

На правах рукописи



**Тентюков Михаил Пантелеймонович**

**ЭКОГЕОХИМИЯ РАЙОНОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ  
БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ И ЯМАЛА**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина» на кафедре геологии Института естественных наук и в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН в лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии

**Научный консультант:** доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Юдович Яков Эльевич

**Официальные оппоненты:**

**Страховенко Вера Дмитриевна**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ФГБУН ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких элементов и экогеохимии

**Удачин Валерий Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт минералогии УрО РАН (ФГБУН ИМ УрО РАН, г. Миасс), временно исполняющий обязанности директора Института

**Опекунов Анатолий Юрьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ, г. Санкт-Петербург), Институт наук о Земле, профессор кафедры геоэкологии и природопользования

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО УГГУ, г. Екатеринбург)

Защита состоится «01» марта 2017 г. в 15.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) по адресу: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте <http://portal.tpu.council/914/worklist>

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.г.-м.н.



Л.В. Жорняк

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Особенности структуры ресурсно-сырьевой базы обусловили одностороннюю топливно-энергетическую специализацию субарктических регионов и, в частности, полуострова Ямал и Большеземельской тундры. Формирование топливодобывающей инфраструктуры в этих районах сопровождается загрязнением химическими элементами. Отмечается, что химические элементы, в отличие от многих органических и минеральных загрязняющих соединений, не распадаются и не разлагаются, а только меняют уровень содержания и(или) формы нахождения в зависимости от условий внешней среды. Включаясь в миграцию и биологический круговорот, химические элементы неизбежно загрязняют окружающую среду. Анализ техногенных преобразований субарктических тундр, связанных с химическим загрязнением, осложняется слабой изученностью криогенных процессов, контролирующих формирование геохимических аномалий в снежном покрове и мерзлых почвах, а также недостаточной информацией об особенностях их последующей трансформацией при сходе снега и оттаивании почв. Очевидно, что для территорий, где устойчивый снежный покров сохраняется более 200 дней в году, результаты летних исследований техногенных преобразований целинных тундр должны рассматриваться с учетом того, что зимние процессы влияют на весь процесс в целом. Заметим, что имеется крайне мало обобщающих исследований, направленных на изучение аэрогенных геохимических аномалий, возникающих при взаимодействии техногенных эмиссий с различными видами депонирующей поверхности (снежный покров, растительность, почвы). Поэтому эколого-геохимический анализ химического воздействия топливодобывающих комплексов на природную среду Субарктики – весьма актуальная проблема.

Основы геохимических исследований промышленных территорий заложены научными трудами Ю. Е. Саета с сотрудниками, создавшими новое направление прикладной геохимии – *«геохимия окружающей среды»*. Эти исследования базируются на концептуальных положениях о техногенезе, выдвинутых А. Е. Ферсманом, и геохимии ландшафтов, разработанных Б. Б. Польновым, получившие в дальнейшем значительное развитие в трудах А. И. Перельмана, М. А. Глазовской, Н. С. Касимова.

Геохимия техногенеза и окружающей среды разрабатывалась в трудах И. А. Авессаломовой, В. А. Алексеенко, В. С. Аржановой, Н. В. Барановской, В. Г. Волковой, А. Я. Гаева, Г. И. Гривы, А. Н. Геннадиева, Н. Ф. Глазовского, Н. Д. Давыдовой, В. В. Добровольского, П. В. Елпатьевского, А. Л. Ковалевского, Е. М. Коробовой, В. К. Лукашева, М. Ю. Лычагина, А. М. Межибор, Д. В. Московченко, В. И. Осипова, А. Ю. Опекунова, Ю. И. Пиковского, Л. П. Рихванова, О. А. Самоновой, А. П. Садова, Н. П. Солнцевой, Е. П. Сорокиной, В. Д. Страховенко, Т. Т. Тайсаева, В. Т. Трофимова, Е. Г. Язикова и других ученых.

В данной работе эколого-геохимический анализ связан, главным образом, с изучением ответных реакций равнинных тундр на загрязнение, возникающее при нефте-, газо-, угледобыче. **Объектами исследования** послужили природные и техногенные ландшафты Большеземельской тундры и Ямала, а **предметом исследования** – процессы миграции и аккумуляции химических элементов-примесей (ЭП) в депонирующих компонентах ландшафтов (растения, почва, донные отложения, снежный покров).

**Цель и задачи исследований.** Основная цель работы – установление эмпирических закономерностей распределения ЭП в равнинных ландшафтах Большеземельской тундры и Ямала и выявление индикационных признаков техногенной трансформации целинных тундр для разработки технологий мониторинга и геохимических способов защиты природной среды тундр с учетом промышленной специализации территорий. В соответствии с целью исследований решали следующие **задачи**:

1. Установить закономерности распределения ЭП в почве и растениях целинных и освоенных тундр и выявить геохимические особенности миграции и концентрации ЭП в зоне влияния нефте-, угле-, газодобычи;

2. Выявить эколого-геохимические особенности техногенной трансформации тундровых ландшафтов в районах нефтедобычи и установить связанные с ними индикационные признаки ответных реакций природной среды на загрязнение; оценить информативность индикационного комплекса признаков в качестве критерия выделения прогнозных территорий экологического неблагополучия;

3. Проанализировать особенности проявления барьерообразующих факторов и связанных с ними геохимических барьеров в мерзлотных ландшафтах; показать прикладные аспекты применения геохимических барьеров для охраны окружающей среды Субарктики;

4. Исследовать особенности формирования аэрогенных геохимических аномалий при взаимодействии аэрозольного стока с различными типами подстилающей поверхности (почва, растительность, снежный покров);

5. Разработать новые способы мониторинга атмосферного загрязнения промышленных территорий в районах холодного климата.

**Фактический материал.** Основу диссертации составляют материалы ландшафтно-геохимических исследований (включая результаты стационарных наблюдений на буровой «Харьяга-26»), проводившихся автором в Большеземельской тундре и на п-ове Ямал с 1983 по 1992 г. Кроме того, в диссертации представлены теоретические исследования аэротехногенного загрязнения ландшафтов и результаты полевых наблюдений (2005-2012 гг.) с использованием оригинального метода пассивного сбора сухих выпадений в пределах деятельного слоя воздуха. Его апробацию проводили на ключевых участках в Малоземельской тундре (северо-восточная оконечность Ненецкой гряды), в таежных ландшафтах Среднего Тимана и на водораздельных участках левобережья р. Сысола. В последних, наряду с летними исследованиями, проводили и зимние. В ходе исследований (1983-1992 гг.) автором отобраны пробы растительности (2160), почв и почвообразующих пород (927), донных наилок (35), коллоидные образования гидроксидов железа (72), поверхностных вод (44) и снеговой воды (45). При разработке новых технологий пассивного мониторинга аэрозольного загрязнения поверхности (2005-2012 гг.) проанализировано более 200 проб аэрозольного стока, определено содержание сульфат-иона в 1500 пробах снега; проведены наблюдения за динамикой послойной изменчивости интегральных геохимических параметров (водородного показателя, удельной электропроводности) в снежной толще (700 проб снеговой воды), осуществлены количественный химический анализ послойных образцов снега (120) и измерение удельной активности радионуклидов в стоке аэрозолей (100). При этом анализ результатов и их обобщение проводились при участии автора.

Концентрации химических элементов в золе растений и торфа, почвах, сухих остатках вод были определены методом приближенно-количественного атомно-эмиссионного спектрального анализа в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), НПО «Севзапгеология» (Санкт-Петербург), Бронницкой ГГЭ (г. Бронницы, Московская обл.), Ухтинской ГРЭ (г. Ухта), ИГЕМ РАН (г. Москва). Рентгеноструктурный анализ глинистых минералов осуществлен в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Определение подвижных форм железа в почвах выполнено в лаборатории экологии почв ИЭРЖ УрО РАН (Екатеринбург). Ответные реакции, возникающие в растениях при углеводородном загрязнении, выявлялись с помощью ЭПР-спектроскопии, дифференциально-термографического метода в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Химический анализ проб снеговой воды, мерзлотной верховодки, проб озерной и речной воды проведен в Республиканском центре СЭН (г. Сыктывкар), гидрохимической лаборатории

Экологического научно-исследовательского стационара (г. Лабытнанги) и экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Удельную активность радионуклидов в сухих выпадениях измеряли на сцинтилляционном гамма-бета спектрометрическом комплексе с программным обеспечением «Прогресс» в лаборатории миграции радионуклидов и радиохимии (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар). Все анализы проводили в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам, с использованием стандартных образцов сравнения, и контролировались параллельными определениями, а также данными внешнего и внутреннего контроля.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежат постановка задач эколого-геохимических исследований, проведение и анализ материалов ландшафтно-геохимического опробования тундровых почв, растений, поверхностных вод и донных отложений, снежного покрова, а также организация экспериментов при изучении аэрозольного загрязнения ландшафтов с использованием оригинального метода пассивного сбора сухих выпадений в пределах деятельного слоя воздуха.

### **Научная новизна работы**

1. На основе многолетних исследований равнинных ландшафтов Большеземельской тундры и п-ова Ямал выявлены закономерности, отражающие распределение ЭП на кларковом (фоновом) уровне, а также отклонения этих закономерностей в условиях влияния нефте-, угле-, газодобычи.

2. Техногенная трансформация целинных тундр сопровождается образованием особой ландшафтной структуры, в пределах которой фиксируется определенный комплекс ответных реакций компонентов на химическое загрязнение, которые могут выступать геоиндикаторами изменений природной среды и служить основой разработки методических приемов оперативного прогнозного эколого-геохимического районирования территорий нефтегазодобычи для оптимизации природоохранных мероприятий.

3. Охарактеризованы основные барьерообразующие факторы в мерзлотных ландшафтах и связанные с ними геохимические барьеры. Представлен опыт создания искусственных геохимических барьеров для мониторинга и защиты тундр в районе нефтедобычи.

4. Установлено, что одним из механизмов закисления снега является морозное конденсирование кислотообразующих аэрозолей (в частности, диоксида серы) на поверхности ледяных кристаллов инея. Ранее иней, как источник кислотного загрязнения снежного покрова в промышленных районах, не учитывался и не рассматривался.

5. Разработана новая технология пассивного пробоотбора сухих выпадений в приземном слое воздуха, которая позволяет по-новому организовать геохимический и радиационный мониторинг промышленных территорий.

### **Защищаемые положения**

1. Геохимическая дифференциация микроэлементного фона Ямала и Большеземельской тундры определяется криогенезом, торфонакоплением, глеевым выщелачиванием и подзолообразованием. О каждом из этих процессов можно судить по особенностям распределения элементов-примесей индикаторных групп (литофилов, сульфофилов, сидерофилов).

2. При буровых работах и обустройстве скважин техногенная трансформация природной среды тундр проявляется на уровне элементарных ландшафтов и носит локальный характер. В условиях химического воздействия процесс сопровождается образованием особой ландшафтной структуры и формированием определенного комплекса ответных реакций компонентов окружающей среды на загрязнение.

3. В равнинных тундрах выявляется небольшое число классов геохимических барьеров как в природных, так и в техногенных условиях; создание на их основе

искусственных геохимических барьеров повышает эффективность геохимических мер защиты и мониторинга окружающей среды в районах промышленного освоения.

4. Вне зависимости от агрегатного состояния аэрозольного стока при его взаимодействии с подстилающей поверхностью (почвой, растительностью, снежным покровом) аэрогенные геохимические аномалии возникают в результате адгезии аэрозольных частиц, которой всегда предшествует адсорбция, а устойчивость сигнала аэрогенной аномалии обеспечивается удержанием частиц на поверхности за счет действия капиллярных сил конденсирующейся жидкости.

**Достоверность защищаемых положений** определяется большим объемом фактического материала, полученного современными методиками в сертифицированных аналитических лабораториях, а также корректной статистической обработкой геохимических данных, учитывающей метрологические особенности использованных аналитических методик и природную дисперсию концентраций химических элементов.

**Теоретическое и практическое значение работы** заключается в развитии теоретических представлений о закономерностях геохимических процессов, происходящих в ландшафтах криолитозоны и разработки природоохранных технологий. Полученные результаты имеют значение и для геохимических поисков полезных ископаемых, и для совершенствования эколого-геохимического мониторинга состояния природной среды Субарктики в районах нефте-газодобычи. Реализованные методологические принципы комплексной эколого-геохимической оценки состояния тундр в районах пионерного освоения Ямала и Большеземельской тундры позволили разработать практические приемы использования геохимических барьеров в качестве природоохранных мер. Результаты защищены четырьмя авторскими свидетельствами (в соавторстве). С использованием компьютерного моделирования и восстановления природных распределений элементов по неполно-определенным и усеченным выборкам апробированы статистические методы оценки неоднородностей пространственно распределенных данных (Программа «Ecolstat», автор-разработчик, д.г.м.-н., профессор Ю.А.Ткачёв, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН). Созданы информационно-вычислительные ресурсы для моделирования и экспериментально проверены способы усреднения результатов по неоднородным совокупностям данных с разной представительностью и различной погрешностью анализов, а также опробованы методы обработки аналитических результатов в условиях логнормального распределения с выделением и оценкой природных распределений. На примере специально подготовленных баз данных показаны области и границы применения этих методов в эколого-геохимических исследованиях и подготовлены рекомендации по организации мониторинга тундровых ландшафтов в зоне техногенеза. На основе анализа граничных геохимических эффектов, возникающих при взаимодействии аэрозольного стока с подстилающей поверхностью (почва, растения, снежный покров), выполнены эксперименты по изучению механизма взаимодействия аэрозольного стока с различными типами искусственной поверхности из химически инертных материалов. В итоге были созданы оригинальный способ пассивного сбора аэрозолей и сконструировано устройство для его реализации, признанные экспертизой Федерального института промышленной собственности (ФИПС) РФ пионерными. Разработанные на их основе изобретения позволяют по-новому организовать геохимический и радиационный мониторинг промышленных территорий. Инновации защищены 13 патентами Российской Федерации. Материалы диссертационной работы используются автором при проведении учебных занятий со студентами Сыктывкарского государственного университета.

**Публикации и апробация результатов работы.** Результаты исследований изложены в 107 научных публикациях, в том числе в двух монографиях, 43 статьях, из

которых 21 статья опубликована в рецензируемых журналах из списка ВАК, получены 13 патентов и четыре авторских свидетельства (в соавторстве) на изобретение.

Основные научные положения работы и защищаемые в диссертации тезисы обсуждались на 15 международных, российских и региональных конференциях по проблемам защиты и мониторинга окружающей среды, геохимии техногенеза, геохимии литогенеза, геохимии ландшафтов, геоинформационным технологиям в геологии в городах Архангельск (2006), Воркута (1989, 1994), Минск (1991), Екатеринбург (1994), Санкт-Петербург (2001), Москва (2002, 2006, 2012), Сыктывкар (2009, 2014), Томск (2007, 2010), Тюмень (2010, 2011), Copenhagen (2011). Кроме этого инновационные разработки экспонировались на конкурсах и выставках в Екатеринбурге (2012), Москве (2010, 2012), Сыктывкаре (2008, 2010, 2011).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Ее объем составляет 336 с., 68 табл. и 94 рис. Список литературы содержит 495 названий, том числе 75 работ зарубежных авторов. Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований и защищаемые положения, научная новизна полученных результатов, практическая ценность работы. Глава 1 «Экогеохимия тундровых ландшафтов: некоторые вопросы теории» посвящена теоретическим аспектам эколого-геохимического изучения мерзлотных ландшафтов. Глава 2 «Методы исследований» содержит описание методов, с помощью которых выполнялись ландшафтно-геохимические, биогеохимические, геокриологические и снеговедческие исследования. Показано аналитическое обеспечение исследований, отдельно приведено описание статистической обработки информации. Глава 3 «Характеристика природных условий» показывает особенности дифференциации геохимического фона Большеземельских и Ямальных тундр и распределение ЭП в почвах и растениях. *Выводы данной главы положены в основу первого защищаемого положения.* Глава 4 «Эколого-геохимический анализ техногенного преобразования тундр в районах промышленного освоения» посвящена комплексному эколого-геохимическому анализу техногенных преобразований целинных тундр в районах нефти, -газо, -угледобычи. *Результаты, освещенные в разделах 4.1.2, 4.1.4, 4.1.5 использованы при обосновании второго защищаемого положения, а в части раздела 4.1.2 – третьего; итоги разделов 4.1.1.4, 4.3.3, 4.4.2, применены в четвертом защищаемом положении.* Глава 5 «Эколого-геохимическая характеристика природных факторов барьерообразования и геохимические барьеры в равнинных тундрах» характеризует условия барьерообразования и основные классы геохимических барьеров в мерзлотных ландшафтах. *Результаты разделов 5.1.1, 5.2.1, 5.3.2.1 послужили основой для третьего защищаемого положения, а данные из раздела 5.4.1 – для четвертого.* Глава 6 «Опыт применения геохимических барьеров для защиты и мониторинга окружающей среды» представляет способы защиты и мониторинга окружающей среды с помощью искусственных геохимических барьеров, содержит описание оригинальных приемов пассивного пробоотбора аэрозолей и мониторинга аэрозольного загрязнения ландшафтов. *Результаты, приведенные в разделах 6.1, 6.2, применены в обосновании третьего защищаемого положения, а данные из раздела 6.3. – положены в основу четвертого.* Заключение содержит основные выводы и задачи дальнейших эколого-геохимических исследований топливодобывающих комплексов в равнинных тундрах.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность научному консультанту доктору геолого-минералогических наук, действительному члену РАЕН, Уральской академии геологических наук и Нью-Йоркской академии наук, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, геохимику Я. Э. Юдовичу. Автор благодарен руководителю кафедры геологии СыктГУ, академику РАН, проф. А. М. Асхабову за поддержку и внимание к работе. Автор благодарен всем своим коллегам, принявшим участие в обсуждении основных разделов работы, оказавшим

моральную поддержку и помощь в проведении полевых и лабораторных исследований, обработке и оформлении результатов и выражает свою искреннюю признательность: Т. П. Майоровой, А. Б. Анохину, А. П. Братцеву, З. И. Воеводовой, И. И. Шуктомоной, В. М. Гляд, В. С. Дедкову, А. В. Коковкину, В. В. Каневу, Г. М. Втюрину, М. В. Гецен, Г. С. Назаровой, С. Ю. Кожевникову, Ж. А. Лыткиной, С. И. Лютоеву, Т. Н. Музакке, М. С. Подорову, Н. Г. Рачковой, В. В. Камбалову, Н. А. Трофимовой, А. И. Таскаеву, Ю. А. Ткачёву, А. М. Тентюкову, А. М. Тентюковой, В. В. Ситниковой, Т. С. Сытарь, Е. Р. Фрайтеру, О. П. Сыромолотовой, А. В. Яковину. Автор благодарит проф. Л. П. Рихванова за ценные замечания, а также сотрудников кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ и ее руководителя проф. Е. Г. Язикова за стимулирующее внимание к диссертации, что во многом способствовало её завершению. С глубокой признательностью автор вспоминает советы и консультации А. И. Перельмана (научного руководителя кандидатской диссертации автора), полученные при обсуждении отдельных результатов ландшафтно-геохимических исследований на Ямале и в Большеземельской тундре.

Структура автореферата оформлена по защищаемым положениям.

### ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

С разработкой программного комплекса «Ecolstat» (автор-разработчик, д.г.м.-н., профессор Ю.А.Ткачёв, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН) открылись новые возможности статистической обработки данных геохимического опробования и сопоставления их с полученными ранее, что позволило выдвинуть **первое защищаемое положение**.

**1. Геохимическая дифференциация микроэлементного фона Ямала и Большеземельской тундры определяется криогенезом, торфонакоплением, глеевым выщелачиванием и подзолообразованием. О каждом из этих процессов можно судить по особенностям распределения элементов-примесей индикаторных групп (литофилов, сульффилов, сидерофилов).**

**Оценка распределения индикаторных групп микроэлементов в равнинных тундрах.** С использованием специально подготовленных баз данных по результатам геохимического опробования выполнено раздельное изучение отдельных групп элементов-примесей, близких по своим геохимическим свойствам и условно независимых друг от друга. Так, в группе *типичных катионогенных элементов-литофилов* (Sr, Ba) в условиях торфонакопления информативен барий, который может образовывать подвижные органо-минеральные комплексы. Контрастность его аномалий в торфе нередко определяется генезисом торфа (моховой, осоковый, травяной). Образование аномалий Sr часто приурочено к надмерзлотному иллювиальному максимуму, что может свидетельствовать о присутствии сезонных криогенных карбонатных форм данного элемента. В группе *типичных анионообразующих литофилов* (B, P) хорошим показателем бионакопления является фосфор. В группе *металлов-сульфофилов* (Pb, Cu, Zn) элементами-антагонистами в торфонакоплении являются Zn и Cu. Если для первого распределение в торфяной толще имеет регрессивно-аккумулятивный тип, то для меди – прогрессивно-элювиальный. Появление надмерзлотного иллювиального максимума для Pb часто свидетельствует о его сорбции глинистой фракцией почв. При техногенной активизации подзолообразования (за счет увеличения кислотообразующих аэрозолей в приземном воздухе) и аэрогенном оглинивании почв из группы *катионо- и анионообразующих литофилов* с постоянной валентностью (Ga, Sc, Y) определенную информативность имеет распределение Ga, а из



сидерофилов – железо. В условиях хорошей дренированности почв уровни накопления химических элементов зависят преимущественно от элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля. Для почв с затрудненным дренажем в распределении химических элементов отмечается в основном аккумулятивно-элювиально-иллювиальный тип, который развивается на фоне выраженного в различной степени оглеения. Для целей мониторинга при глеевом выщелачивании из *катионо- и анионогенных элементов с переменной валентностью* (Ti, Zr, Sn, V, Mo, Nb) наиболее информативны элементы, способные связываться в прочные соединения с органическим веществом почв (Ti, V, Mo). В группе *элементов-сидерофилов* (Fe, Co, Cr, Mn, Ni) помимо железа хорошим индикатором окислительных условий является Mn. Относительное увеличение в почвенном профиле содержания Mn в зоне ожелезнения свидетельствует об окислительно-восстановительной зональности.

**Региональные особенности микроэлементного фона равнинных тундр.** Для регионального сравнения особенностей миграции ЭП в равнинных тундрах Ямала и Большеземельской тундры теоретической моделью послужили представления о трех парагенных элементных ассоциациях: элементах-литофилах (Lit), элементах-сульфофилах (Slf), элементах-сидерофилах (Sid). В первую группу вошли Sr, Ba, Ga, Ti, для которых общими являются их сравнительно высокий кларк в литосфере и в разной степени выраженная тенденция к образованию ионных связей; последнее хорошо объясняет их геохимию в ландшафтах – высокую растворимость некоторых солей, их белый цвет, щелочно-кислотные свойства растворов. Вторая группа включает Cu, Zn, Pb, отличающиеся повышенным сродством к сере и тенденцией к образованию ковалентных связей. Третью группу образовали Mn, Co, Ni, Cr; эти элементы-примеси имеют увеличенное сродство к кислороду и образуют металлические связи.

Оценка совпадения теоретических и эмпирических частот распределения ЭП, выполненная с использованием критерия  $\chi^2$ , показала, что как для целинных, так освоенных тундр распределение ЭП в почвенно-растительном покрове в большинстве не может быть аппроксимировано логарифмически нормальным законом распределения (рис. 1-3).

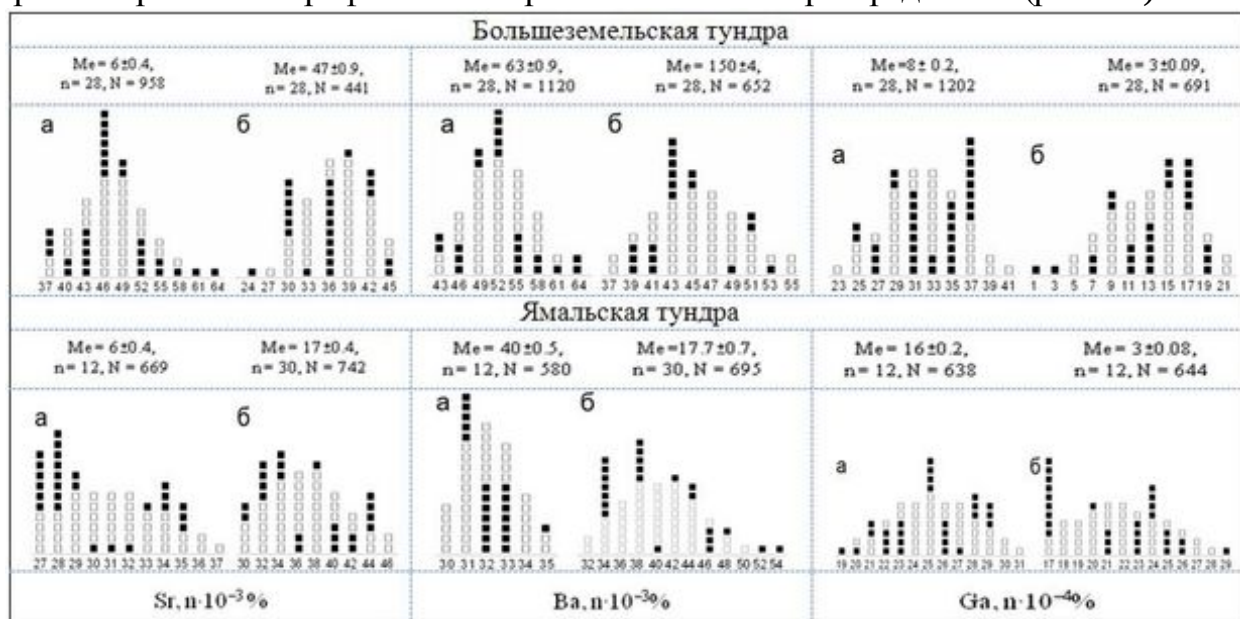


Рисунок. 1. Гистограммы (темные квадраты – эмпирические, светлые – теоретические) распределения элементов-литофилов в: а) почвах, б) растениях (Me – медиана, n – число выборок, N – кол-во проб).

Гистограммы часто осложнены сильным эксцессом и имеют значительную дисперсию. Характерно, что и в Большеземельских, и в Ямальских тундрах для сульфофильных и литофильных ЭП фиксируется преимущественно полимодальное распределение в выборках, что может свидетельствовать о нескольких источниках их поступления в ландшафты, один из которых – удаление (сток) аэрозолей из приземной атмосферы.

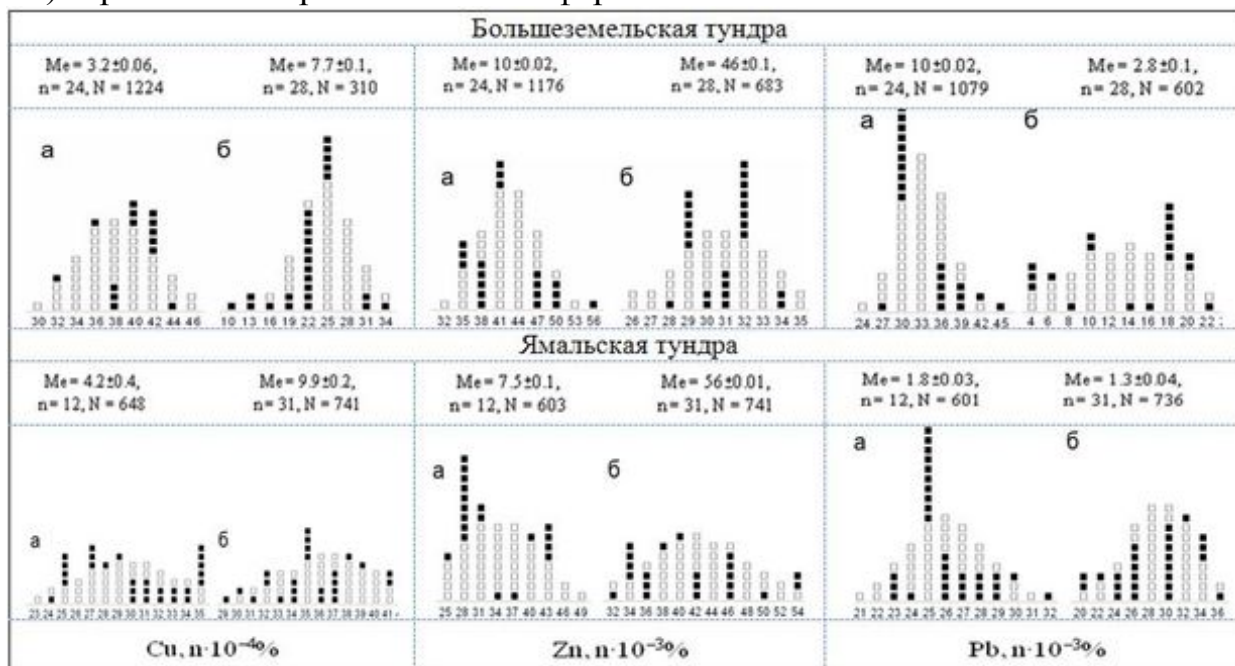


Рисунок 2. Гистограммы (темные квадраты – эмпирические, светлые – теоретические) распределения элементов-сульфофилов в: а) почвах, б) растениях.

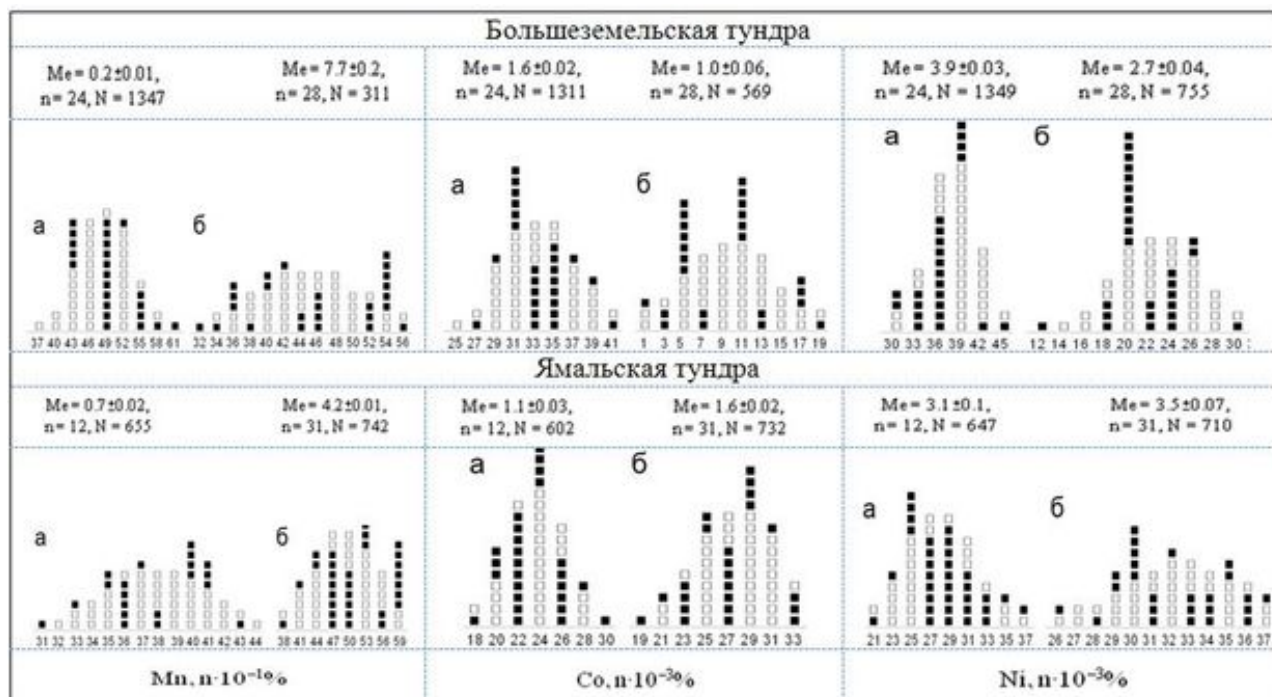


Рисунок 3. Гистограммы (темные квадраты – эмпирические, светлые – теоретические) распределения элементов-сидерофилов в: а) почвах, б) растениях.

В целом, полученные результаты показывают, что вне зависимости от промышленной специализации территории (добыча нефти или угля) основным

источником загрязнения целинных тундр, существенно расширяющим зону техногенного воздействия, является привнос дополнительных объемов химически активных веществ. При их поступлении в атмосферу увеличивается аэрозольная масса в приземном воздухе и растет атмосферное загрязнение поверхности. Предполагается, что из-за аэротехногенного загрязнения ландшафтов значения средних содержаний ЭП в почвенном покрове условно фоновых и техногенных участков колеблются в очень широких пределах и характеризуются высокими дисперсиями. Поэтому часто распределение ЭП в выборках полимодальное либо близко к бимодальному, что свидетельствует о влиянии аэротехногенных источников, подавляющих сигнал природного фона. Подобное обстоятельство следует учитывать при организации мониторинга состояния окружающей среды в районах промышленного освоения.

**Оценка биогеохимической активности жизненных форм тундровых растений.** Изучение концентрационных функций тундровых растений Ямала показало следующее. Для типичных катионогенных литофилов (Ba, Sr) отношение Ba/Sr ниже в растениях северных тундр, чем в южных. Группа катионо- и анионогенных химических элементов с постоянной валентностью (Sc, Y, Ga, Ge) в целом отличается низкими содержаниями в тундровой растительности. Ti, Zr, Sn, V, Nb, Mo, относящиеся к группе катионо- и анионогенных химических элементов с переменной валентностью, в тундровой растительности накапливаются неодинаково. Для V и Mo характерны относительно высокие значения КБП, что обусловлено их биофильностью. Для Ti, Zr, Nb различные уровни накопления обусловлены разницей геохимического фона. Для Sn отмечается относительное накопление в растениях южных тундр Ямала, в частности, в травах.

Для Большеземельской тундры такой избирательности элемента не выявлено. Бор и фосфор (типичные анионогенные литофилы) активно концентрируются в растениях. Для бора характерно накопление в кустарниках и кустарничках, из трав концентраторами бора являются плауны; фосфора больше содержится в кустарниках. Для металлов-сульфофилов (Cu, Zn, Pb) распределение в тундровой растительности во многом контролируется условиями среды, определяющими активность миграции этих элементов в почве. Сидерофилы группы железа (Cr, Mn, Co, Ni) отличаются неравномерным распределением в растениях тундр. В целом можно отметить, что геохимический фон растений варьирует сильнее, нежели почв.

В районах промышленного освоения техногенные эмиссии и активный ветровой перенос теллурической пыли инициируют увеличение аэрозольной массы в приземной атмосфере и активизирует осаждение пыле-аэрозольных частиц, что ведет к изменению биогеохимической активности растений и усилению колебаний биогеохимического фона. Расчеты среднего коэффициента накопления ( $\bar{A}_x$ ), выполненного по отношению к кларку литосферы по Григорьеву (2003) отдельно для ассоциаций геохимически близких химических элементов: литофилов, сидерофилов, сульфофилов, позволил обнаружить, возможно, региональную биогеохимическую специализацию растений Ямала, проявляющуюся в преимущественном накоплении литофильных и сульфофильных элементов (рис. 4).

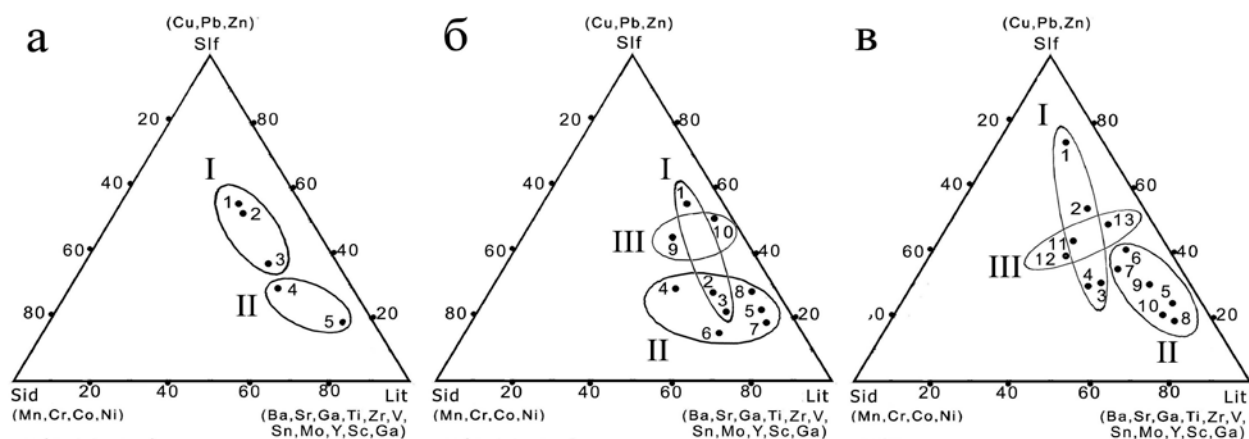


Рисунок. 4. Относительные пропорции распределения (в % к  $\sum A_x$ ) сидерофильных, литофильных и сульфобильных (Sid–Lit–Slf) элементов в золе растительности: **а)** Западно-Ямальской низинной северной субарктической тундры, усл. обозн.: 1 – сем. Березовые, 2 – сем. Ивовые, 3 – сем. Мятликовые, 4 – сем. Осоковые, 5 – сем. Хвощевые; **б)** Центрально-Ямальской возвышенной средней субарктической тундры, усл. обозн.: 1 – сем. Березовые, 2 – сем. Ивовые, 3 – сем. Вересковые, 4 – сем. Осоковые, 5 – сем. Астровые, 6 – сем. Розоцветные, 7 – сем. Хвощовые, 8 – сем. Плауновые, 9 – мхи рода Сфагнум, 10 – лишайники рода Цетрариевые; **в)** Центрально-Ямальской возвышенной южной субарктической тундры, усл. обозн.: 1 – сем. Березовые, 2 – сем. Ивовые, 3 – сем. Вересковые, 4 – сем. Сосновые, 5 – сем. Мятликовые, 6 – сем. Осоковые, 7 – сем. Розоцветные, 8 – сем. Хвощовые, 9 – сем. Бобовые, 10 – сем. Гречишные, 11 – мхи рода Сфагнум, 12 – мхи рода Политрихум, 13 – лишайники рода Кладония. Доп. обозн.: Жизненные формы растений: I –кустарники, II –травы, III – мхи и лишайники.

В зависимости от жизненных форм растений в тундрах Ямала наиболее активными растениями-концентраторами литофилов являются травы (мятликовые и хвощевые), а сульфобильных – кустарниковые формы растений (березовые и ивовые), а также мхи (сфагновые) и лишайники (цетрариевые), из трав только осоковые. Вместе с тем, анализ коэффициентов биологического поглощения ( $A_x$ ), характеризующих интенсивность вовлечения химических элементов в биологический круговорот, показал определенную избирательность в накоплении ЭП растениями различных семейств. Для *Западно-Ямальских низинных северных субарктических тундр* к элементам энергичного накопления ( $A_x > 10n$ ) относятся Zn, Nb, P, Mn, Cu. При этом самые высокие значения  $A_x$  зафиксированы для Zn и P (от 13.1 до 41.3); у фосфора значения  $A_x$  ниже – до 14.9, а для ниобия, марганца и меди интервал величин  $A_x$  лежит в пределах 11.1–16.1. Для *Центрально-Ямальских возвышенных средних и южных тундр* группу элементов энергичного накопления образуют Zn, P, Mn. При этом самые высокие значения  $A_x$  вновь отмечены для цинка. Коэффициент  $A_{Zn}$  в семействе березовых (*Betula nana* L.) для средних и южных тундр составляет 73.5 и 113.2 соответственно. Возможно, это связано с высокой биофильностью цинка, который к тому же легко мигрирует в кислых почвах. В целом состав ассоциаций со значениями  $A_x$  ( $10-n$ ) очень меняется от выборки к выборке. Отмечается, что для низинных северных субарктических тундр, занимающих приморские террасы в пределах распространения казанцевских отложений, спектр элементов со значениями  $A_x > 10n$  значительно шире, нежели для возвышенных средней и южной тундр Центрального Ямала, развивающихся на салехардских отложениях и грубообломочных породах палеозоя.



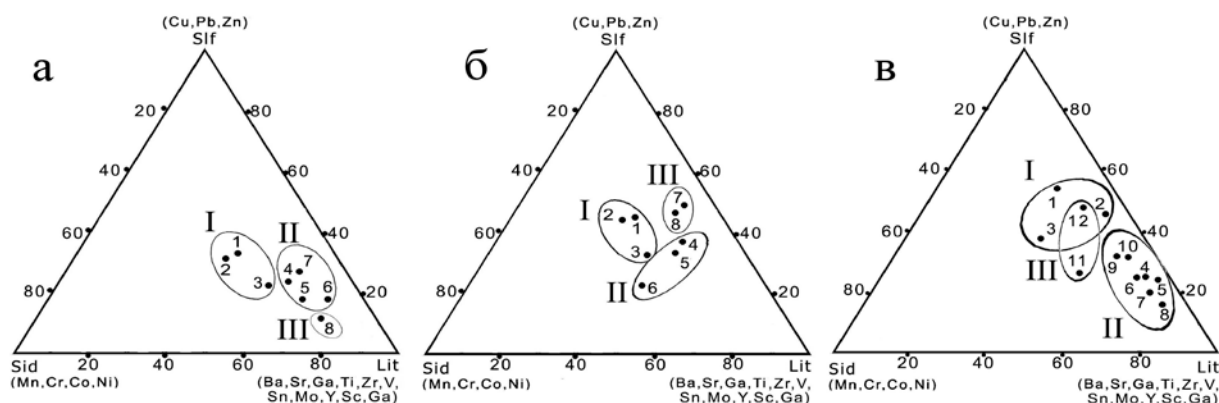


Рисунок. 5. Относительные пропорции распределения  $\sum A_x$  сидерофильных, литофильных и сульфофильных (Sid–Lit–Slf) элементов в золе растительности: **а)** Лая-Колвинского междуречья: усл. обозн.: 1 – сем. Березовые, 2 – сем. Ивовые, 3 – сем. Вересковые, 4 – сем. Мятликовые, 5 – сем. Осоковые, 6 – сем. Астровые, 7 – сем. Хвоцевые, 8 – сем. Политриховые; **б)** Верхне-Колвинского озерного района: усл. обозн.: 1 – сем. Березовые, 2 – сем. Ивовые, 3 – сем. Вересковые, 4 – сем. Мятликовые, 5 – сем. Осоковые, 6 – сем. Розоцветные, 7 – мхи рода Сфагnum, 8 – мхи рода Политрихум; **в)** Воркутинской тундры: 1 – сем. Березовые, 2 – сем. Ивовые, 3 – сем. Вересковые, 4 – сем. Мятликовые, 5 – сем. Астровые, 6 – сем. Хвоцевые, 7 – сем. Бобовые, 8 – сем. Гречишные, 9 – сем. Норичниковые, 10 – сем. Гвоздичные, 11 – мхи рода Политрихум, 12 – лишайники рода Пальтигера. Доп. обозн.: Жизненные формы растений: I –кустарники, II – травы, III – мхи и лишайники.

Аналогичные расчеты выполнены для Большеземельской и Воркутинской тундр (рис. 5), которые показали преимущественно литофильный состав биогеохимического фона для долин малых водотоков Лая-Колвинского междуречья и старопромышленного угольного района Воркутинской тундры, для которых характерны значительные площади обнаженных почв. Для растений, развивающихся в зоне распространения реликтовых торфяников (Верхне-Колвинский озерный район), отмечается увеличение содержания сидерофильных элементов и существенное уменьшение литофильной составляющей, доля сульфофильных элементов изменилась мало. В целом, для растительности Большеземельской тундры самые высокие средние кларки накопления фиксируются у растений семейств Березовые, Ивовые, Вересковые. Из трав активное накопление ЭП наблюдаются для растений семейства Мятликовые и Осоковые.

Для растений Воркутинской тундры характерно наличие избыточности фосфора, что мы рассматриваем как результат влияния сжигания углей. Известно, что фосфор относится к элементам средней углефилности (Юдович, Кетрис, 2005). Поэтому, учитывая промышленную специализацию Воркутинского промышленного района, можно полагать, что одним из основных источников поступления фосфора в растения является сжигание угля. Механизм его поступления в ландшафты из приземной атмосферы связан с сухим осаждением его соединений в составе аэрозольного стока. Наряду с фосфором, активно накапливаются также Zn и Mn. Особенно сильно Zn поглощается карликовой березой (*Betula nana* L.) ( $A_x = 41.0$ ) и растениями семейства Ивовые (*Salix lanata* L.) ( $A_x = 13.9$ ). Mn очень активно поглощается кустарниковыми растениями (семейства Березовые, Ивовые, Вересковые). Марганца мало в травах – фоновые значения  $A_x = 0.4-0.8$ , что связано с малой подвижностью марганца в нейтральной и слабощелочной средах тундровых луговин.

В итоге, сопоставление биогеохимической активности жизненных форм тундровых растений (кустарников, трав, мхов, лишайников) выявило систематическую (биоморфную) специализацию трав в преимущественном накоплении анионогенных элементов, тогда как кустарники, мхи и лишайники характеризуются увеличенным содержанием катионогенных элементов. Формирование аномалий катионогенных элементов во мхах и лишайниках идет по безбарьерному типу, а их контрастность зависит от степени шероховатости и формы листовых пластинок мхов и вегетативной поверхности лишайников (кустистые, накипные).

**Оценка флуктуаций геохимического фона** в районах нефте-, газодобычи показала, что особенности распределения элементов-примесей в тундровых почвах и растениях техногенных участков связаны с дополнительным импульсом миграции вещества, что обусловлено: **1)** увеличением слоя сезонного оттаивания многолетнемерзлых почво-грунтов при механическом повреждении напочвенного покрова; **2)** приростом объемов транзитного стока мерзлотной верховодки и техногенным заболачиванием ландшафтов; **3)** активизацией суффозии, солифлюкции и оврагообразованием; **4)** техногенными выбросами в приземную атмосферу и связанным с ним повышением массы кислотообразующих аэрозолей; **5)** формированием техногенного микрорельефа и усилением снегонакопления на промышленных площадках. Следует заметить, что для целинных тундр, в которых слой сезонного протаивания смыкается с многолетней мерзлотой, колебания фона больше зависят от типа почв и характера растительности, и меньше – от степени увлажнения.

Таким образом, многолетняя мерзлота как геохимический фактор, предопределяя особенности геохимических обстановок и условий, играет важную роль в мобилизации и миграции химических элементов при техногенном преобразовании мерзлотных ландшафтов. При этом сезонные флуктуации природного и техногенного геохимического фона имеют разные механизмы. При организации геохимического мониторинга они должны учитываться раздельно: как в отношении выбора объектов-индикаторов, так и геохимических показателей природного и техногенного фона.

Одна из ключевых задач геоэкологии – поиск индикационных признаков техногенного преобразования компонентов окружающей среды в районах промышленного освоения. Ее решение применительно к субарктическим тундрам позволило выдвинуть **второе защищаемое положение.**

**2. При буровых работах и обустройстве скважин техногенная трансформация природной среды проявляется на уровне элементарных ландшафтов и носит локальный характер. Процесс сопровождается образованием особой ландшафтной структуры и формированием определенного комплекса ответных реакций компонентов окружающей среды на загрязнение.**

**Особенности техногенных преобразований ландшафтной структуры целинных тундр** были установлены при картографировании техногенных участков. Крупномасштабная ландшафтно-геохимическая карта-схема ключевых участков в масштабе 1:1000 составлена нами на основе топографической съемки местности, полевых и камеральных работ (рис. 6 и 7).

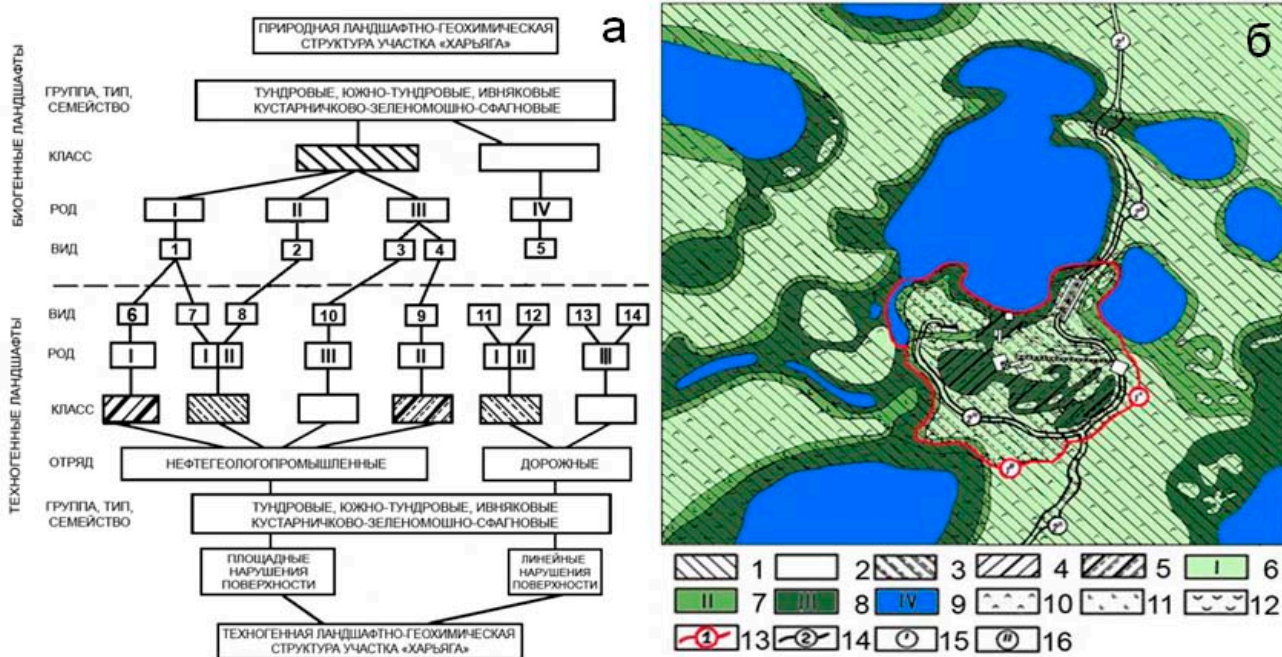


Рис. 6. Структурная (а) и пространственная (б) дифференциация элементарных геохимических ландшафтов озерно-болотных комплексов в пределах ключевого участка «Харьяга», развивающихся на реликтовых торфяниках (масштаб: 1: 1000). Усл. обозн.: I – классы ландшафтов: 1 – кислый-глеевый ( $H^+-Fe^{2+}$ ); 2 – слабокислый-глеевый ( $Fe^{2+}-POB$ ); 3 – кислый-глеевый ( $H^+-Fe^{2+}$ ); 4 – солёный ( $Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}$ ; 5 – солёный, слабокислый-глеевый ( $Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-} / Fe^{2+}-POB$ ); II – роды ландшафтов: 6 – автономные, 7 – трансэлювиальные, 8 – трансаккумулятивные, 9 – субаквальные; III – почвы: 10 – мерзлотные сухо-торфяные почвы, 11 – мерзлотные торфяно-глеевые почвы, 12 – тундровые болотные почвы. Прочие обозн.: IV – границы техногенных ландшафтов: 13 – нефтегеолого-промышленного, 14 – дорожных; V – разряды ландшафтов: 15 – умеренная, 16 – сильная степень повреждений почвенно-растительного покрова.

В качестве картографической единицы выбраны элементы рельефа, поэтому изображение контуров элементарных геохимических ландшафтов (элювиальных, трансэлювиальных, аккумулятивных, аквальных) дано по границам форм рельефа (водораздел, склон, полоса стока, пойма водотока), которые, в свою очередь, выделяли по изогипсам. На полученную карту элементов рельефа были перенесены контуры повреждений напочвенного покрова (линейные – дороги и полосы стока аварийных разливов загрязняющих веществ; площадные – котлован-отстойник, участки размещения буровой установки, складов ГСМ и химреагентов, вахтовый посёлок, вертолётная площадка). Таким образом, картографическая основа составлена по элементам рельефа с применением материалов топографической и ситуационной съёмок.

В исследованных районах нефтедобычи по особенностям структурной перестройки выделяются два типа техногенных преобразований ландшафтов: *харьягинский* и *сеношорский*. Изменения по *харьягинскому* типу выражаются в усложнении первичной ландшафтной структуры (рис.3), появляются новые геохимические классы элементарных ландшафтов. Такой тип присущ заболоченным междуречьям и представлен торфяно-бугристой тундрой в пределах реликтовых торфяников. Понижения между буграми заняты мочажинными и озерно-болотными комплексами. Характерны слабая расчлененность рельефа

(относительные превышения 1,5-2,5 м) и наличие мощных (до 1,5 м) отложений торфа. В целом, для данного типа характерно преобладание доли автономных (60-65%) и субаквальных (20-25%) ландшафтов, остальные виды составляют менее 20%. Это обуславливает определенную «монотонность» структуры ландшафтов заболоченных междуречий. Кроме того, наличие относительно невысоких превышений в рельефе заболоченных междуречий вызывает слабую геохимическую контрастность при сопряжении ландшафтов. Эта территория, совпадающая с границами техногенного участка, отличается изменением геохимического фона (табл. 1) и полной трансформацией первичных природных ландшафтов (преобразованием структуры почвенного профиля, появлением новообразованных геохимических барьеров и морфо-анатомических повреждений растений, изменением класса водной миграции).

Таблица 1

Парагенетические ассоциации элементов-примесей  
в надмерзлотном горизонте почв участка «Харьяга», 0-50см

| Тип почв                      | Фоновый участок                       | Техногенный участок                            |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
| Мерзлотные<br>торфяно-глеевые | <u>P, Zn, Cu, Sn, Mn, Fe</u><br>Cr, V | <u>Ti, Pb, Zr, Ba, Cr, V</u><br>Sr, Mo, Mn, Fe |

Из табл. 1 видно (группа элементов в числителе характеризует накопление в ландшафтах, а в знаменателе – их вынос), что в ландшафтах харьягинского типа процессы аккумуляции преобладают над процессом выноса. Подобное обстоятельство во многом обусловлено широким развитием торфяных отложений и озерно-болотных комплексов. Техногенным преобразованиям *сеношорского типа* свойственно формирование более сложной структуры повреждений поверхности. Данный тип присущ долинам малых водотоков (рис. 7). Элементарные ландшафты представлены участками тундры, входящими в систему водосбора. В границах этого типа все малые водотоки берут начало из озер и болот, поэтому от истока к устью строение ландшафтной структуры долин малых водотоков постепенно усложняется. Дело в том, что с увеличением длины водотока площадь водосбора расширяется, углубляется врез долины, формируются разной крутизны склоны, изменяется доля площади автономных и подчиненных ландшафтов по длине водотока, возрастает геохимическая контрастность ландшафтов.

Это отражается в образовании сложной «пестрой» ландшафтной структуры долин малых водотоков. Результаты факторного анализа (табл. 2) показывают, что в результате техногенного преобразования геохимического фона в ландшафтах происходит накопление типоморфных элементов-примесей из состава буровых шламов и отработанных растворов. Эти элементы даны в числителе. Их сравнение показывает, что в техногенных участках, в отличие от фоновых, активизируется вынос элементов. Наличие среди них Cu и Be, входящих в состав нефтей, дает основание говорить о наличии остаточного углеводородного загрязнения, которое достаточно активно вымывается поверхностным стоком.

В целом можно заключить, что для техногенных участков *сеношорского типа*, в отличие от *харьягинского*, характерен интенсивный вынос элементов – процессы выноса преобладают над процессами аккумуляции. В результате активизируется сток мерзлотной верховодки. При этом на дне эрозионных рытвин и промоин, суффозионных просадок, а также на поверхности техногенного делювия на пойменной террасе и в прибрежной части водотоков чаще фиксируются коллоидные



натеки гидроксидов железа, индицирующих зону разгрузки загрязненных внутрипочвенных вод.

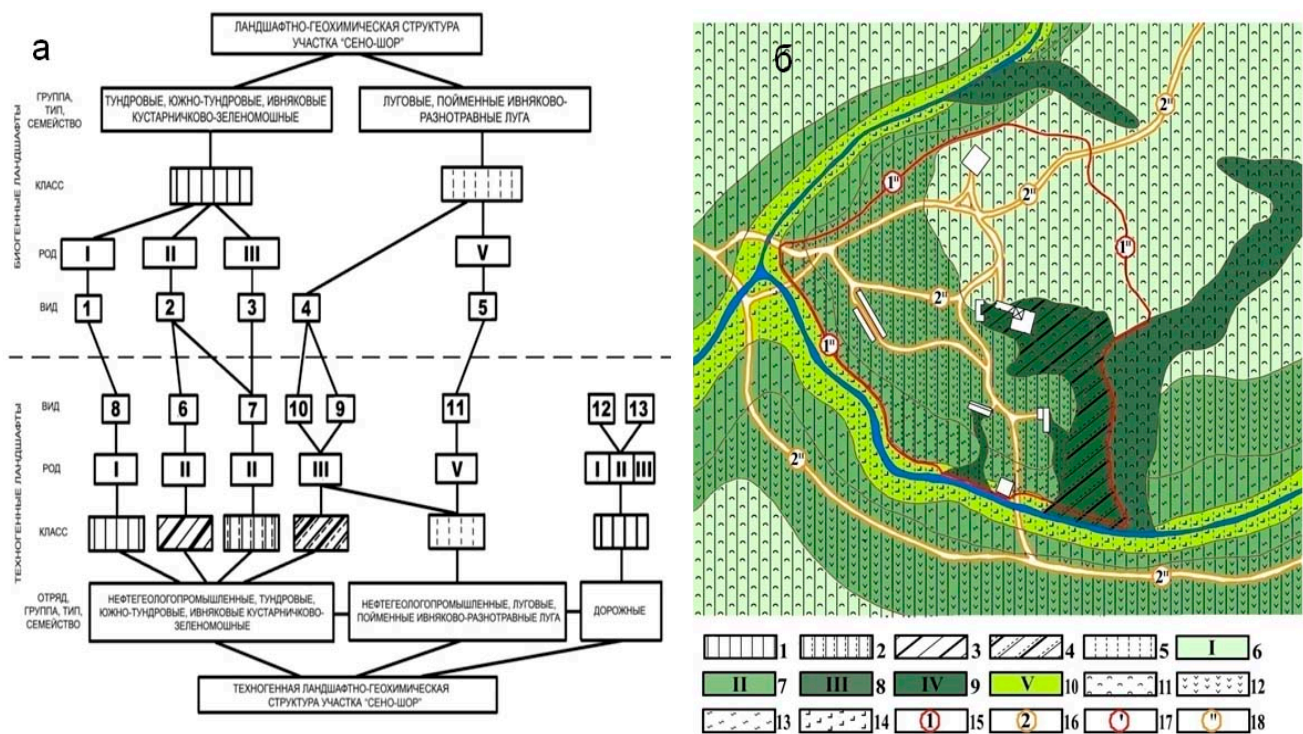


Рис. 7. Структурная (а) и пространственная (б) дифференциация элементарных геохимических ландшафтов «Сено-Шор», развивающихся на супесчано-суглинистых отложениях ледникового генезиса (масштаб: 1: 1000). Усл. обозн.: I – классы ландшафтов: 1 – кислый, переходный к кислому глеевому ( $H^+ - Fe^{2+}$ ), 2 – кислый ( $H^+$ ), 3 – солёносный ( $Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}$ ), 4 – солёносный, слабокислый-глеевый ( $Na^+, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}/Fe^{2+} - POB$ ), 5 – слабокислый-глеевый ( $Fe^{2+} - POB$ ). II – роды ландшафтов: 6 – автономные, 7 – трансэлювиальные, 8 – трансэлювиально-аккумулятивные, 9 – аллювиально-аккумулятивные, 10 – супераккумулятивные. Дополнительные обозначения: III – почвы: 11 – мерзлотные торфяно-глеевые почвы, 12 – торфянистые поверхностно-глеевые почвы, 13 – дерново-глеевые делювиальные суглинистые почвы, 14 – дерново-глеевые аллювиальные песчаные почвы; IV – границы техногенных ландшафтов: 15 – нефтегеолого-промышленного, 16 – дорожных; V – разряды ландшафтов: 17 – умеренная, 18 – сильная степень повреждений почвенно-растительного покрова.

Таблица 2

Парагенетические ассоциации элементов-примесей  
в надмерзлотном горизонте почв участка «Сено-шор», 0-50 см

| Тип почв                         | Фоновый участок             | Техногенный участок                     |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Надмерзлотные торфянисто-глеевые | <u>Cr, Ni</u><br>Ba, Sr, Mn | <u>Ba, Sr, Pb</u><br>Ga, Sn, Ti, Cu, Be |

**Механизм рассеяния углеводородного загрязнения.** Считается, что основным механизмом формирования углеводородного загрязнения (УВ-загрязнение) почв и его перемещения из верхних горизонтов в нижние является гравитационно-капиллярное движение нефти, где в качестве «поршня» выступают атмосферные осадки в виде дождя (Солнцева, 1998, 2004). Но в условиях тундры, где годовое количество выпавших осадков относительно невелико, эффективность такого механизма представляется недостаточной. По-видимому, дополнительным

механизмом формирования ореолов УВ-загрязнения в тундровых ландшафтах может быть вынос нефтепродуктов, сорбированных на частицах глинистых минералов, за пределы почвенного профиля при активизации суффозионных процессов на техногенных площадках. На эту мысль наталкивает установленное в профилях легких почв на отработанных буровых изменение соотношения глинистых минералов.

Одной из причин активизации суффозии может служить рост снегонакопления, которое в пределах буровой площадки на 15-20% больше, чем на целинных участках. Из-за загрязнения поверхности снега весной его таяние на буровой площадке происходит активнее, чем в целинной тундре. В итоге в пределах буровой площадки латеральный сток мерзлотной верховодки формируется быстрее, чем на прилегающих участках. Увеличение объемов стока мерзлотной верховодки через буровую площадку вызывает активизацию внутрипочвенного выноса (суффозии) минеральных частиц. А так как по отношению к воде рассмотренные группы глинистых минералов ведут себя по-разному – у набухающих глинистых минералов (монтмориллонита и смешанослойных минералов) повышенное сродство к воде, то вынос последних будет происходить интенсивнее, нежели хлорита и каолинита. Тогда следует ожидать, что в пробах, взятых из водотока у буровой площадки и, возможно, ниже по течению, соотношение глинистых минералов в донных отложениях будет иным, чем в почвах.

Действительно, рентгеноструктурный анализ глинистой фракции почв, взятых в пределах буровой Харьяга-11, показал, что в верхах почв техногенного участка понижена доля глинистых минералов групп монтмориллонита и смешанослойных минералов. В то же время в пробах наилка, взятых напротив буровой, доля монтмориллонита и смешанослойных минералов в два раза превышает таковую хлорита и каолинита. Можно предположить, что это недостающая часть набухающих глинистых минералов почв, снесенных в ручей в результате активизации суффозионных процессов в пределах техногенного участка.

**Формирование ореольных вод.** На полевом стационаре «Буровая «Харьяга-26» в Большеземельской тундре проанализированы особенности изменения ионных форм миграции металлов в природных водах в результате аварийных разливов отработанных щелочных буровых растворов. Выявлено, что их химическое воздействие вызывает формирование ореольных вод. В пределах полевого стационара «Буровая «Харьяга-26» мерзлотная верховодка имеет преимущественно сульфатно-хлоридно-натриевый, хлоридно-гидрокарбонатно-кальциевый составы. Ей присущи высокие значения pH (до 8.6) и увеличенные содержания микроэлементов по сравнению с природными водами. Так, здесь почти на порядок выше содержание цинка, свинца; вода обогащена железом, медью, возросла ее минерализация – с 20 до 114 мг/л. Воды болот, загрязненные сточными водами с буровой, отличаются повышенным содержанием ионов натрия и калия, при этом их суммарное содержание несколько превышает таковое кальция и магния. Увеличено, кроме того, содержание соединений азота и железа. Воды болот характеризуются как гидрокарбонатно-натриевые, с относительно высокой минерализацией (327 мг/л). Химический состав вод ручьев изменился слабо, и в основном они близки к природным. По-видимому, активное

перемешивание, большой объем разбавления, даже в пределах техногенного участка, мало меняют их ионный состав.

**Морфо-анатомические повреждения растений в зоне аварийных разливов.** Изучение техногенного воздействия на растительный покров выявило его связь со специфическими морфологическими изменениями растений (Тентюков, Кузиванова, 1986). Так, у хвоща (*Equisetum arvense* L.), иван-чая (*Chamerion angustifolium* L.), ромашки (*Tripleurospermum inodorum* L.) крестовника (*Senecio congestus* R.Br.) выявлена карликовость вегетативных форм. У багульника (*Ledum palustre* L.) сильно изменяется форма листьев: по мере удаления от верхушки побега края листовых пластинок раскручиваются и форма листа из ланцетовидной становится почти овальной. У ивы (*Salix arctica* Pall.) наблюдалось частичное иссушение побегов, при этом облиственность составляла 40-60 %. На побегах текущего года отмечены листья с морфологическими изменениями: края листовых пластинок были неровные, листья располагались преимущественно на концах побегов, на верхушках некоторых ветвей фиксировалось густое скопление листьев в виде розы. Кроме этого для растений, оказавшихся в зоне прямого воздействия техногенных потоков (полоса стока, образовавшаяся после переливов сточных вод из котлована-отстойника), выявлены анатомические нарушения в структуре вегетативных органов.

Сравнительное изучение тонкой структуры вегетативных органов (препараты побегов ивы (*Salix arctica* Pall.) и багульника (*Ledum palustre* L.) выявило анатомические изменения, возникающие при углеводородном загрязнении. В листьях и стеблях побегов растений с техногенного участка в меньшей степени, чем в растениях с фонового, развиты покровные ткани, клеточный слой кутикулы и эпидермиса тоньше. Элементы механической ткани, особенно в листьях, развиты плохо. Столбчатый мезофилл в листьях багульника обычно представлен пятью-шестью, а в листьях поврежденных растений лишь тремя-четырьмя слоями клеток. При этом губчатый мезофилл у поврежденного растения отличается развитием крупных межклетников. В поврежденных листьях ивы формировался однослойный мезофилл, в то же время в листьях с фонового участка он состоит из двух-трех слоев. Характерной особенностью клеток проводящей системы стебля багульника с фонового участка является большое количество кристаллов оксалата кальция в форме друз. В растениях с техногенного участка их существенно меньше, но при этом в клетках ксилемной ткани стебля растения отмечаются капли буроватых включений неопределенной системы.

**Физические эффекты в растениях при углеводородном загрязнении.** С удалением от буровой площадки внешние признаки повреждений растений ослабевают и регистрируются только в понижениях, так называемых «полосах стока». По ним легкие компоненты нефтесодержащей жидкости (нафтеновые и ароматические углеводороды) «разбегаются» дальше всех. В этих условиях актуальной является задача обнаружения дополнительных признаков, позволяющих вскрыть углеводородное загрязнение там, где нет видимых повреждений растительного покрова. В качестве инструментов такого поиска нами использованы ЭПР-спектроскопия, термография. Для исследования был выбран сфагновый мох (*Sphagnum squarrosum* Crome; *S. magellanicum* Brid.), который часто доминирует в моховом покрове тундр. Для сфагнов характерно

нарастание верхушкой стебля, поэтому отбирали только верхнюю часть растения. Высушенные на воздухе и измельченные пробы исследовались на радиоспектрометре ПРЭС 1001 при частоте 2.3. Гц с частотой модуляции 500 кГц при комнатной температуре. Замечено, что во всех проанализированных образцах сфагнома в спектрах ЭПР отсутствовали линии свободных радикалов (СР), связанные со сверхтонкими структурами. Поэтому о присутствии СР в спектре ЭПР можно было судить только по g-фактору 2.0028, который оказался одинаковым для растений с фонового и техногенного участков, но с различной интенсивностью сигнала спектра ЭПР. Примечательно, что опыты с вакуумированием выявили парамагнитные центры (ПЦ), обладающие разной чувствительностью к кислороду воздуха. Данный «кислородный эффект» сильнее выражен в растениях, взятых с загрязненных участков, что может свидетельствовать о присутствии в них ПЦ различной природы.

Результаты дифференциально-термического анализа (термовесовой анализ выполнен на дериватографе D-1500), полученные по тем же образцам мха, что и использованные при ЭПР-спектроскопии, показали, что все выявленные ранее температурные экстремумы для чистого сфагнома (обнаруживаемые по экзоэффектам окисления органики и газовыделения, 309 и 397 С° соответственно) в загрязненных образцах смещаются в область относительно низких температур и становятся менее выраженными (294 и 365 С°). Меняется и рисунок термограммы – в ней появляется экзотермический эффект с отметкой 342 С°, фиксируемый в узком температурном интервале, что указывает на большую скорость («взрывной» характер) превращения вещества, совершившегося в образце. Установлено, что при термической деструкции мха, загрязненного углеводородами (УВ), в термохимических реакциях участвуют и УВ. Их разложение протекает с тепловыми эффектами, вызывающими смещение температурных экстремумов в область более низких значений. Примененное сочетание физических методов при изучении сфагнумов, загрязненных углеводородами, выявило корреляцию между содержанием свободных радикалов и изменением термографических характеристик. Возможно, что аналогичные физические эффекты, возникающие в качестве ответных реакций на техногенное воздействие, обнаружатся и у других групп растений. Их поиск представляет самостоятельную задачу, решение которой позволит расширить сферу практического применения ЭПР-спектроскопии, термографии в эколого-геохимических исследованиях.

**Эколого-геохимическое прогнозное районирование по устойчивости целинных тундр к нефтяному загрязнению.** Постулируется, что техногенное загрязнение, обязанное одному и тому же источнику (промышленное предприятие, транспортная магистраль, агроландшафт, урбанизированная территория), неодинаково в различных ландшафтно-геохимических условиях: в тундре, тайге, в условиях холмистого рельефа, на плоских водоразделах и равнинах, в районах развития кристаллических пород и рыхлых осадочных отложений. Принимается, что на прогнозных картах эколого-геохимического районирования в зависимости от масштаба должны отражаться геокомплексы с однотипным характером миграции элементов и со схожим комплексом ответных реакций природной среды на химическое воздействие. Их выделение проистекает из *когерентности* геохимического ландшафта –

скоррелированности (согласованности) взаимосвязанных и взаимообусловленных геохимических процессов, определяющих степень закрепления, разрушения, выноса и трансформации загрязняющих веществ в границах одного или группы геохимических ландшафтов (Перельман, Касимов, 1999). При прогнозном районировании *принцип когерентности* позволяет обоснованно переносить геохимическую характеристику ключевого ландшафта на аналогичные территории, эколого-геохимически не исследованные.

В целом эколого-геохимический анализ целинных тундр в районах промышленного освоения показал, что особенности техногенной трансформации ландшафтной структуры и дальнейшей мобилизации химических элементов в освоенных тундрах определяются тесным взаимодействием природных и техногенных факторов. При этом первые часто усиливают негативное воздействие вторых. Поэтому для повышения информативности мониторинга загрязнения целинных тундр необходим поиск эколого-геохимических критериев, позволяющих различать загрязнение в зависимости от природы процесса.

Загрязнение может обнаруживаться по техногенным геохимическим аномалиям, способным формироваться в атмосфере, почвах и почвообразующих породах, природных водах и донных отложениях, в растительных и животных организмах. В ходе исследований условий барьерообразования в целинных и техногенно преобразованных тундрах были получены результаты, позволившие выдвинуть **третье защищаемое положение.**

**3. В равнинных тундрах выявляется небольшое число классов геохимических барьеров как в природных, так и техногенных условиях; создание на их основе искусственных геохимических барьеров повышает эффективность геохимических мер защиты и мониторинга окружающей среды в районах промышленного освоения.**

Традиционно по формам движения вещества и процессам их концентрации выделяют механические, биогеохимические и физико-химические барьеры. В тундровых ландшафтах в разной мере представлены все три типа.

**Механические геохимические барьеры.** В равнинных тундрах в мерзлых почвах выделяются три разновидности механических барьеров. *Первый* это мерзлотный сорбционно-механический барьер, приуроченный к зоне мерзлотного водоупора. Для него характерно то, что из-за разной степени подвижности ЭП в условиях избыточного увлажнения иллювиальные максимумы в зоне мерзлотного механического барьера многих ЭП не совпадают. *Второй* – кольматационный сорбционно-механический барьер, приуроченный к зоне капиллярного поднятия глеевых надмерзлотных вод в зону окисления. В сезонно талом слое почвы положение капиллярной каймы мерзлотной верховодки хорошо фиксируется по охристым кольматированным гидроксидами железа прослоям торфа. Данный барьер широко встречается в пределах распространения реликтовых торфяников. *Третий* – капиллярный сорбционно-механический барьер в зоне литологического контроля – выделяется нами впервые. Следует заметить, что процессы взаимодействия жидкости с твердой поверхностью, такие как смачивание, капиллярное впитывание, капиллярное передвижение жидкости, поверхностное натяжение, исследуются уже давно. Однако о капиллярности как барьерообразующем факторе



известно крайне мало. В почвенном профиле капиллярный механический барьер проявляется в зоне литологического контроля, когда мелкозернистый слой подстилается крупнозернистым.

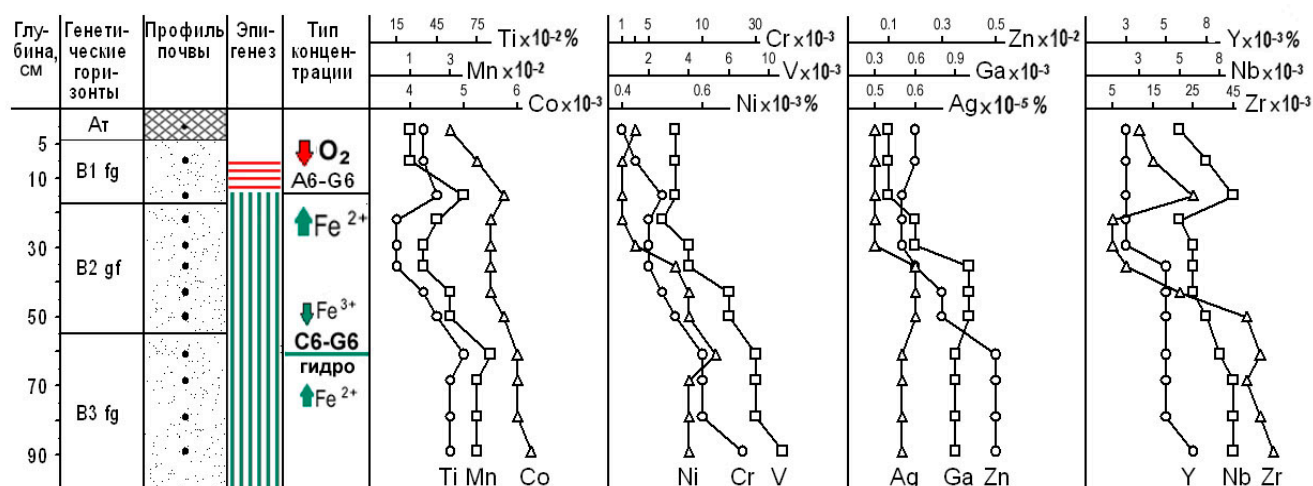


Рисунок 8. Формирование геохимической аномалии в зоне литологического контроля супесь-пески в торфянисто-глеевых почвах (разрез Я 91-4).

На рис. 8 представлен разрез торфянисто-глеевых почв с активным промывным режимом. Сезонное промерзание не смыкается с многолетней мерзлотой. В его профиле выделяются два слоя. Верхний представлен чередованием супесчано-песчаных прослоев, тогда как нижний состоит из мелко-, крупнозернистых крупнопористых песчано-галечниковых отложений. В профиле выявляются два охристых горизонта, отличающихся распределением ЭП. В обоих горизонтах накапливаются Ti, Mn, Cr, Zr. Для Co, Cr, Nb регистрируется только один пик – верхний, хотя тенденция увеличения их содержаний в нижней части профиля сохраняется.

Следует заметить, что в верхней части профиля отмечается супесчаный тиксотропный слой, увлажнение которого определяется подвешенной влагой, удерживаемой капиллярными силами. Данный тип почвенной влаги не связан гидравлически с капиллярной каймой мерзлотной верховодки, залегающей на глубине 60 см (рис. 8). В нижней части профиля относительное увеличение содержания ЭП приурочено к зоне изменения гранулометрического состава почвы: мелкозернистые песчаные прослои чередуются с песчано-галечниковыми. Очевидно, что их водопроницаемость разная, что способствует формированию *капиллярного механического барьера*. Капиллярный механический геохимический барьер всегда возникает на границе контакта, когда мелкозернистые отложения залегают поверх крупнозернистых и никогда в другом порядке. Возникающая при этом зона подвешенной капиллярной влаги выступает в качестве своеобразного механического барьера, что определенным образом влияет на вертикальное распределение ЭП и влаги в мерзлотных почвах.

**Биогеохимические барьеры.** В равнинных тундрах обнаруживаются три подтипа биогеохимических барьеров. *Первый* возникает при взаимодействии воздушного потока с поверхностью растений. Его появление определяется действием капиллярных сил конденсирующейся жидкости, а контрастность биогеохимического барьера в условиях пылевого загрязнения зависит от степени шероховатости листьев растений, которая у разных групп растений имеет свои отличия, что, в свою очередь, сказывается на биогеохимической активности

растений. Результаты исследования позволяют иначе оценивать использование мхов и лишайников, растений, получающих минеральное питание за счет аэрозольного стока, для мониторинга аэрозольного загрязнения. Из-за разной шероховатости листовой поверхности растений, при прочих равных условиях, можно получить неодинаковые результаты (рис. 9).

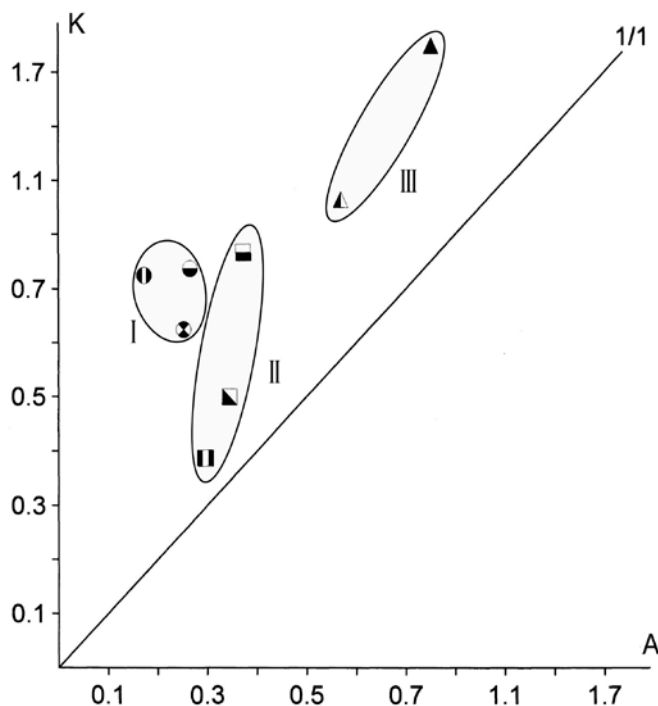


Рисунок. 9. Сравнение биогеохимической активности жизненных форм растений южной подзоны Большеземельской тундры по соотношению катионов ( $K = [\sum \text{kk Mn, Co, Ni, Zn, Cu, Pb, Sr, Ba, Ga, Nb}] / 9$ ) и анионов ( $A = [\sum \text{kk Zr, Mo, Sn, V, P, Zr, Cr}] / 7$ ) в золе. Усл. обозн.: I – древесные растения; II – травяные растения; III – моховые растения (нормирование выполнено по отношению к местному кларку  $Ax1$ , каждый знак 30-40 проб).

*Второй подтип* биосорбционного барьера формируется в торфяной толще и контролируется процессами торфообразования. При этом состав аномалии определяется флористическим составом торфа и прижизненными накоплениями ЭП растениями-торфообразователями. *Третий подтип* – хемосорбционный биогеохимический барьер – появляется вследствие взаимодействия гумусовых кислот с минеральной фазой почв. Очевидно, что формирование хемосорбционного биогеохимического барьера – сложный природный процесс. Велика в нем роль криогеохимических процессов с участием органических кислот. Известно, что при морозной дегидратации почвенного растворенного органического вещества (вымораживание воды) происходит снижение pH остаточного раствора. В условиях подкисления почвенные органические кислоты (гуматы и фульваты) могут коагулировать с образованием гелей, обладающих высокой удельной активной поверхностью (Ong. et. al., 1970). Процесс образования геля сопровождается как включением ионов металлов в структуру геля, так и их физической адсорбцией на поверхности геля, что способствует связыванию катионов, высвобождающихся в результате реакций химического выветривания органическими кислотами минеральной фазы почв.

Главное, что следует отметить – это резкое проявление аккумуляции ЭП в криогенно-коагуляционном органоминеральном слое, которое вызвано резкой сменой кислотно-щелочных условий в этой части профиля. В нем для органического слоя характерны низкие значения кислотности ( $pH < 5$ ), что обусловлено закреплением здесь кислых продуктов разложения растительных остатков, тогда как переход к минеральному горизонту отличается ростом pH до 6 и наличием подвижных форм железа, фиксируемых в этой зоне по интенсивному охристому окрашиванию почвенного слоя.

**Физико-химические геохимические барьеры.** В целинной тундре из барьеров данного типа чаще всего встречаются кислородные комплексные геохимические барьеры. В верхней части почвенного профиля они формируются на контакте капиллярной каймы глеевой верховодки с кислородной обстановкой. Индикационным признаком кислородного барьера (А) служит характерное ожелезнение. В тундровых ландшафтах в условиях кислого оглеения железо может мигрировать в форме мономерных ионных комплексов и органоминеральных соединений. Окисляясь на кислородном барьере, железо в виде охристых коллоидных образований выпадает из почвенных растворов. Коллоиды являются хорошими сорбентами, и для поглощенных металлов они выступают в качестве сорбционного барьера (G). Поэтому в ожелезненном почвенном слое совмещаются два геохимических барьера: кислородный и сорбционный с образованием комплексной аномалии А2-G2. Для большинства кислородно-сорбционных барьеров, положение которых в тундровых почвах приурочено к капиллярной кайме мерзлотной верховодки, образование аномалий идет с преимущественным накоплением железа, ванадия, кобальта.

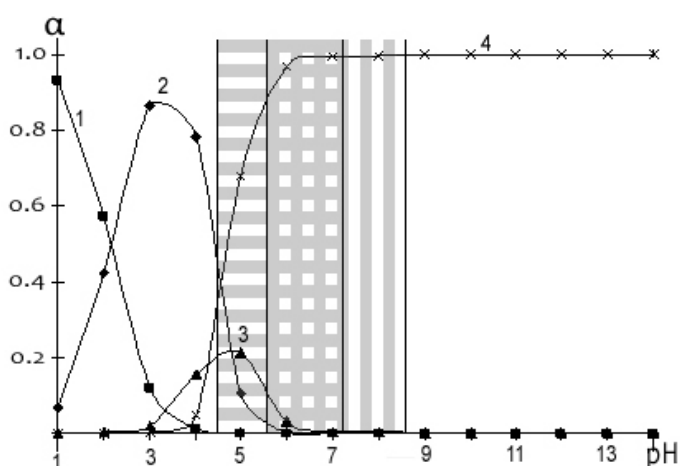


Рисунок. 10. Диаграмма монокомплексов железа (III) в зависимости от pH в системе  $\langle \text{Fe}^{3+}\text{-OH} \rangle$ . Усл. обозн.: 1 –  $\text{Fe}^{3+}$ , 2 –  $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$ , 3 –  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ , 4 –  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]^0$ . Доп. обозн.: интервалы pH-осаждения монокомплексов в природных (горизонтальная штриховка) техногенных (вертикальная штриховка) водах.

становится основной с повышением pH. При осаждении молекулярной формы железа возникают устойчивые коллоидные образования гидроксидов железа. Коллоидные соединения железа являются хорошими сорбентами. Поэтому в зоне щелочного барьера, формирующегося при смене кислой реакции на слабокислую, возможно появление комплексного щелочно-сорбционного барьера с устойчивыми комплексными аномалиями D2-G2.

В пределах исследованных участков щелочно-сорбционный барьер часто фиксируется в торфянистых почвах в условиях поверхностного оглеения. В них барьер формируется в верхней части почвенного профиля на границе кислого (pH водной вытяжки  $< 5$ ) органоминерального слоя (Акр) криогенно-коагуляционного генезиса и слабокислого минерального горизонта (pH водной вытяжки  $> 5$ ). На щелочно-сорбционном барьере D2-G2 возможны осаждение и образование аномалий Fe, Pb, Ag, Ni, Ti, Sr, Ga, Cr.

Другим распространенным классом является щелочной барьер, формирующийся в кислых условиях при смене кислой реакции на слабокислую. Так, анализ распределения ионных комплексов железа (III) в системе  $\langle \text{Fe}^{3+}\text{-OH} \rangle$  показывает, что в кислой среде возможно резкое снижение миграции свободного катиона  $\text{Fe}^{3+}$  при относительно высокой стабильности монокомплекса  $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$  (рис. 10, линии 1 и 2). С ростом значений pH увеличивается концентрация молекулярной формы  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]^0$  (рис. 10, линия 4), рост миграции которой проявляется вначале в слабокислой среде и

Менее информативны в равнинных тундрах *глеево-сорбционные барьеры* С6-G6, которые в условиях избыточного увлажнения образуют слабоконтрастные геохимические аномалии. Данный класс барьеров типичен для торфяно-болотных мерзлотных почв. По своему положению барьер часто совпадает с иллювиальным максимумом ЭП в нижней части почвенного профиля. В зоне мерзлотного водоупора появление глеевого барьера нередко контролируется криогенной коагуляцией, что усиливает сигнал аномалии типа С6, в которой элементами индикаторами выступают молибден и медь.

На техногенных участках число типов и классов геохимических барьеров повторяет природные, которые, однако, в зоне аварийных разливов сточных вод и буровых шламов дополняются щелочным и кислым геохимическими барьерами. На буровой площадке *кислородно-сорбционный барьер* ярче выражен в краевой части техногенного участка – в зоне разгрузки внутрипочвенных вод. Вследствие механических нарушений почвенно-растительного покрова на буровой площадке возрастает мощность слоя сезонного оттаивания почв, поэтому в ее пределах латеральный сток мерзлотной верховодки формируется быстрее, чем на соседних участках целинной тундры. В результате происходит увеличение стока мерзлотной верховодки через буровую площадку, которая, перехватывая часть транзитного внутрипочвенного стока мерзлотной верховодки с прилегающих участков, начинает выполнять роль местного водосбора. В итоге в пойме водотока, дренирующего такую буровую, возникают зоны разгрузки глеевых сточных вод, которые хорошо индицируются охристыми коллоидными образованиями гидроксидов железа, осаждающихся на кислородном барьере. Вместе с железом соосаждаются барий (элемент-индикатор отработанных буровых растворов) и бериллий (типоморфный элемент нефтей).

*Кислый геохимический барьер.* Его формирование происходит при смене нейтральных и щелочных условий на слабокислые и кислые. В полосе аварийного стока буровых растворов барьер возникает в зоне контакта песчано-глинистого наноса с щелочной реакцией (рН водной вытяжки равной  $> 8$ ) с остатками торфяной подстилки, характеризующейся относительно низкими показателями кислотности (рН водной вытяжки 4.35). Здесь, на кислом барьере, повышаются содержания Ва, Zr, Сг. Видимо, это обусловлено не только их осаждением на кислом барьере, но и сорбцией органическим веществом почв. Таким образом, барьер можно квалифицировать как кислый-сорбционный.

*Щелочной геохимический барьер.* На техногенных участках образование барьеров данного класса происходит в условиях техногенного подщелачивания. Так, на отработанных буровых площадках после технической рекультивации на месте котлована-отстойника остается много бурового шлама, водная суспензия которого имеет щелочную реакцию. При подпруживании глеевые слабокислые внутрипочвенные воды взаимодействуют с техногенным карбонатным песчано-глинистым материалом бурового шлама и нейтрализуются. В зоне их контакта с техногенным наносом формируется аномалия Pb, Cu, Ва, Sr, Zn, обусловленная, по-видимому, фиксацией металлов в форме карбонатов на щелочном геохимическом барьере (D2).

**Опыт применения геохимических барьеров для защиты и мониторинга окружающей среды.** Исследования показали, что в качестве основы разработок геохимических способов защиты и мониторинга окружающей среды лучше

использовать новообразованные техногенные барьеры, формирование и устойчивость которых обеспечиваются природными местными условиями. Для исследованной территории такими барьерами являются кислородно-сорбционный и мерзлотный сорбционно-механический.

*Выявление загрязнения почвы с применением кислородного барьера.* Исследования отработанных буровых площадок в Большеземельской тундре показали, что геохимическое опробование гидроксидов железа, осаждающихся на кислородных барьерах в зоне разгрузки внутрипочвенных вод, информативно при оценке интенсивности внутрипочвенного загрязнения и организации геохимического мониторинга.

Результаты геохимического опробования коллоидных натеков гидроксидов железа в зоне разгрузки глеевых вод в пойме водотока, дренирующей буровую, показали, что в состав аномалии А6-Г6 может входить и барий (табл. 3). Особенности миграции бария в мерзлотных ландшафтах позволяют использовать его в качестве элемента-индикатора при выявлении загрязнения тундровых почв в районах обустройства нефтепромыслов (рис. 11). Широкая встречаемость гидроксидов железа делает их чрезвычайно удобным объектом геохимического опробования при изучении состояния природной среды в зоне техногенеза.

Таблица 3

Состав ассоциаций ЭП в почвах и гидроксидах железа

| Почвы фоновых участков                       | Почвы техногенных участков  | Гидроксиды железа       |
|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| (P, Be, Mn, Sn, Pb, Sc)<br>Ti (Ni, V, Ga, Y) | Pb, Ba, Zn (Be, Mo)<br>(Ti) | Be, Ba (Y, Pb, Co)<br>— |

**Локализация внутрипочвенного распространения загрязнения с помощью искусственного мерзлотного сорбционно-механического барьера.** Для разработки этого способа были организованы экспериментальные исследования на модельном полигоне на полевом стационаре «Буровая Харьяга-26», где подготовили четыре специальные площадки размером 20×6 м каждая. В нижнем конце площадок был отсыпан вал из торфа высотой 1,5-2,5 м. На первых двух проводилось моделирование аварийных разливов нефти и отработанных буровых растворов, а на двух других наблюдали весеннюю динамику оттаивания почвы.

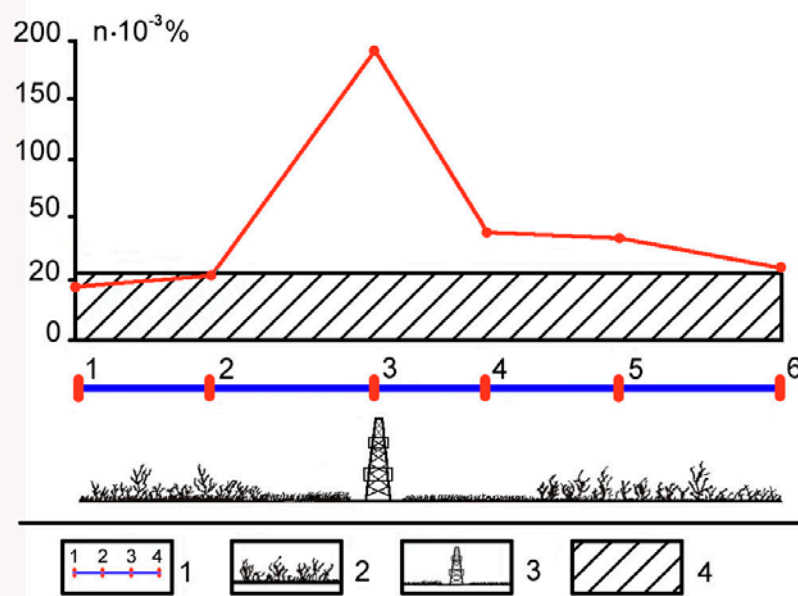


Рисунок. 11. Распределение бария в гидроксидах железа. Усл. обозн.: 1 – точки опробования по направлению течения реки, 2 – ненарушенные и 3 – техногенно нарушенные участки водотока, 4 – фоновые значения содержания бария в гидроксидах железа.



На первой площадке был симитирован аварийный разлив нефти (5 м<sup>3</sup>). Глубина просачивания смолисто-битумных фракций составила 15-20, возле обваловки – до 30 см. В первую неделю отмечалось сильное испарение легких фракций. В конце второй недели на поверхности нефтяного пятна стали появляться трещины усыхания. Мощность слоя оттаявшей почвы под нефтяным пятном увеличилась до 45 см, что на 10 см больше, чем на контрольных площадках, а перед обваловкой мерзлотный водоупор понизился до 60 см – скопление подпруженной мерзлотной верховодки перед обваловкой ускорило оттаивание почвы. Подпруживание произошло в результате нарушения латерального стока мерзлотной верховодки, вызванного мерзлотным ядром, образовавшимся в толще торфяной обваловки. Было предположено, что подобное мерзлотное ядро и сорбционные свойства торфа могут эффективно препятствовать внутрпочвенному растеканию аварийных разливов нефти.

Для определения оптимальных размеров обваловки с мерзлотным ядром внутри с учетом сорбционной емкости торфа исследовались образцы, вырезанные из различных горизонтов торфяной толщи. Образцы торфяной почвы равного объема, предварительно взвешенные, насыщались нефтью. После удаления (свободное стекание) их избытка образцы повторно взвешивали. Разница двух взвешиваний соответствовала количеству нефти, удержанной почвой. Расчеты показали, что торфяная обваловка шириной в основании 6, высотой по гребню 1,8-2,0 и высотой мерзлотного ядра 1,0-1,2 м может удерживать на один погонный метр обваловки 600-650 кг нефти. Моделирование загрязнения отработанными буровыми растворами выполнялось на второй площадке. Было внесено 0,25 м<sup>3</sup> раствора бурового шлама с pH 9.01 и концентрацией 380 г/л. Глубина просачивания песчано-глинистых частиц составила 28 см при величине талого слоя на площадке 41 см. Наблюдения за динамикой оттаивающего слоя, как и в первом случае для нефти, показало увеличение его мощности. Под пятном оно составило 49, а в предбарьерной части – 61 см. Было проанализировано содержание техногенных элементов в предбарьерной части и за пределами модельного полигона. Пробы отбирались из шурфа в зоне капиллярной каймы мерзлотной верховодки.

Таблица 4. Способность мерзлотного сорбционно-механического геохимического барьера удерживать компоненты буровых растворов, г/т

| Элемент | Среднее содержание ЭП на модельном полигоне с искусственным барьером |                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------|
|         | в предбарьерной части                                                | после барьера за площадкой |
| Барий   | 3000±600                                                             | 64±12                      |
| Свинец  | 100±15                                                               | 1±0,2                      |
| Медь    | 20±4                                                                 | 6±1,2                      |
| Цинк    | 1000±180                                                             | 8±1,6                      |
| Кобальт | 15±3                                                                 | 3±0,6                      |

Результаты показали (табл. 4), что искусственное формирование мерзлотного механического барьера может быть эффективным средством для защиты мерзлотных почв от загрязнения при аварийных разливах нефти и отработанных буровых растворов. Образование мерзлотного механического барьера (его основные элементы показаны на рис. 12) обусловлено тем, что после отсыпки торфяного вала 1 внутри его повышается уровень мерзлоты 2 и возникает водонепроницаемое мерзлотное ядро 3. Это нарушает миграцию почвенных

растворов, которые скапливаются в предбарьерной части 4. Их подпруживание перед обваловкой ускоряет оттаивание почвы.

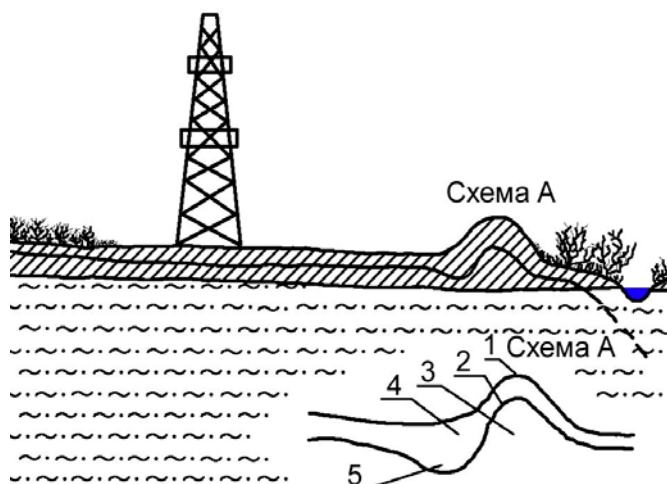


Рисунок. 12. Основные элементы искусственного мерзлотного сорбционно-механического барьера (пояснения в тексте).

В результате в предбарьерной зоне образуется аккумулятивная полость 5. В случае скопления в предбарьерной части большого объема техногенного потока разгрузка (фильтрация) загрязненных почвенных растворов будет происходить через надмерзлотную часть торфяного вала, где загрязняющие примеси будут собираться торфом.

Таким образом, геохимические барьеры могут выступать в качестве технологической базы разработки новых способов мониторинга и геохимических средств защиты тундр. Продолжение изучения особенностей формирования геохимических барьеров и условий,

обеспечивающих их устойчивость в мерзлотных ландшафтах, имеет практическое значение для дальнейшего развития барьерных технологий в Субарктике.

Анализ граничных геохимических эффектов и явлений, возникающих при взаимодействии аэрального потока с подстилающей поверхностью, позволяет рассматривать ее как специфический поверхностный геохимический барьер, к которому приложимы концептуальные положения учения А.И.Перельмана о геохимических барьерах. Исследования особенностей образования аэрогенных аномалий при взаимодействии аэрозольного стока с различными типами подстилающей поверхности позволили выдвинуть **четвертое защищаемое положение.**

**4. Вне зависимости от агрегатного состояния аэрозольного стока при его взаимодействии с подстилающей поверхностью (почвой, растительностью, снежным покровом) аэрогенные геохимические аномалии возникают в результате адгезии аэрозольных частиц, которой всегда предшествует адсорбция, а устойчивость сигнала аэрогенной аномалии обеспечивается удержанием частиц на поверхности за счет действия капиллярных сил конденсирующейся жидкости.**

**Эфемерное ожелезнение поверхности ландшафтов на Ямале.** В ходе полевых исследований в северной и средней субарктической тундрах на Ямале отмечались факты, когда гидроксиды железа регистрировались на поверхности почвы, лишенной растительности. Как правило, их появление носило кратковременный характер и ожелезнение регистрировалось в виде тонкой несплошной красновато-бурой пленки. Такое *эфемерное ожелезнение* поверхности почв обычно проявлялось после выпадения коротких летних дождей, завершающих относительно продолжительный период ясной хорошей погоды. Индикационным признаком данного явления служит преобладание оксида железа (II) над оксидом железа (III) (таблица на рис. 13). Очевидно, что высокое содержание несиликатного железа, зафиксированное в верхней части профиля почв в автономных ландшафтах, явно привнесено извне, и

является результатом осаждения железосодержащих аэрозолей из приземного слоя воздуха. Преобладание в окислительных условиях двухвалентного железа возможно, если допустить, что источником для него могли послужить атмосферные выпадения. Для Ямала, где годовая сумма осадков незначительна и сопоставима с таковыми для засушливых степных районов<sup>1</sup>, соотношение между влажными и сухими выпадениями будет смещаться в сторону сухих выпадений. В связи с этим вполне вероятно, что в районах промышленного освоения Ямала загрязнение (ожелезнение) ландшафтов в большей мере будет обусловлено сухими аэрозольными выпадениями, нежели атмосферными осадками в виде дождя.

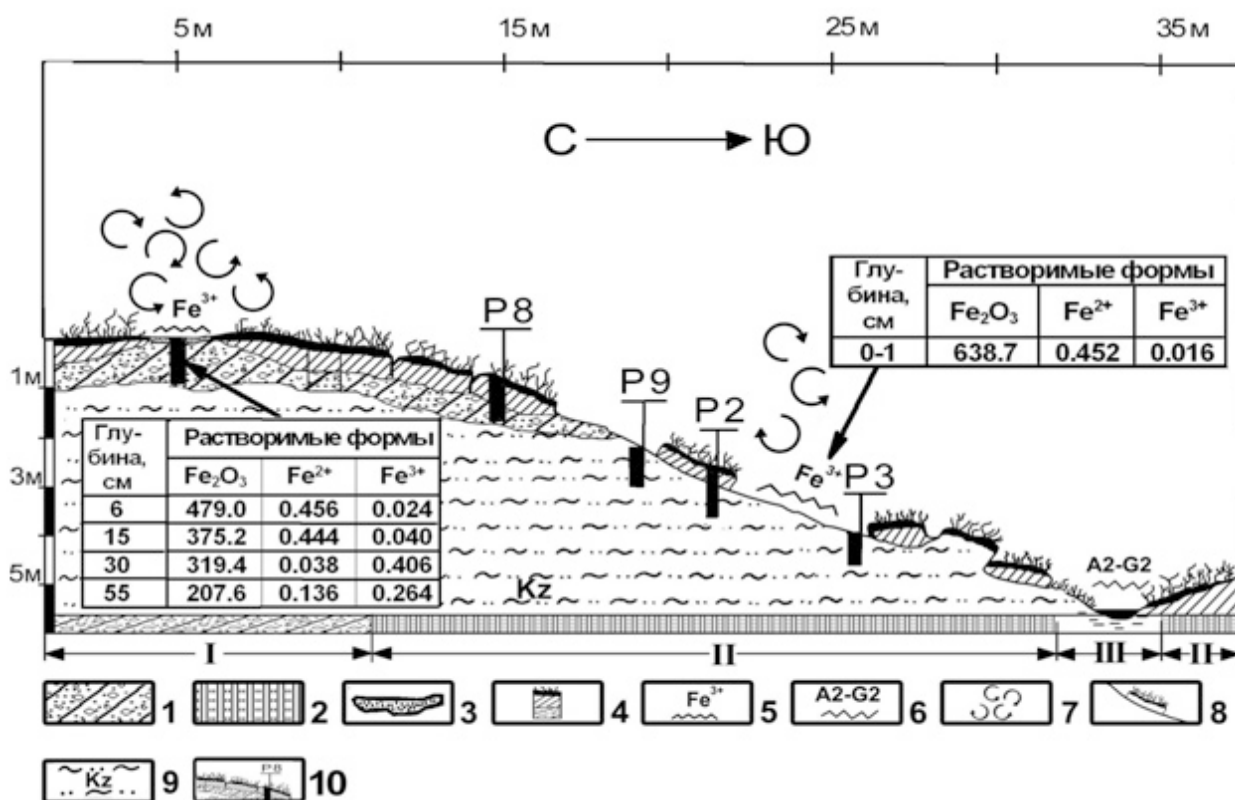


Рисунок. 13. Ландшафтно-геохимический профиль на казанцевских отложениях. *Элементарные ландшафты:* 1 – автономные элювиальные, представленные кустарничково-осоково-лишайниковыми тундрами, 2 – трансэлювиальный ландшафт оползневого склона с нарушенной коренной кустарничково-мохово-лишайниковой тундрой; 3 – транссупераквальный ландшафт днища эрозионной промоины; 4 – ветровые раздувы почвы; 5 – пленки бурых выцветов железа-III на поверхности ветровых раздувов; 6 – положение геохимического барьера на поверхности пролювия; 7 – эффоресценция железа-III; 8 – фрагмент оползня; 9 – легкие суглинки; 10 – номер и местоположение разреза.

*Атмосферный цикл миграции железа и ожелезнение поверхности.* Источником железа в атмосфере могут служить железосодержащие минералы почвообразующих пород, входящие в состав теллурической пыли. Для Ямала это преимущественно железосодержащие минералы глин из рыхлых отложений – хлорит и монтмориллонитовые образования (возможные продукты коры выветривания на базитах?). Сухое осаждение аэрозолей определяется турбулентной диффузией и предполагает наличие направленного воздушного потока к поверхности. Поэтому интенсивность осаждения аэрозолей зависит от развития турбулентности в приземном

<sup>1</sup> Тамбей (Ямал) – 228, Кустанай – 255 и Целиноград – 308 мм/год (Орлова, 1962).

слое атмосферы. Для Ямала, как и для всей тундровой зоны, сильная турбулентность отмечается в приземном слое. Причиной является высокая интенсивность солнечной радиации, которая способствует сильному нагреванию деятельной поверхности на высоте 0.01-0.5 м от почвы, где температура воздуха может быть в 1.5-2 раза выше, чем на высоте 2 м (Орлова, 1962). В этих условиях в приземной атмосфере могут возникать конвективные турбулентные вихри с направлением воздушных потоков как вверх, так и к земной поверхности. В последнем случае в направлении деятельного слоя будет формироваться устойчивый приток загрязняющих веществ и возникнет высокая вероятность их осаждения из воздушного потока на поверхность почвы. Железосодержащие аэрозольные частицы, обладая высокой дисперсностью, могут адсорбироваться на поверхности почвы (явление адгезии). Эфемерное ожелезнение сопровождается образованием поверхностной аномалии A2-G2.

**Морозное конденсирование техногенных эмиссий.** Изучение загрязнения атмосферы при проведении буровых работ показало, что качественные и количественные характеристики химического состава снега на фоновых участках вокруг строящейся буровой «Харьяга-26» в 1983 г. превышали аналогичные, полученные после года работы буровой. Наличие относительно высокого содержания сульфатов в снежном покрове, а также различия в ионно-солевом составе снеговой воды послужили основанием предположить (Воеводова, 1988), что характеристические изменения концентрации компонентов обусловлены влиянием преобладающих воздушных масс, формирующих химический состав атмосферных осадков и снежного покрова.

Зимой 1982/83 г. в район исследования воздушные массы приходили с урбанизированных территорий Европы, а зимой 1983/84 г. – с севера Атлантики. Однако анализ дальнего переноса сульфатов по загрязнению снежного покрова показал, что вклад трансграничной эмиссии в выпадение сульфатов в высоких широтах Арктики составляет менее 2% (Василенко и др., 1985). Вместе с тем, известно, что некоторые газы могут сжижаться в интервале зимних температур Арктики, в частности, аммиак и диоксид серы, для которых температура сжижения составляет  $-33,7$  и  $-10^{\circ}\text{C}$  соответственно. Учитывая сказанное, можно предположить, что высокие концентрации сульфатов, обнаруженные в снеге вокруг строящейся буровой – результат морозного конденсирования диоксида серы из атмосферы при взаимодействии техногенных эмиссий с поверхностью снега.

Анализ причин появления эффектов эфемерного ожелезнения поверхности почвы и морозного конденсирования техногенных газов показал возможность искусственного регулирования условий пассивного осаждения аэрозолей из пограничного слоя на специальный субстрат из химически инертных материалов.

**Технологии пассивного мониторинга аэрозольного загрязнения поверхности.** Суть инновационного решения заключается в следующем: **а)** пассивный сбор аэрозолей ведут в пределах деятельного слоя воздуха на обустроенных аэрозольных площадках; **б)** осаждение аэрозолей осуществляют на химически инертный сорбционный субстрат из волокнистых (беззольные фильтры) и/или порошковых (оксиды металлов) материалов; **в)** их экспонирование проводят в особых устройствах – импульсерах, конструкция которых обеспечивает сухое осаждение аэрозолей, при этом длительность экспонирования не зависит от сорбционной емкости

субстрата и определяется только задачами исследования. Анализ литературы и патентный поиск показал, что такой подход является пионерным.

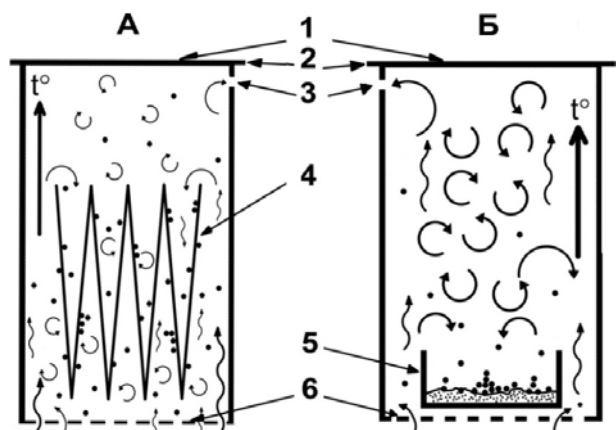


Рисунок. 14. Схема пассивного пробоотбора аэрозолей с волокнистыми (А) и порошковыми (Б) сорбентами с помощью импульвератора (пояснение в тексте).

Импульвератор (1) выполнен из материала, обладающего высокой теплоемкостью и химически инертного к атмосферным компонентам в форме полого цилиндра с открытой нижней частью. Верхняя часть устройства закрыта глухой крышкой (2) и снабжена выступом-козырьком, под которым по окружности сделаны отверстия (3). В импульвератор помещается круглый ложемент (5) (рис. 14, Б). На ложемент тонким слоем укладывается химически инертный тонкодисперсный порошковый субстрат (оксиды металлов). При воздействии солнечной радиации из-за различий теплоемкости материалов

ложемента и корпуса устройства, в его внутреннем объеме возникает температурный градиент. Наличие градиента температур обеспечивает во внутреннем объеме устройства возникновение условий для формирования конвективных и турбулентных воздушных потоков с аэрозольными частицами над субстратом. В результате внутри устройства возникает высокая вероятность диффузионного и турбулентного осаждения аэрозолей из пограничного слоя на поверхность сорбента. Величина температурного градиента зависит от нагрева частиц. Чем больше частиц в пограничном слое, тем выше его температура, тем активнее идет молекулярное перемешивание: при нагреве частиц часть их кинетической энергии передается молекулам воздуха. В результате этого число соударений возрастает, и частицы могут контактировать с поверхностью и удерживаться на ней. Силы, которые обеспечивают такой контакт, называются *адгезией* (Зимон, 1983). Адгезии всегда предшествует адсорбция, сопровождающаяся изменением концентрации вещества на границе раздела фаз. При адгезионном взаимодействии аэрозольной частицы с поверхностью в зазоре между контактирующими телами происходит конденсация паров и образование мениска жидкости, который удерживает частицу на поверхности за счет действия капиллярных сил конденсирующейся жидкости. Появление капиллярной прослойки может наблюдаться уже при относительной влажности более 50%, а при влажности 70% и выше именно капиллярные силы обуславливают величину адгезии частиц. Представленная ниже зависимость относительной влажности воздуха от его температуры:

|                   |     |      |      |      |     |     |     |
|-------------------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
| $e, \%$           | $=$ | 100  | 90   | 80   | 70  | 60  | 50  |
| $t, \text{град.}$ | $=$ | 15,0 | 13,4 | 11,6 | 9,5 | 7,3 | 4,5 |

показывает, что при суточном ходе температур воздуха от 4,5 до 15°C и при неизменных характеристиках влагосодержания воздуха вымывание аэрозолей дождевыми осадками произойдет только один раз – при температуре 15°C, а сухое осаждение аэрозолей будет происходить всякий раз, когда поток воздуха коснется охлажденной поверхности во всем интервале температур.

В импульвераторе возможно использование химически инертного субстрата из гидрофильного материала (4, рис. 14,А), в качестве которого могут быть использованы безольные фильтры. Пассивный пробоотборник аэрозолей испытан в широком диапазоне температур (от – 47 до +32°C), относительной влажности (30–100%) и скорости ветра (от штиля до 20 м·с<sup>-1</sup> с порывами до 35). Наблюдения проводились



в тундровой и таежной зонах европейской территории России. Нижеприводимые результаты позволяют рекомендовать пассивный сбор сухих выпадений с использованием химически инертного субстрата для контроля аэрозольного загрязнения ландшафтов, мониторинга трансграничного переноса тяжелых металлов, изучения колебаний радиационного фона в приземной атмосфере.

#### Оценка химического потенциала атмосферы.

Постулируется, что вне зависимости от природы труднорастворимых соединений металлов (карбонатов, сульфидов, силикатов, оксидов и др.) при их взаимодействии с атмосферной влагой в аэрозольной среде образуются гидратированные ионы металлов – аквакомплексы – соединения, в которых в качестве лиганда выступает вода. В условиях роста пылевого загрязнения атмосферы участие аквакомплексов металлов в химических реакциях с атмосферными компонентами увеличивает объем ультрадисперсных легкорастворимых соединений – вторичных аэрозолей, носителей химического потенциала атмосферы. Для его оценки сравнивали соотношение металлов в кислото- и водорастворимой фазе аэрозольного стока в зависимости от продолжительности экспонирования пассивных пробоотборников аэрозолей (рис. 15). Как видно из рис. 15, графики распределения металлов в короткий и длинный периоды экспонирования сорбентов демонстрируют устойчивое преобладание в стоке аэрозолей растворимых соединений металлов. Это отражает общее свойство аэрозольной среды – обогащение легкорастворимыми соединениями металлов, а их соотношение между растворимой и малорастворимой фракциями может характеризовать активность геохимических процессов при взаимодействии аэрозолей с поверхностью.

Предполагается, что химические преобразования аэрозолей, начатые в атмосфере, могут продолжиться и в ландшафтах и тем самым вызвать триггерный эффект, способствующий началу развития эколого-геохимических процессов, не типичных (диссонансных) для конкретных природных условий. Например, эфемерное ожелезнение поверхности почвы в условиях атмосферного загрязнения Ямала.

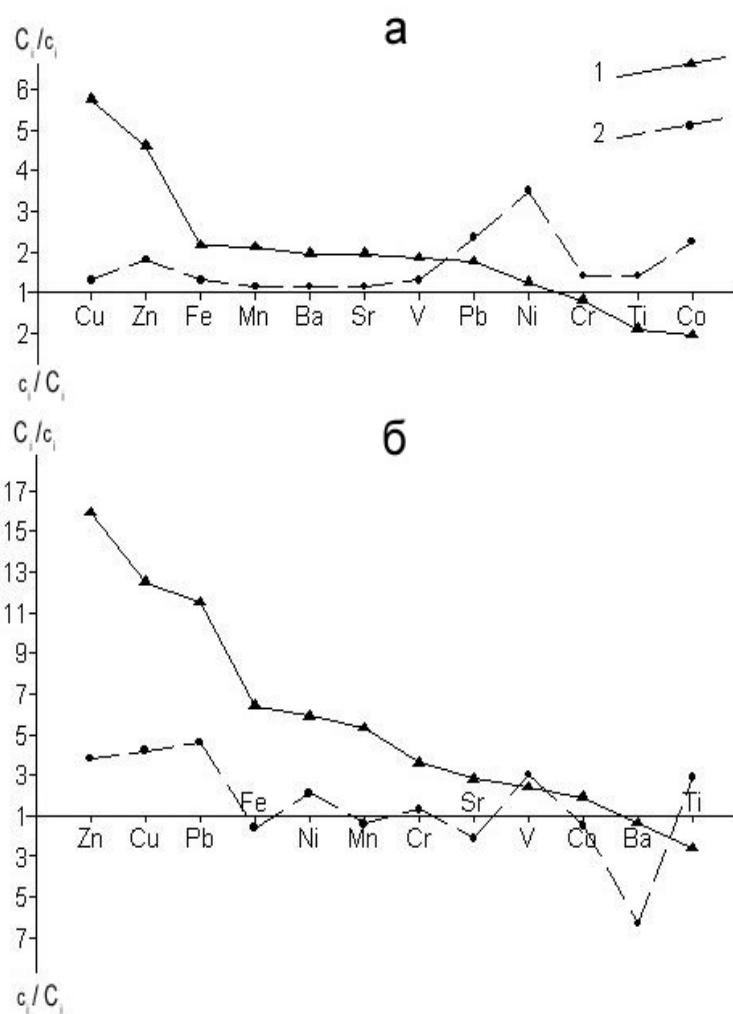


Рисунок. 15. Распределение концентраций металлов в стоке аэрозолей: а) короткий – 29.09-23.11.2011, б) длинный период экспонирования – с 14.05.2010 г. по 19.06.2012 г. Усл. обозн.: 1) водорастворимая, 2) кислоторастворимая фракция.



**Морозное концентрирование техногенных эмиссий и сульфатное загрязнение снежного покрова.** При соприкосновении водяных паров со снегом происходит их сублимация с образованием ледяных кристаллов инея на заснеженной поверхности. Для осаждения инея необходимо, чтобы температура воздушного потока была выше температуры подстилающей поверхности. Появление ледяных кристаллов инея на поверхности снега возможно и при низких температурах при относительной влажности воздуха менее 80% (Кузьмин, 1957), поэтому условия для образования поверхностного инея возникают чаще, нежели для выпадения снегопада. Между тем, роль инея в балансе загрязнения снежного покрова мало исследована, поскольку отсутствуют надежные количественные способы его измерения. Как показали наши наблюдения (Тентюков, 2011), иней имеет очень малую плотность –  $0,03 \div 0,05 \text{ г/см}^3$ .

Выпавший иней толщиной 2-3 мм при оттаивании в снегомерном сосуде дает столь малое количество воды, что станциями метеонаблюдений их отмечают как «0,0». Однако, обладая высокой поверхностной активностью, ледяные кристаллы инея в условиях загрязнения атмосферы являются главным источником загрязнения снежного покрова в период между снегопадами. В связи с этим, получение количественных характеристик динамики выпадения инея представляет определенный научный и практический интерес.

Таблица 5. Динамика концентраций  $\text{SO}_4^{2-}$  в поверхностном слое снега зимой 2006/07 г.

| Зима (21.01-08.02) |            |                                   | Весна (05.03-05.04) |            |                                   |
|--------------------|------------|-----------------------------------|---------------------|------------|-----------------------------------|
| Дата               | Осадки, мм | Сульфат-ион, мг/л                 | Дата                | Осадки, мм | Сульфат-ион, мг/л                 |
| 24.01              | 0.3        | $1.28 \pm 0.23$                   | 12.03               | 0.0        | $1.35 \pm 0.41$                   |
| 25.01              | 0.0        | $1.72 \pm 0.57$                   | 14.03               | 6.6        | $1.33 \pm 0.29$                   |
| <b>26.01</b>       | –          | <b><math>1.13 \pm 0.21</math></b> | <b>15.03</b>        | –          | <b><math>1.30 \pm 0.34</math></b> |
| <b>27.01</b>       | –          | <b><math>1.40 \pm 0.34</math></b> | <b>16.03</b>        | –          | <b><math>1.56 \pm 0.48</math></b> |
| 29.01              | 3.2        | $1,66 \pm 0,51$                   | <b>17.03</b>        | –          | <b>Не опр.</b>                    |
| 30.01              | 7.6        | $1,30 \pm 0,40$                   | <b>18.03</b>        | –          | <b>Не опр.</b>                    |
| 31.01              | 0.3        | $1,09 \pm 0,33$                   | <b>19.03</b>        | –          | <b><math>1.73 \pm 0.53</math></b> |
| 03.02              | 0.0        | $0.68 \pm 0.17$                   | <b>28.03</b>        | –          | <b><math>1.21 \pm 0.41</math></b> |
| <b>05.02</b>       | –          | <b><math>0.61 \pm 0.14</math></b> | <b>29.03</b>        | –          | <b><math>1.27 \pm 0.34</math></b> |
| <b>06.02</b>       | –          | <b><math>0.71 \pm 0.19</math></b> | <b>30.03</b>        | –          | <b><math>1.51 \pm 0.50</math></b> |
| 07.02              | 1.0        | $0.77 \pm 0.21$                   | 02.04               | 5.4        | $1.82 \pm 0.59$                   |
| 08.02              | 1.6        | $1.12 \pm 0.29$                   | 05.04               | 1.5        | $0.78 \pm 0.21$                   |

Наблюдения за динамикой сульфатного загрязнения поверхности снега проводили в два этапа. Первый (зимний) выполнен с 21 января по 8 февраля, а второй (весенний) – с 5 марта по 6 апреля 2007 г. Пробы поверхностного инея отбирали с помощью специального устройства (Пат. 2363939). Сульфат-ион в снеговой воде определялся турбидиметрически. Чувствительность анализа – 0,4 мг/л. Лабораторная погрешность составляет 25% от природной<sup>2</sup>, которая может рассматриваться как удовлетворительная для анализа, который «работает» на пределе чувствительности. Концентрация сульфат-иона в выборках аппроксимируется распределением, близким к

нормальному. Поэтому за наиболее вероятное значение измеряемой величины принято среднее арифметическое ( $M$ ), вычисленное из всего ряда измеренных

<sup>2</sup> Расчеты выполнены с использованием программы «Metrolog». Автор приносит свою глубокую благодарность его разработчику д.г.-м.н. Ю.А. Ткачёву (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН).

значений (шесть проб) для каждого дня наблюдений. Проанализировано 174 пробы (96 за первый период и 78 – за второй). Доверительный интервал рассчитан при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ . Выявлен прирост содержания сульфат-иона в пробах инея в перерывах между снегопадами зимой: (с 26 по 27 января) он составил 0,27 мг/л, а весной (с 15 по 19 и 28 по 30 марта) – 0,43 и 0,30 соответственно (табл. 5).

Исследование динамики изменчивости концентраций сульфат-иона в верхнем слое снега показали зависимость его содержания от частоты образования поверхностного инея. Предполагается, что механизм, обеспечивающий относительно высокие содержания сульфат-иона на поверхности снега, связан с морозным конденсированием диоксида серы. Известно, что температура сжижения диоксида серы  $-10^{\circ}\text{C}$ , поэтому зимой в приземном слое воздуха возможно образование дисперсных капель сжиженного газа  $\text{SO}_2$  как из атмосферы, так и состава техногенных эмиссий. Их адсорбция на поверхности ледяных кристаллов инея может быть важным источником поступления сульфатов на поверхность снежного покрова. Процесс усиливается с приходом циклонов, поскольку при контрасте температур между снежной поверхностью и приземной атмосферой данный механизм действует как своеобразный насос, закачивая в снежный покров избыток влаги из атмосферы, а вместе с ней – и часть техногенных эмиссий, адсорбированных на поверхности атмосферных ледяных кристаллов. В итоге влияние морозного концентрирования диоксида серы на загрязнение снежного покрова будет усиливаться. В таких условиях возможно получение близких показателей, характеризующих содержание соединений серы в снежной толще фоновых и техногенных территорий.

**Региональный радиационный мониторинг: использование  $^{40}\text{K}$  в качестве радиоизотопной метки регионального переноса пылевого загрязнения.** В настоящее время радиоэкологическая обстановка динамично меняется: отмечается повсеместный рост естественного фона ионизирующих излучений, появляются новые и расширяются существующие зоны с повышенным содержанием радионуклидов, возрастает их содержание в пищевых цепочках (Алексахин, 2009). В таких условиях необходим поиск критериев распознавания: что является результатом воздействия атмосферного переноса радиоактивных веществ, а что – следствием влияния сезонных колебаний природного радиационного фона. Поскольку последний тесно связан с атмосферной радиоактивностью, то изучение носителей ее распределения в приземном слое воздуха весьма актуально. Для этого удобным объектом наблюдений явился  $^{40}\text{K}$ . Выбор обусловлен тем, что радиоизотоп широко рассеян в почве и прочно удерживается глинами. Экспонирование импультвераторов, в которых в качестве сорбционного субстрата использовался тонкодисперсный химически инертный порошок  $\text{MgO}$ , производилось на двух аэрозольных площадках. Первая была обустроена в пределах Сыктывкарского (участок «РБК»), а вторая – Ухтинского промышленного узла (район пос. Водный, участок «10 завод»).

Выбор промузлов обусловлен отсутствием в них объектов, связанных с алюминиевым производством, а также тем, что для Сыктывкара частота повторяемости ветров со стороны источника регионального запыления (глиноземный карьер рудника «Бокситы Тимана») составляет 7-10, а для Ухты – 20-25 %. По отношению к Сыктывкару и Ухте источник запыления воздуха находится на расстоянии 400 и 260 км соответственно. Измерение удельной активности  $^{40}\text{K}$  производили на сцинтилляционном гамма-бета спектрометрическом комплексе с программным обеспечением «Прогресс» (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН) в геометриях

«Маринелли-250». Время измерения проб – 3600 сек. Результаты показали, что удельная активность  $^{40}\text{K}$ , «набранная» за год для Сыктывкарского промузла, оказалась почти в три раза ниже, чем для Ухтинского за два месяца (табл. 6).

Таблица 6. Изменение удельной активности  $^{40}\text{K}$  в условиях запыленности атмосферы, Бк/кг

| Период экспонирования            | Сорбент | Удельная активность |
|----------------------------------|---------|---------------------|
| Сыктывкарский промышленный район |         |                     |
| 05.2009-04.2010                  | MgO     | 58±17               |
| 03.2011-04.2012                  | MgO     | < 40                |
| Ухтинский промышленный район     |         |                     |
| 06.2011-07.2011                  | MgO     | < 40                |
| 07.2011-09.2011                  | MgO     | 181±36              |

Следовательно, с началом работы рудника за счет регионального переноса возросло содержание глиноземной пыли в приземной атмосфере над Ухтинским промузлом, что усиливает риск дополнительного радиационного облучения населения за счет увеличения ингаляционной дозы  $^{40}\text{K}$ , прирост которой находится в прямой зависимости от степени загрязнения приземного воздуха глиноземной пылью. Исследованиями механизма взаимодействия аэрозольного

стока с подстилающей поверхностью в системе: «атмосфера–почва», «атмосфера–снежный покров», «атмосфера–растение» установлено что: **а)** аэрозольный сток в условиях атмосферного загрязнения выступает как геохимический фактор, предопределяющий особенности геохимических обстановок и условий, играющих важную роль в мобилизации и миграции химических элементов в ландшафтах.

В районах промышленного освоения техногенные эмиссии инициируют увеличение аэрозольной массы в приземной атмосфере и активизируют аэрозольный сток на поверхность ландшафтов. В результате в деятельном слое воздуха и почв возрастает масса вовлеченного в геохимические реакции материала, что усиливает миграцию ЭП; **б)** соотношения металлов в водо- и кислоторастворимой фракциях сухих выпадений зависят от содержания кислотообразующих аэрозолей и минеральных частиц в воздухе. В условиях подкисления атмосферы техногенными эмиссиями концентрация металлов в водорастворимой фракции сухих выпадений выше, чем в кислоторастворимой, тогда как при запылении воздуха зависимость обратная; **в)** в условиях пыле-аэрозольного загрязнения приземной атмосферы приглушается биогеохимическая активность растений. Обнаружено, что при прочих равных условиях контрастность сигнала аэрогенной биогеохимической аномалии определяется степенью шероховатости листовой поверхности растения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены эмпирические закономерности, характеризующие особенности фонового распределения элементов-примесей в равнинных ландшафтах Ямала и Большеземельской тундры. Оценка совпадения теоретических и эмпирических частот распределения элементов-примесей, выполненная с использованием критерия  $\chi^2$ , показала, что как для целинных, так и освоенных тундр распределение элементов-примесей в почвенно-растительном покрове в большинстве не может быть аппроксимировано логарифмически нормальным законом распределения. Гистограммы часто осложнены сильным эксцессом и имеют значительную дисперсию. Примечательно, что и в Большеземельских, и Ямальных тундрах для сульфобильных и литобильных элементов-примесей фиксируется преимущественно полимодальное распределение в выборках, что свидетельствует о наличии нескольких источников их поступления в ландшафты.

2. Геохимические аномалии, возникающие вследствие сезонных флуктуаций природного геохимического фона, и геохимические аномалии, связанные с техногенной трансформацией мерзлотных ландшафтов, имеют разные механизмы и должны рассматриваться отдельно – как в отношении выбора геохимических показателей природного и техногенного фона, так и геохимических признаков в объектах-индикаторах.

3. Сопоставление биогеохимической активности жизненных форм тундровых растений (кустарники, травы, мхи и лишайники) показало систематическую (биоморфную) специализацию трав в преимущественном накоплении анионогенных элементов, тогда как кустарники, мхи и лишайники характеризуются увеличенным содержанием катионогенных элементов. Формирование аномалий катионогенных элементов во мхах и лишайниках идет по безбарьерному типу, а их контрастность зависит от степени шероховатости и формы листовых пластинок мхов и вегетативной поверхности (кустистые, накипные) лишайников.

4. Сопряженные с ЭПР-спектроскопией и термографические исследования сфагновых мхов выявили для загрязненных растений увеличение интенсивности спектра свободных радикалов и смещение температурных отметок термической деструкции органического вещества в область относительно низких значений. Данное сочетание физических методов достаточно информативно при качественной оценке состояния природной среды в зоне техногенеза.

5. Эколого-геохимический анализ барьерообразующих факторов выявил небольшой спектр классов геохимических барьеров: кислородный (А2, А6), глеевый (С2, С6), щелочной (D2, D6), кислый (Е6), термодинамический (Н2, Н6) и сорбционный (G2, G6) с соответствующими типами аномалий. Применение геохимических барьеров в природоохранной практике повышает эффективность мер защиты и мониторинга окружающей среды топливдобывающих комплексов в Субарктике. В частности, в условиях равнин Большеземельской тундры с близким залеганием мерзлотного водоупора в качестве основы разработок способов защиты окружающей среды лучше использовать искусственный мерзлотно-сорбционный геохимический барьер, который эффективен как для локализации распространения внутрипочвенного загрязнения, так и для мониторинга самоочищения территории. При выявлении загрязнения информативно геохимическое опробование коллоидных образований гидроксидов железа, осаждающихся на кислородном барьере. Широкая встречаемость гидроксидов железа делает их чрезвычайно удобным объектом геохимического опробования при создании опорных точек сети геохимического мониторинга.

6. Наблюдениями установлено, что в зоне изотермического слоя, формирующегося на границе «снег-почва», возникают условия для существования своеобразного криогеохимического барьера. Физико-химические преобразования снежных кристаллов в данной граничной зоне с участием субохлажденной влаги, образовавшейся при конденсации почвенных водяных паров, контролируют процесс накопления элементов-примесей в кристаллах глубинного инея на криогеохимическом барьере.

7. При анализе послойной изменчивости интегральных геохимических параметров (водородный показатель, окислительно-восстановительный потенциал, кондуктометрия, плотность снега) выявлено, что в снежном покрове существует окислительно-восстановительная зональность.

8. Наблюдения за динамикой изменчивости содержания сульфат-иона на поверхности снежного покрова показали, что сульфатное загрязнение поверхности снежного покрова в период между снегопадами обусловлено адсорбцией

сжиженных капель  $\text{SO}_2$  на ледяных кристаллах инея при его осаждении (температура сжижения диоксида серы  $-10^\circ\text{C}$ ). Ранее этот источник подкисления снега не учитывался и не рассматривался.

9. Обнаружено, что соотношение содержаний металлов в водо- и кислоторастворимой фракциях в стоке сухих выпадений зависят от содержания кислотообразующих аэрозолей и минеральных частиц в воздухе. В условиях подкисления атмосферы техногенными эмиссиями концентрация металлов в водорастворимой фракции сухих выпадений выше, чем в кислоторастворимой, тогда как при запылении воздуха зависимость обратная.

10. Апробирован новый способ пассивного пробоотбора аэрозоле. исследования проводились в широком диапазоне температур (от  $-47$  до  $+32^\circ\text{C}$ ), относительной влажности (30–100%) и скорости ветра (от штиля до  $20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  с порывами до 35) в тундровой и таежной зонах европейской территории России. По итогам исследований получено 13 патентов. Результаты позволяют по-новому организовать пассивный контроль аэрозольного стока при изучении регионального и трансграничного переноса техногенных эмиссий, при исследованиях атмосферной радиоактивности и наблюдениях аэрозольного загрязнения приземного слоя воздуха в малообжитых и труднодоступных районах.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ

1. Тентюков, М.П. Послойный снегоотборник с прямоугольным сечением / М.П. Тентюков // Лёд и Снег. - 2014. - № 1 (125). - С. 81-85.
2. Тентюков, М.П. Особенности распределения химических элементов в мерзлых почвах / М.П. Тентюков // Криосфера Земли. -2013. - Т. XVII. - № 3. - С. 100-107.
3. Тентюков, М.П. Оценка удельной активности искусственных и естественных радионуклидов в стоке аэрозолей в лесные экосистемы / М.П. Тентюков // Сибирский экологический журнал. - 2012. - Т. 19. - № 3. - С. 337-344.
4. Тентюков, М.П. Изучение распределения радионуклидов в стоке сухих аэрозолей при их поступлении в лесные экосистемы / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2012. - № 3. - С. 46-55.
5. Тентюков, М.П. Морозное конденсирование диоксида серы и загрязнение поверхности снега / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2011. - № 12. - С. 29-35.
6. Тентюков, М.П. Изучение динамики концентрации радионуклидов в приземной атмосфере/ М.П. Тентюков, А.И. Таскаев, И.И. Шуктомова, В.П. Лютое // Известия Коми научного центра УрО РАН. - 2011. - № 1(5). - С. 38-43.
7. Тентюков, М.П. Поступление металлов в лесные экосистемы со стоком сухих аэрозолей: влияние погодообразующих процессов и метеорологических факторов / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2009. - № 5. - С. 66-79.
8. Тентюков, М.П. К возможности выявления углеводородного загрязнения в сфагнуме методом ЭПР // Сибирский экологический журнал. - 2008. - Т. 15. -№ 6. - С. 867-870.
9. Тентюков, М.П. ЭПР-спектроскопия сухих аэрозолей / М.П. Тентюков, В.П. Лютое // Оптика атмосферы и океана. - 2008. - Т. 21. - № 9. - С. 789-792.
10. Тентюков, М.П. Изменение информативности индикационных характеристик тундровых кустарников в условиях аэротехногенного загрязнения / М.П. Тентюков // Сибирский экологический журнал. - 2008. - Т. 15. - № 2. - С. 217-225.



11. Тентюков, М.П. Морозное конденсирование техногенных эмиссий и загрязнение снежного покрова в районе нефтедобычи (на примере Большеземельской тундры) / М.П. Тентюков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2008. - № 2. - С. 39-45.

12. Тентюков, М.П. Накопление металлов в тундровых кустарниках в условиях аэротехногенного загрязнения Ямала / М.П. Тентюков, Ю.А.Ткачëв // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2008. - № 3. - С. 31-37.

13. Тентюков, М.П. Особенности формирования загрязнения снежного покрова: морозное конденсирование техногенных эмиссий (на примере районов нефтедобычи в Большеземельской тундре) / М.П. Тентюков // Криосфера Земли. - 2007. - Т. XI. - № 4. - С. 31-41.

14. Тентюков, М.П. Способ сбора сухих аэрозолей для изучения аэротехногенного загрязнения лесных экосистем и устройство для его осуществления / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2007. - № 5. - С. 99-106.

15. Тентюков, М.П. Сухие аэрозольные выпадения в геохимическом цикле железа (на примере ландшафтов Центрального Ямала) / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2006. - № 12. - С. 35-44.

16. Тентюков, М.П. Ионные формы железа поверхностных вод как индикаторы эрозионной устойчивости ландшафтов (Центральный Ямал) / М.П. Тентюков // География и природные ресурсы. - 2006. - № 2. - С. 73-76.

17. Тентюков, М.П. Формирование аэрозольной среды Ямала в условиях загрязнения атмосферы / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2006. - № 3. - С. 55-63.

18. Тентюков, М.П. Ожелезнение поверхности тундр Центрального Ямала как природно-техногенный феномен / М.П. Тентюков // Криосфера Земли. - 2005. - Т. IX. - № 4. - С. 18-28.

19. Тентюков, М.П. Геохимический цикл железа в атмосфере над Ямалом и его влияние на содержание соединений железа в тундровых ландшафтах / М.П. Тентюков // Метеорология и гидрология. - 2005. - № 5. - С. 37-43.

20. Тентюков, М.П. Биофизические реакции сфагновых мхов как индикационные признаки в условиях углеводородного загрязнения / М.П. Тентюков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2005. - № 10. - С. 9-14.

21. Тентюков, М.П. Почвенные и атмосферные факторы эрозионной устойчивости ландшафтов Центрального Ямала / М.П. Тентюков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2005. - № 4. - С. 18-28.

### **Монографии**

1. Тентюков, М.П. Геохимия ландшафтов Центрального Ямала / М.П. Тентюков. - Екатеринбург: УрО РАН, 1998. - 102 с.

2. Тентюков, М.П. Геохимия ландшафтов равнинных тундр (на примере Ямала и Большеземельской тундры) / М.П. Тентюков. - Сыктывкар: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2010. - 260 с.

### **Статьи в сборниках и материалах научных конференций**

1. Тентюков, М.П. Возможность биоиндикации нарушений растительного покрова при проведении буровых работ на нефтяных месторождениях Большеземельской тундры / М.П. Тентюков, С.В. Кузиванова // Природопользование

и охрана окружающей среды Тимано-Печорского ТПК: Сб. науч. тр. / Коми фил. АН СССР. - Сыктывкар, 1986. - № 76. - С. 95-105.

2. Тентюков, М.П. Использование гидроксидов железа при выявлении загрязнения тундры / М.П. Тентюков // Сер. сообщ. / Новые научные методики / АН СССР. Урал. отд. Коми науч. центр. Вып. 29 (1988). - Сыктывкар, 1988. - 24 с.

3. Тентюков, М.П. Техногенная трансформация тундровых ландшафтов в районах нефтедобычи / М.П. Тентюков // Экология нефтегазового комплекса / Материалы 1 Всесоюз. конф. Надым (3-6 окт. 1988 г.). - М., 1989. - Вып. 1. - Ч. 1. - С.78-84.

4. Тентюков, М.П. Геохимический мониторинг Ямала: геохимические барьеры (практический аспект) / М.П. Тентюков; АН СССР. Урал.отд., Ин-т биологии. Коми науч. центр. - Сыктывкар, 1990. - 38 с. - Деп. в ВИНТИ 29.01.1991, N 477-B91.

5. Тентюков, М.П. Техногенные геохимические барьеры / А.И. Перельман, Е.Н. Борисенко, Н.Ф. Мырлян, М.П. Тентюков // Геохимия техногенных процессов. - М.: Наука. - 1990. - С. 14-26.

6. Тентюков, М.П., Физические методы исследования растений в зоне техногенеза / М.П. Тентюков, Г.С. Назарова, Л.В. Бершов; АН СССР. Урал. отд. Ин-т биологии. Коми науч. центр. - Сыктывкар, 1990. - 12 с. - Деп. в ВИНТИ 31.01.1990, N 599-B90.

7. Тентюков, М.П. Биогеохимическая индикация влияния антропогенных факторов на перераспределение микроэлементов в тундровых фитоценозах / М.П. Тентюков // Индикационная роль споровых растений Воркутинской тундры в условиях антропогенного воздействия. - Сыктывкар, 1991. - С. 165-189. - Деп. в ВИНТИ 30.10.91, N 4169-B91.

8. Тентюков, М.П. Геохимические ландшафты / Колл. авторов; под общ. ред. Л.Н. Добринского // Природа Ямала. - Екатеринбург: УИФ «Наука», - 1995. - С. 139-149.

9. Тентюков, М.П. Геохимические барьеры в ландшафтах Центрального Ямала / М.П. Тентюков // Геохимические барьеры в зоне гипергенеза; под ред. Н.С. Касимова, А.Е. Воробьева. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. - С. 223-231.

10. Тентюков, М.П. Геохимическая активность атмосферы и ожелезнение поверхности тундровых ландшафтов (на примере Центрального Ямала) / М.П. Тентюков // Материалы Российской конференции, посвященной юбилею А.И. Перельмана «Геохимия биосферы». Москва, 15-18 ноября 2006 г. - М.: МГУ, 2006. - С. 145-149.

11. Тентюков, М.П. Особенности геохимической трансформации поверхностных вод в районах нефтедобычи в Большеземельской тундре / М.П. Тентюков // Тез. Международной конференции «Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов». - Тюмень (11-13 октября 2010 г.). Изд-во ТГУ. - 2010. - С. 203-206.

12. Тентюков, М.П. Морозное концентрирование диоксида серы и проблема кислого снега в районах нефтедобычи: иней как объект геохимического мониторинга / М.П. Тентюков // Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов: Тез. Международной конференции. - Тюмень (15-17 ноября 2011 г.): Изд-во ТГУ. - 2011. - С. 121-124.

13. Тентюков, М.П. Пассивный радиационный мониторинг запыленности приземной атмосферы / М.П. Тентюков, И.И. Шуктомова // Материалы

Международной конференции «Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды». - Сыктывкар (17-21 марта 2014 г.): ИБ Коми НЦ УрО РАН. - 2014. - С. 340-344.

14. Тентюков, М.П. Геохимическая активность атмосферы и аэрозольное загрязнение ландшафтов // Материалы Российского совещания с международным участием «Геохимия литогенеза». - Сыктывкар (17-19 марта 2014 г.): ИГ Коми НЦ УрО РАН. - 2014. - С. 113-115.

### **Патенты и авторские свидетельства на изобретения**

1. Пат. № 2554303 Российская Федерация, МПК G 01 W 1/14 (2006.01). Способ измерения нарастающих отложений сублимационного льда-инея на поверхности снежного покрова / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2013121714; заявл. 08.05.2013; опубл. 27.06.2015, Бюлл. N 18. - 10 с.: ил.

2. Пат. 89907 Российская Федерация, МКПО 09-03. Устройство для измерения высоты снежного покрова и прироста инея: патент на промышленный образец / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2012503457; заявл. 01.10.2012; опубл. 19.09.2014, Бюлл. N 25. - 7 с.: ил.

3. Пат. 2502059 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/22, G 01 N 1/00. Способ выявления кислотного загрязнения приземного слоя атмосферы в зимний период и устройство для его осуществления / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. - N 2012392998/04; заявл. 13.09.2012; опубл. 20.12.2013, Бюлл. N 35. - 10 с.: ил.

4. Пат. 2477461 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/04. Послойный снегоотборник / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 201123918/05; заявл. 10.06.2011; опубл. 10.03.2013, Бюлл. N 7. - 10 с.: ил.

5. Пат. 2469288 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/00, B 82 B 1/00. Способ определения загрязнения приземного слоя атмосферы наноразмерными частицами / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. - 2011124616/05; заявл. 16.06.2011; опубл. 10.12.2012, Бюлл. N 34. - 12 с.: ил.

6. Пат. 2459191 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/22. Способ и устройство для экспонирования контейнеров для сбора сухих аэрозолей на безлесных территориях / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2010150949/05; заявл. 13.12.2010; опубл. 20.08.2012, Бюлл. № 23. - 6 с.: ил.

7. Пат. 2432564 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/00. Способ выявления загрязнения приземного слоя воздуха с помощью искусственной росы / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2009131544/05; заявл. 19.08.2009; опубл. 27.10.2011, Бюлл. № 30. - 6 с.: ил.

8. Пат. 2411487 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/04. Снегоотборник Тентюкова / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2009131266/05; заявл. 17.08.2009; опубл. 10.02.2011, Бюлл. № 4. - 9 с.: ил.

9. Пат. 72844 Российская Федерация, МКПО 09-03. Контейнер для сбора сухих атмосферных аэрозолей / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2008501008; заявл. 31.03. 2008; опубл. 16.11.2009, Бюлл. № 4. - 5 с.: ил.

10. Пат. 2363939 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/20. Способ выявления сульфатного загрязнения снежного покрова (варианты) и устройство для отбора проб снега с поверхностным инеем / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2007149351/12; заявл. 29.12.2007; опубл. 10.08.2009 Бюлл. № 22. - 12 с.: ил.

11. Пат. 2362984 Российская Федерация, МПК G 01 N 5/00. Способ отбора сухих аэрозолей при выявлении аэрогенного загрязнения поверхности и устройство для его осуществления / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2007118839/29; заявл. 21.05.2007; опубл. 27.07.2009, Бюлл. № 21. - 11 с.: ил.

12. Пат. 2357222 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/22, B 82 B 1/00. Способ контроля загрязнения воздуха наноразмерными частицами и устройство для его осуществления / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2007138237/12; заявл. 15.10.2007; опубл. 27.05.2009. Бюлл. № 15. - 8 с.: ил.

13. Пат. 2314511 Российская Федерация, МПК G 01 N 1/22. Способ сбора сухих аэрозолей для контроля окружающей среды и устройство для его осуществления / Тентюков М.П., заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. N 2005141282/12; заявл. 28.12.2005; опубл. 10.01.2008. Бюлл. № 1. - 6 с.: ил.

14. А.с. 1730582 СССР МКИ G 01 N 33/24. Способ выявления загрязнения в зоне избыточного увлажнения / Тентюков М.П., Назарова Г.С., Бершов Л.В. - N 4629039/15; заявл. 30.12.1988; опубл. 30.04.1992. Бюлл. № 16. - 10 с.: ил.

15. А.с. 1453356 СССР МКИ G 01 V 9/00. Биогеохимический способ выявления зон активной миграции техногенных элементов / Перельман А.И., Тентюков М.П., Мирнова А.И., Анохин А.Б., Пискун И.И. - N 4268097/24-25; заявл. 26.06.1987; опубл. 23.01.1989. Бюлл. № 3. - 5 с.: ил.

16. А.с. 1388798 СССР МКИ G 01 N 33/24. Способ выявления техногенного загрязнения ландшафтов с глеевой обстановкой / Авторы: Перельман А.И., Тентюков М.П., Мырлян Н.Ф., Пискун И.И. - N 4077815/30-15; заявл. 13.06.1986; опубл. 15.04.1988. Бюлл. № 14. - 6 с.: ил.

17. А.с. 1304492 СССР МКИ E 21 C 41/00, A 01 B 79/00. Способ локализации техногенных потоков загрязнения / Авторы: Перельман А.И., Тентюков М.П., Братцев А.П., Мырлян Н.Ф. - N 3874592/22-03; заявл. 21.03.1985; зарегистр. 15.12.1986. (ДСП).