



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

*Тал*

**Таловская Анна Валерьевна**

**ЭКОГЕОХИМИЯ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ  
НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ЮГА СИБИРИ  
(ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА НЕРАСТВОРИМОГО  
ОСАДКА СНЕГОВОГО ПОКРОВА)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

1.6.21. – Геоэкология

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный консультант:** **Язык Егор Григорьевич,**  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Бортникова Светлана Борисовна,**  
доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэлектрохимии, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

**Кошелева Наталья Евгеньевна,**  
доктор географических наук, профессор кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

**Удачин Валерий Николаевич,**  
доктор геолого-минералогических наук, директор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук, г. Миасс

Защита состоится «7» июня 2022 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.б.н.

Барановская Наталья Владимировна

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследований.** Одной из важнейших геоэкологических проблем урбанизированных территорий является влияние атмосферных аэрозолей на качество атмосферного воздуха (Ивлев, 1982; Seinfeld et al., 1998; 2006; Аэрозоли..., 2006; Juethi, 2016). Основным фактором в загрязнении считаются аэрозоли твердых частиц (Янин, 2003; Касимов и др., 2014; Обзор..., 2019). В разных странах, по современным оценкам, поступление твердых частиц за счет сжигания топлива расценивается на уровне 5–45%, а от промышленных источников – 10–35% (Янин, 2003; Karagulian et al., 2015; Hopke et al., 2020). Твердые частицы при этом оказывают негативное воздействие на здоровье населения (Величковский, 2002; Pope et al., 2006; WHO, 2015; Jaafari et al., 2021).

На урбанизированных территориях юга Сибири, крупного промышленно-сырьевого региона страны, техногенными источниками воздействия на среду обитания являются предприятия различных отраслей промышленности (топливная, металлургическая, машиностроительная, химическая, нефтеперерабатывающая, атомная, горнопромышленная, теплоэнергетика и др.) (Адам, 2003; Касимов и др., 2014; Госдоклад..., 2018). Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, в т.ч. и твердых частиц, формируют повышенный и высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха (Госдоклад..., 2018), а также определяют потенциальный экологический риск для населения (Битюкова и др., 2011; Касимов и др., 2014). Для юга Сибири актуальны фундаментальные исследования влияния техногенных факторов на пространственно-временные закономерности образования, трансформации, переноса аэрозолей для выявления их основных источников и стоков (Аэрозоли..., 2006).

Существенный вклад в развитие научных знаний о микрофизических, химических и биологических характеристиках атмосферных аэрозолей Сибири внесли ученые институтов РАН и других научно-исследовательских организаций, что отражено в коллективной монографии (Аэрозоли Сибири, 2006 г., под ред. К.П. Куценого) и в многочисленных публикациях авторских коллективов (Б.Д. Белан, М.В. Панченко, Д.В. Симоненков, В.С. Козлов, Е.П. Яушева, С.А. Терпугова, М.Ю. Аршинов, В.Ф. Рапута, В.В. Пененко, А.А. Виноградова, В.П. Шевченко, Т.В. Ходжер, Л.П. Голобокова, Г.С. Жамсуева, А.С. Сафатов и др.).

Использование снегового покрова как планшета-накопителя аэрозольных выпадений из атмосферы является весьма актуальным для определения их состава, источников и дальности переноса на региональном и локальном уровнях, а также для оценки эколого-геохимического состояния промышленно-урбанизированных территорий (Методические рекомендации ИМГРЭ, 1982; Глазовский и др., 1983; Василенко и др., 1985; Линник, 1985; Геохимия..., 1990; Касимов и др., 1990; 1995; 2014; 2016; Бояркина и др., 1993; Davidson и др., 1996; Ажаев, 2007; Белан, 2007; Шевченко и др., 2006; 2015; 2020; Кошелева и др., 2012; Котова, 2013; Сорокина, 2013; Воронцова, 2013; Голохваст, 2014; Baltrėnaitė et al., 2014; Siudek et al., 2014; Удачин, 2014; Власов и др., 2015; 2020; Тентюков, 2016; Taras'kevičius et al., 2017; Кудерина и др., 2018; Gustaytis et al., 2018; Gabersek и Gosar, 2020).

Территория Сибири, расположенная в зоне с резко-континентальным климатом и с продолжительным периодом снежостава (5–6 месяцев), представляет собой крайне удобный регион для использования снежостава в качестве депонирующей среды с целью изучения механизмов формирования состава аэрозолей под влиянием техногенных факторов в урбанизированных районах.

В Сибири исследования аэрозолей с помощью снежостава в разные периоды проводились научными группами, например, из Новосибирска (В.Ф. Рапута, В.В. Коковкин, С.Б. Бортникова, А.Ю. Девятова, С.Ю. Артамонова, Ю.В. Ермолов), Тюмени (Д.В. Московченко, Р.Ю. Пожитников, В.А. Боев, Н.С. Ларина), Горно-Алтайска (Ю.В. Робертус, В.А. Ситникова), Барнаула (А.В. Пузанов, И.В. Хвостов, И.П. Чефранов, Т.С. Папина, Т.В. Носкова), Кемерово (Н.В. Журавлева, В.А. Некипелый, С.А. Некипелова), Москвы (В.П. Шевченко), Томска (А.П. Бояркина, Н.В. Ильченко, А.Ю. Иванов, А.И. Летувнинкас, Л.П. Рихванов, А.Ю. Шатилов, Е.Г. Язиков), Иркутска (Н.И. Янченко, А.Н. Баранов, В.И. Гребенщикова, Б.А. Бычинский, М.С. Холодова, Л.М. Филимонова, Н.А. Онищук, Н.Д. Давыдова, Т.И. Знаменская, Г.П. Королева, В.А. Скворцов, В.П. Рогова, И.А. Белозерцева, Н.В. Федорова), Кызыла (И.Д. Кара-Сал, Л.Х. Тас-Оол) и Улан-Удэ (А.В. Украинцев, Д.И. Жамбалова).

Несмотря на повышенный интерес к исследованию аэрозолей Сибири с использованием снежостава, существует недостаток знаний о экогеохимии широкого спектра химических элементов, включая слабоизученные в геохимическом плане редкоземельные элементы, мало сведений о техногенных образованиях в составе аэрозолей, осевших в снежоставе на урбанизированных территориях.

В последние два десятилетия (2001–2019 гг.) проведены систематические эколого-геохимические исследования аэрозолей с использованием снежостава на многих промышленно-урбанизированных территориях юга Сибири при личном участии автора. За многолетний период исследований накоплен обширный фактический материал, позволяющий на современной лабораторно-аналитической базе выполнить комплексное изучение минералого-геохимических характеристик состава атмосферных аэрозолей, формирующихся под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности в регионе.

**Объектом исследований** является нерастворимый осадок снежостава, который формируется аэрозольными частицами, осевшими в снежоставе в результате процессов сухого и влажного осаждения на урбанизированных территориях юга Сибири.

**Предметом исследований** выступает пылевая нагрузка, химический и минерально-вещественный состав нерастворимого осадка снежостава.

**Цель исследований** – выявить закономерности формирования химического и минерально-вещественного состава атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири с разными условиями техногенеза по данным изучения нерастворимого осадка снежостава; разработать подходы к типизации территорий в регионе по амотехногенному воздействию на среду обитания для оценки экологического состояния.

### **Задачи исследований:**

1. Определить уровни пылевой нагрузки, концентрации широкого спектра химических элементов, формы их нахождения, соотношение видов техногенных и природных образований в составе нерастворимого осадка снегового покрова на урбанизированных территориях юга Сибири, подвергаемых воздействию разнопрофильных промышленных предприятий (теплоэнергетические, нефтеперерабатывающие, металлургические, машиностроительные и металлообрабатывающие, нефтегазовые, горнопромышленные, стройиндустрии).

2. Изучить закономерности распределения пылевой нагрузки и минералогическо-геохимические особенности состава нерастворимого осадка снегового покрова в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики юга Западной Сибири для определения специфики их влияния на урбанизированных территориях в зимний период.

3. Изучить пространственно-временную динамику пылевой нагрузки и химического состава нерастворимого осадка снегового покрова на промышленно-урбанизированной территории юга Западной Сибири по данным многолетнего мониторинга (2007–2018 гг.).

4. Оценить пространственную изменчивость уровней накопления макро- и микроэлементов в нерастворимом осадке снегового покрова на территории Томской области на основе эколого-геохимического районирования.

5. Обосновать комплекс критериев и признаков атмотехногенного воздействия, отражающие промышленное освоение городов, особенности формирования уровня пылевой нагрузки, геохимических и минерально-вещественных характеристик нерастворимого осадка снегового покрова в различных условиях техногенеза, в качестве основы проведения типизации урбанизированных территорий юга Сибири.

**Фактический материал и методы исследования.** В основу диссертационной работы положены материалы, полученные при личном участии автора в процессе проведения научно-исследовательских работ на территории юга Сибири в период 2001–2019 годы. Исследования выполнялись автором во время обучения и работы на кафедре геоэкологии и геохимии (в н.в. отделение геологии) Томского политехнического университета.

Исследования осуществлялись при поддержке *12 грантов*, включая шесть грантов под руководством автора – гранты Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК 951.2013.5, 2013–2014 гг.), компании British Petroleum (2013, 2016 гг.), ТПУ на проведение молодыми учеными научных исследований (2008 г.), программы У.М.Н.И.К. (2007–2008 гг.) и Германской службы академической мобильности (DAAD, 2007 г.), а также шесть грантов, одним из исполнителей которых являлся автор, – гранты компании British Petroleum (2014, 2015, 2017 гг.), РГО (2015 г.), РФФИ (16-45-700184ра, 2016–2018 гг.; 20-05-00675А, 2020–2022 гг.). Работы также проводились с участием автора в рамках *хоздоговоров* с ОАО «Томскгеомониторинг» по «Программе ведения государственного мониторинга состояния недр на территории Томской области» (2005–2008 гг.), ООО «Хакасразрезуголь» (2008 г.) и ООО «Сорский ГОК» (2015–2017 гг.).

В основу работы положены результаты исследований *2056 проб снегового покрова (с суммарным весом ~ 35 тыс. кг снега)*. Пробы отобраны, подготовлены и изучены во время выполнения полевых, камеральных и лабораторно-аналитических работ с участием автора.

При личном участии автора сбор основного фактического материала выполнялся на территории юга Сибири – в Томской области (Томск, Северск, Асино, Стрежевой, Колпашево, 113 сельских населенных пункта), Кемеровской (Кемерово, Юрга, Междуреченск, Новокузнецк, Киселевск, Топки, Мыски), Омской (г. Омск) и Новосибирской (г. Искитим) областях, в Красноярском крае (Красноярск, Ачинск) и Республике Хакасии (Сорск, Черногорск), а также в Павлодарской (г. Павлодар) и Восточно-Казахстанской (г. Усть-Каменогорск) областях Республики Казахстан. Исследования также осуществлялись в Центральном Казахстане (г. Караганда, Республика Казахстан) (рисунок 1).

С разной степенью детализации изучена *21 урбанизированная территория* с различной спецификой техногенеза и природно-ландшафтными условиями.

Площадная снегогеохимическая съемка (масштаб 1:50000 и 1:100000) выполнена на территории *10 городов* – Омск, Томск, Юрга, Междуреченск, Топки, Асино, Колпашево, Стрежевой, Сорск и Караганда. Векторная сеть наблюдений (от 0,5 до 5,5 км от источника) с учетом главенствующего направления ветра использовалась в зоне воздействия *27 предприятий* различных отраслей производства (теплоэнергетическая, нефтехимическая, нефтеперерабатывающая, металлургическая, машиностроительная, угле-, нефте- и горнодобывающая, стройиндустрия), расположенных в *18 изучаемых городах*. Для изучения многолетней динамики аэрозольного загрязнения с учетом преобразований в структуре промышленного сектора в качестве модельного объекта выбран г. Томск.

Отбор и подготовка проб снегового покрова осуществлялись по единообразной методике в соответствии с нормативно-методическими документами (РД 52.04.186-89; Методические рекомендации ИМГРЭ..., 1982; Методические рекомендации №5174-90, утвержденные главным государственным санитарным врачом СССР от 15.05.1990 г.). Вес каждой пробы снегового покрова для получения массы нерастворимого осадка, необходимой для выполнения аналитических исследований, составлял *не менее 17 кг*, а в отдельных случаях и *150 кг*.

Аналитические исследования состава проб нерастворимого осадка снегового покрова выполнены высокочувствительными современными методами в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов. Достоверность аналитических результатов определялась внутренним и внешним контролем, параллельным анализом разными методами.

Значительная часть определений количественного содержания 27 химических элементов в пробах нерастворимого осадка снегового покрова выполнена инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА, *1831 проба*) в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии (в н.в. отделение геологии) на базе учебно-научного центра «Исследовательский ядерный реактор» ТПУ (аналитики: А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). На базе этого реактора также осуществлялся метод f-радиографии для анализа делящихся радионуклидов.

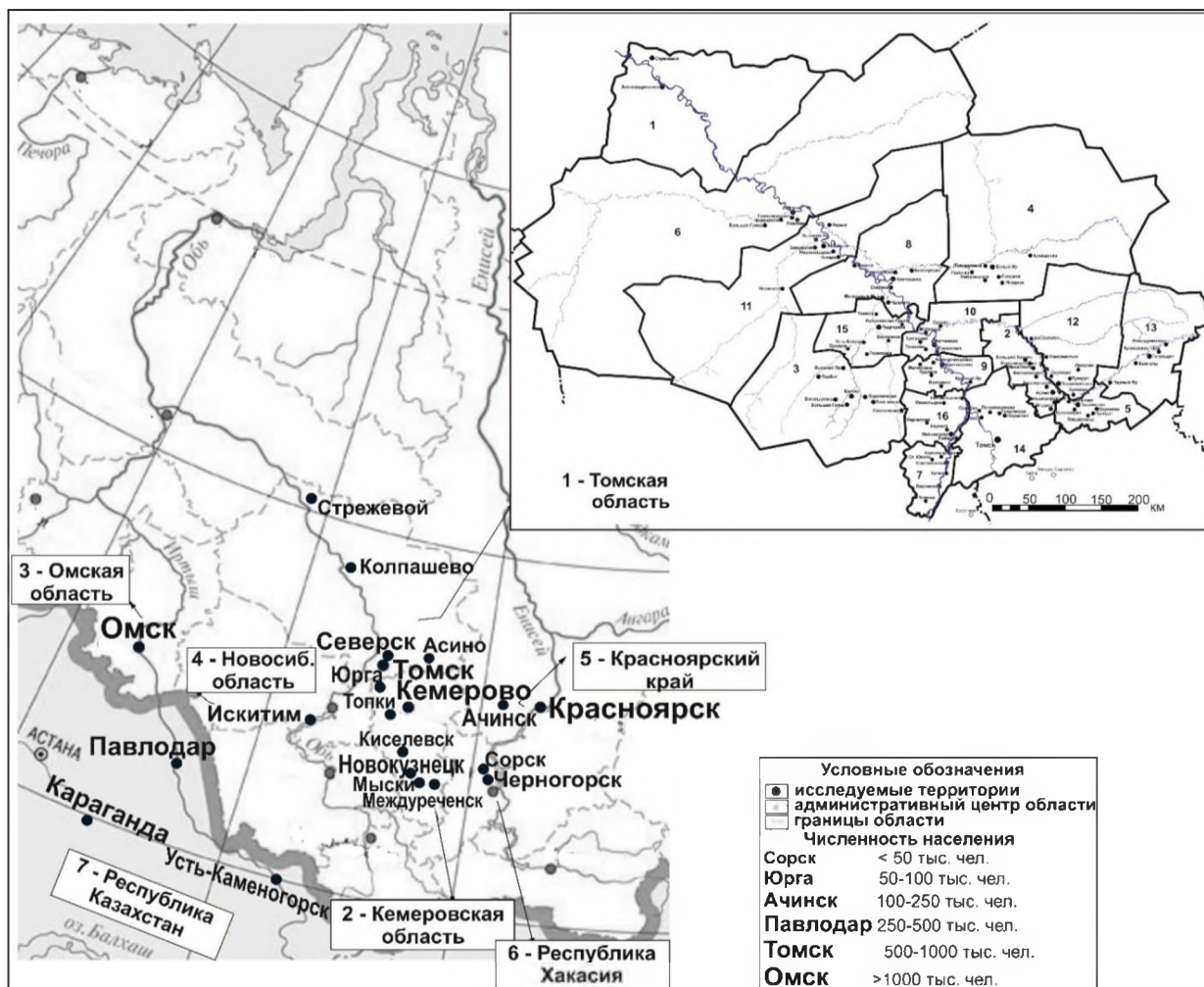


Рисунок 1 – Схема расположения урбанизированных территорий на юге Сибири

Содержание 60 химических элементов в пробах определялось масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, 300 проб) в ХАЦ «Плазма» (г. Томск, директор: Н.В. Федюнина).

В лабораториях МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ в пробах проводилось измерение содержания ртути методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААСМ, 1343 пробы; РА-915+ с приставкой ПИРО-915), определение минерально-фазового состава с помощью порошковой рентгеновской дифрактометрии (87 проб; дифрактометр Bruker D2 PHASER; ДРОН 3М), исследование микрочастиц методом электронной сканирующей микроскопии (74 пробы, 1580 частиц; сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с ЭДС приставкой Bruker XFlash 4010) и микроскопическим методом (987 проб; бинокулярный стереоскопический микроскоп Leica ZN 4D с видео приставкой). Данными методами также выполняли анализ состава образцов промышленной пыли и сырья с некоторых предприятий. В НОЦ «Наноцентр» ТПУ осуществляли изучение гранулометрического состава отдельных проб методом лазерной дифракции (анализатор SALD-7101 фирмы Shimadzu; аналитик: А.А. Леонов).

В рамках научных стажировок анализ отдельных проб проводился методами сканирующей электронной микроскопии, ИСП-МС и рентгеновской дифрактометрии в Университете Карлсруэ (г. Карлсруэ, Германия); ИСП-МС (определение  $U^{235}$  и  $U^{238}$ ) в Центре радиозологии окружающей среды



Норвежского университета наук о жизни (г. Ос, Норвегия); лазерной дифракции в НОЦ «Нанотехнологии» Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток); сканирующей электронной микроскопии в Карагандинском государственном техническом университете (г. Караганда, Республика Казахстан).

При личном участии автора осуществлялось определение биологического влияния нерастворимого осадка снегового покрова методом биотестирования на *Drosophila melanogaster* (67235 дрозophilы, 30 проб) в лабораториях Сибирского государственного медицинского университета (г. Томск, консультанты: профессор Н.Н. Ильинских, ассистент Н.А. Новикова), на *Paramecium caudatum* (20 проб) в ОАО «Томскгеомониторинг» (г. Томск, зав. лабораторией: Т.Д. Кириленко, консультант: аналитик Н.И. Мазурина).

В работу включены результаты изучения химического состава отдельных проб снеговой воды, проанализированные методами ИСП-МС (ХАЦ «Плазма»), атомно-абсорбционной спектрометрии «холодного пара» (МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ), ионной хроматографии, потенциометрии, титриметрии, кондуктометрии и фотоколориметрии (НОЦ «Вода» ТПУ, руководители: к.г.-м.н. Ю.Г. Копылова, к.г.-м.н. А.А. Хвощевская).

Обработка полученных данных включала определение эколого-геохимических показателей в соответствии с методическими рекомендациями ИМГРЭ (1982; 1990) – пылевая нагрузка ( $P_{п}$ ); коэффициент концентрации ( $K_c$ ); выпадение химических элементов на снеговой покров ( $P_{общ}$ ); коэффициент превышения выпадений над фоном ( $K_p$ ); суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) и нагрузки ( $Z_p$ ); статистический анализ в ПО «Statistica» по учебному пособию (Михальчук и Языков, 2015); картографическое представление данных в ПО «Surfer» (метод Kriging) и ПО «Corel Draw». Проводился расчет  $Z_c$  и  $Z_p$  как для 28 элементов, так и для 60 элементов, содержания которых измерены различными методами анализа. По величинам  $P_{п}$ ,  $Z_c$  и  $Z_p$  определялся уровень загрязнения и экологической опасности по общепринятым градациям (Геохимия..., 1990; Касимов и др., 2012). По величинам  $P_{п}$  предложена и использована градация уровня загрязнения относительно фона. Приняты оценки фона для пылевой нагрузки ( $<20$  мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) и содержания 27 химических элементов в пробах по литературным данным (Шатилов, 2001; Языков, 2006). Также в качестве фоновых уровней использованы результаты автора по измерению химического состава проб (до 60 элементов), по изучению соотношения природных и техногенных образований в пробах из района Обсерватории «Фоновая» Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН.

### **Научная новизна работы.**

1. Впервые изучены закономерности распределения уровня пылевой нагрузки, широкого спектра химических элементов и техногенных образований в атмосферных аэрозолях по результатам комплексного исследования состава нерастворимого осадка снегового покрова на урбанизированных территориях юга Сибири с разными условиями техногенеза в современный период (2007–2019 гг.) развития промышленных предприятий (теплоэнергетические, нефтеперерабатывающие, металлургические, машиностроительные, металлообрабатывающие, нефтегазовые, горнопромышленные, стройиндустрии).



2. В зонах воздействия предприятий теплоэнергетики юга Западной Сибири установлены уровни пылевой нагрузки и выявлены закономерности их изменений в зависимости от расстояния до источника выбросов. Выполнена оценка редкометалльной (лантаноиды, Y, Sc, U, Th, Nb, Hf, Ta, Ge, Ga, Zr) и ртутной техногенной геохимической специализации нерастворимого осадка снегового покрова. Определены индикаторные показатели отношения микроминеральных фаз (муллит/кварц), техногенные микросферулы, микрочастицы редкоземельного и уранового состава.

3. На основе данных многолетнего (2007–2018 гг.) мониторинга изучена пространственно-временная динамика формирования пылевой нагрузки и геохимических ореолов в снеговом покрове на территории города юга Западной Сибири с учетом преобразований в структуре промышленного сектора и изменений топливного баланса на объекте теплоэнергетики.

4. Впервые проведено эколого-геохимическое районирование территории Томской области по геохимическим особенностям состава нерастворимого осадка снегового покрова, определена региональная геохимическая специализация нерастворимого осадка снегового покрова, установлена пространственная локализация техногенных геохимических зон, сформированных выбросами промышленности и объектов теплоэнергетики.

5. Научно обоснованы подходы к типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания на основе систематизации результатов изучения уровня пылевой нагрузки, геохимических и минерально-вещественных особенностей состава нерастворимого осадка снегового покрова в современный период (2007–2019 гг.) на территории 21 города в регионе. Используя авторский фактический материал и литературные данные, проведена типизация 34 промышленно-урбанизированных территорий региона на основе разработанных подходов, в результате которой выявлены и охарактеризованы районы с различным экологическим состоянием.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Диссертационная работа вносит значимый вклад в развитие современных научных направлений, связанных с изучением геохимии окружающей среды, экологической минералогии и геоэкологии. Результаты работы расширяют научные знания о минералого-геохимических характеристиках атмосферных аэрозолей в разных условиях техногенеза на юге Сибири по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова.

Выполненные исследования геохимической и минерально-вещественной специализации состава нерастворимого осадка снегового покрова на урбанизированных территориях юга Сибири позволяют идентифицировать источники аэрозолей и выделять геоиндикаторы изменения атмосферы под влиянием техногенеза. Это дает возможность на качественно новом уровне проводить изучение региональных изменений в составе атмосферного воздуха и трансграничного переноса аэрозолей.

Разработанные подходы к типизации урбанизированных территорий юга Сибири с разными условиями техногенеза по атмотехногенному воздействию на

среду обитания для оценки экологического состояния представляют собой самостоятельное научное достижение.

Практическая значимость работы заключается в определении уровня аэрозольного загрязнения на урбанизированных территориях юга Сибири в зависимости от промышленной специфики функционирующих производств на основе исследования пылевой нагрузки, химического и минерально-вещественного состава нерастворимого осадка снегового покрова.

Полученные результаты исследований позволяют совершенствовать методы мониторинга окружающей среды, составлять прогнозы изменения экологического состояния в регионе, выполнять оценку риска здоровью людей, разрабатывать природоохранные рекомендации и стратегии экологической безопасности городов для минимизации техногенного воздействия на атмосферный воздух и здоровье населения.

Впервые предложены и запатентованы способы определения участков загрязнения снегового покрова техногенными образованиями (патент № 2229737, 2004 г.) и радиоактивными компонентами (патент № 2453869, 2012 г.). Создана база данных (свид. гос. регистр. № 2016620754, 2016 г.) для определения уровней пылевой нагрузки и накопления химических элементов в нерастворимом осадке снегового покрова, а также проведено эколого-геохимическое районирование на территории Томской области и г. Томска.

Материалы исследований использованы в экологической деятельности ОГБУ «Облкомприрода» Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОАО «Томскгеомониторинг», ООО «Хакасразрезуголь», ООО «Сорский ГОК» и АО «Ачинский НПЗ ВНК», а также в отчетах по грантам Президента РФ для молодых ученых, РФФИ, РГО и компании British Petroleum.

Материалы работы внедрены в образовательный процесс для подготовки бакалавров и магистров, иностранных студентов, обучающихся по направлению «Экология и природопользование» в Томском политехническом университете.

**Достоверность защищаемых положений** обеспечена использованием современных концептуальных, теоретических, методических подходов и принципов геохимии окружающей среды, экологической минералогии и геоэкологии; большим массивом фактического материала, включающего статистически значимое количество проб, отобранных и подготовленных по единой методике в соответствии с нормативно-методическими документами; анализом состава проб с помощью современных высокочувствительных аналитических методов в аккредитованных лабораториях ведущих центров страны и зарубежья; статистической обработкой лабораторно-аналитических данных и глубиной проработки материала.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и представлялись на 67 Международных, 35 Всероссийских и 5-ти Региональных научных конференциях, симпозиумах, форумах и совещаниях, в том числе Международный научный симпозиум студентов, аспирантов и молодых ученых им. акад. М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск,

2001–2008, 2014, 2016–2017 гг.); Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (г. Томск, 2004, 2009, 2013, 2016, 2021 гг.); Международная научно-практическая конференция «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде», (г. Семипалатинск, 2006, 2008, 2012 гг.); 11th Urban Environment Symposium (г. Карлсруэ, Германия, 2012 г.); «Всемирный Форум Снега – 2013» (г. Новосибирск, 2013 г.); The First Russian-Nordic Symposium on Radiochemistry (г. Москва, 2013 г.); Международная конференция «Аэрозоль и оптика атмосферы» (г. Москва, 2014 г.); Международная научно-практическая конференция «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли» (г. Иркутск, 2017, 2018, 2020 гг.); Международная конференция «Медицинская геология: MedGeo'17» (г. Москва, 2017 г.); Всероссийская конференция «Современные проблемы геохимии» (г. Иркутск, 2013, 2018 гг.); Всероссийская научная конференция «Геохимия ландшафтов» (г. Москва, 2016 г.); Сергеевские чтения: задачи геоэкологии (г. Москва, 2013 г.); Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (г. Томск, 2005, 2011, 2013, 2017, 2019 гг.); конференция «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2006–2021 гг.) и многие другие.

**Публикации.** Основные научные результаты и положения диссертации опубликованы в 255 работах, в т.ч. 59 публикаций в российских и зарубежных рецензируемых изданиях, включая 15 публикаций в журналах, индексируемых в базах Scopus и (или) WoS; два патента РФ на изобретение и патент на полезную модель; 36 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России. Изданы в соавторстве монография, 4-е учебных пособия, включая с грифом СибРМУЦ (2011 г., переиздано в 2016–2020 гг.) и два на английском языке, получено свидетельство на базу данных.

**Личный вклад автора.** В период с 2001 г. по 2019 г. автор лично принимала участие в планировании, организации и выполнении всех полевых, камеральных и лабораторно-аналитических работ для исследования состава атмосферных аэрозолей с использованием снегового покрова на урбанизированных территориях юга Сибири, а также в подготовке всех научных публикаций. Отбор, подготовка и изучение проб снегового покрова осуществлялись лично автором или под руководством автора. Автором лично выполнено обобщение и систематизация массива полученных данных, сформулированы цель, задачи, выводы и защищаемые положения. В соавторстве запатентованы способы определения участков загрязнения снегового покрова, создана база эколого-геохимических данных. Автором лично получены новые научные результаты по экогеохимии атмосферных аэрозолей по данным изучения нерастворимого осадка снегового покрова, разработана и выполнена типизация урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 7-ми глав, заключения и списка литературы. Рукопись изложена на 373 страницах машинописного текста, включающего 113 рисунков и 109 таблиц. Список литературы состоит из 643 источников, в т.ч. 136 на иностранном языке.

**В главе 1** рассматриваются современные представления об аэрозолях и снеговом покрове как депонирующей среды на основе литературного обзора.

**Глава 2** характеризует природно-климатические и геоэкологические условия на изучаемых урбанизированных территориях юга Сибири.

**Глава 3** содержит информацию о методике отбора и подготовке проб снегового покрова, аналитических методах исследования состава нерастворимого осадка снегового покрова и снеговой воды, а также о методике обработки полученных данных (эколого-геохимический, статистический, картографический анализ).

**Глава 4** посвящена результатам изучения уровней пылевой нагрузки, широкого геохимического спектра элементов (от Li до U), природных и техногенных образований в нерастворимом осадке снегового покрова на 21 урбанизированной территории с разнопрофильными промышленными предприятиями. Приводятся также результаты изучения многолетней динамики (2007–2015 гг.) аэрозольного загрязнения на территории многопрофильного промышленного города (Томск) по данным изучения нерастворимого осадка снегового покрова.

**В главе 5** представлены результаты исследований пылевой нагрузки, уровней накопления химических элементов (ртуть, уран, торий, редкоземельные и др.), минерально-вещественного состава нерастворимого осадка снегового покрова в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики (ТЭС). Показаны также результаты многолетнего эколого-геохимического мониторинга (2009–2018 гг.) загрязнения снегового покрова в зоне переноса выбросов ТЭС (ГРЭС-2 г. Томска).

**В главе 6** приведен анализ пространственного распределения уровней накопления макро-и микроэлементов в нерастворимом осадке снегового покрова по результатам эколого-геохимического районирования на территории Томской области с учетом расположения промышленных предприятий и объектов теплоэнергетики.

**Глава 7** посвящена обоснованию подходов к типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания на основе анализа промышленного освоения городов с применением методов геоурбанистики, а также результатов исследования состава нерастворимого осадка снегового покрова с использованием методов геохимии окружающей среды и экологической минералогии. Представлены результаты выполненной типизации 34 промышленно-урбанизированных территорий в регионе.

**В заключении** изложены основные выводы и рекомендации по диссертационной работе.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность учителю и научному консультанту д.г.-м.н., профессору Язикову Егору Григорьевичу за многолетнее научное руководство и формирование научного мировоззрения, а также за ценные советы при выполнении диссертационной работы. Автор приносит сердечную благодарность своей семье за постоянную поддержку.

За проведение совместных полевых, камеральных и лабораторно-аналитических работ, а также за разностороннее обсуждение результатов автор выражает большую благодарность всем студентам, бакалаврам и магистрантам, аспирантам и соискателям, которые занимались в разные годы научно-исследовательской деятельностью под руководством автора.

Автор искренне благодарит за участие в совместных исследованиях Е.Е. Ляпину, к.г.-м.н., с.н.с. Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; В.Ф. Рапугу, д.ф.-м.н., в.н.с. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; сотрудников Института оптики атмосферы СО РАН – к.ф.-м.н., с.н.с. Д.В. Симоненкова, к.ф.-м.н. В.С. Козлова, д.ф.-м.н. М.В. Панченко, д.ф.-м.н. Б.Д. Белана; Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН – к.г.-м.н., с.н.с. А.Ю. Девятову, к.г.-м.н., с.н.с. А.В. Еделева; Сыктывкарского государственного университета – д.г.-м.н. М.П. Тентюкова; Сибирского государственного медицинского университета – д.б.н. Н.Н. Ильинских, ассистента Н.А. Новикову; начальника отдела охраны окружающей среды ООО «Сорский ГОК» А.В. Бутенко.

Автор выражает признательность коллегам отделения геологии ТПУ за ценные советы во время проведения исследований и обсуждения работы, а также за помощь в изучении состава проб на сканирующем электронном микроскопе, рентгеновском дифрактометре и ртутном анализаторе. Автор благодарит руководителей и сотрудников аналитических лабораторий.

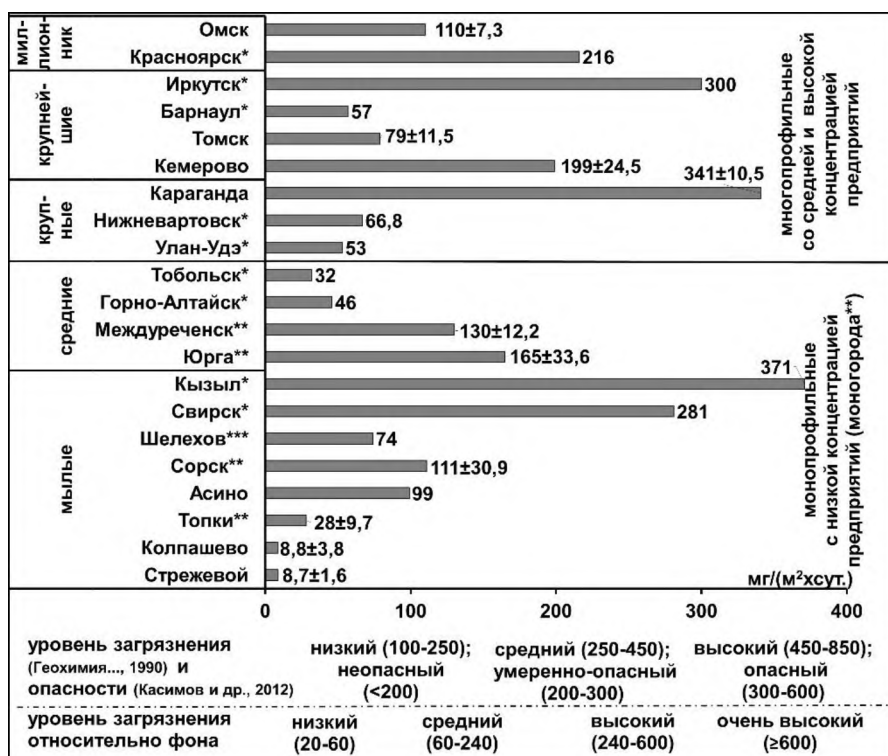
## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**ПОЛОЖЕНИЕ 1.** *Промышленный техногенез на урбанизированных территориях юга Сибири формирует средний (60–240 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) и высокий (240–600 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) уровни пылевой нагрузки относительно фона (<20 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)). Техногенная геохимическая специализация нерастворимого осадка снегового покрова контрастно проявляется в спектре макро- и микроэлементов, уровни концентрации которых в 2–140 раз выше фоновых значений, что определяется видами функционирующих промышленных предприятий и пространственно-временной динамикой формирования геохимических ореолов. В зонах техногенеза в минерально-вещественном составе нерастворимого осадка снегового покрова комплекс техногенных образований включает специфичные виды микрочастиц металлов и металлоидов (в форме сульфидов, сульфатов, оксидов, фосфатов, интерметаллидов, ≤5%), микроминеральных фаз (силикаты, карбонаты, фториды, ферриты, сульфиды, окислы, ≤25%) и прочих компонентов (частицы шлаков, строительных материалов, угля, микросферулы, ≤70%), которые характеризуют воздействие разнопрофильных промышленных предприятий.*

Над городами Сибири формируется «аэрозольная шапка» с размерами в несколько сотен метров по вертикали и несколько десятков километров по горизонтали за счет комплексного воздействия техногенных и природных факторов (Белан и др., 1994; 1996; Симоненков, 2015). Следовательно, необходимо получение знаний о составе аэрозолей и их влиянии на качество городской среды, что возможно при минералого-геохимическом изучении нерастворимого осадка снегового покрова (Шатилов, 2001; Язиков, 2006).

Установлено, что *пылевая нагрузка* на территории городов юга Сибири изменяется от 8,7 до 199 мг/(м<sup>2</sup>·сут.), а в зонах воздействия предприятий – от 38 до 1054 мг/(м<sup>2</sup>·сут.). В целом, на урбанизированных территориях преимущественно формируются средний (60–240 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) и высокий (240–600) уровни пылевой

нагрузки относительно фона (<20) (рисунок 2–3), которые обусловлены воздействием различных по промышленной специфике функционирующих производств.



Примечание: слева по оси – города по численности населения;

\* – литературные данные: г.Красноярск: Стримжа и др., 2012; г.Иркутск: Рогова и др., 2002; г.Кызыл: Кара-Сал, 2012; Мананков, Кара-Сал, 2013; г.Шелехов, г.Свирск: Холодова и др., 2016; Grebenshchikova et al., 2017, г.Барнаул: Хвостов, 2007; г.Горно-Алтайск: Ситникова, 2018; г.Улан-Удэ: Жамбалова, 2018; г.Нижневартовск: Пожитков и др., 2020; г.Тобольск: Тигеев, Московченко, 2021

Рисунок 2 – Уровень пылевой нагрузки на территории городов юга Сибири по результатам площадной снегогеохимической съемки

Средний уровень загрязнения характерен для многопрофильных промышленных городов с высокой концентрацией предприятий, относящихся к городам-миллионникам и крупнейшим по численности населения, и расположенных в различных ландшафтных зонах. К примеру, Красноярск (Стримжа и др., 2012), Омск, Кемерово и Томск. Средний уровень пылевой нагрузки также формируется в монопрофильных промышленных городах средней и малой величины по численности населения. Например, моногорода с угледобывающей (г. Междуреченск) и горнодобывающей промышленностью (г. Сорск), расположенные в предгорной зоне.

Высоким уровнем загрязнения относительно фона отличаются монопрофильные промышленные города – Свирск (Холодова, 2016), Иркутск (Рогова и др., 2002) и Кызыл (Кара-Сал, 2012), находящиеся в предгорной и горной зонах, а также многопрофильный город Караганда, с местонахождением в степной зоне Центрального Казахстана.

По результатам многолетних наблюдений (2007–2015 гг.) на территории многопрофильного промышленного города Томска установлено сохранение пространственно-временной динамики расположения контрастных ореолов пылевой нагрузки со средним и высоким уровнями загрязнения относительно фона в районах размещения ГРЭС-2 и кирпичных заводов, соответственно. В 2015 г. в сравнении с 2007 г., в районах города, где произошла дислокация или закрытие

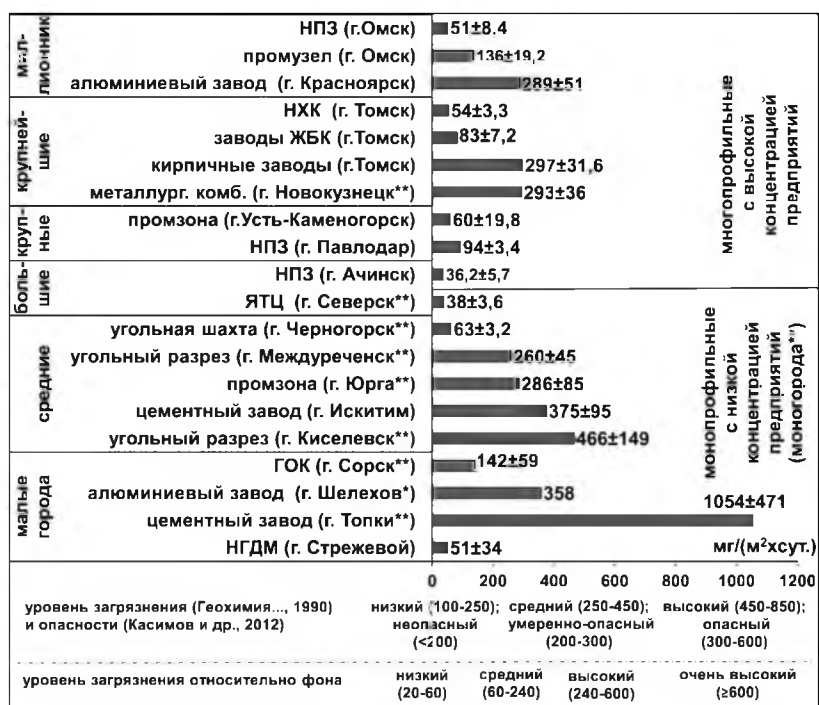


Рисунок 3 – Уровень пылевой нагрузки в зонах воздействия предприятий юга Сибири по результатам снегогеохимической съемки (примечание: см. рис. 2)

В зонах воздействия предприятий юга Сибири определено, что средний уровень загрязнения относительно фона формируется под влиянием угольных предприятий, например, функционирующих вблизи моногородов – Черногорск, Междуреченск (рисунок 3). Высокий уровень загрязнения характерен для района города, где расположены предприятия черной металлургии, например, в крупнейшем моногороде Новокузнецке, алюминиевого производства, в частности, в городе-миллионнике Красноярске, стройиндустрии, к примеру, в Томске и Искитим. По данным многолетнего мониторинга (2009–2015 гг.) в зонах воздействия предприятий на территории Томска (ГРЭС-2, нефтехимический комбинат (НХК), заводы по производству железобетонных конструкций и бетона (ЖБК), кирпичные заводы) установлены периоды снижения пылевой нагрузки, связанные с технологическо-административными мерами по уменьшению выбросов.

Получены оценки средних содержаний широкого спектра химических элементов (редкоземельные, уран и торий, тяжёлые металлы и металлоиды, макроэлементы и др.) в нерастворимом осадке снегового покрова для 21 урбанизированной территории юга Сибири с разными условиями техногенеза.

Установлено, что уровни концентрации химических элементов в нерастворимом осадке снегового покрова превышают фон в 2–140 раз, а величины среднесуточного выпадения элементов на снеговой покров выше фона в 3–900 раз. Выявлена техногенная геохимическая специализация нерастворимого осадка снегового покрова на каждой урбанизированной территории, которая обусловлена промышленной спецификой функционирующих предприятий. Суммарное воздействие химических элементов, определяемое по  $Z_c$  и  $Z_p$ , формирует средний,

предприятий, а также модернизация автодорожной инфраструктуры, наблюдается тренд снижения пылевой нагрузки до низкого уровня. Влияние преобразований в структуре промышленного сектора на уровень запыленности в городе доказывается тенденцией уменьшения в 3–9 раз пылевой нагрузки на территорию Томска в период 2007–2015 гг. (63–79 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) в сравнении с данными для периодов 1979–1989 гг. (254 мг/(м<sup>2</sup>·сут.); Бояркина и др., 1993) и 1993–1996 гг. (610 мг/(м<sup>2</sup>·сут.); Ильченко, 2000; Летувнинкас, 1999; 2002).



высокий и очень высокий уровни загрязнения с опасной и очень опасной экологической ситуацией.

В зонах воздействия предприятий различных отраслей промышленности (нефтеперерабатывающая, металлургическая, машиностроительная и металлообрабатывающая, горнодобывающая, стройиндустрия и др.) выявлены индикаторные химические элементы в нерастворимом осадке снегового покрова, характеризующие специфику воздействия производств. Элементы-индикаторы имеют значения  $K_c > 3$  и  $K_p > 5$ , а в отдельных случаях  $K_c > 25$  и  $K_p > 50$ . Выделены зоны воздействия предприятий с повышенным отношением лёгких к тяжёлым лантаноидам ( $(La+Ce)/(Yb+Lu) \geq 32$  ед.) и пониженным отношением радиоактивных элементов ( $Th/U \leq 1,5$  ед.) в нерастворимом осадке снегового покрова.

Геохимические особенности нерастворимого осадка снегового покрова, установленные в зонах воздействия предприятий, отчетливо отражаются в техногенной атмогеохимической специализации города. На рисунках 4–5 в качестве примера представлены коэффициенты концентрации элементов ( $K_c$ ) в нерастворимом осадке снегового покрова для некоторых изучаемых урбанизированных территорий с разными условиями техногенеза.

Например, для моногорода Юрга с наличием машиностроительного и ферросплавного производства индикаторами являются Fe, Cr и Co, уровни накопления которых в нерастворимом осадке снегового покрова превышают фон в 2–3 раза. Зона угледобывающего техногенеза, например, в г. Киселевске, отличается средним уровнем загрязнения с опасной ситуацией за счет высоких концентраций в нерастворимом осадке снегового покрова ассоциации лантаноидов ( $K_c$  от 5 до 11,  $K_p$  от 60 до 560), U ( $K_c=17$ ) и Hg ( $K_c=6$ ,  $K_p=350$ ), которые являются элементами-примесями в углях по данным С.И. Арбузова с коллегами (2000; 2007; 2012; 2011; 2015; 2020). Моногород, подвергаемый воздействию горнорудного техногенеза, например, г. Сорск, характеризуется высокими уровнями накопления в нерастворимом осадке снегового покрова элементов рудных пород, в частности Mo ( $K_c=6$ ,  $K_p=294$ ) и Cu ( $K_c=6$ ,  $K_p=327$ ), а также макроэлементов, отражающих состав вмещающих пород.

В многопрофильном промышленном городе-миллионнике, например, в Омске, средний уровень загрязнения и опасная ситуация обусловлены геохимической специализацией нерастворимого осадка снегового покрова на La ( $K_c=50$ ,  $K_p=524$ ), Ce ( $K_c=10$ ,  $K_p=135$ ), Cr ( $K_c=4$ ,  $K_p=48$ ) и полиметаллическую ассоциацию ( $K_c=2-3$ ,  $K_p=5-70$ ). Геохимическая ассоциация полиметаллов (Mn, Cr, Co, Ni, Fe, Zn, Mo, Cd, W) является индикаторной для нерастворимого осадка снегового покрова в окрестностях промузла с крупными предприятиями машиностроения и металлообработки. Ассоциация La-Ce-Cr ( $r \approx 0,6-0,71$ ) связана с воздействием нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), где производят и используют цеолит-катализаторы. В зоне воздействия НПЗ для нерастворимого осадка снегового покрова характерны высокие уровни накопления ассоциации La-Ce-Cr ( $K_c$  от 4 до 140;  $K_p$  от 45 до 880) и величины отношений легких к тяжёлым лантаноидам ( $(La+Ce)/(Yb+Lu)=106$  ед.), вносящие основной вклад в формирование высокого уровня загрязнения с очень опасной ситуацией. Лантан и церий выявлены как

специфичные элементы в PM10 и PM2.5 в окрестностях нефтеперерабатывающих заводов в Техасе и Испании (Moreno et al., 2008; Bozlaker et al., 2013).

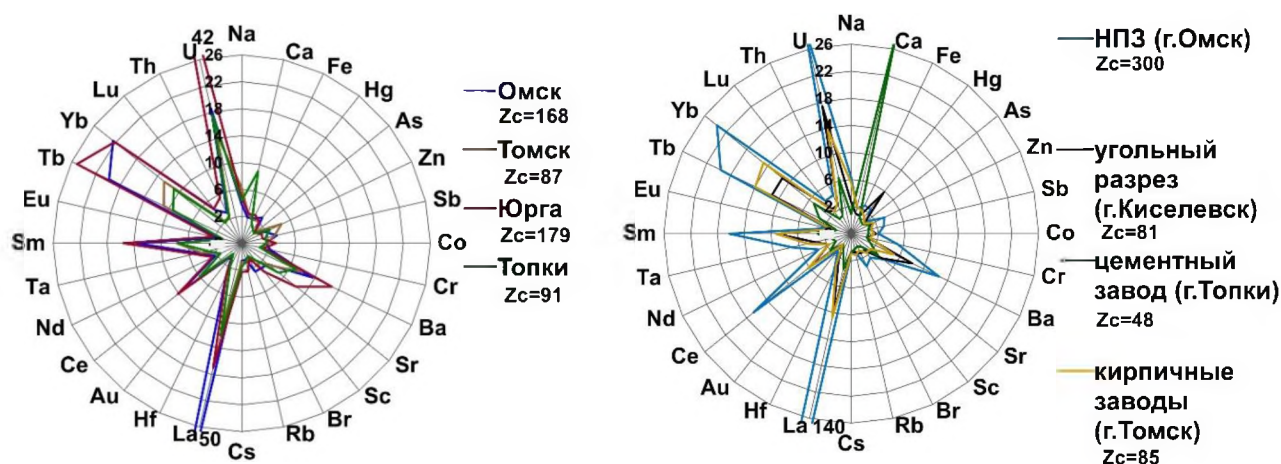


Рисунок 4 – Коэффициенты концентрации 28 химических элементов в нерастворимом осадке снегового покрова на урбанизированных территориях юга Сибири (метод ИНАА, Hg\* – метод ААСМ; по оси X – значения K<sub>c</sub>)

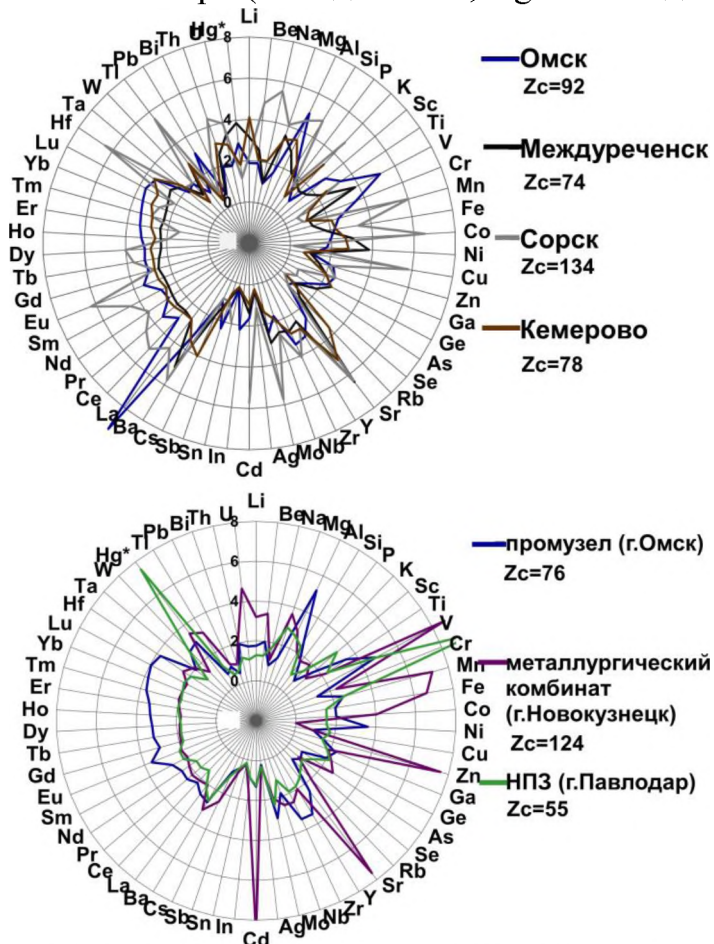


Рисунок 5 – Коэффициенты концентрации 59 химических элементов в нерастворимом осадке снегового покрова на некоторых изученных урбанизированных территориях юга Сибири (ИСП-МС, Hg\* – метод ААСМ)

Формирование геохимических особенностей нерастворимого осадка снегового покрова на урбанизированных территориях обусловлено пространственно-временной динамикой геохимических ореолов, что показано по результатам многолетнего (2007–2015 г.) мониторинга на территории Томска. В период наблюдений в Томске произошли изменения в структуре геохимических ореолов Hg, Br, PЗЭ, U, Th, As и Sr, обусловленные изменениями в промышленном и теплоэнергетическом секторе.

В пробах, отобранных на территории Томска в 2015 г., определена геохимическая ассоциация Hg-Br ( $r \approx 0,64$ ), отражающая тренд статистически достоверного снижения притока Hg в 2 раза, а Br в 4 раза в составе твердых частиц на снеговой покров с 2007 г. по 2015 г. Установлена также динамика уменьшения концентрации Hg в 3 раза с 2006 г.

по 2017 г. в почвогрунтах города (Ляпина, 2020). Тенденция понижения концентрации Hg в компонентах природной среды Томска может быть связана как с глобальным снижением технофильности Hg (Касимов, Власов, 2012), так и с изменениями в промышленном и теплоэнергетическом секторе города. По данным снегогеохимической съемки, в 2007 г. на территории города отмечалось формирование геохимических ореолов Hg в зоне воздействия ГРЭС-2, а в 2015 г. – ореолы не наблюдались. Это может быть обусловлено уменьшением использования доли природного газа в 2015 г. в топливном балансе на ГРЭС-2 в сравнении с 2007 годом. По литературным данным, ртуть содержится в природном газе (Рыжов и др., 1998) и шлейфах газовых факелов (Симоненков, 2015).

В зоне воздействия НХК с 2009 г. по 2016 г. прослежена динамика снижения в 2 раза уровней накопления ассоциации Hg-Vg в нерастворимом осадке снегового покрова. Эта закономерность вероятно тоже обуславливает тренд уменьшения поступления Hg и Vg в снеговой покров на территории города с 2007 г. по 2015 г., учитывая, что Vg это элемент-индикатор воздействия НХК (Язиков, 2006).

В 2015 г. наблюдались наиболее контрастные геохимические ореолы PЗЭ, U, Th, As и Sr в районе размещения Томской ГРЭС-2, чем в 2007 году. Выявленные изменения обусловлены увеличением использования угля (~58%) на ГРЭС-2 в 2015 г. в сравнении с 2007 г. (~27%).

По данным многолетнего мониторинга (2007 г., 2009–2015 гг.) установлено формирование устойчивых техногенных геохимических ореолов Th и лантаноидов в северо-восточном районе города, подвергаемого воздействию кирпичных заводов. В северной части города высокие уровни концентрации PЗЭ определены также в почвогрунтах (Рихванов и др., 1993; Жорняк, 2009), что свидетельствует о постоянных источниках поступления рассматриваемой группы элементов.

Результаты биотестирования на *Drosophila melanogaster* и *Paramecium caudatum* показали негативное влияние на живые организмы нерастворимого осадка снегового покрова из районов Томска, находящихся под воздействием разнопрофильных предприятий (теплоэнергетики, машиностроения и металлообработки, стройиндустрии).

На урбанизированных территориях юга Сибири *минерально-вещественный состав* нерастворимого осадка снегового покрова характеризуется доминированием техногенных образований (39–90%) над природными (10–61%) образованиями, при фоне 76 и 24%, соответственно.

Под «*техногенными образованиями*» в нерастворимом осадке снегового покрова понимаем фазы, генерированные в производственных процессах или оторванные этими процессами от своего природного положения. Техногенные образования разделены на три вида: 1) микроминеральные фазы; 2) микрочастицы металлов и металлоидов; 3) прочие техногенные частицы (отдельные компоненты промышленной пыли), которые являются индикаторами воздействия предприятий. Разновидности индикаторных техногенных образований определяются производственной спецификой предприятий.

В нерастворимом осадке снегового покрова на долю индикаторных *микроминеральных фаз* приходится до 25%, которые представлены силикатами и

алюмосиликатами, карбонатами, фторидами, ферритами, оксидами железа и алюминия, сульфидами (рисунок 6). Важное значение для определения источников загрязнения является предложенное отношение минерал-индикатор/кварц (рисунок 6). Выбор кварца как реперного минерала обусловлен его большой распространенностью в земной коре и терригенным происхождением в снеговом покрове. Например, цеолит и лизардит являются индикаторными микрофазами для нерастворимого осадка снегового покрова в зоне воздействия НПЗ (г. Омск), кальцит, браунмиллерит и хатрурит – цементных заводов (г. Топки, г. Искитим), криолит и корунд – алюминиевого производства (г. Красноярск).

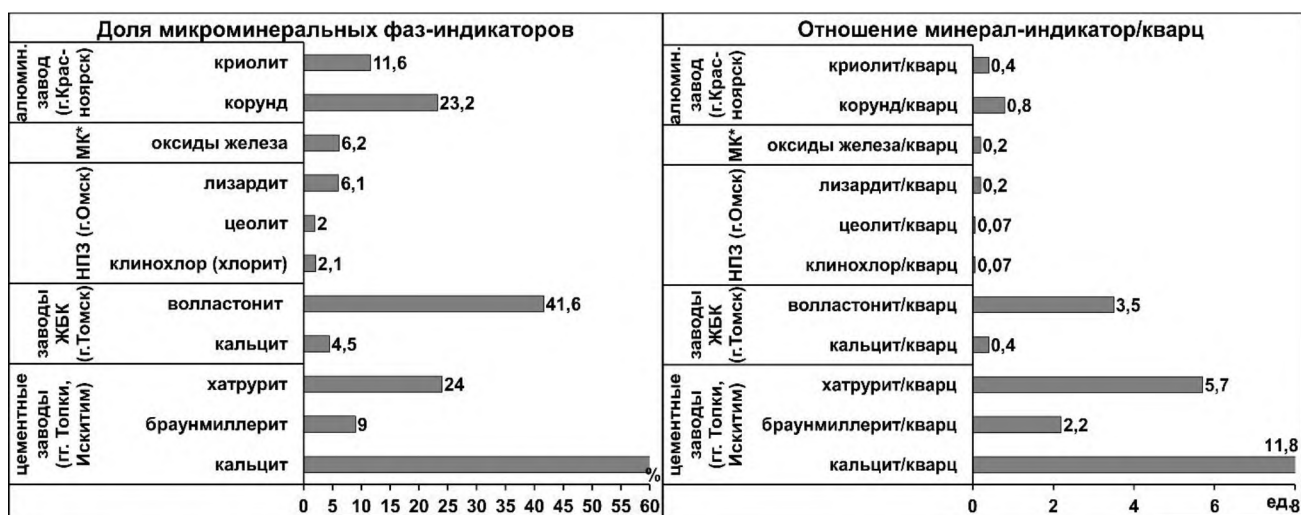


Рисунок 6 – Техногенные микроминеральные фазы в нерастворимом осадке снегового покрова в зонах техногенеза юга Сибири (МК\* – металлургический комбинат в Новокузнецке)

В нерастворимом осадке снегового покрова частота встречаемости индикаторных *микрочастиц металлов и металлоидов* (металлосодержащие микрочастицы) достигает 5%. Эти микрочастицы представляют собой твердофазные формы проявления химических элементов в виде сульфидов (Me-S), сульфатов (Me-S-O), оксидов (Me-O), интерметаллидов (Me-Me) и фосфатов редкоземельных элементов. Так, в нерастворимом осадке снегового покрова в районе расположения предприятия по добыче и обогащению медно-молибденовой руды, например, в г. Сорске, характерно наличие микрочастиц сульфидов молибдена, сульфидов меди и железа. Особенность нерастворимого осадка снегового покрова в зоне воздействия НПЗ, например, в г. Омске, заключается в присутствии микрочастиц цериевых фосфатов и оксидов лантаноидов. В нерастворимом осадке снегового покрова в зоне воздействия предприятий металлургии, машиностроения и металлообработки выявлены интерметаллические микрочастицы (с различными комбинациями металлов) и оксиды металлов, отражающие производственную специализацию этих предприятий, что показано на примере исследований в Омске, Новокузнецке, Юрге и Усть-Каменогорске.

Техногенные образования в нерастворимом осадке снегового покрова также представлены *другими индикаторными видами частиц из промышленной пыли*, доля которых достигает 70%. Основу нерастворимого осадка снегового покрова составляют продукты эмиссии сжигания топлива на объектах теплоэнергетики –

микросферулы, зола и шлак, угольные и сажеподобные частицы. В зависимости от производственной специфики предприятий встречаются в нерастворимом осадке снегового покрова металлургический шлак, металлические микросферулы, цементная, кирпичная или угольная пыль, стекловолокно, микропластик и прочие.

Таким образом, получены новые сведения об уровне пылевой нагрузки и минералого-геохимических характеристиках нерастворимого осадка снегового покрова на урбанизированных территориях юга Сибири в современных условиях развития производства. Полученные данные позволяют сформировать целостную картину об атмотехногенном аэрозольном загрязнении в регионе.

**ПОЛОЖЕНИЕ 2.** *Уровень пылевой нагрузки в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики юга Западной Сибири изменяется от 56 до 880 мг/(м<sup>2</sup>·сут.). По мере удаления от источников выбросов (высота 100–150 м), наибольший уровень пылевой нагрузки (79–790 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) формируется на расстоянии до 1,3 км, а в пределах 1,3–2,3 км уровень нагрузки снижается в среднем в 2 раза (43–268 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)). В качестве элементов-индикаторов, отражающих геохимические особенности состава нерастворимого осадка снегового покрова, установлены лантаноиды, Y, Sc, U, Th, Nb, Hf, Ta, Ge, Ga, Zr, Hg. Характерным при этом является наличие микрочастиц, представленных в форме редкоземельных фосфатов, а в отдельных случаях оксидов урана. Минерально-вещественная специфика обусловлена присутствием микросферул различного состава (алюмосиликатные, алюмосиликатно-железистые, железистые, лантан-цериевые и иттриевые) и отношением муллит/кварц (0,2–3,1, при фоне 0,01 ед.).*

Предприятия теплоэнергетики (ТЭС) являются мощными источниками выбросов в атмосферный воздух твёрдых частиц (Ревич, 2010). В зимний сезон на юге Западной Сибири увеличивается техногенная аэрозольная нагрузка на урбанизированные территории за счет интенсификации работы ТЭС, в топливном балансе которых в основном применяется уголь. Поэтому необходимо определять специфику воздействия ТЭС среди других источников загрязнения.

Проведены исследования в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики, расположенных в городах Кемерово, Мыски, Юрга, Северск, Томск и Омск. Для сравнительного анализа исследования выполнялись и в районе размещения ТЭЦ г. Караганда (Центральный Казахстан). Для изучения многолетней динамики (2005 г., 2009–2018 гг.) аэрозольного загрязнения в качестве модельного объекта выбрана ГРЭС-2 в г. Томске.

Установлено, что *величины пылевой нагрузки* в зоне воздействия ТЭС юга Западной Сибири находятся в диапазоне от 56 до 880 мг/(м<sup>2</sup>·сут.) (рисунок 7). По градации пылевой нагрузки относительно фона выявлено, что формируется средний уровень загрязнения в зоне воздействия ГРЭС г. Новосибирска (Девятова, 2009), ГРЭС г. Мыски и ТЭЦ г. Омска, а высокий – ТЭС Северска, Кемерово и Караганды. Различия в уровнях пылевой нагрузки определяются технологическими факторами, например, видами используемого топлива (марка и качество углей, потребление природного газа), эффективностью системы золоулавливания, влиянием открытых угольных складов.



По данным многолетнего мониторинга в зоне воздействия ГРЭС-2 г. Томска (рисунок 8), установлено уменьшение пылевой нагрузки в среднем на 45% с 2009 г. по 2012 г., обусловленное снижением объемов выбросов твердых веществ из-за реконструкции и установки дополнительных золоуловителей. Преобладание природного газа (~80%) в топливном балансе ГРЭС-2 в 2005 г. оказало влияние на формирование низкого уровня пылевой нагрузки относительно фона.

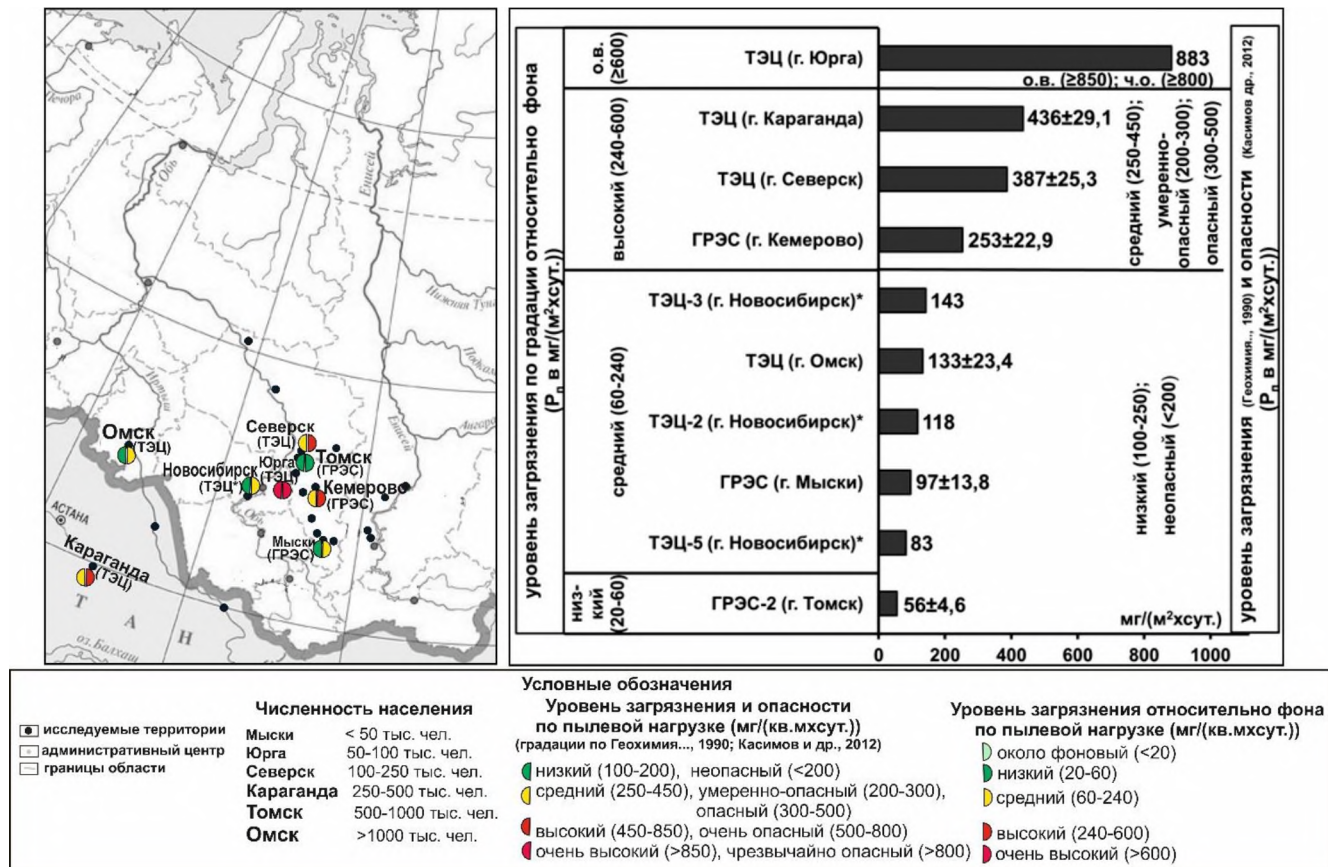


Рисунок 7 – Уровень пылевой нагрузки в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики юга Западной Сибири по данным изучения снегового покрова (о.в. – очень высокий; ч.о. – чрезвычайно опасный; \* – Девятова, 2009; Бортникова и др., 2009)

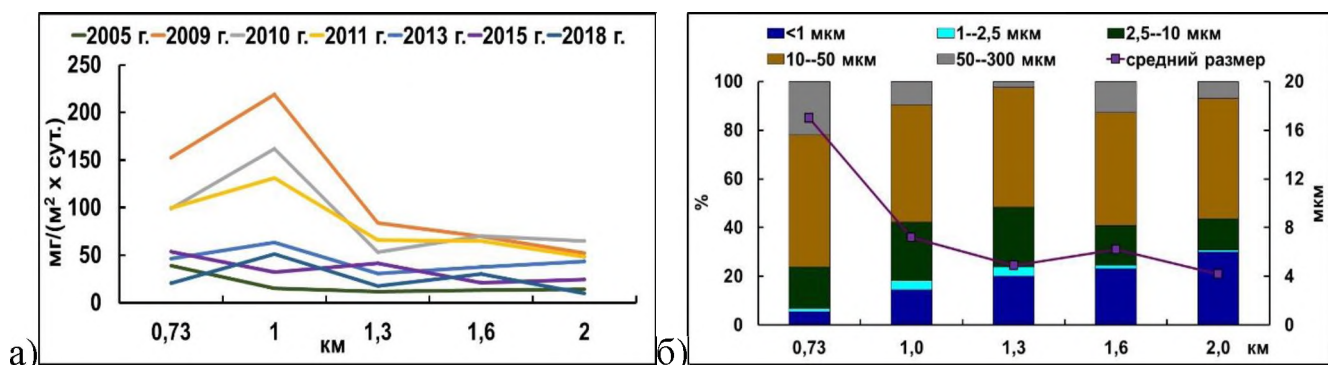


Рисунок 8 – Динамика распределения пылевой нагрузки (а) и размера частиц (б) в нерастворимом осадке снегового покрова по мере удаления от ГРЭС-2 г. Томска

Выявлена закономерность снижения уровней пылевой нагрузки в среднем в 2 раза по мере удаления (от 0,5 до 2,3 км) от ТЭЦ и ГРЭС, у которых высота дымовых труб составляет 100–150 м (рисунок 8–9). В ближней зоне воздействия (до 1,3 км)

пылевая нагрузка формируется на уровне 79–790 мг/(м<sup>2</sup>·сут.), тогда как в дальней зоне (1,3–2,3 км) – 43–268 мг/(м<sup>2</sup>·сут.).

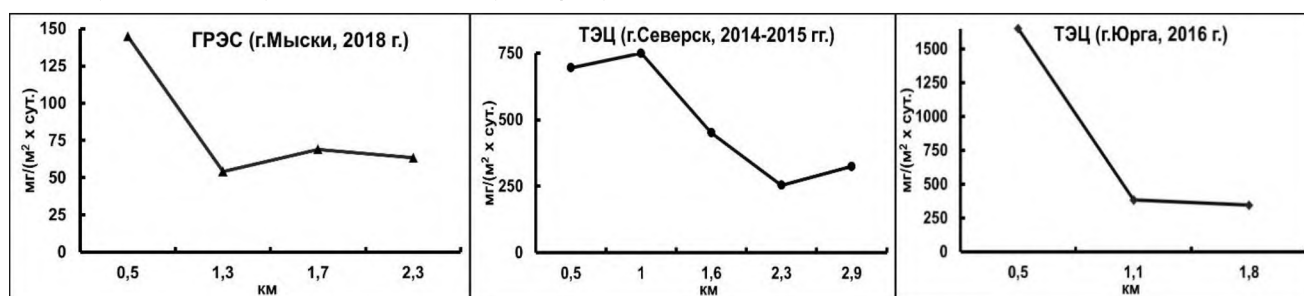


Рисунок 9 – Распределение пылевой нагрузки по мере удаления от ТЭС (высота дымовых труб 100–150 м) в направлении основного массопереноса вещества

Закономерность уменьшения пылевой нагрузки в зависимости от удаления до источника выбросов прослеживается в период многолетних наблюдений в зоне воздействия ГРЭС-2 г. Томска, что подтверждено результатами математической модели реконструкции полей выпадений примесей (Таловская, Рапута и др., 2013). В ближней зоне воздействия ГРЭС-2 (до 1 км) преобладают (до 45%) крупные гранулометрические фракции частиц в нерастворимом осадке снегового покрова (10–50 и 50–300 мкм), а в дальней зоне (1,3–2 км) увеличивается доля (до 35%) мелких фракций (<1 и 1–10 мкм) (рисунок 8).

Результаты по пространственному распределению пылевой нагрузки в районах расположения изучаемых ТЭС согласуются с данными исследований аэрозольного загрязнения снегового покрова в зоне воздействия отдельных ТЭЦ г. Новосибирска (Артамонова, 2007; 2020; Девятова, 2009). На примере ТЭЦ г. Москва показано, что максимальные концентрации взвешенных веществ в воздухе характерны для ближней зоны (0,8–1,5 км) воздействия (Битюкова, 2021).

Зоны воздействия ТЭС юга Западной Сибири отличаются по геохимическому спектру макро- и микроэлементов в нерастворимом осадке снегового покрова (рисунок 10). Вместе с тем, просматриваются общие черты *геохимической специализации нерастворимого осадка снегового покрова*, особенно отчётливые для группы редких металлов. Для нерастворимого осадка снегового покрова характерны геохимические ассоциации редкоземельных (Sc, Y, лантаноиды) и радиоактивных (U, Th) элементов, Nb, Hf, Ta, Ge, Ga и Zr. Уровни концентрации элементов этой группы превышают фон в 2–45 раз. Кроме того, определена ртутная геохимическая специализация нерастворимого осадка снегового покрова, которая наиболее отчетливо выражена в зоне воздействия ТЭС, расположенных в Мысках, Северске и Караганде.

Установленная геохимическая специализация нерастворимого осадка снегового покрова обусловлена геохимическими особенностями используемого топлива. По данным С.И. Арбузова с коллегами (2000; 2007; 2012; 2011; 2015; 2020), угли Сибири обогащены редкими элементами. Ртуть в виде примеси содержится в природном газе (Рыжов и др., 1998) и углях (Арбузов и др., 2015). В золе уноса металлы сорбируются на мелких частицах (Юдович и Кетрис, 2005). Определен близкий уровень содержания химических элементов в нерастворимом осадке снегового покрова и золе уноса, что указывает на генезис твёрдых частиц.



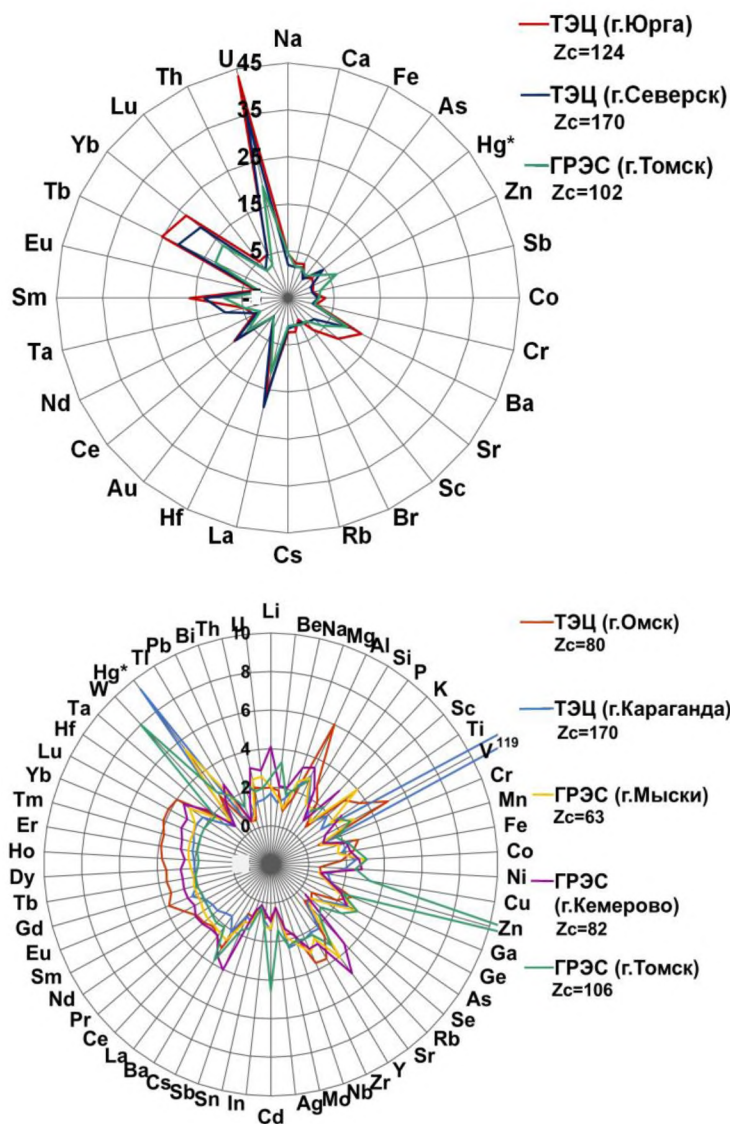


Рисунок 10 – Коэффициенты концентрации химических элементов в нерастворимом осадке снежного покрова в зоне воздействия ТЭС юга Западной Сибири

покрова составляют 21–22 ед. и соотносятся с уровнями для золы уноса (19 ед.).

По результатам многолетнего (2005 г., 2009–2018 гг.) эколого-геохимического мониторинга в зоне воздействия ГРЭС-2 г. Томска выявлена закономерность формирования повышенных уровней накопления As, Zn, Ba, Sr, U, Th, Hf, Ta, лантаноидов (La, Ce, Tb, Yb, Lu, Sm) в нерастворимом осадке снежного покрова при балансе угля 35–65% (2009–2015 гг.), тогда как Hg и Br – при балансе природного газа более 50% на ГРЭС-2. В системе «твердый осадок снежного покрова–снеговая вода» РЗЭ, U, Th, Nb, Hf, Ta, Ge, Ga, Zr более, чем на 85%, а Hg – на 65% содержатся в нерастворимом осадке, что указывает на их твердофазные формы проявления. Уран и трансураниевые элементы находятся в молекулярно-рассеянной форме. Изотопы  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  преимущественно связаны с гидроксидами Fe и Mn (44,0 и 43,2%, соответственно) и труднорастворимыми соединениями (29,4 и 32,2%), немного более 10% приходится на карбонатные и органические формы.

Уровни Th/U-отношения в нерастворимом осадке снежного покрова из зоны воздействия ТЭС юга Западной Сибири находятся в диапазоне 2,0–2,9 ед., что свидетельствует о смешанной природе поступления урана и тория в соответствии с градацией (Рихванов и др., 2002; 2007; Язиков, 2006). Установленные уровни Th/U-отношения близки к таковым для нерастворимого осадка снежного покрова из районов расположения угледобывающих объектов (1,4–2,2 ед.) и золы уноса ТЭС (2,0–2,2 ед.), указывая на эмиссию урана и тория за счет сжигания угля.

В нерастворимом осадке снежного покрова из зоны воздействия ТЭС, использующих угли Кузнецкого бассейна, уровни отношения лантаноидов ((La+Ce)/(Yb+Lu)) изменяются от 32 до 34 ед. и близки к таковым в золе уноса (30–38 ед.). В окрестностях ТЭЦ, где сжигается уголь с Экибастузского бассейна, уровни отношения легких к тяжелым лантаноидам в нерастворимом осадке снежного

Ртуть в основном проявляется в изоморфной (39%), физически связанной (33%) и свободной формах (29%).

Во время ежемесячного мониторинга в зимние сезоны с 2001 г. по 2007 г. в районе кампуса Томского политехнического университета, Академгородка и в пригороде Томска наблюдалась динамика увеличения концентрации РЗЭ, U и Th в нерастворимом осадке снегового покрова в период интенсификации работы объектов теплоэнергетики (Таловская, 2008). В районе расположения ГРЭС-2 выявлены высокие концентрации РЗЭ, As, Sr, Ba в почвогрунтах (Жорняк, 2009) и листьях тополя (Барановская, 2011), что указывает на многолетний источник поступления рассматриваемых элементов в окружающую среду.

В зоне воздействия ТЭС юга Западной Сибири *минерально-вещественный состав* нерастворимого осадка снегового покрова характеризуется преобладанием группы техногенных (74–90%) над группой природных образований (10–26%). Доминируют при этом угольные и сажеподобные частицы (15–23%), зола и шлак (20–30%), формирующие аморфную фазу (25–45%). Угольная зола и сажа негативно влияют на респираторную систему человека (Мякишева и др., 2005).

В нерастворимом осадке снегового покрова идентифицированы с высокой частотой встречаемости (до 3%) *микрочастицы*, близкие по составу к цериевым фосфатам (рисунок 11). В зоне воздействия ТЭЦ г. Омска и ТЭЦ г. Северска характерными также являются микрочастицы, представленные иттриевыми фосфатами и оксидами урана. Микрочастицы сульфидов ртути обнаружены в районе расположения ТЭЦ г. Юрга.

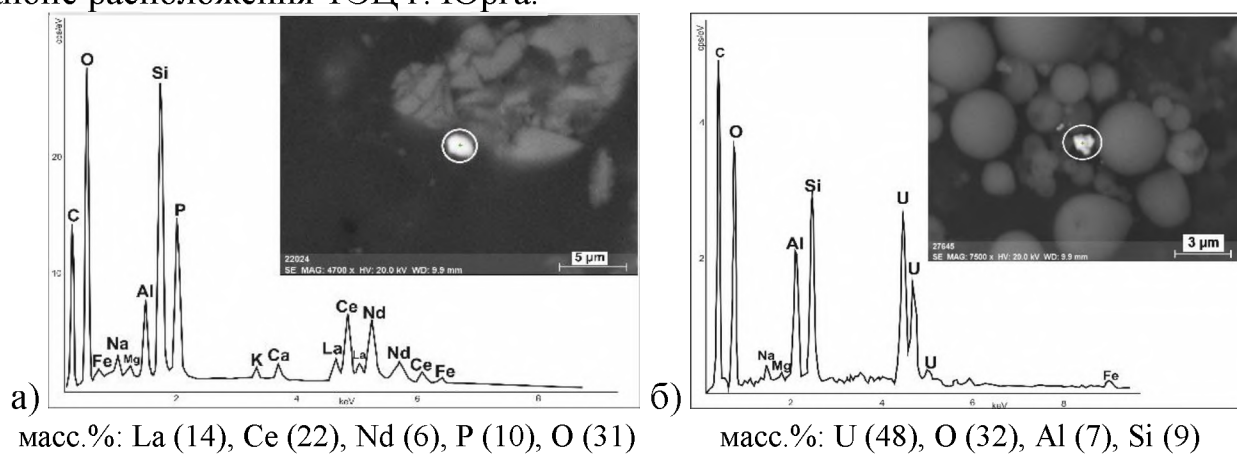


Рисунок 11 – Микрочастицы в составе нерастворимого осадка снегового покрова в зоне воздействия ТЭС: а) цериевые фосфаты; б) оксиды урана

В нерастворимом осадке снегового покрова микроминеральные фазы муллита установлены как техногенные образования, отражающие воздействие ТЭС, что согласуется с литературными данными (Языкков, 2006; Федорова, 2008; Рогова и др., 2009). Для определения генезиса аэрозольных частиц, как сжигание угля, предложено использовать индикаторное *отношение муллит/кварц*, которое находится на уровне 0,2–3,1, при фоне 0,01 ед. (таблица 1). Уровни отношений муллит/кварц в нерастворимом осадке снегового покрова сопоставимы с таковыми для золы уноса, что указывает на источник происхождения муллита.

Техногенными образованиями в нерастворимом осадке снегового покрова, характеризующие воздействие ТЭС юга Западной Сибири, являются также

микросферулы, которые на основе их элементного состава разделены на 4 вида. Первый вид – алюмосиликатные микросферулы (масс. %:  $15 < Al + Si \leq 25$ ) с гладкой или поровой структурой, представляющие собой форму проявления муллита. Микросферулы отличаются высокой частотой встречаемости (15–29%). Вторым видом – алюмосиликатно-железистые (масс. %:  $10 < Al + Si \leq 15$ ), характеризуются наличием на «теле» микросферулы алюмосиликатного состава отдельных микровключений оксидов железа (масс. %:  $Fe \geq 25$ ,  $O \geq 45$ ). Третий вид – железистые микросферулы или ферросферулы, которые отличаются высоким содержанием оксидов железа (масс. %:  $Al + Si \leq 10$ ;  $Fe \geq 60$ ,  $O \geq 30$ ), а также дендритной, гладкой или полигональной структурой. Четвертый вид – микросферулы редкоземельного состава, среди которых выделяются микросферулы лантан-цериевые (масс. %: La – 21, Ce – 17, O – 52) и иттриевые (масс. %: Y – 24, Ga – 3, Dy – 6, P – 4, O – 35). Данные виды микросферул являются характерными в зоне воздействия ГРЭС-2 г. Томска, ТЭЦ г. Северска и угольных котельных Томской области.

Таблица 1 – Отношение муллит/кварц в нерастворимом осадке снегового покрова в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики юга Западной Сибири

Минерал, %	Нерастворимый осадок снегового покрова							Зола уноса			
	ГРЭС-2 (г.Томск)	ТЭЦ (г.Юрга)	ГРЭС (г.Мыски)	ТЭЦ (г.Северск)	ГРЭС (г.Кемерово)	ТЭЦ (г.Караганда)	ТЭЦ (г.Омск)	Фон	ГРЭС-2 (г.Томск)	ТЭЦ (г.Северск)	ГРЭС (г.Кемерово)
Кварц ( $SiO_2$ )	59,7	58,8	40,3	37	24,2	14,2	19,3	63,7	47,3	34,3	20,6
Муллит ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )	12	39	36	32,9	21,6	21,9	60,6	<1	23,2	37,4	22
Муллит/кварц	0,2	0,7	0,9	0,9	0,9	1,5	3,1	0,01	0,5	1,1	1,1

Таким образом, установлены индикаторные уровни пылевой нагрузки, группа химических элементов (лантаноиды, Y, Sc, U, Th, Nb, Hf, Ta, Ge, Ga, Zr, Hg), техногенные образования (микрочастицы редкоземельного и уранового состава, угольные и сажеподобные частицы, зола и шлак, микросферулы ассоциированные с муллитом, оксидами железа и лантаноидами) и уровни отношения муллит/кварц в нерастворимом осадке снегового покрова для идентификации источников загрязнения как предприятия теплоэнергетики юга Западной Сибири.

**ПОЛОЖЕНИЕ 3.** На основе эколого-геохимического районирования территории Томской области в нерастворимом осадке снегового покрова установлены повышенные концентрации U, Ba, Na, Zn, Ta, Sr, Hg, Br, Hf, Th, Sb и лантаноидов относительно фона. Выделены при этом три основные техногенные геохимические субпровинции разного генезиса и локализации: полиэлементная с ассоциацией лантаноиды-U-Th-Ta-Sc-Cs-Hf-Hg-Sr-Ba-Co в районах с повышенной пылевой нагрузкой Томск–Северской промышленной агломерации и угольной теплоэнергетики; ртутно-бромная в районах размещения объектов теплоэнергетики; натриевая в зоне воздействия нефтегазодобывающих предприятий.

Томская область, как крупная промышленная область на юге Западной Сибири, выбрана в качестве модельного объекта для изучения в региональном масштабе особенностей формирования состава атмосферных аэрозолей под воздействием многопрофильных производств и предприятий теплоэнергетики.

В Томской области основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят промышленные предприятия различных отраслей производства (теплоэнергетическая, нефтехимическая, ядерно-топливный цикл (ЯТЦ) и др.), расположенные в южной части области, в частности на территории Томск–Северской городской агломерации, где проживает 70% населения области, а также нефтегазодобывающие предприятия – в северных районах (данные ежегодных докладов о состоянии окружающей среды в Томской области). В сельских населенных пунктах и центрах 16 административных районов области основными техногенными источниками загрязнения являются котельные, которых в области более 300, из них 137 используют уголь, 113 – природный газ, 51 – древесину, 24 – нефть, дизтопливо, мазут, 11 – разные виды топлива (<http://green.tsu.ru/tomres/>).

В области более 20 лет назад комплексные снегогеохимические исследования выполнялись только в промышленно-нагруженном южном районе (Томский административный район), а на всей территории области – проводились мозаично (Экология СПУ..., 1994; Шатилов, 2001; Язиков, 2006; Рихванов и др., 2006; 2008). В этой связи, необходимо получение новых данных о пространственном распределении полей атмотехногенного загрязнения аэрозольными частицами на основе эколого-геохимического районирования территории области с использованием снегового покрова как депонирующей среды.

В Томской области при личном участии автора выполнялся отбор *976 проб снегового покрова* на территории *четырёх городов* (Томск, Асино, Стрежевой, Колпашево) и *113 сельских населённых пунктов*, а также в зонах воздействия котельных (до 250 м), использующих различные виды топлива (уголь, природный газ, древесина, нефть).

Установлено, что ореолы *пылевой нагрузки*, в которых фон превышен в 4–9 раз, расположены в южном районе, где находится Томск–Северская агломерация, и юго-восточном районе, в котором функционируют предприятия лесной промышленности (Таловская и др., 2014; Филимоненко, 2015). В этих районах также размещено большое количество котельных, использующих в основном уголь, которые вносят свой вклад в уровень пылевой нагрузки. Определено, что в зоне воздействия сельских котельных, работающих на угле, пылевая нагрузка формируется на уровне 6 фонов и статистически значимо выше уровней для населённых пунктов, в которых они расположены.

Уровни пылевой нагрузки существенно снижаются до фоновых показателей (<10 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) в районах области, которые удалены от Томск–Северской агломерации на 100–250 км в северо-западном направлении. Кроме того, высокая численность котельных, использующих природный газ, древесину или нефть, в этих районах также обуславливает фоновые уровни пылевой нагрузки. Динамика уменьшения концентрации нерастворимых частиц в снеговом покрове была

прослежена по северо-западному профилю от Томска до эстуария р. Обь в пределах области (Шевченко и др., 2015; 2020).

В масштабе Томской области *техногенная геохимическая специализация* нерастворимого осадка снегового покрова характеризуется высокими уровнями накопления U, Th, Br, Hg, Ba, Zn, Sr, Sb, Na, Ta, Hf и лантаноидов, которые в 2–14 раз выше фона, кларка земной коры и кларка ноосферы (таблица 2).

Таблица 2 – Геохимическая характеристика нерастворимого осадка снегового покрова на территории Томской области

Эл-т	Содержание, мг/кг		K <sub>c</sub>	P <sub>общ</sub> , мг/(км <sup>2</sup> ·сут.)		K <sub>p</sub>	Кларки***	
	среднее	фон		среднее	фон		ноосферы	земной коры
Na*	0,6±0,01	0,2	4,0	217±24,2	10,5	20,7	1,9	2,4
Ca*	1,3±0,03	0,8	1,6	477±49,8	57	8,4	1,6	2,6
Fe*	2,4±0,05	1,9	1,3	742±64,2	130	5,6	2,2	4,1
Hg**	0,2±0,01	0,08	2,1	4,9±0,3	1,2	4,1	0,18	0,1
As**	9,2±0,3	18,6	1,5	260±25,1	117	2,2	3	6,5
Zn**	311±8,2	139	2,2	7960±615	879	9,1	46	78,0
Sb	3,8±0,2	2,3	1,7	87,2±6,0	16,1	5,4	0,25	0,8
Co	11,8±0,3	10,3	1,1	407±39,1	72,1	5,6	10	15,0
Cr	95,7±1,9	110	0,9	2281±179	770	2,9	50	92,0
Ba	464±10,1	100	4,6	15377±1365	700	21,9	36	628
Sr	210±6,4	100	2,1	7235±769	700	10,3	240	270
Sc	6,8±0,1	7,1	0,9	236±23,5	49,7	4,7	7	15,0
Br	5,7±0,1	2,9	1,9	112±15,3	20,3	5,5	26	1,6
Rb	39,1±0,5	55,0	0,7	1269±131	385	3,3	96	110
Cs	2,2±0,04	3,5	0,6	75,7±7,6	24,5	3,1	5,9	4,9
La	22,7±0,5	2,8	8,1	747±65,8	19,6	38,1	12	32,0
Hf	4,0±0,1	2,2	1,8	136±13,7	15,4	8,8	2,5	4,5
Au	0,04±0,002	0,2	0,2	0,6±0,04	1,5	0,4	0,00069	0,002
Ce	49,0±0,9	10,3	4,8	1563±137	72,1	21,7	1,9	1,4
Nd**	18,0±0,3	14,9	1,2	573±48,6	88,7	6,5	32	63,0
Ta	0,6±0,02	0,2	3,2	21,7±2,1	0,7	31	16	29,0
Sm	3,5±0,1	0,6	6,2	123±12,7	4,0	30,7	4,5	5,7
Eu	0,7±0,01	1,1	0,4	25,3±2,5	7,7	3,3	0,64	1,3
Tb	0,5±0,01	0,06	8,5	17,6±1,7	0,4	44,1	0,64	0,9
Yb	1,9±0,03	0,2	9,6	65,2±6,2	1,4	46,6	1,9	2,5
Lu	0,3±0,004	0,15	1,7	9,0±0,9	0,5	17,9	0,45	0,5
Th	5,5±0,1	2,9	1,9	183±17,1	20,3	8,9	7,6	9,3
U	2,7±0,1	0,2	13,4	86,2±8,0	1,4	61,6	1,9	2,5
	Z <sub>c</sub> =64			Z <sub>p</sub> =479				

объем выборки – 753 пробы; для Hg – 455; \* – содержание в мг/кг, P<sub>общ</sub> в г/(км<sup>2</sup>·сут.); фон – Шатилов, 2001; Языкова, 2006; \*\* – фон данные автора; \*\*\* – кларк ноосферы: Н.Ф. Глазовский и М.А. Глазовская, 1982; 1988; кларк земной коры: Григорьев, 2009 и данные из обзора Н.С. Касимова (Касимов, Власов, 2015)

Уровни концентрации химических элементов в нерастворимом осадке снегового покрова формируют средний уровень загрязнения с умеренно-опасной ситуацией по величине Z<sub>c</sub>. Среднесуточные выпадения химических элементов на снеговой покров относительно фона (K<sub>p</sub>=3–62) создают низкий уровень нагрузки.

В нерастворимом осадке снегового покрова выделены полиэлементная ассоциация (лантаноиды-U-Th-Ta-Hf-Cs-Rb-Sc-Co-Hg) и ассоциация Ba-Sr



(рисунок 12), которые статистически значимо коррелируют с доминирующим «Фактором 1» (51,7% дисперсии). Фактор 1 отчётливо проявляется в южных, включая промышленно-нагруженный, и юго-восточных районах (рисунок 12–13). В этих же районах области локализуются контрастные геохимические ореолы U, Th, Hg, Sr, Ba, Co, Ta, Hf, Cs, Rb и РЗЭ. На рисунке 14 в качестве примера представлены карты-схемы пространственного распределения U. Геохимические ореолы Th, Ta, Hf, Cs, Rb, Sc, лантаноидов имеют схожую структуру с ореолами U.

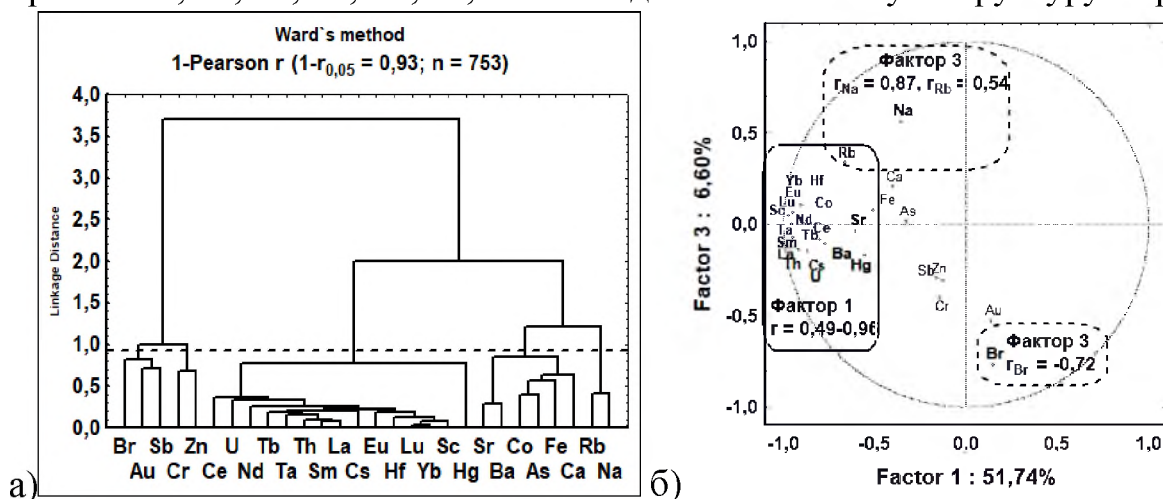


Рисунок 12 – Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов (а) и факторных нагрузок (б) в нерастворимом осадке снегового покрова на территории населенных пунктов Томской области

Формирование полиэлементной ассоциации в южных и юго-восточных районах происходит, с одной стороны, за счет дальнего переноса выбросов от Томск–Северской городской агломерации, а с другой стороны, под воздействием местных котельных, использующих в основном уголь.

В ранее проведенных исследованиях установлено, что геохимические ореолы РЗЭ, U, Th и других микроэлементов в компонентах природной среды и биосубстратах человека, отражающих воздействие предприятий агломерации (ЯТЦ, ТЭС, НХК), образуют единую структуру на территории южных районов (Рихванов, 1997; Шатилов, 2001; Рихванов и др., 2006; Язиков, 2006; Таловская, 2008; Жорняк, 2009; Межибор, 2010; Барановская, 2011; Артамонова, 2012; Наркович и др., 2012; 2016; Перминова, 2017; Иванов, 2018; Барановская и др., 2020). Согласно основной «розе» ветров, ореолы вытянуты в север-северо-восточном и юго-западном направлениях от Томск–Северской агломерации на расстояние 10–50 и 50–100 км. Ореолы охватывают не только сельские населённые пункты южного района (Томского), где размещена агломерация, но и сопредельных юго-восточных (Асиновский, Зырянский) и южного (Кожевниковский) районов.

Распространение урана и фторидов в север-северо-восточном направлении (до 30–40 км) от агломерации доказано нами математическим моделированием по результатам изучения снегового покрова (Рапуга, Таловская и др., 2011). За счет циклонических процессов вещества могут переноситься и оседать в снеговом покрове на расстояние более 60–70 км в северо-восточном и западном направлениях от агломерации (Зинченко и др., 2020).

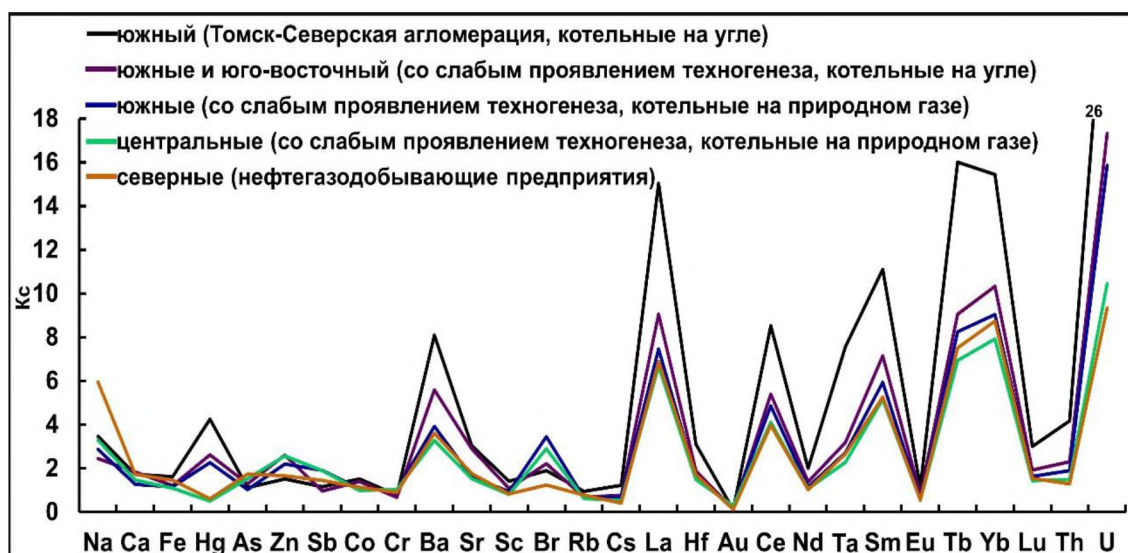


Рисунок 13 – Коэффициенты концентрации элементов в нерастворимом осадке снегового покрова на территории сгруппированных районов Томской области по преобладающим видам топлива на местных котельных

На территории сельских населённых пунктов, которые расположены в северо-восточном и юго-западном направлении от Томск–Северской городской агломерации на расстоянии до 30 км, выявлены молекулярно-рассеянная и концентрированная (в виде микровключений) формы нахождения урана и трансурановых элементов в нерастворимом осадке снегового покрова методом f-радиографии (Язиков, 2006; Таловская, 2008). Результаты этих исследований позволили нам получить *патент на изобретение «Способ определения загрязнённости снегового покрова радиоактивными компонентами» (№ 2453869)*.

Молекулярно-рассеянная форма представлена на детекторе в виде единичных треков делящихся радионуклидов с плотностью более 1500 трек/мм<sup>2</sup>, при фоновом показателе – около 1000 трек/мм<sup>2</sup>. Определены микровключения в виде отдельных сгустков треков как «скопления» (>0,3 «скопление»/см<sup>2</sup>) на детекторе, которые отражают воздействие предприятий теплоэнергетики.

Микровключения также проявляются на детекторе как треки от осколков деления радионуклидов в виде «звёзд» с высокой плотностью (>0,5 «звезда»/см<sup>2</sup>) и характеризуют воздействие предприятий ядерно-топливного цикла. В нерастворимом осадке снегового покрова на территории сельских населённых пунктов северо-восточной зоны воздействия ЯТЦ определена высокая плотность «звёзд» (>1,0 «звезда»/см<sup>2</sup>) и единичных треков (>3000 трек/мм<sup>2</sup>). Влияние ЯТЦ также подтверждается по литературным данным о соотношении изотопов урана ( $U^{238}/U^{235} = 74,28–127,315$ ) в нерастворимом осадке снегового покрова (Артамонова, 2012), а также о наличии «звёзд» в почвогрунтах (Язиков, 2006; Жорняк, 2009) и кольцах деревьев (Архангельская, Рихванов, 2004), выявленных методом f-радиографии.

Результаты исследований в зоне воздействия местных объектов теплоэнергетики, применяющие различные виды топлива, доказывают, что сельские котельные влияют на формирование техногенной геохимической специализация нерастворимого осадка снегового покрова в Томской области.



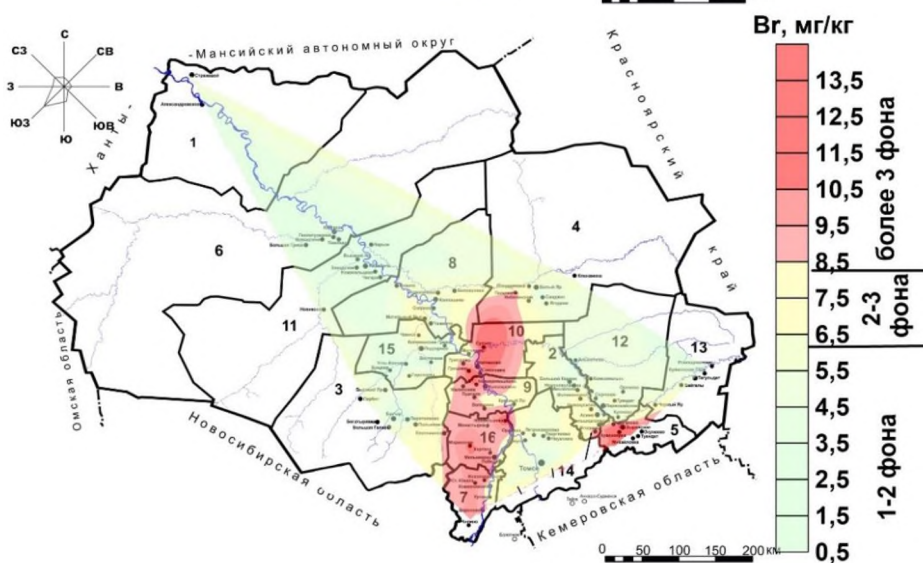
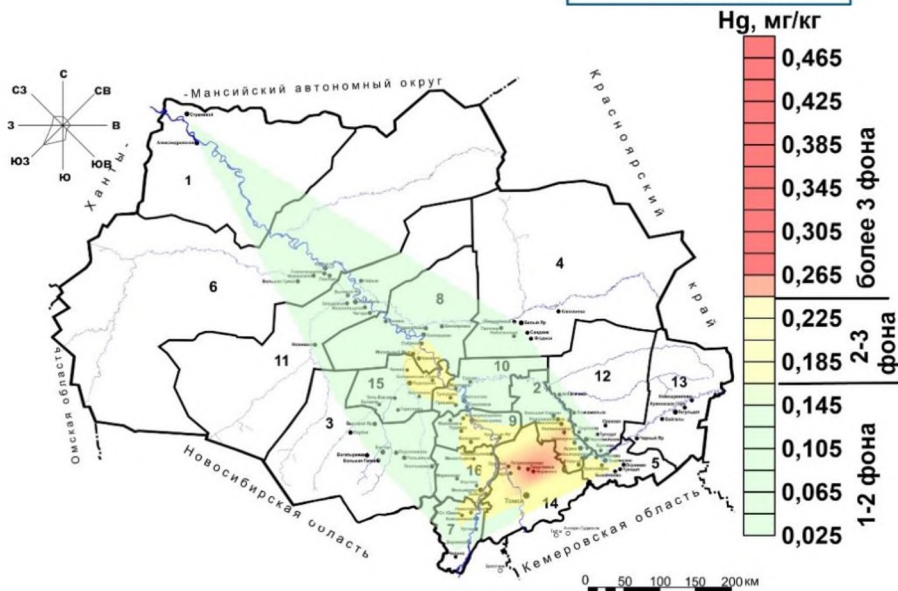
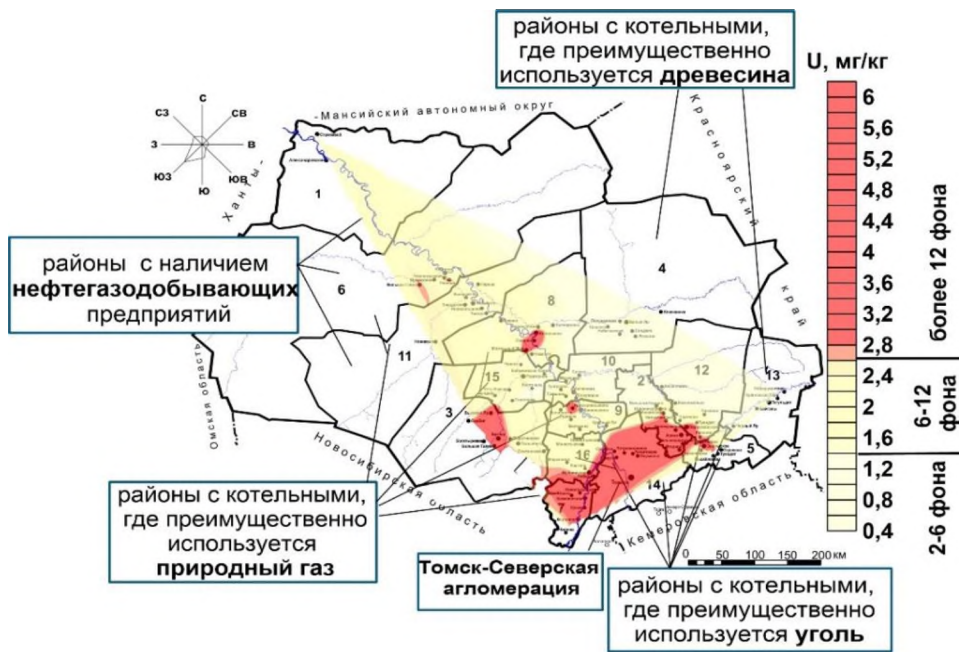


Рисунок 14 – Пространственное распределение отдельных микроэлементов в нерастворимом осадке снегового покрова на территории Томской области (цифры – номера административных районов; черные точки – места отбора проб)

Определены индикаторы в нерастворимом осадке снегового покрова, отражающие воздействие котельных, использующих уголь, – спектр микроэлементов (U, Th, As, Co, Hg, Zn, Sb, Ba, Sr, лантаноиды (La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Sm), Sc, Cs, Hf, Ta, Br), фазы муллита (10–25%), микрочастицы оксидов урана, цериевых фосфатов и лантан-цериевые микросферулы. Подтверждением воздействия угольных котельных является также преобладание в нерастворимом осадке снегового покрова на территории населённых пунктов области группы техногенных образований, представленной микросферулами, угольными, шлаковыми, сажеподобными частицами (35–55%).

Установлены контрастные геохимические ореолы Br и Hg на территории юго-восточного, южных и центральных районов области, для которых характерно слабое проявление техногенеза (рисунок 13–14). В данных районах преобладают котельные, использующие природный газ, а также размещены котельные, работающие на угле и нефти. Так, техногенная геохимическая специализация нерастворимого осадка снегового покрова проявляется на Hg ( $K_c=2,1$ ), Br ( $K_c=1,8$ ), Sb ( $K_c=1,8$ ) в зоне воздействия котельных, применяющих природный газ. В связи с этими фактами, техногенными источниками эмиссии Br и Hg в районах области являются местные котельные. Природный газ, уголь и нефть содержат примеси Br, Hg, Sb (Иванов, 1996; Рыжов и др., 1998; Юдович, Кетрис, 2006; Калинин, 2009; Арбузов и др., 2015), следовательно, возможно их поступление в окружающую среду в процессе сжигания топлива. В южных и центральных районах области также выявлены высокие концентрации Br в почвах (Перминова, 2017), в патологически измененной щитовидной железе (Рихванов и др., 2008; Барановская, 2011) и в волосах детей (Барановская, 2011; Наркович, 2012).

На территории северных районов области, подвергаемых воздействию нефтегазодобывающих предприятий, установлена локализация контрастных геохимических ореолов натрия. В этих ореолах концентрация Na в нерастворимом осадке снегового покрова находится на уровне 5–6 фонов, величины среднесуточного выпадения Na на снеговой покров – 16–29 фонов.

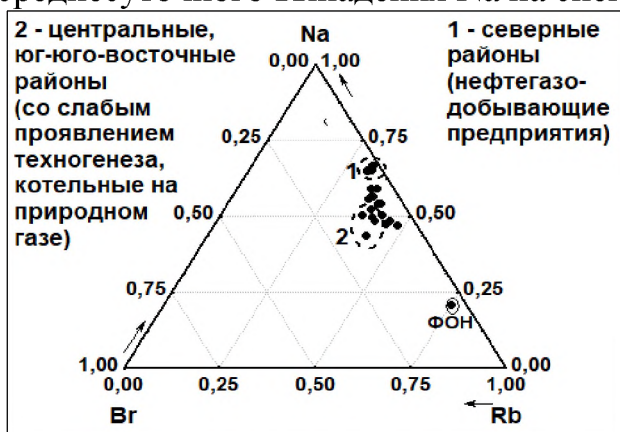


Рисунок 15 – Тройная диаграмма соотношения элементов «Na-Rb-Br» в нерастворимом осадке снегового покрова на территории населенных пунктов Томской области

Для нерастворимого осадка снегового покрова характерно пониженное Br/Na отношение (0,001, при фоне 0,002 ед.), что также хорошо видно по долевым распределению элементов в системе «Na-Br-Rb» (рисунок 15).

По результатам факторного анализа, в северных районах области выделяется «Фактор 3» (6,6% дисперсии), с которым Na и Rb образуют положительную значимую корреляционную связь, а с Br – отрицательную связь (рисунок 12), что может указывать на его смешенную природу. Высокое накопление Na в нерастворимом осадке снегового покрова

на территории населённых пунктов возможно за счет дальнего переноса эмиссий от нефтегазодобывающих предприятий, которые расположены в северных районах. Это подтверждается высокими уровнями накопления Na ( $K_c=3-10$ ,  $K_p=2-10$ ) в нерастворимом осадке снегового покрова на территории нефтяного месторождения, что согласуется с ранее проведенными исследованиями (Шатилов, 2001; Язиков, 2006). Высокие концентрации Na характерны для снеготалой воды (Большунова, 2015), подземных вод (Шамолина и Назаров, 1975) и шламов (Климова др., 2020) на месторождениях Томской области. В повышенных концентрациях Na обнаружен в шлейфах газовых и нефтяных факелов (Симоненков, 2015), а также в буровых растворах (Ксензенко, 1995).

Таким образом, выполненное эколого-геохимическое районирование территории Томской области с использованием данных о химическом составе нерастворимого осадка снегового покрова, позволило выделить техногенные геохимические субпровинции, обусловленные воздействием разнопрофильных предприятий и локального теплоэнергетического комплекса.

**ПОЛОЖЕНИЕ 4.** *Разработана и проведена типизация урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания, подходы к которой основаны на критериях и признаках, характеризующих промышленно-урбанизированное освоение территорий и аэрозольное загрязнение, отражающие закономерности формирования уровня пылевой нагрузки, геохимических и минерально-вещественных особенностей состава нерастворимого осадка снегового покрова, для оценки экологического состояния территорий.*

Познание процессов геохимической трансформации компонентов природной среды под воздействием урбанизации и хозяйственной деятельности позволяет проводить экологическую классификацию городов. Например, разработаны научно-концептуальные основы масштабной геохимической систематики городов и городских ландшафтов Н.С. Касимовым с соавторами (1995; 2014), а также классификации селитебных геохимических ландшафтов А.А. Алексеенко (2000; 2013). Известны отдельные региональные классификации, к примеру, классификация техногенного геохимического воздействия веществ на геосистемы Сибири Н.Д. Давыдовой (2001 г.), эколого-геохимическая типизация техногенных систем Крыма Л.Н. Новиковой и Ю.А. Новикова (2003 г.).

По результатам многолетних исследований атмосферных аэрозолей с использованием нерастворимого осадка снегового покрова разработаны подходы к типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания для оценки экологического состояния (таблица 3–6). Оригинальность типизации заключается в разработанном комплексе экологически значимых критериев и признаков, отражающих закономерности формирования и распределения аэрозольного загрязнения на урбанизированных территориях в зависимости от условий техногенеза. Разработанные критерии и признаки базируются на результатах комплексного изучения уровней пылевой нагрузки и состава нерастворимого осадка снегового покрова, полученных автором

в процессе исследований на 21 урбанизированной территории юга Сибири. Критерии и признаки возможно применять для типизации территории городов, как целостных урбосистем, и отдельно для типизации зон воздействия предприятий.

Таблица 3 – Схема типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания с использованием критериев, характеризующих промышленно-урбанизированное освоение

ТИП ВОЗДЕЙСТВИЯ I. ПРОМЫШЛЕННО-УРБАНИЗИРОВАННОЕ ОСВОЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ		
Критерий	Группа	Показатель
I.1 Промышленно-функциональное назначение города	I.1.1 непромышленный город	Кол-во отраслей промышленности: •отсутствие промышленных отраслей производства
	I.1.2 монопрофильный промышленный (Манаева, 2018) или моногород (по Распоряжению Правительства РФ от 29.07.2014 №1398-р);	•одна градообразующая отрасль производства;
	I.1.3 многопрофильный промышленный (Архипов, 2010; Манаева, 2018)	•многоотраслевое производство
I.2 Концентрация промышленных предприятий в городе	I.2.1 с низкой концентрацией предприятий	Кол-во крупных и средних промышленных предприятий: •1–3 градообразующих предприятий;
	I.2.2 со средней концентрацией	•4–14 предприятий
	I.2.3 с высокой концентрацией	•≥15 предприятий
I.3 Численность городского населения	I.3.1 малые;	Численность жителей, тыс. чел.: •≤50;
	I.3.2 средние;	•50–100;
	I.3.3 большие;	•100–250;
	I.3.4 крупные;	•250–500;
	I.3.5 крупнейшие;	•500–1000;
	I.3.6 миллионники (Старовойтов, Медведева, 2008; Архипов, 2010; Манаева, 2018)	•≥1000 (Старовойтов, Медведева, 2008; Архипов, 2010; Манаева, 2018)

Типизация урбанизированных территорий проводится по критериям и признакам, которые характеризуют два типа воздействия (таблица 3–6). *Первый тип воздействия – промышленно-урбанизированное освоение территории* (таблица 3). Типизация территорий по первому типу воздействия осуществляется с использованием трех критериев, разработанных с использованием методов геоурбанистики (Старовойтов, Медведева, 2008; Архипов, 2010; Манаева, 2018). В качестве оснований используются сведения о промышленной инфраструктуре города и численности населения. Критериями первого и второго порядка являются промышленно-функциональное назначение города и концентрация промышленных предприятий, соответственно. Эти критерии отражают ведущие виды промышленного воздействия на формирование экологической обстановки. Основой третьего критерия является численность городского населения, поскольку, по литературным данным (Касимов и др., 2014), существует зависимость между концентрацией поллютантов в воздухе и размером города. По каждому критерию проводится типизация урбанизированных территорий с выделением групп городов, которые характеризуются показателями.

*Второй тип воздействия – аэрозольное загрязнение* (таблица 4–6). Основой являются результаты обобщения и систематизации собственного фактического материала по минералого-геохимическому изучению нерастворимого осадка снегового покрова на 21 урбанизированной территории юга Сибири.



Таблица 4 – Схема типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания с использованием критериев и признаков «уровень пылевой нагрузки»

ТИП ВОЗДЕЙСТВИЯ II. АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ			
КРИТЕРИЙ II.1.1 УРОВЕНЬ ПЫЛЕВОЙ НАГРУЗКИ			
ПРЯМОЙ ПРИЗНАК			
Наименование признака	Параметры оценки экологического состояния		
	Параметр	Показатель	Уровень загрязнения (опасности)
II.1.1.1.ПП.1 Уровень пылевой нагрузки	• $P_n \geq 100$ мг/(м <sup>2</sup> -сут.) (по общепринятым градациям: Геохимия..., 1990; Касимов, 2012)	$\leq 250$ ( $\leq 200$ )	Низкий (неопасный)
		250-450 (200-300; 300-500)	Средний (умеренно опасный; опасный)
		450-850 (500-800)	Высокий (очень опасный)
		$\geq 850$ ( $\geq 800$ )	Очень высокий (чрезвычайно опасный)
	От уровня фона • $P_n > 20$ мг/(м <sup>2</sup> -сут.); • $P_n \geq 3$ фонов	20-60	Низкий (1-3 фона)
		60-240	Средний (>3-12 фона)
	241-600	Высокий (>12-30 фона)	
	$\geq 600$	Очень высокий (>30 фона)	
КОСВЕННЫЙ ПРИЗНАК			
II.1.1.1.КП1 Уровень пылевой нагрузки	От уровня фона • $P_n \leq 20$ ; • $P_n < 3$ фонов	$\leq 20$	Около-фоновый

Таблица 5 – Схема типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания с использованием критериев и признаков «геохимические характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова»

ТИП ВОЗДЕЙСТВИЯ II. АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ			
КРИТЕРИЙ II.2.1 ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВА НЕРАСТВОРИМОГО ОСАДКА СНЕГОВОГО ПОКРОВА			
ПРЯМОЙ ПРИЗНАК			
Наименование признака	Параметры оценки экологического состояния		
	Параметр	Показатель	Уровень загрязнения (опасности)
II.2.1.ПП1 Техногенная геохимическая специализация	• $K_c \geq 3$ ; • $K_p \geq 5$ ; • $p \leq 0,05$ ; • $Th/U \geq 1,5$ ; • $(La+Ce)/(Yb+Lu) \geq 32$		Выше фонового уровня накопления химических элементов
II.2.1.ПП2 Элементы-индикаторы, характеризующие воздействие производства	• $C \geq 3\sigma$ ; • $K_c \geq 3$ ; • $K_p \geq 5$ ; •ассоциации элементов; • $Th/U \leq 1,5$ ; • $(La+Ce)/(Yb+Lu) \geq 100$		Выше фонового уровня накопления элементов-индикаторов
II.2.1.ПП3 Полиэлементное загрязнение	• $Z_c \geq 32$ (по общепринятым градациям: Геохимия..., 1990; Касимов, 2012)	$\leq 32$	Низкий (неопасный)
		32-64	Низкий (умеренно опасный)
		64-128	Средний (опасный)
		128-256	Высокий (очень опасный)
		$\geq 256$	Очень высокий (чрезвычайно опасный)
II.2.1.ПП4 Полиэлементная нагрузка	• $Z_p \geq 1000$ (по общепринятым градациям: Геохимия..., 1990; Касимов, 2012)	$\leq 1000$	Низкий (неопасный)
		1000-5000 (1000-2000; 2000-4000)	Средний (умеренно опасный; опасный)
		5000-10000 (4000-8000)	Высокий (очень опасный)
		$\geq 1000$	Очень высокий (чрезвычайно опасный)
II.2.1.ПП5 Формы нахождения радиоактивных элементов в виде микровключений (патент в соавторстве № 2453869; 2012г.)	•радиально-лучистое скопление треков $\geq 0,5$ «звезда»/см <sup>2</sup> ; •отдельные сгустки треков $\geq 0,3$ скопление/см <sup>2</sup>	$\leq 0,5$	Низкий
		$\geq 0,5$	Высокий
КОСВЕННЫЙ ПРИЗНАК			
II.2.1.КП1 Сопутствующие элементы, характеризующие воздействие производства	• $K_c \geq 1,5$ ; • $K_p \geq 3$ ; •ассоциации элементов; • $Th/U > 1,5$ ; • $(La+Ce)/(Yb+Lu) < 100$		Выше фонового уровня накопления элементов
II.2.1.КП2 Рассеянная форма радиоактивных элементов (патент в соавторстве № 2453869; 2012г.)	•равномерное распределение треков $\geq 1500$ трек/мм <sup>2</sup>	$\leq 1500$	Низкий
		$\geq 1500$	Высокий

Таблица 6 – Структура типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атомтехногенному воздействию на среду обитания с использованием критериев и признаков «минерально-вещественные характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова»

ТИП ВОЗДЕЙСТВИЯ II. АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ					
КРИТЕРИЙ II.3.1 МИНЕРАЛЬНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВА НЕРАСТВОРИМОГО ОСАДКА СНЕГОВОГО ПОКРОВА					
ПРЯМОЙ ПРИЗНАК					
Наименование признака	Параметры оценки экологического состояния				
	Параметр	Показатель	Уровень загрязнения		
II.3.1.ПП1 Типы техногенных частиц-индикаторов, характеризующие воздействие производства (патент в соавторстве №2229737; 2004 г.)	*доля техногенных частиц-индикаторов $\geq 10\%$	По доли техногенных частиц-индикаторов, %			
		$\leq 10$	Фоновый		
		10-15	Низкий (1-1,5 фонов)		
		15-25	Средний (1,5-2,5 фона)		
		25-35	Высокий (2,5-3,5 фона)		
II.3.1.ПП2 Техногенные минералы-индикаторы, характеризующие воздействие производства	*долевое содержание минералов-индикаторов $\geq 1\%$ ; *отношение доли минералов-индикаторов к доли кварца	Отношение минерал-индикатор/кварц			
		$< 0,1$	Низкий		
		0,1-1,0	Средний		
		1,0-2,5	Высокий		
		$\geq 2,5$	Очень высокий		
II.3.1.ПП3 Техногенные металлосодержащие микрочастицы-индикаторы, характеризующие воздействие производства	*содержание элементов, масс.%; *частота встречаемости от всех изученных частиц, %	Частота встречаемости, %			
		$< 1$	Низкий		
		$> 1$	Высокий		
КОСВЕННЫЙ ПРИЗНАК					
II.3.1.КП1. Соотношение группы природных и группы техногенных образований (частиц) (патент в соавторстве №2229737; 2004 г.)	*доля группы природных (ПЧ) и техногенных частиц (ТЧ), %	Доля ПЧ, %	Доля ТЧ, %	По доле группы ТЧ	
		$\geq 76$	$\leq 24$	Фоновый	
		65-75	25-35	Низкий (1-1,5 фона)	
		40-65	35-60	Средний (1,5-2,5 фона)	
		15-40	60-85	Высокий (2,5-3,5 фона)	
II.3.1.КП2-1. Сопутствующие минералы	*долевое содержание минералов $\geq 1\%$	$\leq 15$	$\geq 85$	Очень высокий ( $\geq 3,5$ фона)	
		-			
		-			
		-			
		-			
II.3.1.КП2-2. Соотношение кристаллических (минеральных) и аморфных фаз	*доля кристаллических (КФ) и аморфных фаз (АФ), %	Доля КФ, %	Доля АФ, %	По доле АФ	
		$\geq 93$	$\leq 7$	Фоновый	
		86-92	8-14	Низкий (1-2 фона)	
		72-86	14-28	Средний (2-4 фона)	
		58-72	28-42	Высокий (4-6 фона)	
II.3.1.КП3. Сопутствующие металлосодержащие микрочастицы, характеризующие производство	*содержание элементов, масс.%; *частота встречаемости, %	Частота встречаемости, %			
		$< 1$	Низкий		
		$> 1$	Высокий		

Для разработки основ типизации территорий также использованы методы и подходы геохимии окружающей среды (Методические рекомендации ИМГРЭ..., 1982; 1990; Линник и др., 1986; Геохимия..., 1990; Касимов и др., 1990; 1995; 2014; 2016) и экологической минералогии (Голева, 2007). Разработаны три критерия для типизации территорий: уровень пылевой нагрузки, геохимические, минерально-вещественные особенности состава нерастворимого осадка снегового покрова.

Ведущее значение в типизации урбанизированных территорий имеют минералого-геохимические признаки аэрозольного загрязнения для оценки экологического состояния. Признаки разделены на прямые и косвенные. Прямые признаки непосредственно указывают на формирование аэрозольного загрязнения, связанного с воздействием моно- или многопрофильных предприятий. Косвенные признаки свидетельствуют о предпосылках аэрозольного загрязнения. Следует отметить, что отдельные признаки основаны на запатентованных в соавторстве способах определения загрязнения снегового покрова техногенными

образованиями (патент № 2453869; 2012 г.) и радиоактивными компонентами (патент № 2229737; 2004 г.).

Все признаки характеризуются параметрами для оценки экологического состояния территорий по уровню загрязнения. Определение уровня загрязнения осуществляется по показателям: пылевая нагрузка ( $P_{п}$ ), эколого-геохимические ( $K_c$ ,  $K_p$ ,  $Z_c$ ,  $Z_p$ , отношения элементов) и статистические показатели, плотность распределения треков от деления радионуклидов, доленое содержание различных видов техногенных образований. Значения показателей обусловлены фактическими данными для изученной 21 урбанизированной территории. Уровни загрязнения по пылевой нагрузке ( $P_{п}$ ), полиэлементному загрязнению ( $Z_c$ ) и полиэлементной нагрузке ( $Z_p$ ) определяются показателями по общепринятым градациям (Геохимия..., 1990; Касимов и др., 2012), а также по предложенной градации для  $P_{п}$  относительно фона для юга Сибири. Необходимо добавить, что предложены и обоснованы параметры оценки экологического состояния территорий по уровню загрязнения техногенными образованиями и радионуклидами в нерастворимом осадке снегового покрова относительно фона.

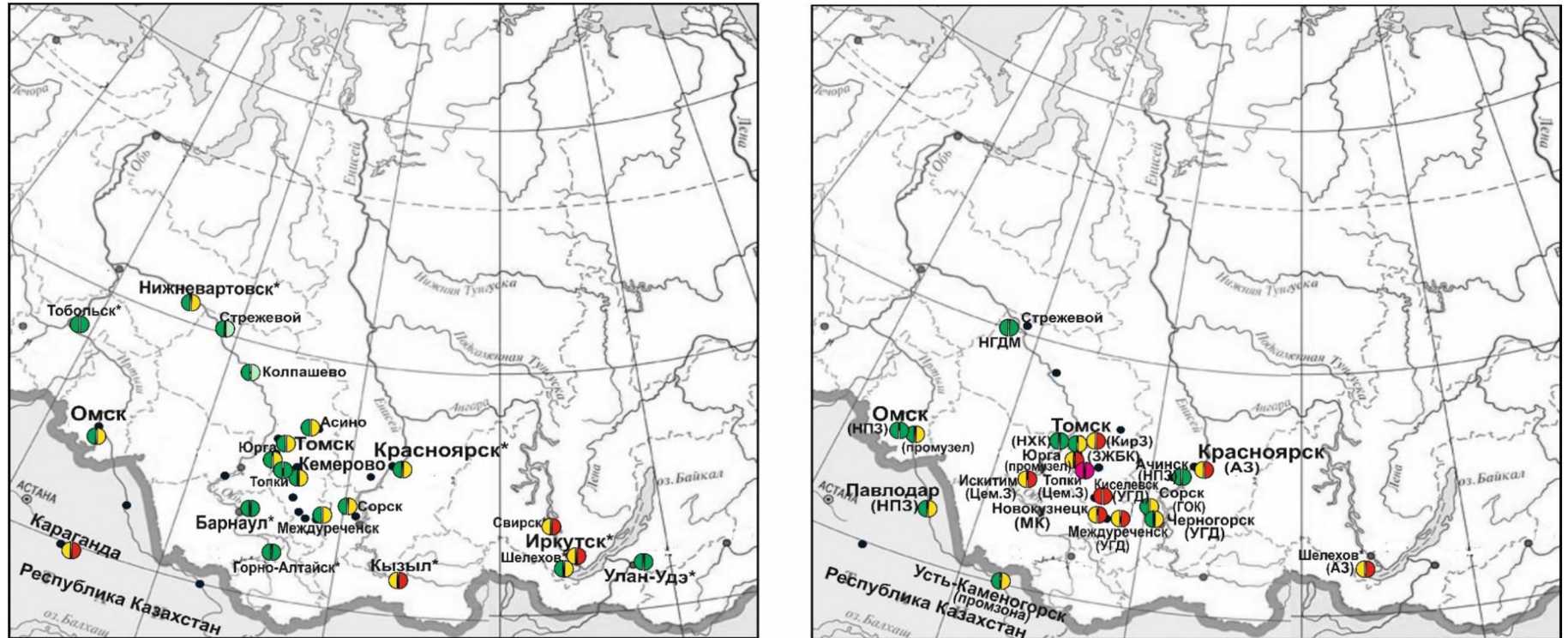
*Используя разработанные подходы к типизации, выполнена типизация 34 урбанизированных территорий юга Сибири, включая 17 городов и 34 зоны воздействия предприятий.* Рассмотрим некоторые фрагменты выполненной типизации (рисунок 16–17, таблица 7–8), полный вариант которой представлена в главе 7 диссертации. Данными для проведения типизации являются результаты, полученные при личном участии автора для 21 территории. Также использованы опубликованные материалы разными исследователями для 15 городов.

По критерию «промышленно-функциональное назначение города» установлено, что основную группу составляют монопрофильные промышленные города (18 из 34 изученных городов), из которых 11 городов являются моногородами и представляют собой крупные промышленные центры, например, угледобывающей, цементной или металлургической промышленности. Группа многопрофильных городов с развитой инфраструктурой различных отраслей промышленности представлена 12 городами. По критерию «численность городского населения» среди рассматриваемых 34 городов распространенными являются малые, в сумме девять городов, также выделено семь средних и семь крупных, три больших, шесть крупнейших городов и два города-миллионника.

В результате типизации территорий с использованием критерия «уровень пылевой нагрузки» и одноименных прямого и косвенного признаков установлено наличие большой группы городов (10 городов) и зон воздействия предприятий (18 предприятий) со средним уровнем загрязнения относительно фона (рисунок 7, 16).

Проведение типизации территорий по критерию «геохимические характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова» с использованием прямых признаков позволило сформировать «атмогеохимический портрет урбанизированной территории». Города и зоны воздействия предприятия отчетливо разделяются по специфичному техногенному геохимическому спектру элементов и по элементам-индикаторам в нерастворимом осадке снегового покрова, соответственно (таблица 7–8).





ГОРОДА

ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Численность населения		Условные обозначения	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● исследуемые территории</li> <li>□ административный центр</li> <li>□ границы области</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Топки &lt; 50 тыс. чел.</li> <li>Юрга 50-100 тыс. чел.</li> <li>Ачинск 100-250 тыс. чел.</li> <li>Караганда 250-500 тыс. чел.</li> <li>Томск 500-1000 тыс. чел.</li> <li>Омск &gt;1000 тыс. чел.</li> </ul>	<p>Уровень загрязнения и опасности по пылевой нагрузке (мг/(кв.мхсут.)) (градации по Геохимия..., 1990; Касимов и др., 2012)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● низкий (100-200), неопасный (&lt;200)</li> <li>● средний (250-450), умеренно-опасный (200-300), опасный (300-500)</li> <li>● высокий (450-850), очень опасный (500-800)</li> <li>● очень высокий (&gt;850), чрезвычайно опасный (&gt;800)</li> </ul>	<p>Уровень загрязнения относительно фона по пылевой нагрузке (мг/(кв.мхсут.))</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● около фоновый (&lt;20)</li> <li>● низкий (20-60)</li> <li>● средний (60-240)</li> <li>● высокий (240-600)</li> <li>● очень высокий (&gt;600)</li> </ul>

Рисунок 16 – Типизация урбанизированных территорий юга Сибири по критерию «Уровень пылевой нагрузки» (\* – литературные данные: г.Красноярск: Стримжа и др., 2012; г.Иркутск: Рогова и др., 2002; г.Кызыл: Кара-Сал, 2012; Мананков, Кара-Сал, 2013; г.Шелехов, г.Свирск: Холодова и др., 2016; Grebenshchikova et al., 2017, г.Барнаул: Хвостов, 2007; г.Горно-Алтайск: Ситникова, 2018; г.Улан-Удэ: Жамбалова, 2018; Нижневартовск: Пожитков и др., 2020; Тобольск: Тигеев и др., 2021; Московченко и др., 2021; сокращения: УГД – угледобывающее предприятие, НГДМ – нефтегазодобывающее месторождение, НПЗ – нефтеперерабатывающий завод, НХК – нефтехимический комбинат, ЦемЗ – цементный завод, МК – металлургический комбинат, АЗ – алюминиевый завод, КирЗ – кирпичный завод, ЗЖБК – завод по производству железобетонных конструкций, ГОК – горно-обогатительный комбинат)

Таблица 7 – Типизация урбанизированных территорий юга Сибири по прямому признаку «техногенная геохимическая специализация» (фрагмент)

Тип воздействия - I. Промышленно-урбанизированное освоение		Тип воздействия - II. Аэрозольное загрязнение		
Критерий - I.1 Промышленно-функциональное назначение	Критерий - I.2 Концентрация промышленных предприятий	Критерий - II.2.1 Геохимические характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова		
		Прямой признак - II.2.1.ПП1 Техногенная геохимическая специализация		
Группа городов	Группа городов	Город	Основная отрасль промышленности	Техногенная геохимическая специализация
I.1.3 Многопрофильный промышленный город	I.2.3 С высокой концентрацией предприятий	Омск	Химическая, нефтеперерабатывающая, авиакосмическая, машиностроительная, металлообрабатывающая	La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Sc, Br, Hf, Pr, Nd, Y, Zr, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, U, Cr, V, Sb, Hg, Zn, Pb, Al, P, Ti, Mo, Ni
		Томск	Машиностроение, нефтехимическая, строительная	Na, Zn, Sb, Cu, As, W, Mo, Ni, Bi, Hg, Br, U, Th, P3Э
		Кемерово	Химическая, в т.ч. производство кокса	Li, Al, Na, Sr, Ba, Cs, Hf, La, Ce, Sm, Ta, Yb, Th, U
		Красноярск	Космическая, алюминиевая, машиностроение, химическая	V, Ni, Ti, Co, W, Be, Mo, Cu, Fe, Sn, Cd, Mn (Стримжа и др., 2012)
		Павлодар	Нефтеперерабатывающая, химическая, цветная металлургия (алюминиевая)	Cd, Be, Sr, Mo, Mn, Cu, V, Zn, Co, Pb, Ni, Cr (Ажаев, 2007)
I.1.2 Монопрофильный промышленный город (моногород*)	I.2.2 Со средней концентрацией предприятий	Кызыл	Деревообрабатывающая, производство стройматериалов	Zn, Pb, Cu, Mn, Co, Cd, As, Hg, Ni (Кара-сал, 2012; Тас-оол и др., 2016)
		Чита	Теплоэнергетическая, авиационная	Zn, Cd, Pb, Cu (Бондаревич и др., 2018)
		Юрга*	Машиностроение, ферросплавное производство	Fe, Co, Ba, Sr, Hg, Sc, Rb, Cs, La, Hf, Ce, Ta, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Th, U
I.1.2 Монопрофильный промышленный город (моногород*)	I.2.1 С низкой концентрацией предприятий	Междуреченск*	Угледобывающая	Hg, Sr, Ba, Ni, V, Li, Ti, P, U, Th, Ta, Nb и P3Э
		Сорск*	Горнодобывающая, обогащательная	Mo, Cu, Na, Mg, Al, Si, K, Fe, Ti, Cr, Mn, Sr, Nb, Sn, Ag, Cd, Ba, U, P3Э
		Асино	Деревообрабатывающая	U, Hg, P3Э
		Стрежевой	Нефтегазодобывающая, нефтеперерабатывающая	Na, Br, Mg, Se, V, Bi

По прямым признакам «полиэлементное загрязнение» и «полиэлементная нагрузка», установлено что, наиболее характерными для юга Сибири являются города (до 60% от изученных) и зоны воздействия предприятий (до 45% от изученных) со средним уровнем загрязнения и опасной экологической ситуацией.

По признакам «формы нахождения радиоактивных элементов» отчетливо выделяются предприятия ядерно-топливного цикла, в зонах воздействия которых формируется высокий уровень загрязнения радионуклидами, определяемый по плотности микровключений в виде «звезд» в нерастворимом осадке снега.

В результате типизации по критерию «минерально-вещественные характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова» с использованием прямых признаков разделены зоны воздействия предприятий по специфичным видам техногенных образований в нерастворимом осадке снегового покрова (таблица 8). По минерально-вещественным признакам выделена большая группа городов (до 80% из изученных) и зон воздействия предприятий (до 45%) со средним и высоким уровнем загрязнения техногенными образованиями, отражающие воздействие функционирующих производств (рисунок 17).

Таким образом, разработана и выполнена типизация урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания на основе данных об уровне пылевой нагрузки и о минералого-геохимических особенностях состава аэрозолей, осевших в снеговом покрове, с учетом техногенных факторов для определения экологической обстановки.

Таблица 8 – Типизация урбанизированных территорий юга Сибири с использованием критериев и прямых признаков «геохимические и минерально-вещественные особенности состава нерастворимого осадка снегового покрова»

Город	Предприятие	Тип воздействия - II.Аэрозольное загрязнение			
		Критерий - II.2.1 Геохимические характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова	Критерий - II.3.1 Минерально-вещественные характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова		
		II.2.1.ПП2. Элементы-индикаторы	II.3.1.ПП1 Типы техногенных частиц-индикаторов	II.3.1.ПП2 Техногенные минералы-индикаторы	II.3.1.ПП3 Техногенные металлосодержащие микрочастицы-индикаторы
Омск	НПЗ	La, Ce, V, Cr, Al	–	лизардит, цеолит	La-Ce-O; Fe-Cr-Mn; V-Ni-Cu-Zn-Fe; Fe-Cr-Cu-Ni; Fe, Si, Al, O); цериевые фосфаты (La, Ce, Nd, Pr, P, Th, O); Ce-Zr
	промузел (машиностроение и металлообработка)	Al, Ti, V, Ni, Mo, W	металлические микросферулы	оксиды железа	Cu-Fe-Sn-Ti; Cr-Fe-Mo-V-W; Ce-Fe-Ti
	ТЭЦ (каменные угли Экибастузского бассейна)	Al, Ba, Sc, Y, Zr, Sm, Gd, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит	Ba-S-O; Zr-Si-Al-O; иттриевые фосфаты (Y, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, U, P, O); U-O
Томск	НХК	Br*1	полиэтилен-подобные (микропластик)	-	–
	ГРЭС-2 (каменные угли Кузнецкого бассейна и природный газ)	Zn, Cd, Hg, W, As, U, Sb, лантаноиды	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит, кристобалит	Zn-Fe-S; Fe-As-S; W-Ti-Fe; Cu-Sn-Co-Zn-Fe; La-Ce-сферулы (La, Ce, P, Si, Al, O); Y-Gd-Dy-сферулы (Y, Gd, Gy, P, Si, Al, Fe, O); цериевые фосфаты (La, Ce, Nd, P, O)
	Заводы ЖБК	W, Bi, Fe, Ca	цементная пыль	волластонит	Fe-S; Fe-As-S; Fe-Cu-S; Fe-O; Ca-O-C; Ti-Fe-Ni; Fe-Cr-Mn
	Кирпичные заводы	Na, W	кирпичная крошка	-	W-O
Северск	ТЭЦ (каменные угли Кузнецкого бассейна)	U, Th, лантаноиды, Ta, Ba, Hg	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит	Ba-Zn-S; Ba-S-O; Ba-S-O; U-O
	ЯТЦ*	Lu, F, Zn, U, Cs*1 (U,Th, Ba, Sr, Y, Nb, Zr, PЗЭ*2)	–	графит*1	U-O*1
Стрежевой	НГДМ (от города)	V, Br	сажеподобные	–	–
Кемерово	ГРЭС (каменные угли Кузнецкого бассейна)	U, Th, La, Ce, Sm, Sr, Ba, Cs, Al	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит	Ba-S-O; цериевые фосфаты (La, Ce, Nd, Pr, Sm, Th, P, O)
Новокузнецк	Металлургический комбинат	Fe, Mn, Zn, Mg, Cd, V	шлак металлургический, металлические микросферулы	оксиды железа	Fe-O; Fe-Mn-Mg-O; Fe-Zn-Pb-Mn
Топки	Цементный завод	Ca	цементная пыль, микросферулы (кальций-содержащие)	браунмиллерит, хатрурит, кальцит	Ca-O-C
		Ca, Hg			

для объектов ТЭС микросферулы – алюмосиликатные, смешанные алюмосиликатно-железистые, железистые, а для ТЭС Томска и Северска доп. лантан-цериевые и иттриевые; \*<sup>1</sup> – Язиков, 2006; \*<sup>2</sup> – Артамонова, 2014

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований сделаны следующие выводы:

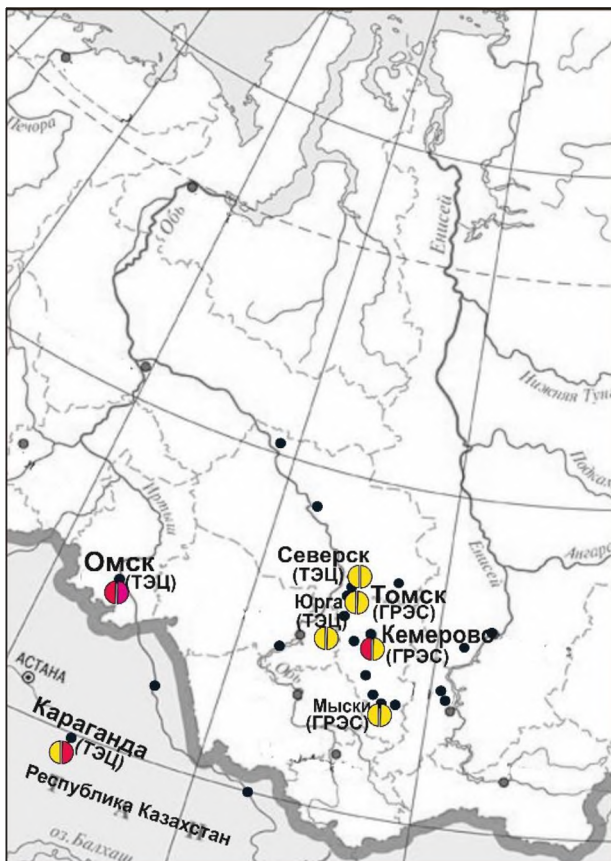
1. Уровни пылевой нагрузки на урбанизированные территории юга Сибири изменяются от 8,7 до 1054 мг/(м<sup>2</sup>·сут.), что обусловлено спецификой функционирующих отраслей производства. В соответствии с предложенной градацией по пылевой нагрузке относительно фона (<20 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) на многих территориях установлены средний (60–240 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) и высокий (240–600 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)) уровни загрязнения.

Таблица 8 (Окончание)

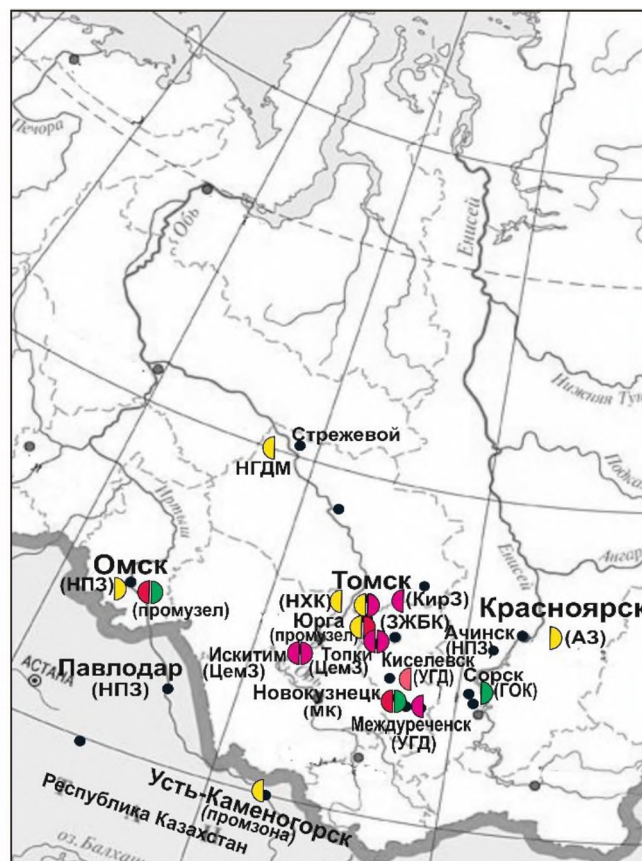
Город	Предприятие	Тип воздействия - II.Аэрозольное загрязнение			
		Критерий - II.2.1 Геохимические характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова	Критерий - II.3.1 Минерально-вещественные характеристики состава нерастворимого осадка снегового покрова		
		II.2.1.ПП2. Элементы-индикаторы	II.3.1.ПП1 Типы техногенных частиц-индикаторов	II.3.1.ПП2 Техногенные минералы-индикаторы	II.3.1.ПП3 Техногенные металлосодержащие микрочастицы-индикаторы
Междуреченск	Угледобывающие (Кузнецкий бассейн)	Hg, U, Ta, Sb, La, Ce и др. P3Э	угольные частицы	–	цериевые фосфаты (La, Ce, Nd, P, O); иттриевые фосфаты (Y, Gd, Dy, Er, Th, P, O)
Киселевск		Hg, лантаноиды			
Юрга	Промузел (машиностроительный, ферросплавный)	Fe, Cr, Co	шлак металлургический, металлические микросферулы	оксиды железа, кремний	Fe-S; As-Fe-S; Cu-Fe-S; Fe-O; Ca-Fe-O (в шлаке); Fe-Si; Cu-Sn-Fe; Mn-Fe; Fe-Cr-Ni-Bi; Fe-Mn-Cr
	ТЭЦ (каменные угли Кузнецкого бассейна)	U, Th, Ba, Sr, La, Sm, Tb, Yb, Lu, Ce, Nd, Sc, Cs	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит	Ba-S-O; цериевые фосфаты (La, Ce, Nd, Sm, Pr, P, O), Hg-S
Мыски	ГРЭС (каменные угли Кузнецкого бассейна)	U, Th, Hg, Co, Sr, La, Yb	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит, оксиды железа	–
Павлодар	НПЗ	V, Hg, Cr	–	–	Cr-Fe-S; Hg-S; Cr-Fe
Ачинск		V, Ni	–	–	Sn-Ni-Fe-O; Ni-Cr-Fe-O; Sn-Ni-Fe-O; Ni-Cr-Fe-O
Усть-Каменогорск	Металлургические заводы	U, Zn, Ta, Sb, Au	шлак металлургический	н.д.	Zn-Cu-S; Zn-S; Pb-S; Zn-Cu-O; Cu-O; Bi-O; Pb-Fe-Sb, U-O
Караганда	ТЭЦ (каменные угли Экибастуз. бас., мазут)	V, Hg, Br, Sc и др. P3Э	микросферулы, частицы выбросов ТЭС	муллит, оксиды железа	Ba-S-O с примесью Br; U, Nb, Ta
Черногорск	Угледобывающие (Минусинск. бассейн)	Sb, Cr, Co	угольные частицы	н.д.	н.д.
Сорск	ГОК	Mo, Cu	–	молибденит	Cu-Fe-S; Mo-S; Fe-Cu-O
Красноярск	Алюминиевый завод	Al, F**	–	корунд, криолит	Al-O; Al-Na-F
Новосибирск (Девятова, 2009)	ТЭЦ-2 (бурые угли Канско-Ачинского бассейна)	Ge, Sb	микросферулы (алюмосиликатные)	н.д.	н.д.
	Оловокомбинат	Sn	н.д.	н.д.	Sn-O; Sn-Fe; Sn-As-Fe-Al-Si
Иркутск (Филимонова, 2017)	Ново-Иркутская ТЭЦ (бурые угли Иркутского бассейна)	Si, Fe, Mg, Mn, B	микросферулы	муллит, магнетит, аморф. кварц, анкерит	Ca-O; Mg-O
Шелехов	Алюминиевый завод	F, Al (Филимонова и др., 2017)	н.д.	корунд (Федорова, 2008)	Al-O; Al-Na-F
Братск		F, Al (Янченко и др., 2013)			
Саяногорск		F, Al (Давыдова, 2014)			
Свирск (Холодова, 2016)	Отвалы бывшего мышьяковистого завода	As	н.д.	эвхроит, касситерит, битумы, графит, асбест	н.д.

Уровни накопления широкого спектра химических элементов (до 60 элементов; от Li до U), включая малоизученные в геохимическом плане редкоземельные элементы, в нерастворимом осадке снегового покрова многократно (порой в сотни раз) превышают фоновые показатели. Выявлены геохимические особенности нерастворимого осадка снегового покрова на 21 урбанизированной территории, которые отражают специфику геохимического воздействия функционирующих предприятий и объектов теплоэнергетики. Это доказано исследованиями в зонах техногенеза, по результатам которых в нерастворимом осадке снегового покрова определены геохимические индикаторы воздействия предприятий с различной промышленной специализацией (теплоэнергетические, нефтеперерабатывающие, металлургические, машиностроительные и металлообрабатывающие, нефтегазовые, горнопромышленные, стройиндустрии).





**ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**



**ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Численность населения		Условные обозначения	
		Уровень загрязнения техногенными образованиями-индикаторами	
		Доля техногенных частиц-индикаторов, %	
		Отношение минерал-индикатор/кварц, ед	
● исследуемые территории	Топки < 50 тыс. чел.	□ фондовый (<10)	■ низкий (<0,1)
□ административный центр	Юрга 50-100 тыс. чел.	■ низкий (10-15)	■ средний (0,1-1,0)
□ границы области	Ачинск 100-250 тыс. чел.	■ средняя (15-25)	■ высокий (1,0-2,5)
	Караганда 250-500 тыс. чел.	■ высокий (25-35)	■ очень высокий (>2,5)
	Томск 500-1000 тыс. чел.	■ очень высокий (>35)	
	Омск >1000 тыс. чел.		

Рисунок 17 – Типизация урбанизированных территорий юга Сибири по уровню загрязнения техногенными образованиями с использованием прямых признаков «типы техногенных частиц-индикаторов» и «типы минералов-индикаторов» (сокращения – см. рис. 16)

На урбанизированных территориях юга Сибири в основном формируются средний и высокий уровни техногенного полиэлементного загрязнения с опасной и очень опасной экологической ситуацией.

По данным многолетнего мониторинга (2007–2015 гг.) в многопрофильном промышленном городе Томске выявлено, что особенности пространственно-временной динамики структуры геохимических ореолов редкоземельных элементов, урана и тория, ртути и брома, ореолов пылевой нагрузки определяются изменениями в промышленной и транспортной инфраструктуре города, включая модернизацию производства и эффективность природоохранных мероприятий.

Сформированный при промышленном техногенезе минерально-вещественный состав нерастворимого осадка снегового покрова характеризуется соотношением техногенных (39–90%) и природных (10–61%) образований. Техногенные образования при этом представлены микроминеральными фазами,

металлосодержащими микрочастицами, включая микросферулы, прочими компонентами промышленной и строительной пыли, в комплексе отражающие воздействие предприятий в зависимости от их производственной специализации. Предложен показатель для определения техногенных источников аэрозолей как отношение минерал-индикатор/кварц в нерастворимом осадке снегового покрова.

2. Определена специфика воздействия предприятий теплоэнергетики в городах среди других источников загрязнения в зимний сезон. В зонах воздействия ТЭС установлены в основном средние уровни пылевой нагрузки относительно фона (60–240 мг/(м<sup>2</sup>·сут.)). В ближней зоне (до 1,3 км) пылевая нагрузка в 2 раза выше таковой для дальней зоны (1,3–2,3 км) воздействия объектов теплоэнергетики, у которых высота дымовых труб составляет 100–150 м. Геохимическая специфика состава нерастворимого осадка снегового покрова определяется высокими уровнями накопления ассоциации редких элементов (лантаноиды, Y, Sc, U, Th, Nb, Hf, Ta, Ge, Ga, Zr) и Hg относительно фона. Характерными формами проявления редкоземельных элементов являются микрочастицы близкие по составу к цериевым и иттриевым фосфатам. Специфика минерально-вещественного состава заключается в наличии микросферул алюмосиликатного, алюмосиликатно-железистого, железистого и редкоземельного (лантан-цериевого, иттриевого) составов, в уровнях отношения муллит/кварц.

На примере ГРЭС-2 г. Томска, в период многолетнего мониторинга загрязнения снегового покрова (2009–2018 гг.) в зоне преобладающего массопереноса выбросов, установлена пространственно-временная изменчивость уровня пылевой нагрузки и геохимических особенностей состава нерастворимого осадка снегового покрова с учетом преобразований в топливном балансе.

3. На территории Томской области, по результатам эколого-геохимического районирования в региональном масштабе, в нерастворимом осадке снегового покрова установлены средние уровни концентрации макро- и микроэлементов, которые выше фона в 2–14 раз. Сильноконтрастные техногенные геохимические ореолы лантаноидов, урана и тория, отдельных тяжелых металлов приходятся на южные и юго-восточные районы области, которые также отличаются повышенной пылевой нагрузкой за счёт воздействия промышленного техногенеза Томск–Северской агломерации и местных котельных. Техногенные геохимические ореолы брома и ртути проявляются на территории юг-юго-восточных и центральных районов области, связанные с воздействием местных котельных, преимущественно, работающих на природном газе. Северные районы, где функционируют нефтегазодобывающие предприятия, отличаются высокими уровнями накопления Na в нерастворимом осадке снегового покрова.

4. Разработаны подходы к типизации урбанизированных территорий юга Сибири по атмотехногенному воздействию на среду обитания для оценки экологического состояния. Основой типизации являются критерии и признаки оценки промышленно-урбанизированного освоения и аэрозольного загрязнения территории. Оригинальность типизации заключается в предложенных прямых и косвенных минералого-геохимических признаках аэрозольного загрязнения, которые разработаны на основе изучения уровня пылевой нагрузки и состава

нерастворимого осадка снегового покрова. В рамках типизации предложены параметры оценки экологического состояния территорий, которые определяют уровень загрязнения химическими элементами, техногенными образованиями и радионуклидами, содержащихся в нерастворимом осадке снегового покрова.

Выполнена типизация 34 урбанизированных территорий юга Сибири, включая 17 городов и 34 зоны воздействия предприятий с использованием собственного фактического материала и литературных данных. В результате выделены и охарактеризованы территории в регионе с низким, средним, высоким и очень высоким уровнем аэрозольного загрязнения в зависимости от условий техногенеза.

Таким образом, в работе решена актуальная научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение, заключающаяся в теоретическом обосновании оценки влияния атмосферных аэрозолей на качество атмосферного воздуха на урбанизированных территориях юга Сибири с разными условиями техногенеза для изучения качества жизни населения и экологического состояния городов с использованием методов геохимии окружающей среды и экологической минералогии. Выполненные исследования атмосферных аэрозолей выступают в роли инструмента при принятии технологических решений для обеспечения экологически безопасного проживания населения, включающие природоохранные рекомендации, стратегии развития городов и регионов, прогнозирование техногенного воздействия на окружающую среду и совершенствование методов экологического мониторинга.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Основные публикации в рецензируемых изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и (или) Web of Science, и из перечня ВАК Минобрнауки России*

1. **Talovskaya, A. V.** Geoecological assessment of the Tomsk-Seversk industrial agglomeration territory based on the results of studying dust aerosol depositions / **A. V. Talovskaya** // Journal of mining institute. – 2006. – V. 167. – № 2. – Pp. 128–131.
2. Osipova, N. A. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia / N. A. Osipova, E. A. Filimonenko, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov // Human and Ecological Risk Assessment. – 2015. – V. 21. – Pp. 1664–1685.
3. **Talovskaya, A. V.** Assessment of aerotechnogenic pollution: case study in the vicinity of coal-fired and oil-fired local boiler houses in Tomsk region / **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov, T. S. Shakhova, E. A. Filimonenko // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2016. – V. 327. – № 10. – Pp. 116–130.
4. Shakhova, T. S. Mercury in the dust aerosols in the vicinity of petrochemical complex (for example, in Pavlodar, Kazakhstan) / T. S. Shakhova, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov, E. A. Filimonenko, E. E. Lyapina // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2016. – V. 327 – № 12. – Pp. 16–25.
5. Adil'Bayeva, T. E. Estimation of aerotechnical pollution in the vicinity of the thermal power plant (Трр-3) in Karaganda according to snow survey (Republic of Kazakhstan) / T. E. Adil'Bayeva, **A. V. Talovskaya**, Y. G. Yazikov // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2017. – V.4. – Pp. 237–247.
6. Osipova, N. A. Coal producer effect on snow cover pollution at adjacent urban territories (case study of Mezhdurechensk) / N. A. Osipova, A. A. Bykov, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2017. – V. 328. – № 12. – Pp. 36–46.

7. **Talovskaya, A. V.** Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov, E. A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T. S. Shakhova // *Environmental Technology (United Kingdom)*. – 2018. – V. 39 (18). – Pp. 2288–2303.
8. Belan, B. D. Comparative estimation of geochemical activity of the atmosphere according to the ratio of compositions of different near-ground aerosol fractions at the Fonovaya observatory in Autumn 2016 / B. D. Belan, D. V. Simonenkov, **A. V. Talovskaya**, M. P. Tentyukov, A. V. Fofonov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2018. – V. 31. – № 1. – Pp. 36–42.
9. Sukhodolov, A. P. Comparative assessment of emission products distribution from Siberian Aluminum Plants / A. P. Sukhodolov, N. I. Ianchenko, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov // *Ecology and Industry of Russia*. – 2018. – V. 22. – № 3. – Pp. 51–55.
10. Osipova, N. A. Ecological risks caused by toxic elements impact on ambient air determined in the study of the snow cover in Tomsk GRES-2 area / N. A. Osipova, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov [et al.] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2018. – V. 329. – № 4. – Pp. 54–69.
11. Belan, B. D. Estimation of the effect of meteorological and orographic conditions on aerosol contamination of the snow cover in the south of Tomsk region / B. D. Belan, V. S. Buchelnikov, V. F. Lysova, D. V. Simonenkov, **A. V. Talovskaya**, M. P. Tentyukov, E. G. Yazikov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2018. – V. 31. – № 6. – Pp. 656–664.
12. **Talovskaya, A. V.** Macroelement and mineral-phase composition of particulate matter in the impacted area of cement production plant based on snow cover study (Kemerovo Region) / **A. V. Talovskaya**, D. A. Volodina, E. G. Yazikov // *Chemistry for sustainable development*. – 2019. – V. 27. – № 2. – Pp. 180–189.
13. **Talovskaya, A. V.** Mercury pollution in snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia) / **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov, N. A. Osipova, E. E. Lyapina, V. V. Litay, G. Metreveli, J. Kim // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2019. – V. 12 – № 4. – Pp. 132–147.
14. Belosheykina, A. V. Ecological and geochemical assessment of Sorsk mining and processing plant soil cover (Republic of Khakassia) / A. V. Belosheykina, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2020. – V. 331. – № 1. – Pp. 44–53.
15. Buchelnikov, V. S. Analysis of the content of chemical elements in aerosols using data from Passive Sampling at Fonovaya Observatory / V. S. Buchelnikov, **A. V. Talovskaya**, E. G. Yazikov, D. V. Simonenkov, M. P. Tentyukov, B. D. Belan // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2020. – V. 33. – № 5. – Pp. 490–495.
16. **Таловская, А. В.** Мониторинг пылеаэрозолей территории Южного округа г. Томска / **А. В. Таловская** // *Вестник ТГУ*. – 2003. – № 3 (V). – С. 214–216.
17. **Таловская, А. В.** Локальные геохимические наблюдения пылеаэрозолей в пределах городской и пригородной зон / **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков // *Вычислительные технологии*. – 2006. – Т. 11. – № S5. – С. 46–52.
18. Рихванов, Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л. П. Рихванов, Е. Г. Язиков, С. И. Арбузов, **А. В. Таловская** [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 128–136.
19. **Таловская, А. В.** Мониторинг потоков аэрозольных выпадений в фоновых районах Томской области / **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, М. В. Панченко, В. С. Козлов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2007. – Т. 20. – № 6. – С. 517–523.
20. Рихванов, Л. П. Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения / Л. П. Рихванов, Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская** [и др.] // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2008. – № 1. – С. 29–37.
21. **Таловская, А. В.** Мониторинг потоков аэрозольных выпадений в фоновых районах Томской области в зимний период 2006 и 2007 гг. / **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, М. В. Панченко, В. С. Козлов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – Т. 21. – № 6. – С. 498–503.



22. **Таловская, А. В.** Геохимический состав пылеаэрозолей на территории полигона «Томский» Томской области / **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков // Вычислительные технологии. – Т. 13. – №. S3. – 2008. – С. 30–36.
23. **Таловская, А. В.** Геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории г. Томска / **А. В. Таловская** // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – №. 6. – С. 519–524.
24. Янкович, Е. П. Оценка индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения Томска по данным геохимического состава пылеаэрозольных выпадений / Е. П. Янкович, Н. А. Осипова, Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская** // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2011. – №. 5. – С. 67–74.
25. Рапуга, В. Ф. Анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снегового покрова в окрестностях Томска и Северска / В. Ф. Рапуга, **А. В. Таловская**, В. В. Коковкин, Е. Г. Язиков // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – №. 1. – С. 74–78.
26. Филимоненко, Е. А. Особенности вещественного состава пылевых атмосферных выпадений в зоне воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса (на примере Томской ГРЭС-2) / Е. А. Филимоненко, **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – №. 10. – С. 896–901.
27. **Таловская, А. В.** Ртуть в пылеаэрозолях на территории г. Томска / **А. В. Таловская**, Е. А. Филимоненко, Н. А. Осипова, Е. Г. Язиков // Безопасность в техносфере. – 2012. – №. 2. – С. 30–34.
28. Филимоненко, Е. А. Минералогия пылевых аэрозолей в зоне воздействия промышленных предприятий г. Томска / Е. А. Филимоненко, **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, Ю. В. Чумак, С. С. Ильенко // Фундаментальные исследования. – 2013. – Т. 3. – №. 8. – С. 760–765.
29. **Таловская, А. В.** Экспериментальные и численные исследования длительного загрязнения снегового покрова ураном и торием в окрестностях теплоэлектростанции (на примере Томской ГРЭС-2) / **А. В. Таловская**, В. Ф. Рапуга, Е. А. Филимоненко, Е. Г. Язиков // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – №. 8. – С. 642–646.
30. Язиков, Е. Г. Состав пылеаэрозолей и оценка экологического риска в зоне влияния предприятий нефтегазового комплекса / Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская**, Н. А. Осипова, Е. А. Филимоненко // Газовая промышленность. – 2013. – №. 12. – С. 82–85.
31. Язиков, Е. Г. Радиоэкологическая оценка территории на основе изучения атмосферных пылевых выпадений методом осколочной радиографии / Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская** // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2013. – №. 5. – С. 57–61.
32. **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.
33. **Таловская, А. В.** Исследование состава пылевого аэрозоля на фоновой и городской станциях наблюдения в Томском регионе зимой 2012/13 г. / **А. В. Таловская**, Д. В. Симоненков, Е. А. Филимоненко, Б. Д. Белан, Е. Г. Язиков, Д. А. Рычкова, С. С. Ильенко // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – №. 11. – С. 999–1005.
34. **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.
35. Литау, В. В. Оценка пылевого загрязнения территории г. Омска по данным снеговой съемки / В. В. Литау, **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, А. Д. Лончакова, М. И. Третьякова // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – №. 3. – С. 256–259.
36. **Таловская, А. В.** Микроэлементный состав снежного покрова в окрестностях угольных и газовых котельных как показатель экологичности используемого топлива / **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, Е. А. Филимоненко, Н. А. Осипова, Т. С. Шахова // Безопасность в техносфере. – 2017. – Т. 6. – №. 3. – С. 3–12.

37. Шахова, Т. С. Химические элементы в почвах и почвогрунтах в окрестностях нефтеперерабатывающих заводов (на примере г. Омск, Ачинск, Павлодар) / Т. С. Шахова, Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская** // Вестник ЗабГУ. – 2018. – Т. 24. – №. 4. – С. 67–75.
38. Осипова, Н. А. Риски ингаляционного влияния токсичных микроэлементов в окрестностях локальных котельных / Н. А. Осипова, Е. А. Филимоненко, **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, Т. С. Шахова // Безопасность в техносфере. – 2018. – №. 3. – С. 10–18.
39. **Таловская, А. В.** Динамика загрязнения снегового покрова микроэлементами в окрестностях теплоэлектростанции (на примере Томской ГРЭС-2) / **А. В. Таловская**, Е. Г. Язиков, Е. А. Филимоненко // Вестник ЗабГУ. – 2019. – Т. 25. – № 2. – С. 44–53.

*Патенты РФ и свидетельства о государственной регистрации базы данных*

40. Способ определения загрязнённости снегового покрова техногенными компонентами: Патент № 2229737 Россия, МПК7 G 01 V 9/00 / Е. Г. Язиков, А. Ю. Шатилов, **А. В. Таловская**; заявитель и патентообладатель Томский политех. ун-т. – № 2002127851; заявл. 17.10.2002; опубл. 27.05.2004.
41. Способ определения загрязнённости снегового покрова радиоактивными компонентами: Патент № 2453869 Россия, МПК G 01 T 91/169 / Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская**, А. Ф. Судыко, Е. А. Филимоненко; заявитель и патентообладатель Томский политех. ун-т. – № 2011100193/28; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.06.2012.
42. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620754 / заявитель и патентообладатель Томский политех. ун-т. заявл. / Е. Г. Язиков, **А. В. Таловская**, Е. А. Филимоненко, В. В. Жуков – № 2016620468; 18.04.2016; регистр. 07.06.2016. Database of Dust Load and Element Composition of Snow Insoluble Phase.
43. Устройство для экспонирования пассивных пробоотборников аэрозолей: Патент на полезную модель № 182043, Россия, МПК G 01 N 1/22 / Б. Д. Белан, Д. В. Симоненков, **А. В. Таловская**, М. П. Тентюков, Е. Г. Язиков; заявитель и патентообладатель Институт оптики атмосферы СО РАН – № 2018108099; заявл. 05.03.2018; опубл. 01.08.2018.

*Монографии*

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