

На правах рукописи



Хайрулина Елена Александровна

**ЛАНДШАФТОБРАЗОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ
ТЕХНОГЕННОГО ГАЛОГЕНЕЗА**

1.6.21. Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Официальные оппоненты:

Опекунова Марина Германовна, доктор географических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра геоэкологии, профессор

Пузанов Александр Васильевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, исполняющий обязанности директора

Рыбникова Людмила Сергеевна, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория экологии горного производства, главный научный сотрудник

Язык Егор Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение геологии, профессор

Защита диссертации состоится 07 декабря 2022 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.6.01», созданного на базе геолого-географического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (Главный корпус ТГУ, аудитория 119).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/1089bfc3-4783-4ebb-87fc-9af065a05909>

Автореферат разослан « ____ » октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Квасникова Зоя Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Разработка месторождений полезных ископаемых оказывает наиболее интенсивное негативное воздействие на природные комплексы по степени преобразования и площадному распространению. Отходы добычи и переработки калийной промышленности являются источником техногенных высокоминерализованных потоков, которые могут определять формирование специфических ландшафтов с характеристиками и процессами, не свойственными для данной природной зоны. Необходимость оценки пространственно-временных изменений ландшафтов при разработке месторождений калийных солей в значительной мере обусловлена расширением географии производства и малой изученностью интенсивного техногенного галогенеза, с масштабами которого не сопоставим, например, техногенный галогенез при нефтедобыче.

Россия является одним из важнейших поставщиков калийных удобрений в мире. Основные запасы калия в России сосредоточены на одном из крупнейших в мире месторождений калийных солей – Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВКМКС), которое разрабатывается около 90 лет. Его площадь – более 6,5 тыс. км². Геологические запасы месторождения по карналлитовой породе составляют 96,4 млрд т, по сильвинитам – 112,2 млрд т, по каменной соли – 4,65 трлн т. Ежегодная добыча калийно-магниевых солей осуществляется в объеме около 40 млн т в год. На территории ВКМКС накоплено более 270 млн т галитовых отходов и более 30 млн м³ глинисто-солевых шламов.

Острая необходимость в калийных удобрениях обуславливает появление новых предприятий на Верхнекамском месторождении, в Волгоградской области; рассматривается возможность разработки месторождений в Иркутской, Калининградской и Саратовской областях. Обеспечение экологической безопасности горнодобывающей деятельности – актуальная проблема калийной промышленности.

Наиболее полно структура и функционирование ландшафтов изучались при природном галогенезе. Ландшафтно-геохимические процессы при современном галогенезе рассмотрены Н.С. Касимовым и др. на примере Прикаспия, В.П. Петрищевым – на примере солянокупольных районов, R. Fitzpatrick и R. В. Salama, Morgan K. и Jankowski – на примере материкового засоления в Австралии.

Естественные факторы засоления почв в России рассмотрены в фундаментальном труде «Засоленные почвы России» [Засоленные почвы России, 2006] и «Засоленные почвы Западной Сибири» [Курачев, Рябова, 1981]. Установлены генезис формирования засоления в аллювиальных долинах [Ковда, 1937; Родникова, 2007], диагностические признаки и их количественные показатели [Базилевич, Панкова, 1968; Панкова, Ямнова, 1993].

Проблемы техногенного галогенеза мало проработаны. Наиболее полно изучено развитие процессов засоления при поступлении пластовых вод в процессе добычи нефти [Солнцева, Садов, 2004; Габбасова, Сулейманов, 2007; Московченко и др., 2017] и использовании антигололедных реагентов [Артамонова и др., 2010; Никифорова и др., 2017]. Описаны «солонцовый» и «парасолонцовый» процессы технопедогенеза, разработаны модели трансформации почвенного поглощающего комплекса и почвенных растворов.

Техногенный галогенез при разработке месторождений солей, где источник солей может быть естественного или техногенного происхождения и изменяется в пространстве и времени, также недостаточно исследован. Наиболее полно изучен вопрос воздействия добычи калийных солей на поверхностные и подземные воды. Проблемами миграции загрязненных вод в приповерхностную гидросферу и геохимическими исследованиями на территории Верхнекамского месторождения калийных солей достаточно широко занимались Б.А. Бачурин, А.И. Кудряшов, Г.В. Бельтюков и др. Следует назвать отдельные работы по влиянию техногенного засоления на развитие адаптивных механизмов у растений, формирование специфических галофитных и галотолерантных бактериальных сообществ [О.З. Еремченко и др.; Е.Г. Плотникова и др.]. Проводимые за рубежом исследования на территории аналогичных месторождений, например, в Германии, Белоруссии, Франции, Канаде, также связаны с изучением влияния горных работ на отдельные компоненты окружающей среды [P. Hulisz, A. Piernik, J. Arle, В.С. Хомич].

Актуальность темы заключается в необходимости более глубокого понимания взаимодействия компонентов природных систем с целью выявления пространственных и временных изменений ландшафтно-геохимических процессов, вызванных техногенным поступлением водорастворимых солей и элементов-примесей при разработке месторождений калийных солей.

Разработанный методологический подход позволяет провести оценку трансформации геохимической структуры и функционирования ландшафтов под влиянием антропогенной деятельности, что является одной из важнейших задач геоэкологии.

Целью диссертационного исследования является установление пространственно-временных закономерностей формирования природно-техногенных ландшафтов в районах интенсивного техногенного галогенеза.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Определить факторы формирования и особенности геохимической структуры природных и природно-техногенных ландшафтов в районах распространения галогенных формаций.

2. Выявить основные закономерности и механизмы латеральной и радиальной миграции основных загрязнителей в пространстве и времени при разработке месторождений калийных солей.

3. Выделить эколого-геохимические индикаторы состояния наземных и аквальных ландшафтов при техногенном галогенезе.

4. Разработать принципы и методические рекомендации контроля и снижения негативного воздействия объектов калийного производства и восстановления нарушенных земель.

Объект исследования – геохимические ландшафты средней и южной тайги Среднего Предуралья на территории одного из крупнейших в мире калийных месторождений – Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Предмет исследования – ландшафтно-геохимические процессы в районах развития галогенных формаций и их трансформация при горнодобывающей деятельности.

Методологическая основа исследований

Теоретической основой работы является методология ландшафтно-геохимических исследований, разработанная в трудах М.А. Глазовской, А.И. Перельмана и Н.С. Касимова и дополненная эколого-геохимическими методами, предложенными Ю.Е. Саев с соавторами (1986, 1990). Механизмы трансформации ландшафтов были изучены с использованием геохимических, минералогических и биогеохимических методов. В основу работы положены данные ландшафтного описания и геохимического опробования компонентов наземных и аквальных ландшафтов на ключевых участках по ландшафтно-геохимическим профилям, отражающим катены южно-таежных и среднетаежных ландшафтов с учетом расположения объектов калийных предприятий и разгрузки засоленных подземных вод (рис. 1).

Химические анализы проводились в аттестованных лабораториях Пермского государственного национального исследовательского университета, Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург), Университета Колледж Лондона. Определялись макро- и микрокомпоненты поверхностных и подземных вод, донных отложений, почв, растительности, снежных талых вод. Агрохимический анализ и содержание макроэлементов анализировались стандартными методами. Микроэлементы определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ELAN 9000 после микроволнового кислотного разложения. Минеральные компоненты почв и донных отложений анализировались методом XRD, используя настольный дифрактометр D2 Phaser, минералогия почвы – биноклюмом Nikon 104. Морфологию и микроструктуру образцов исследовали с помощью TESCAN MIRA 3 LMU и высокопроизводительного аналитического сканирующего электронного микроскопа (SEM). Анализ твердых фаз донных отложений и почв дополнен энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDS; система Oxford Instrument X-Max 80 EDS). Таксономическое разнообразие микрофлоры изучено с помощью метагеномного анализа по генам 16S рРНК на платформе MiSeq (Illumina).

Для анализа данных химического состава компонентов ландшафтов использовались стандартные статистические методы.

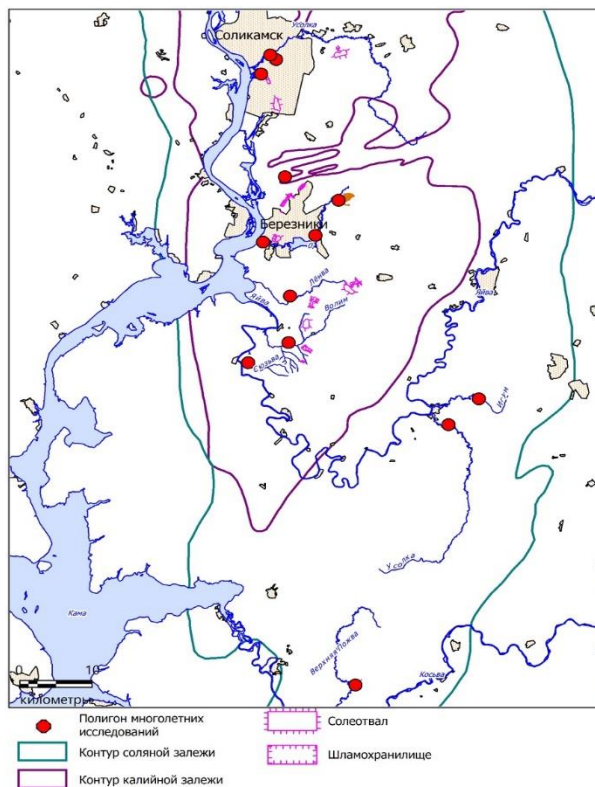


Рисунок – 1. Расположение полигонов многолетних исследований

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и формулировании задач, выборе способов решения и методов исследования, анализе и интерпретации полученных результатов, в написании научных статей, подготовке и представлении докладов на конференциях, симпозиумах и семинарах.

Основные научные результаты получены в рамках выполнения следующих проектов под руководством автора: проект № 01201150308 Министерства образования и науки РФ «Формирование природно-техногенных геосистем в районах развития галогенных формаций» по заданию Министерства образования и науки РФ (2011); 3 проекта РФФИ: № 12-05-09286-моб_з «Научный проект "Влияние разработки месторождения калийных солей на химию поверхностных и подземных вод" для предоставления на научном мероприятии "9-й Международный симпозиум по геохимии окружающей среды"» (2012); № 12-05-31130 «Трансформация природных геосистем в районах техногенного галогенеза» (2012–2013); № 15-05-07461 «Ландшафтно-геохимическая структура в условиях техногенного галогенеза» (2015–2017); проект № 2019–0858 Министерства науки и высшего образования РФ «Биогеохимические и геохимические исследования ландшафтов в условиях разработки месторождений полезных ископаемых, поиск новых методов мониторинга и прогноза состояния окружающей среды» (2020–2024); проект «Внедрение технологий снижения

негативного воздействия на окружающую природную среду и рекультивации нарушенных земель при разработке месторождений полезных ископаемых» в рамках Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование» на 2019–2024 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (распоряжение Правительства РФ от 30 апреля 2019 г. №537) (2021), а также другие проекты, в которых автор участвовала в качестве исполнителя.

Научная новизна полученных результатов

Диссертантом лично и под его руководством проведены комплексные ландшафтно-геохимические и эколого-геохимические исследования воздействия природных и техногенных источников солей на территории распространения соленосной формации: естественных выходов соленых подземных вод, древних рассолоподъемных скважин и предприятий добычи и переработки калийной руды.

Выявлена многофакторность техногенного галогенеза в таежных ландшафтах, особенно ярко проявляющегося в супераквальных ландшафтах. Впервые установлено, что в аллювиальных почвах наиболее интенсивно проявляются процессы засоления в результате близкого расположения или площадной разгрузки засоленных подземных вод.

Установлены и изучены процессы активизации сульфидогенеза и оксидогенеза в аллювиальных ландшафтах. Впервые описано формирование техногенных сульфидных солончаков в районах влияния калийных предприятий.

Проведено комплексное описание сложившихся солонцеватых природных комплексов с участием солеросов в районах длительного влияния древних рассолоподъемных скважин, ранее в Пермском крае не описанных.

Предложена система эколого-геохимических индикаторов для оценки трансформации таежных природных геосистем в условиях интенсивного техногенного галогенеза в результате разработки калийного месторождения. Показана эффективность использования соотношений макрокомпонентов для идентификации воздействия калийной промышленности.

Разработаны теоретические основы мониторинга состояния окружающей среды при разработке месторождений калийных солей, с учетом особенностей миграции основных загрязнителей.

Предложены способы защиты подземных вод от поступления фильтрационных стоков с солеотвалов и шламохранилищ, рекультивации солеотвалов и шламохранилищ и восстановления нарушенных земель при засолении. Получен патент на изобретение «Состав для снижения водопроницаемости горных пород и способ тампонирования водопроницаемости участков горных пород» (патент РФ № 2743977).

Теоретическая значимость работы

Создана методологическая основа оценки трансформации геохимической структуры и функционирования ландшафтов в условиях техногенного галогенеза. Изложены закономерности миграции природных и

техногенных Na–Cl потоков в природных и природно-техногенных ландшафтах с выделением этапов аккумуляции и рассеивания солей и элементов-примесей, активизации процессов ионного обмена и выщелачивания.

Разработаны теоретические основы мониторинга состояния окружающей среды при разработке месторождений калийных солей, с учетом особенностей миграции основных загрязнителей.

Практическая значимость работы

Изучение изменений ландшафтной структуры с выделением различных стадий, форм и индикаторов трансформации ландшафтов открывает возможность для прогнозирования негативных последствий на новых участках разработки месторождений калийных солей и других видов горного производства, отходы которых содержат водорастворимые соли. Это позволяет более эффективно осуществлять экологический контроль состояния окружающей среды в районах разработки полезных ископаемых и проводить природоохранные мероприятия. Результаты исследований использованы для разработки программ мониторинга состояния окружающей среды на участках разработки калийных солей на Усть-Яйвинском лицензионном участке, Палашерском и Балахонцевском участках; составили основу рекомендаций эксперта, включенных в Программу производственного экологического контроля (мониторинга) компонентов окружающей среды Гарлыкского горно-обогатительного комбината (Туркменистан); в качестве экологического обоснования стали частью проектной документации ПАО «Уралкалий», АО «Верхнекамская калийная компания» и АО «ЕвроХим». Выполнены научно-исследовательские работы по разработке методов восстановления нарушенных земель при горнодобывающей деятельности: НИР «Исследования и обоснования возможности отработки запасов сильвинита, расположенных в границах шахтного поля под ООПТ регионального значения «Большеситовское болото» (2020–2021 гг.); НИР «Роль засоления в изменении видового разнообразия растительного мира, устойчивости экосистем, исследование возможности засева растениями поверхности солеотвалов и шламохранилищ Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей» (2016–2017 гг.); НИР «Проведение комплекса мероприятий по восстановлению земель, загрязненных в результате производственной деятельности ПАО «Уралкалий» на объекте БКПРУ–2» (2021–2022 гг.); НИР «Оценка биоразнообразия в районе воздействия предприятий ПАО «Уралкалий» (2021–2022 гг.); НИР «Подходы к оценке состояния почв, загрязненных в результате производственной деятельности ПАО «Уралкалий» (2021 г.); НИР «Инвентаризация нарушенных земель на объектах ПАО «Уралкалий» и в зоне их влияния» (2021–2022 гг.).

На защиту выносятся следующие положения:

1. В условиях гумидного климата Среднего Предуралья в районах разработки месторождения солей водная техногенная миграция водорастворимых солей и элементов-примесей определяет трансформацию ландшафтно-геохимических процессов и биоразнообразия наземных и аквальных ландшафтов.

2. Формирование сульфидных солончаков с осаждением минералов железа на поверхности почв происходит в супераквальных ландшафтах в результате активизации хлоридно-натриевыми техногенными потоками процессов выщелачивания и ионного обмена в системе вода–порода.

3. Эколого-геохимическая оценка трансформации ландшафтно-геохимической структуры на месторождениях калийных солей проводится с использованием комплекса атмогеохимических, гидрохимических, почвенно-геохимических и биогеохимических индикаторов, учитывающих специфику техногенного и природного засоления.

4. Снижение негативного воздействия отходов калийного производства обеспечивается системой мониторинга, отражающей специфику миграции основных загрязнителей, и комплексом природоохранных мероприятий на объектах хранения отходов.

Степень достоверности и апробация результатов исследований.

Достоверность представленных в работе результатов обеспечивается использованием методов исследования, соответствующих современному уровню мировой науки. Степень достоверности подтверждается фактическим материалом натуральных и лабораторных исследований, выполненных в период 2008–2021 гг. на территории Верхнекамского месторождения солей и 2000–2021 гг. на других территориях Пермского края. Лабораторные исследования проведены в аккредитованных лабораториях Пермского государственного национального исследовательского университета, Института геологии и геохимии УрО РАН, (Екатеринбург), Университета Колледж Лондона (Великобритания) и др. лабораториях. Для анализа достоверности результатов исследования химического состава компонентов ландшафтов использовались статистические методы.

Основные положения и результаты исследования докладывались автором на более чем 20 всероссийских и международных конференциях, в том числе: 9th Internat. Symposium on Environmental geochemistry (Авейру, Португалия, 2012); International Geographical Union Regional Conference: Geography, Culture and Society for our future Earth (Москва, Россия, 2015); International conference IMWA2016 (Лейпциг, Германия, 2016); IMWA2018 (Претория, ЮАР, 2018); International conference of the European Association of Geochemistry and the Geochemical Society Goldschmidt2017 (Париж, Франция, 2017); Международная научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения акад. Константина Игнатьевича Лукашева (1907–1987) (Минск,

Беларусь, 2017); IMWA2019 (Пермь, Россия, 2019); IMWA2021 (Кардиф, Великобритания, 2021); EUROSOL2021 (Женева, Швейцария, 2021).

Результаты исследований прошли рецензирование в журналах системы цитирований Scopus и Web of Science, в том числе журналах Q1.

Соответствие научной специальности. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.21. Геоэкология (географические науки) по областям исследования «Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод) (п. 5 паспорта специальности), «Оценка экологического состояния и управление современными ландшафтами» (п. 11 паспорта специальности), «Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности» (п. 14 паспорта специальности), «Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов» (п. 17 паспорта специальности), «Теория и методы геоэкологической оценки существующих и создаваемых технологий добычи и переработки полезных ископаемых природного и техногенного происхождения, инженерная защита экосистем, прогнозирование, предупреждение и ликвидация загрязнения природной среды» (п. 24 паспорта специальности).

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 285 страниц состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы (316 наименований, из них: 76 – на английском языке), списка иллюстраций и таблиц, одного приложения и включает 77 рисунков и 35 таблиц.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. В условиях гумидного климата Среднего Предуралья в районах разработки месторождения солей водная техногенная миграция водорастворимых солей и элементов-примесей определяет трансформацию ландшафтно-геохимических процессов и биоразнообразия наземных и аквальных ландшафтов.

В районах развития галогенных формаций близкое положение солей к поверхности земли способствует поступлению в подземные или поверхностные воды водорастворимых солей естественным путем в виде родников или в результате поступления техногенных рассолов горнодобывающей промышленности. В условиях большого количества атмосферных осадков и активной водной миграции водорастворимых солей одним из наиболее важных ландшафтно-геохимических процессов в формировании природных и природно-техногенных геосистем в районах развития галогенных формаций является **гидрогенез** и его производная – **галогенез**. На исследуемой территории, процессы галогенеза имеют природное и техногенное происхождение. Природный галогенез встречается

в местах разгрузки высокоминерализованных Na–Cl подземных вод, в основном, соликамского горизонта и в районах солеварения, которое было широко развито на данной территории до середины 20 века, а техногенный галогенез проявляется в районах современной добычи и переработки калийных солей.

Особенности формирования природных ландшафтов в районах развития галогенных формаций изучены на территории ландшафтного памятника природы регионального значения ООПТ «Дурнятская котловина» и в районе п. Усть-Игум на территории одного из первых русских поселений Яйвинский острожок с производством соли, основанном в 1570 г. Оба объекта расположены на периферии распространения соляной залежи, но за пределами калийной залежи.

ООПТ «Дурнятская котловина» представляет собой карстовую депрессию в долине р. Пожвы с многочисленными озерами и родниками. Наличие на значительных глубинах прослоек каменной соли обусловили на территории участка обильные выходы карстовых источников Na–Cl состава, которые разгружаются в оз. Белое с минерализацией 5,1 г/л. Из озера вытекает ручей, воды которого увеличивают содержание ионов хлорида в р. Пожва в 4 раза.

Группа из пяти древних рассолоподъемных скважин находится на пойменной террасе в 80–120 м от р. Усолка. На современном этапе минерализация изливающихся из скважин вод составляет 30 – 34 г/л. В процессе подъема и излияния Na–Cl воды разбавляются водами сульфатно-кальциевой и гидрокарбонатно-кальциевой зон.

Поступление вод самоизливающихся скважин и соленых родников определяет специфику химизма поверхностных вод. Минерализация вод рек с зонального значения 600 мг/л увеличивается до 1,2–1,3 г/л (рис. 2).

Поскольку в формировании аквальных ландшафтов наибольшую роль играет ионный состав воды, поступление высокоминерализованных Na–Cl вод нарушает зональность аквальных пресных кислородно-глеевых трансаквальных и трансаккумулятивных гидрокарбонатно-кальциевых ландшафтов таежной зоны Среднего Предуралья. Хлоридно-натриевые карстовые воды формируют в оз. Белое нейтральные солончатые и сильно солончатые кислородно-сероводородные хлоридно-натриевые аккумулятивные аквальные ландшафты (рис. 3). При поступлении соленых вод в реки (р. Пожва, р. Усолка и др.) и разбавлении с природными гидрокарбонатно-кальциевыми и сульфатно-кальциевыми водами происходит смена ландшафтов на слабощелочные слабосолончатые кислородно-глеевые хлоридно-натриевые трансаквальные ландшафты. Преобладание в видовом составе вод зональных видов водорослей свидетельствует о высокой устойчивости аквальных биотопов в районах природного галогенеза, что обеспечивает среднюю продуктивность ландшафтов.

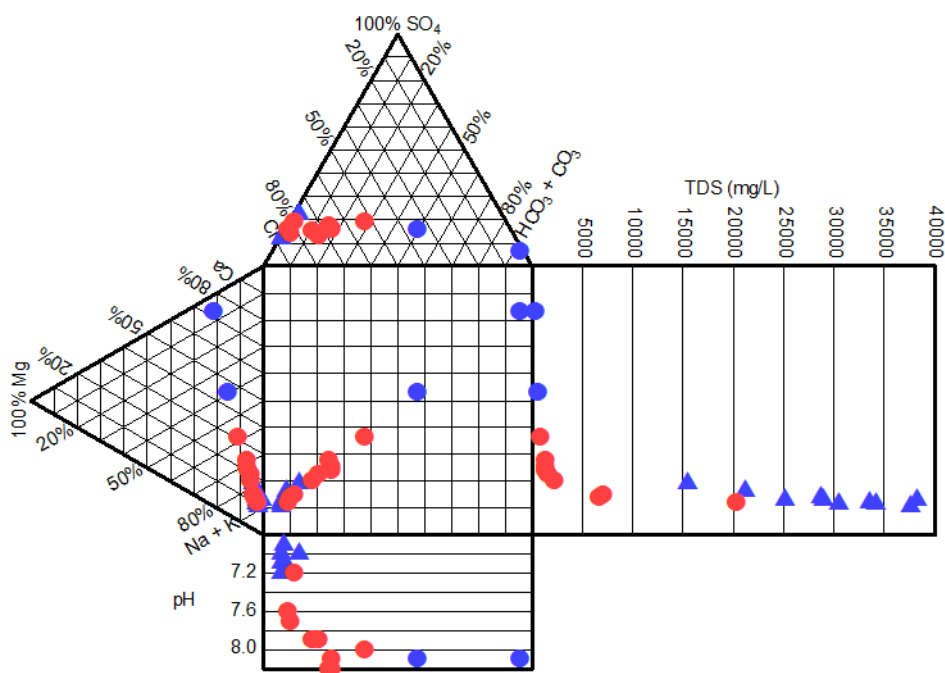


Рисунок 2 – Диаграмма Пайпер химического состава вод изучаемых водотоков в районе природного галогенеза: синий круг – пресные воды; красный круг – соленые ручьи и реки; синий треугольник – скважины

Проявление засоления почвы и видового изменения наземной растительности выявлено в местах поступления Na–Cl вод рассолоподъемных скважин на поверхность земли. В пойме р. Усолка на месте аллювиальных глеевых гумусовых почв образовался вторичный солончак глеевый гумусовый с сульфатно-хлоридным натриевым типом засоления (Gleyic Fluvisolonchak), что определяет формирование вторичных солончаков кислого и слабощелочного класса.

Растительный покров в районе рассолоподъемных скважин представлен, в основном, видами, приуроченными к пойменно-луговым ландшафтам. Высокая засоленность почв вдоль соленого ручья привела к появлению солероса солончакового *Salicornia perennans* WILLD., который относится к группе облигатных галофитов.

Поступление водорастворимых солей в результате разработки калийного месторождения связано, в основном, с фильтрационными водами солевых отвалов и шламохранилищ Na–Cl состава, минерализацией свыше 300 г/л, содержанием Cl⁻ более 50 % от общей минерализации вод, K⁺ – от 1 до 20 %, Na⁺ – 20 – 40 %, SO₄²⁻ – 1 – 5 %.

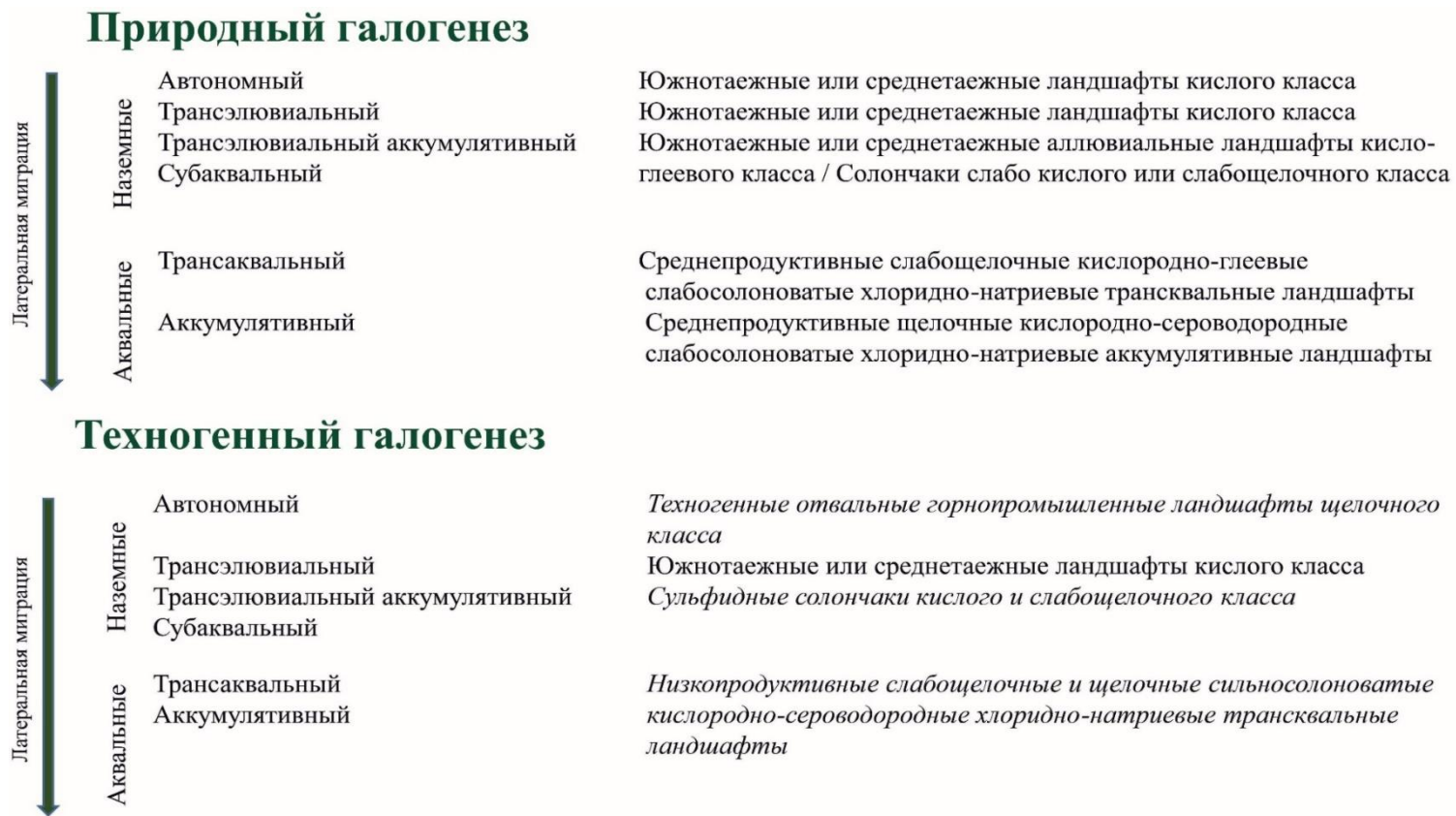


Рисунок 3 – Геохимическая структура природных и техногенных ландшафтов в районе развития галогенных формаций

Химическая специфика техногенных потоков определяется геохимическими особенностями калийных руд. Калийные руды представлены в основном хлоридами калия, натрия, магния, иногда с высокой примесью сульфатов магния и кальция. Концентрация микроэлементов в калийных рудах связана с процессами соленакопления (Br, Sr, Rb, Cs) и терригенными отложениями (Fe, Mn, Co, Cr, Cu и др.), которые залегают между слоями солей и отражают континентальный этап осадконакопления. В процессе разрушения соляных пород концентрация данных элементов может значительно возрастать и образовывать, например, гематитовые прослои с высоким содержанием железа, медистые песчаники и др. При обогащении калийных руд происходит дальнейшая аккумуляция данных химических элементов в веществе солеотвалов и шламохранилищ.

Высокоминерализованные стоки объектов хвостового хозяйства поступают в подземные воды (рис. 4), формируя зоны засоления подземных вод. Засоленные подземные воды разгружаются субаквально в русла рек в виде восходящих родников и площадной разгрузки, определяя Na-Cl химический состав поверхностных вод (рис. 5).

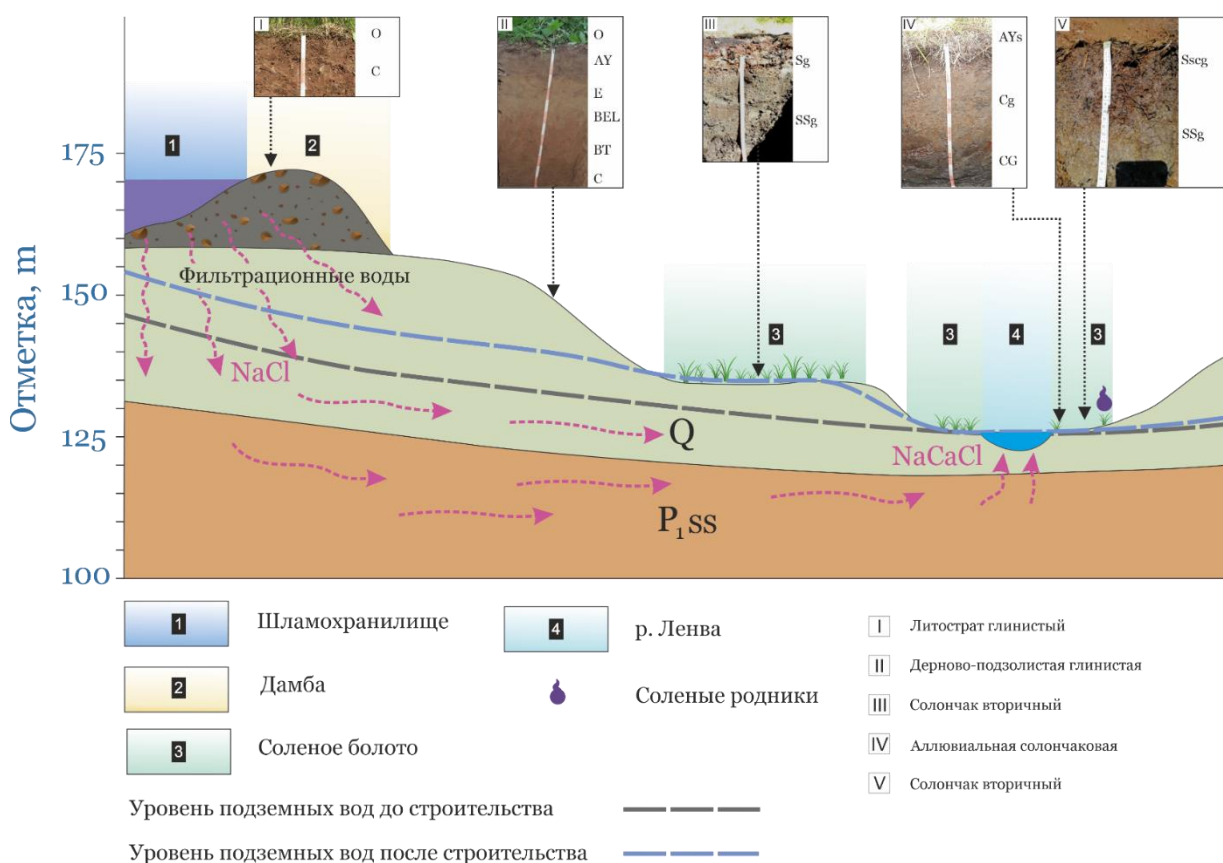


Рисунок 4 – Схематическая модель миграции фильтрационных вод объекта хвостового хозяйства калийного предприятия и формирования природно-техногенных ландшафтов

При фильтрации рассолов через глинистые, местами доломитизированные, известняки и мергели химический состав подземных вод приобретает Na, Ca – Cl состав (рис. 5), т.к. высокоминерализованные Na – Cl техногенные подземные воды активизируют процессы выщелачивания и ионного обмена в системе вода–порода интенсивнее, чем при фильтрации природных пресных вод. Вследствие этого в подземных и поверхностных водах, в большей степени шешминского горизонта, чем четвертичного, на фоне высокого уровня хлоридного загрязнения увеличиваются содержания Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} (рис. 5). Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в некоторых пробах достигает 1,38 мг/л.

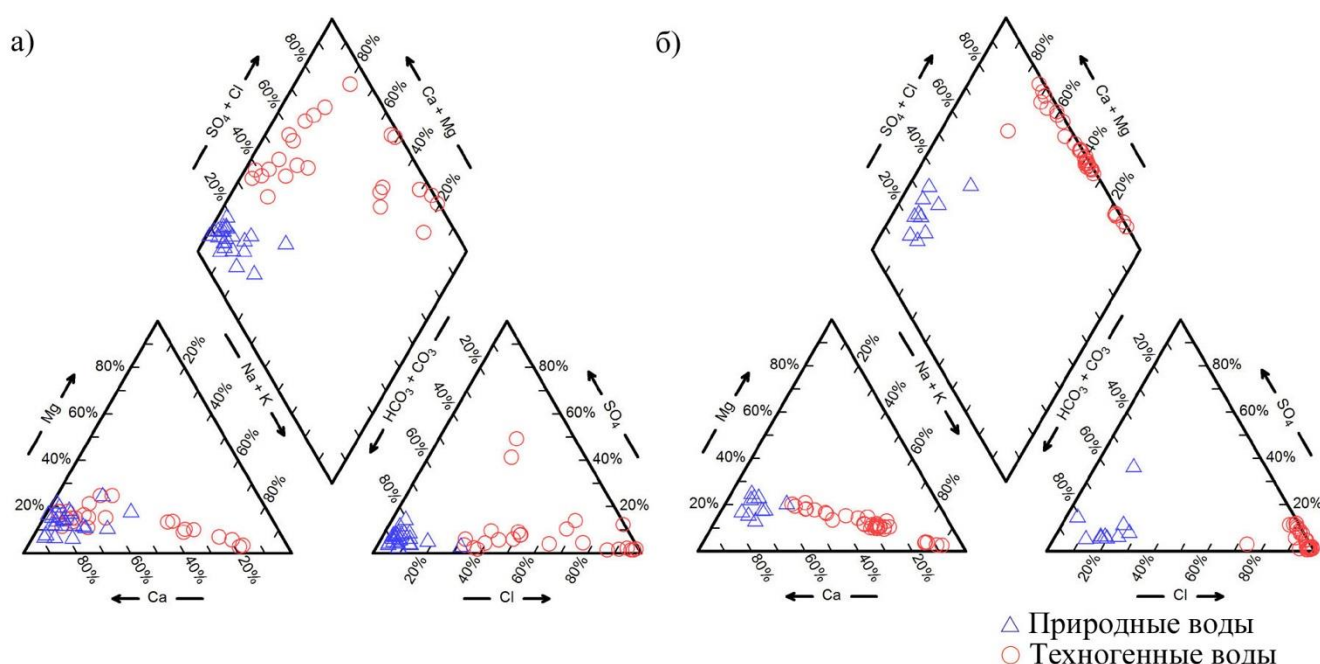


Рисунок 5 – Химический состав: а) подземных и б) поверхностных вод в виде Piper diagram, мг-экв/л

Повышенные концентрации соединений азота в фильтрационных водах вызваны содержанием широкого спектра гетеросоединений в веществе шламохранилища, входящих в состав реагентов флотации. Превышение ПДК в поверхностных водах вблизи шламохранилища для NH_4 достигает 400 раз, NO_2 – 128 раз, NO_3 – 3 раза.

Распределение микроэлементов в засоленных подземных водах и реках отражает повышенное содержание микроэлементов галогенных формаций (Sr, Rb) и активизацию процессов выщелачивания металлов хлоридными растворами (рис. 6). Также как и при формировании химического состава изливов древних рассолоподъемных скважин в техногенно-засоленных подземных и поверхностных водах существует прямая корреляция содержания Cl^- и микроэлементов. Источником микроэлементов в рассолах являются не только породы, контактирующие с Na–Cl дренажными стоками, но и сами шламы. В раствор переходят галофильные элементы Sr, Rb, а также

трудно гидролизуемые элементы, например Ti и Li, что свидетельствует об активной роли хлоридных рассолов в выщелачивании и транспортировке металлов.

Обилие атмосферных осадков и расчлененность рельефа изучаемой территории обеспечивают высокую степень водной миграции химических элементов и, как следствие, трансформацию процессов седиментогенеза. В водной вытяжке донных отложений в зоне влияния шламохранилищ и солеотвалов преобладают хлориды 28 г/л, натрий – 13 г/л, калий - 2,9 г/л при pH 7,2. Относительно фоновых значений (K_C) обнаружены превышения для $Na(137) > Cl(131) > K(130) > SO_4(79)$, развивается сероводородная обстановка (Eh изменяется от -198 до -249). В донных отложениях рек накапливаются техногенные компоненты – сферулы и железные агломераты.

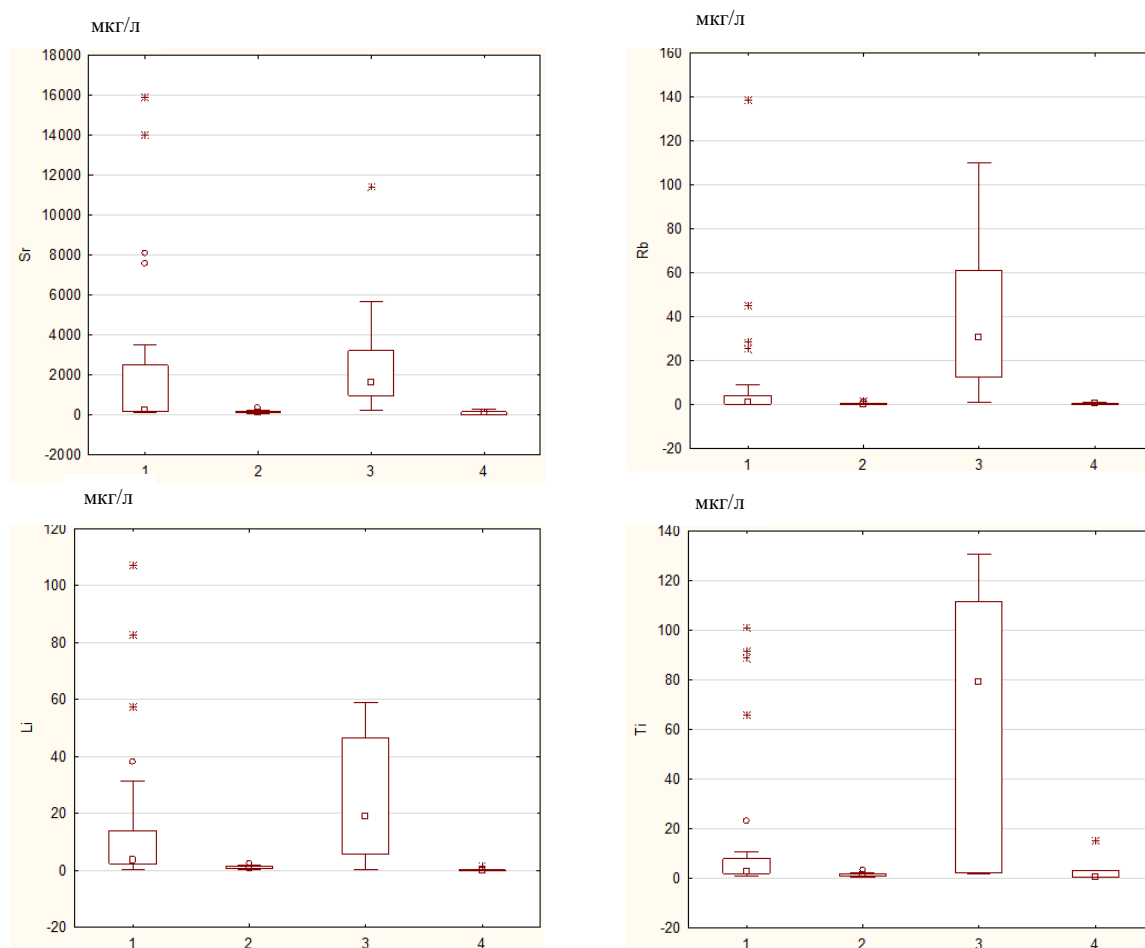


Рисунок 6 – Распределение некоторых микроэлементов в подземных водах Верхнекамского месторождения солей в зависимости от засоления:

- 1- Засоленные родники 3- Засоленные реки
2- Пресные родники 4- Пресные реки

В результате поступления с поверхностным стоком высокоминерализованных сточных вод вблизи отвалов и в местах выхода

высокоминерализованных подземных вод на поверхность в долинах рек формируются очаги почвенного засоления (рис. 4).

В районах расположения солеотвалов и шламохранилищ формируются техногенные почвенные образования (литостраты) с преобладанием в обменном комплексе Na, характеризующиеся высокой изменчивостью суммы токсичных солей (0,5-5,0%) и слабощелочной pH 7-8.

В местах разового поступления рассолов на почвы в результате аварийных разливов наблюдается эволюция характера засоления почвенного покрова. В условиях промывного режима почв засоленные почвы хлоридно-сульфатного типа засоления сменяются на почвы сульфатно-хлоридного типа, постепенно восстанавливается слабокислая почвенная среда, снижается сумма токсичных солей при высоком содержании $\text{Na}_{\text{обм}}$. Характер изменения ППК почв и почвенных растворов приведен на рис. 7.

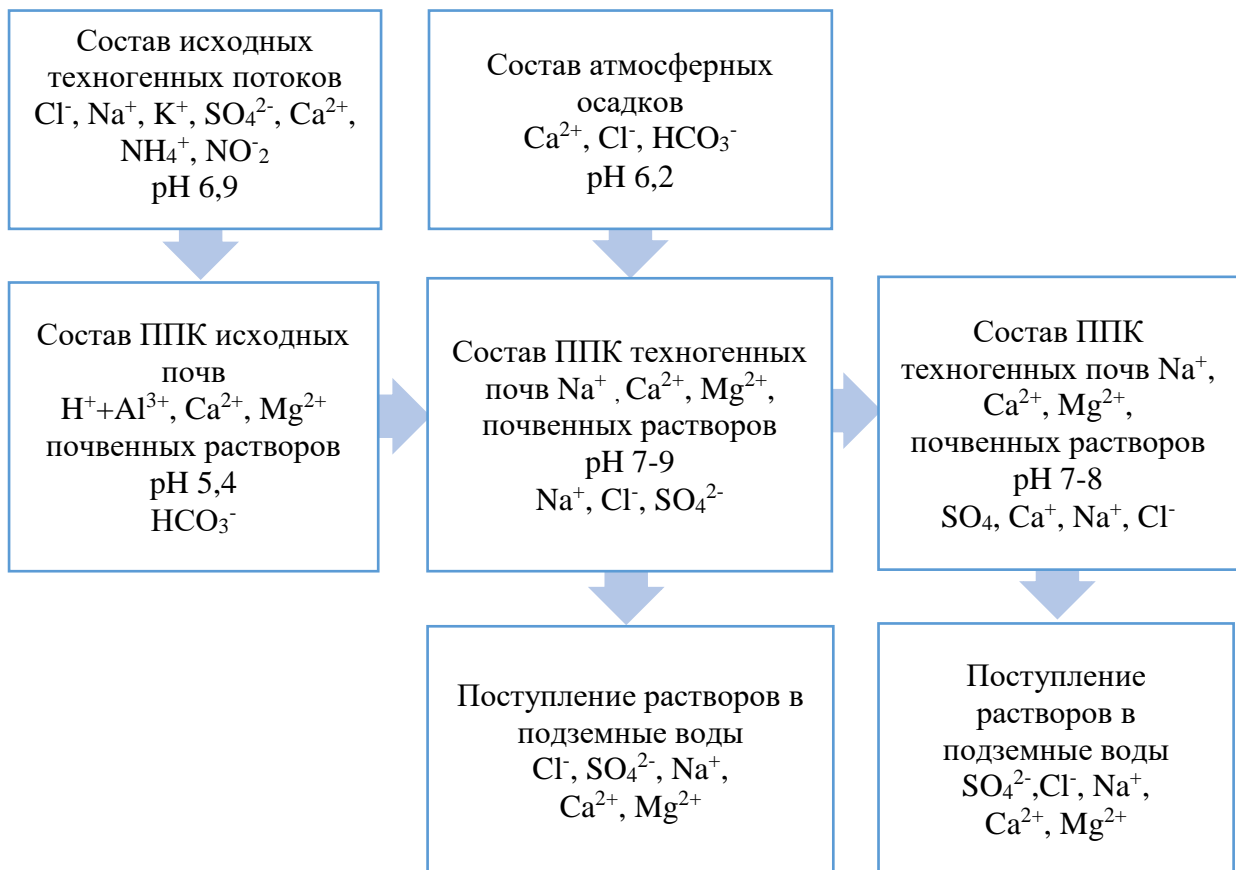


Рисунок 7 – Схематическая модель трансформации почвенных характеристик при разовом поступлении Na-Cl техногенных потоков

Многолетние исследования показали, что наиболее интенсивная трансформация почв проявляется в долинах рек в местах близкого залегания высокоминерализованных Na-Cl подземных вод, где формируются устойчивые ареалы засоленных почв с повышенным содержанием Cl^- , K^+ , SO_4^{2-} , Na^+ на фоне зональных аллювиальных гумусовых глеевых почв

(рис. 4). Процессы заболачивания усиливают эффект воздействия подземных вод на супераквальные ландшафты. Причинами техногенного заболачивания являются оседание земной поверхности в результате подработки подземного пространства и поднятие уровня подземных вод (рис. 4).

В долинах засоленных рек формируются аллювиальная солончаковая почва Gleyic Fluvisols (Salic) и солончак вторичный Gleyic Fluvic Solonchak (рис. 8). Техногенный галогенез проявляется в высоком значении суммы токсичных солей (до 26 %), что соответствует «очень сильной» степени засоления и содержанию хлоридов (более 160 г/л в водной вытяжке почв верхнего горизонта), доли $Na_{обм}$ от емкости катионного обмена (ЕКО) (до 50%).

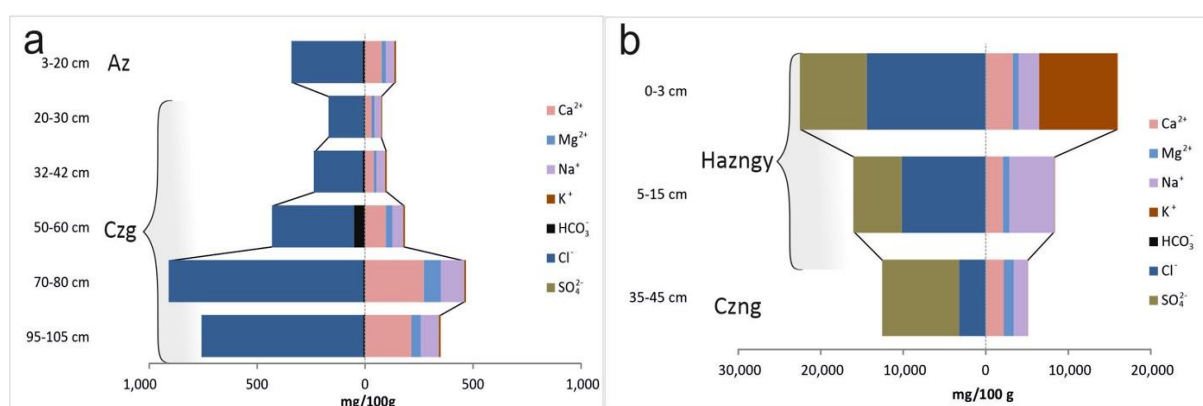


Рисунок 8 – Содержание основных анионов и катионов в а) аллювиальной солончаковой почве Gleyic Fluvisols (Salic) и б) солончаке вторичном Gleyic Fluvic Solonchak

Слабокислая и кислая реакция почвенной среды солончаковых почв и солончака свидетельствует о сохранении кислого класса таежных ландшафтов, даже в условиях интенсивного засоления. В гидроморфных условиях для почв характерна сероводородная обстановка ($Eh -157$), что свидетельствует о развитии сульфидогенеза. Изменение почвенных характеристик в условиях близкого залегания засоленных подземных вод приведено на рис. 9.

Засоление почв и аквальных ландшафтов сопровождается трансформацией биогенеза. Исследования видового состава зоопланктона рек и ихтиофауны в районе влияния объектов калийной промышленности показали, что в водах с содержанием Cl^- свыше 5 г/л преобладают коловратка *N. Acuminate* (86% численности и 76,6% биомассы всего зоопланктона) и единично встречается галлофил *Brachionus plicatilis* Müller, обитающие в основном в соленых водах.

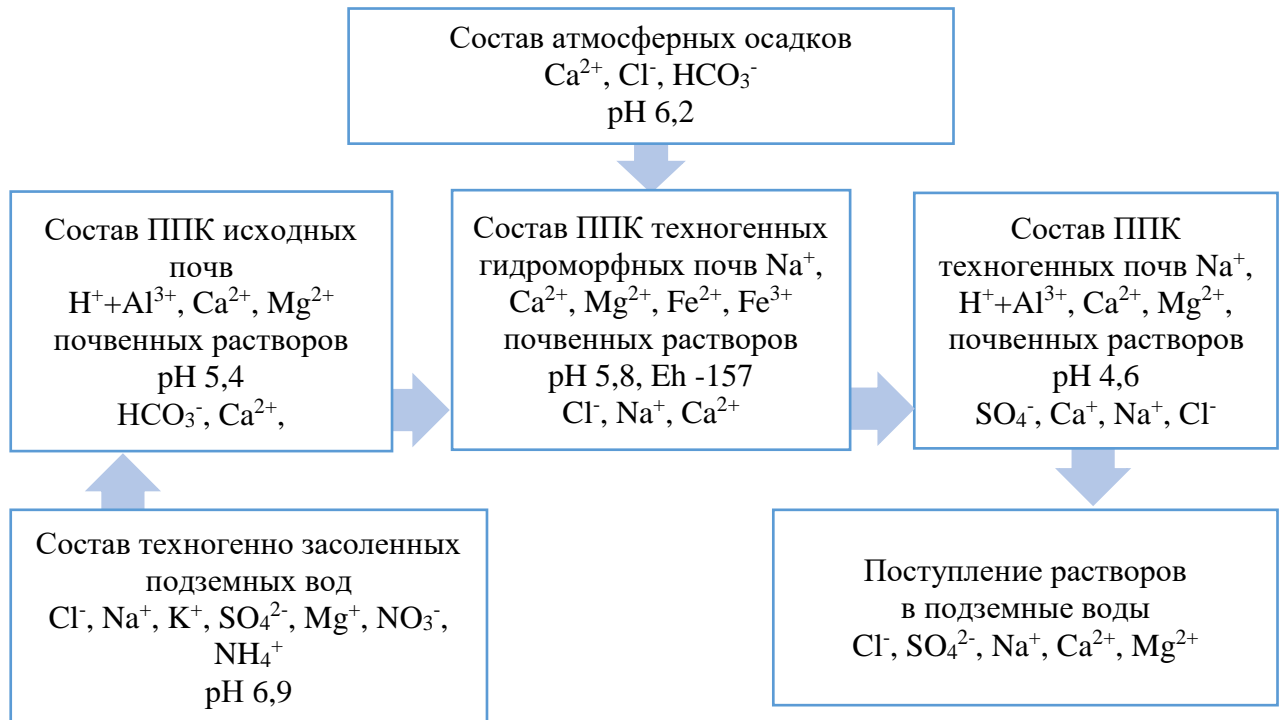


Рисунок 9 – Схематическая модель трансформации почвенных характеристик при различной глубине Na–Cl подземных вод в супераквальных ландшафтах

В реках с наибольшей солевой нагрузкой преобладает макрофитная водоросль *Enteromorpha sp.* семейства *Ulvaceae*, которая является индикатором высокого содержания хлоридов. Постоянная ихтиофауна из-за сильного засоления вод отсутствует.

Солевой стресс в наземных ландшафтах приводит к гибели типичных таежных видов растений и стимулирует захват освобождающихся экотопов солеустойчивыми ассоциациями. Растительность представлена, в основном, луговыми сообществами с антропогенными видами.

На территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей по результатам наших исследований и работам других авторов из солеустойчивой флоры обнаружены бескильница расставленная *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl., латук татарский *Lactuca tatarica* (L.) C.A. Mey., марь сизая *Chenopodium glaucum* L., лебеда раскидистая *Atriplex patula* L.. Из уникальной флоры обнаружен Триостренник морской (*Triglochin maritimum* L.). Характерными местами обитания данного вида являются увлажненные соленые почвы на северных морских побережьях и солончаки.

Наиболее распространены в районах солеотвалов и шламохранилищ вейник наземный *Calamagrostis epigeios*. (L.) Roth., кострец безостый *Bromopsis inermis* (Leys.), пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) Nevski, тимофеевка луговая *Phleum pratense* L., чина луговая *Lathyrus pratensis* L., нивяник обыкновенный *Leucanthemum vulgare* Lam., донник белый *Melilotus*

albus Medikus, клевер ползучий *Trifolium repens* L. и др. В древесном и кустарниковом ярусе преобладают виды березы *Betula sp.*, ивы *Salix* и осина *Populus tremula* L.

При наличии площадной разгрузки подземных вод или заболачивании проективное покрытие резко снижается до 20-30 % , а в некоторых случаях на солончаках вторичных происходит полное исчезновение растительного покрова.

Анализ степени воздействия техногенных выбросов на развитие галогенеза был проведен с помощью исследования химического состава снежного покрова Березниковско-Соликамского промузла. Выявлено, что поступление хлоридов калия и натрия в атмосферу с выбросами обогатительных фабрик, вентиляционных стволов, пылением солеотвалов формирует локальные площадные техногенные аномалии с повышенным содержанием солей в снежном покрове в пределах промышленных площадок или санитарно-промышленной зоны калийных предприятий. На фоне усредненных характеристик талых снеговых вод для промышленной зоны калийных предприятий характерен К, Na–Cl тип вод. Другие функциональные зоны промузла сохраняют характерные для крупных промышленных агломераций химическую специфику талых снежных вод: для рекреационной зоны отмечается Ca–HCO₃ тип вод, для селитебной зоны – Ca–NO₃, HCO₃, для транспортной зоны – Na–HCO₃, для фоновой территории – Ca –Cl.

Некоторые из перечисленных ландшафтно-геохимических процессов встречаются в таежных ландшафтах, например, сульфидогенез, седиментогенез, оксидогенез, другие же не характерны для этой природной зоны, например, галогенез. Сравнение особенностей формирования ландшафтов в условиях природного и техногенного галогенеза позволяет заключить, что в районах добычи калийно-магниевых солей поступление техногенных высокоминерализованных вод является основной причиной трансформации ландшафтно-геохимических процессов. Ведущая роль галогенеза, активизация сульфидогенеза, трансформация биогенеза и седиментагинеца в наземных подчиненных и аквальных ландшафтах привели к изменению ландшафтно-геохимической структуры (рис. 3). Аквальные ландшафты представлены низкопродуктивными слабощелочными и щелочными сильносоленатыми кислородно-сероводородными хлоридно-натриевыми трансаквальными ландшафтами на фоне зональных аквальных пресных кислородно-глеевых трансаквальных и трансаккумулятивных гидрокарбонатно-кальциевых ландшафтов таежной зоны Среднего Предуралья. Значительная площадь размещения отходов и их автономное положение, обычно на водоразделах, обуславливает появление техногенных отвальных горнопромышленных ландшафтов щелочного класса вместо южно- или среднетаежных ландшафтов кислого класса. В подчиненных ландшафтах при близком расположении засоленных подземных вод

происходит смена зональных лугово-аллювиальных ландшафтов на сульфидные солончаковые ландшафты кислого и слабощелочного класса.

2. Формирование сульфидных солончаков с осаждением минералов железа на поверхности почв происходит в супераквальных ландшафтах в результате активизации хлоридно-натриевыми техногенными потоками процессов выщелачивания и ионного обмена в системе вода–порода.

Поступление Na–Cl подземных вод в почвы приводит не только к повышению содержания K^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , $Fe_{\text{общ}}$, но и вызывает сопряженные геохимические процессы в ландшафтах, связанные с взаимодействием горных пород и засоленных вод, такие как выщелачивание, ионный обмен, метаморфизм и образование вторичных минералов.

В долинах рек в гидроморфных условиях из-за близкого положения засоленных подземных вод или их площадной разгрузки был изучен генезис техногенных сульфидных солончаков кислого и слабощелочного класса. Особенностью ландшафтов является формирование отложений охристого цвета на поверхности почв и сероводородной обстановки в нижележащем горизонте, отсутствие растительности.

Минеральный анализ верхнего горизонта почв (мощностью 0–3–5 см) показал, что содержание железистых образований достигает 85% от нерастворимой части пробы, а ожелезненных растительных остатков в некоторых пробах – 20% (рис. 10). Определены гидрогетит, гетит и магматит. Органический материал и кремнистые остатки диатомовых водорослей покрыты оксидами и гидроксидами железа, кристаллами галита и обогащены Ca и Cl с примесью Mg, Na, K, Al, P и S (рис. 11).

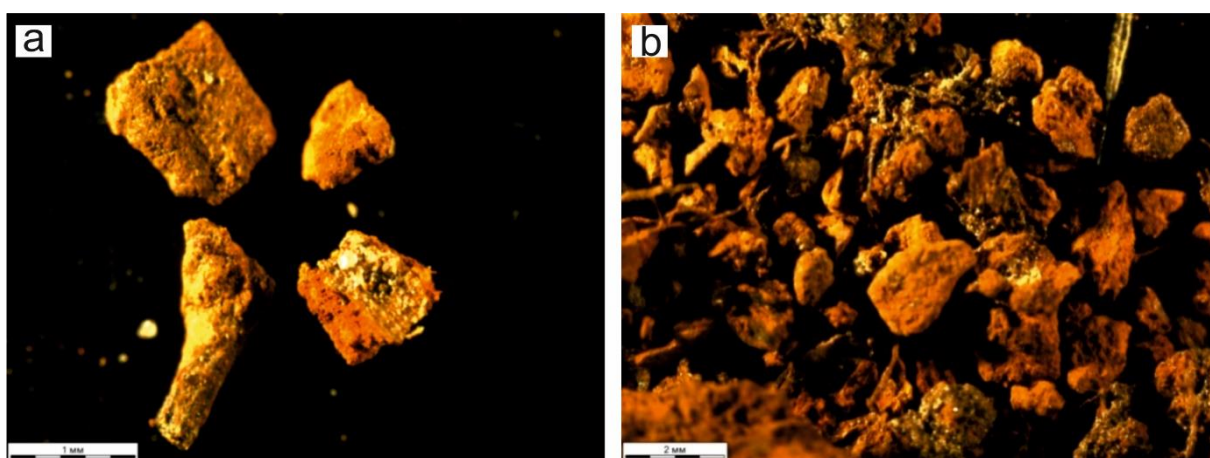


Рисунок 10 – Железистые образования на поверхности почвенного покрова
 а) продукты замещения растений гидроксидами железа; б) железистые образования

Нижний почвенный горизонт, мощностью 3-15 см, представлен черным гелеобразным веществом с высоким содержанием остатков растительности и диатомовых водорослей. Содержание гидрогетита достигает 84%, обнаружены гематит и магнетит. Происходит образование сероводорода, значение окислительно-восстановительного потенциала снижается ($E_h = -156 - -197$ мВ), развиваются восстановительные условия, и формирование гидротроилитового горизонта.

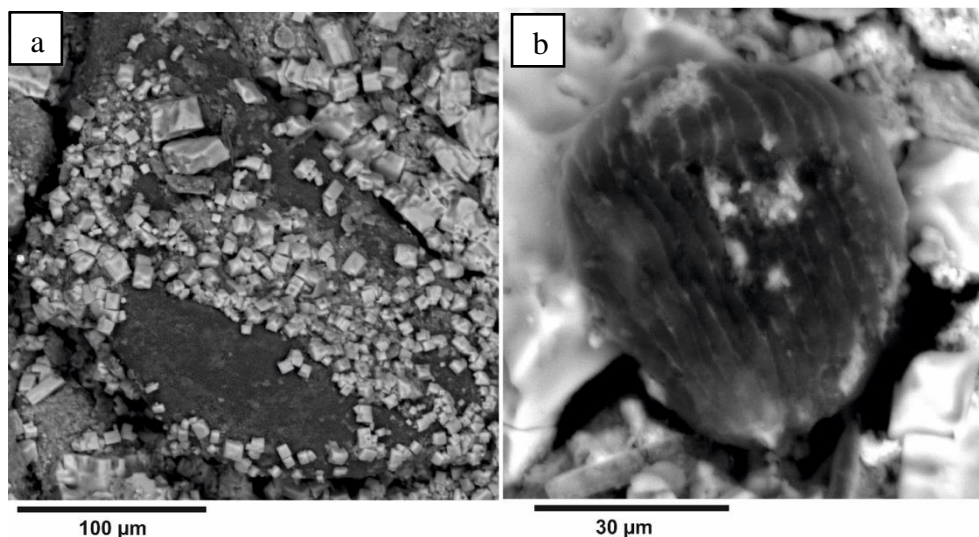


Рисунок 11 – Верхний почвенный горизонт 0-2 см а) рыже-коричневый материал с кристаллами галита; б) органическое образование

В природных условиях гидротроилит – водный сульфид железа – образуется в сульфатных водоёмах степной и пустынной зон, где развивается десульфуризация и продуцируется H_2S . Гелеобразное вещество гидротроилитового горизонта (рис. 12), как и остатки диатомовых водорослей, обогащены Ca, Fe, Cl, K, Na, S и P. Ниже гидротроилитового горизонта расположен горизонт с глеевой обстановкой.

О связи сероводородной обстановки и высокого содержания железистых минералов в почвах с засоленными подземными водами свидетельствует анализ донных отложений шлейфа соленых родников. Содержание сероводорода в донных отложениях увеличивается до 23,1 мг/кг. Значение показателя E_h изменяется от -198 до -249 мВ, что свидетельствует о развитии резко восстановительных условий. Поверхность донных отложений покрыта осадком из железистых образований, в основном, состоящих из Fe, O, Si и Ca. Бактериальные сообщества покрыты железистой коркой, основной элементный состав – Fe, O, Si, Ca и P. В некоторых корках есть примесь K. По данным РФА, в донных отложениях массовая доля оксидов железа составляет более 50%. О связи состава донных отложений с засоленными подземными водами свидетельствует повышенное содержание оксидов K, Ba, Na, Sr, а также элементов Cl, Br и Rb (рис. 13).

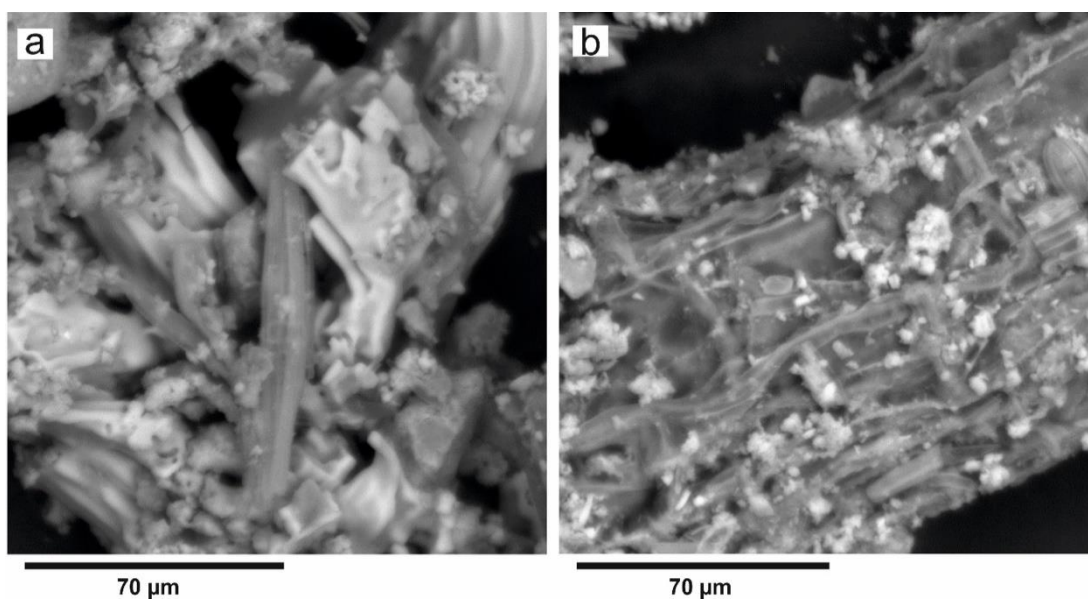


Рисунок 12 – Почвенный горизонт (3-15 см) представляющий собой черную гелеобразную фазу, гидротроилитовый горизонт: а) кремневые остатки диатомовых водорослей, галит, железосодержащие образования, б) остатки растительности, покрытые диатомовыми водорослями и железосодержащими образованиями.



Осаждение железа на поверхности донных отложений соленого родника



Формирование минералов железа на поверхности донных отложений

Химический состав по данным рентгенофлуоресцентного анализа, массовая доля, %

Определяемая характеристика	Массовая доля, %
Fe ₂ O ₃	50,21
SiO ₂	18,93
CaO	4,12
Al ₂ O ₃	3,97
P ₂ O ₅	2,58
K ₂ O	0,96
BaO	0,84
MgO	0,72
Na ₂ O	0,60
SO ₃	0,49
TiO ₂	0,22
MnO	0,09
SrO	0,08
Cr ₂ O ₃	0,02
ZrO ₂	0,01
ППП	14,89
Сумма	98,73

Определяемая характеристика	Массовая доля, $\mu\% \cdot 10^{-4}$
Cl	0,222
V	0,0214
Ni	0,0178
Co	0,0105
As	0,0104
Zn	0,0062
Br	0,005
Cu	0,005
La	0,004
Rb	0,0016
Nb	0,001
Pb	0,0007

Состав минералов (по данным дифрактометрического анализа)

Кварц SiO ₂	13,4%
Плагиоклазы альбит Na[AlSi ₃ O ₈]	2,2%
КПШ	2,0%
Аморфная фаза	82,4%

Рисунок 13 – Осаждение железистых образований в донных отложения шлейфа соленых родников

Источником железа, в основном, являются гидроксиды железа шешминских пестроцветных пород, почвенные минералы и отходы калийного производства (рис. 14), которые более активно выщелачиваются под воздействием техногенных рассолов.

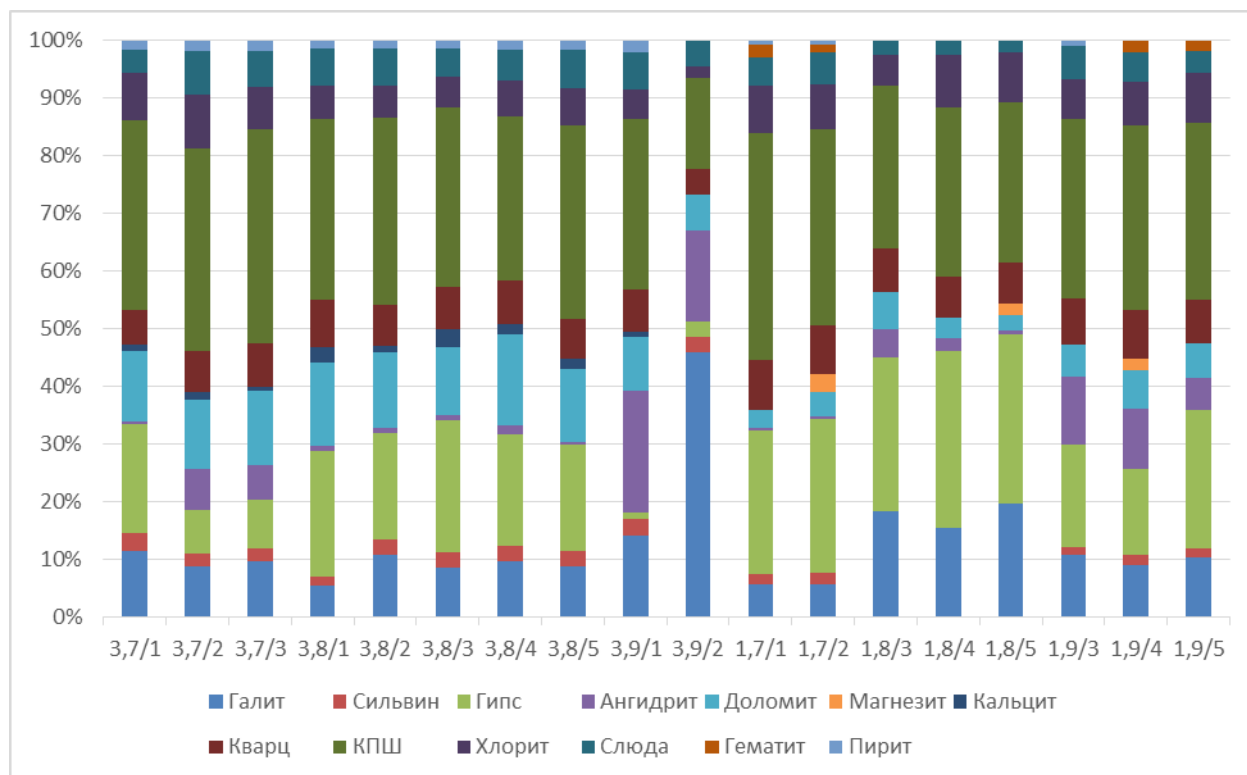


Рисунок 14 – Соотношение основных минералов в веществе шламохранилища

Развитие сульфат редукции и окисления железа в анаэробных условиях почвенной среды и донных отложениях происходит благодаря деятельности бактерий. При доминировании обычных для почвенной и водной среды протеобактерий в почвенных образцах значительную долю составляли бактерии, характерные для морской и других высокоминерализованных сред. На глубине 2–14 см преобладают гамма-протеобактерии рода *Shewanella* (79 и 75% в общей структуре микробиоценоза), являющиеся морскими микроорганизмами, способными к восстановлению железа и марганца. Во всех изученных почвенных горизонтах более 4% от общего числа бактерий составляли представители рода *Alicyclobacillus* – ацидофильные аэробные бациллы, способные к окислению железа и серы.

В горизонте, залегающем на глубине от 14 до 40 см в условиях анаэробноза состав микрофлоры кардинально менялся. Наиболее многочисленными (26,38%) на данной глубине были бактерии рода *Thiomicrospira*, известные как анаэробные облигатно хемолитотрофные бактерии, окисляющие железо и серу. Также в значительном количестве (9–

10%) обнаружены бактерии родов *Marinobacter*, *Marinomonas*, *Idiomarina*, известные как обитатели морской среды, 7% составляли эпсилон-протеобактерии рода *Sulfurimonas*, характеризующиеся способностью к денитрификации и окислению серы.

Погибшая древесная растительность, а также ожелезненные и слаборазложившиеся остатки растительности в почвах свидетельствуют о том, что формирование сульфидных солончаков произошло недавно.

Таким образом, техногенное воздействие калийной промышленности наиболее остро проявляется в долинах рек, где в супераквальных ландшафтах в зонах засоления поверхностных и подземных вод формируются техногенные сульфидные солончаки кислого и слабощелочного класса. Увеличение содержания Cl^- , K^+ , Na^+ сопровождается повышением концентрации Fe и SO_4^{2-} в результате выщелачивания и ионного обмена в системе вода–порода. Высокое содержание органики и соединений азота в почвах способствует активизации микробиологической деятельности и формированию не только сероводородной обстановки в почвах, но и образованию гидротроилитового горизонта. На поверхности почвы, на окислительном геохимическом барьере происходит активное осаждение минералов железа.

Вероятность развития опосредованных геохимических процессов необходимо учитывать при прогнозе поступления техногенных высокоминерализованных вод и оценке экологического ущерба.

3. Эколого-геохимическая оценка трансформации ландшафтно-геохимической структуры на месторождениях калийных солей проводится с использованием комплекса атмогеохимических, гидрохимических, почвенно-геохимических и биогеохимических индикаторов, учитывающих специфику техногенного и природного засоления.

Особенность экологических исследований на месторождениях солей заключается в отсутствии нормативных значений по приоритетным загрязнителям для снеговых талых вод, почв. Ряд значений, например, ПДК для Cl^- и Na^+ в поверхностных и подземных водах, может отражать высокий уровень содержания солей в связи с разгрузкой высокоминерализованных подземных вод естественного происхождения, а не техногенный характер воздействия на природные воды в районе разработки калийного месторождения.

Анализ происходящей трансформации природных комплексов на исследуемой территории позволил разработать систему эколого-геохимических индикаторов для районов техногенного засоления. Индикаторы объединены в группы: атмосферные, геологические, гидрологические, почвенные, биотические. В каждой группе выделены

компоненты, индикаторы, по которым возможно судить о степени трансформации (табл. 1).

Таблица 1 – Система эколого-геохимических индикаторов при ведении мониторинга состояния окружающей среды на калийных предприятиях

Группа индикаторов	Компоненты	Индикатор
Атмосферные	Химический состав снежного покрова	Водородный показатель Cl/Na (моль) Cl/SO ₄ (моль) Na/K (моль)
Геологические	Горные породы	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Суммарный показатель загрязнения (Zc)
	Подземные воды	Водородный показатель Содержание Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ Na/K (моль) Na/Cl (моль)
Гидрологические	Поверхностные воды	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Суммарный показатель загрязнения (Zc) Содержание Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ Na/K (моль) Водородный показатель
	Донные отложения	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Тип водной вытяжки Суммарный показатель загрязнения (Zc) Тип водной вытяжки
Почвенные	Почвы	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Суммарный показатель загрязнения (Zc) Водородный показатель Сумма токсичных солей SAR Тип водной вытяжки
Биотические	Растительность	Площадь вырубок Площадь болот Повреждения растительности техногенными выбросами/вредителями
	Животный мир	Биомасса донных сообществ Видовое разнообразие

Кроме утвержденных нормативными документами показателей оценки состояния компонентов окружающей среды для индикации трансформации химического состава атмосферного воздуха и вод предлагается использовать соотношения химических элементов.

Рассчитанные отношения макрокомпонентов Cl/Na , Cl/SO_4 и Na/K показали свой высокий индикационный потенциал при анализе экологического состояния снежного покрова для оценки состояния атмосферного воздуха. Высокое содержание Cl^- относительно Na^+ свидетельствует о том, что Cl^- поступают в атмосферу не только с NaCl , но и с KCl . Это подтверждает и показатель Na/K , наименьшие значения которого фиксируются в промышленной зоне. Вероятней всего, вблизи предприятий основное поступление Cl^- связано с выбросами KCl . Об исключительно техногенном характере высоких концентраций Cl^- в атмосферном воздухе свидетельствует отношение Cl/SO_4 в снежном покрове. В непосредственной близости от калийного предприятия данное соотношение в 2 раза выше, чем в арктическом снеге, а на фоне других функциональных зон Березниковско-Соликамского промузла превышения достигают 10 раз.

Для выявления роли процессов ионного обмена и выщелачивания в подземных водах были рассчитаны два вида коэффициентов: Na/K и Na/Cl . Отношение Na/K позволяет выявить зависимость содержания солей от воздействия калийной промышленности, поскольку естественные выходы высокоминерализованных вод связаны с растворением галитов и характеризуются высоким содержанием Na^+ при минимальных концентрациях K^+ . Отношение Na/Cl демонстрирует интенсивность удаления Na^+ из подземных вод в результате ионного обмена с породами.

Выход на поверхность загрязненных подземных вод в виде родников, площадной и субквадральной разгрузки, а также поверхностный сток высокоминерализованных вод приводит к засолению поверхностных вод и долинных экосистем. При индикации техногенного засоления поверхностных вод наиболее информативным является соотношение Na/K . Минимальные значения данного показателя наблюдаются вблизи источников засоления, а максимальные значения – при удалении от источника засоления.

Оценка состояния почвенного покрова в условиях засоления традиционно проводится с помощью показателя суммарной концентрации токсичных солей в водной вытяжке почв с учетом их фациального состава. При хлоридном засолении и сумме токсичных солей свыше 0,15% почвы считаются средnezасоленными, при значении свыше 0,7% почвы характеризуются как солончаки. Для характеристики степени засоления почв высокую эффективность показал коэффициент адсорбируемости натрия (SAR). Показатель SAR более 13 свидетельствует о развитии солонцовых процессов в горизонтах. На основании суммарной концентрации токсичных солей и содержания поглощенного натрия рекомендуется проводить оценку экологического состояния почв.

Для оценки состояния биотических компонентов водных объектов эффективными индикаторами являются количество видов и биомасса, определяющие интенсивность биогеохимического круговорота. Наиболее устойчивыми и информативными являются значение биомассы донных

сообществ и их видовое разнообразие. Стабильный состав бентоценозов наблюдается в пресных водах. Здесь отмечается максимальное видовое разнообразие и выравненность донных сообществ. При увеличении содержания СГ биоразнообразие снижается в 1,5-3,0 раза и наблюдается уменьшение общей биомассы в 2-8 раз.

На основе анализа эколого-геохимических индикаторов всех компонентов ландшафта проводится интегральная оценка состояния ландшафтов, прогнозирование тенденций развития, отслеживание и моделирование локальных экологических ситуаций на фоне региональных процессов природной динамики.

Таким образом, разработанная система эколого-геохимических индикаторов при ведении мониторинга состояния окружающей среды на калийных предприятиях наряду с нормативными показателями оценки состояния окружающей среды дополнена рекомендуемыми показателями для анализа природной и техногенной составляющей галогенеза. Приведенные индикаторы могут быть использованы для любых производств, отходы которых содержат водорастворимые соли.

4. Снижение негативного воздействия отходов калийного производства обеспечивается системой мониторинга, отражающей специфику миграции основных загрязнителей, и комплексом природоохранных мероприятий на объектах хранения отходов.

Анализ взаимодействия фильтрационных вод шламохранилища или солеотвалов и компонентов природной среды (рис. 15) позволяет заключить, что для снижения или предотвращения негативного воздействия калийной промышленности на окружающую среду должны быть предусмотрены мероприятия по защите подземных вод в районах расположения солеотвалов и шламохранилищ от дренажных вод.

Основные проблемы реализации природоохранных и рекультивационных мероприятий связаны со значительными уклонами солеотвалов (более 30 град), активной эрозией поверхности солеотвалов, низким содержанием питательных веществ в отходах, токсичностью и подвижностью водорастворимых солей, высокой стоимостью проектных решений.

Учитывая сложившуюся экологическую ситуацию на ВКМКС, первоочередной задачей природоохранных мероприятий является снижение фильтрации стоков в местах складирования отходов. Работу предлагается проводить в двух направлениях: создание защитного экрана в основании солеотвалов и перехват с поверхности отходов атмосферных осадков.

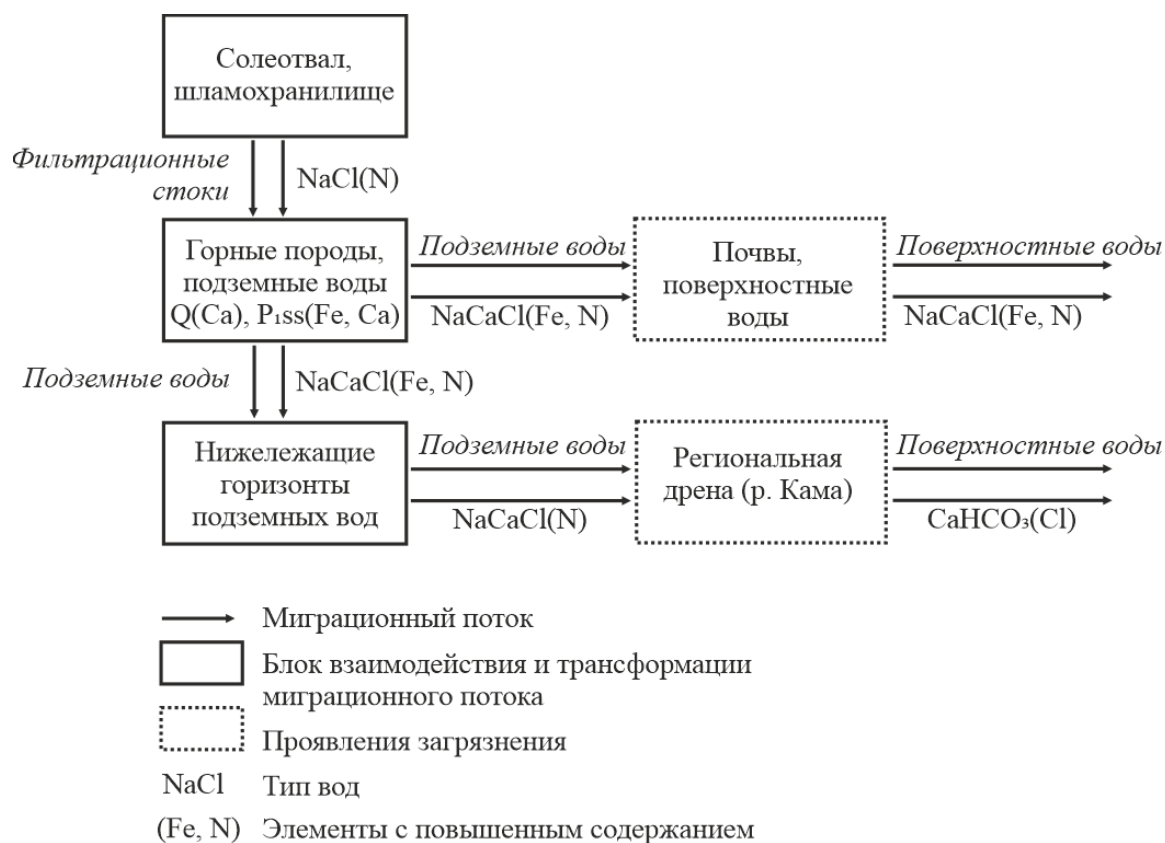
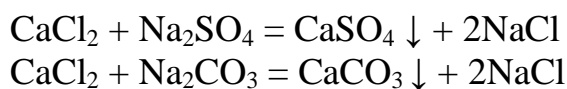


Рисунок 15 – Модель техногенного миграционного потока в окружающей среде при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей

Первый этап заключается в снижении водопроницаемости основания солеотвалов с помощью метода тампонирования горных пород направленной кристаллизацией водорастворимых и водонерастворимых солей. В лабораторных экспериментах, в качестве исходного раствора использован эвтонический раствор четырехкомпонентной системы $KCl-NaCl-CaCl_2-H_2O$, в качестве осадителей – насыщенные растворы сульфата и карбоната натрия, серную кислоту. Эффективность тампонирования пород оценивалась по скорости фильтрации воды или раствора через породу (песок, сильвинит, галит) до и после кристаллизации соли кальция. На основе лабораторных исследований установлено, что осаждение сульфата кальция в большей степени отвечает задаче тампонирования пород. Осаждение солей кальция может рассматриваться как превентивная мера для дополнительной гидроизоляции пород в местах расположения солесодержащих отходов.



Растворимость карбоната кальция в растворах хлорида натрия значительно ниже, чем у сульфата кальция, однако карбонат менее эффективно снижает водопроницаемость грунтов. Возможность

использования эвтонического раствора четырехкомпонентной системы $KCl - NaCl - CaCl_2 - H_2O$ в соляных горных породах обусловлена тем, что в нем не происходит растворение сильвинита и галита. Высокая плотность эвтонического раствора приводит к образованию расслаивающейся системы с раствором хлорида натрия, которая сохраняется в отсутствие перемешивания в течение достаточно длительного времени и позволяет минимизировать контакт раствора с породой.

Эффективность тампонирувания пород сульфатом и карбонатом кальция представлена в табл. 2. Установлено, что в ряде случаев скорость фильтрации снижалась более чем на 90%.

Таблица 2 – Скорость фильтрации растворов до и после кристаллизации соли кальция

Вид породы	Первоначальная скорость фильтрации, л/ч	Скорость фильтрации после кристаллизации соли кальция, л/ч			Скорость фильтрации, % от первоначальной		
		CaSO ₄		CaCO ₃	CaSO ₄		CaCO ₃
		Раствор Na ₂ SO ₄	40% раствор H ₂ SO ₄		Раствор Na ₂ SO ₄	40% раствор H ₂ SO ₄	
Песок	1,440	0,470	0,220	0,490	32,6	15,3	34,0
Галит	0,320	0,156	0,023	0,186	48,8	7,2	58,1
Сильвинит	0,450	0,360	0,024	0,082	80,0	5,3	18,3

Одними из важнейших преимуществ предлагаемого способа являются:

- соли кальция (сульфат, карбонат, силикат) практически не растворяются в воде и малорастворимы в растворах хлорида натрия;
- экологическая безопасность обусловлена использованием соединений, которые уже присутствуют в горных породах;
- экономическая эффективность связана с низкой стоимостью и доступностью используемых для тампонажа солей, являющихся побочным продуктом переработки калийных руд и производства соды.

Схема создания защитного экрана представлена на рисунке 16.

Перехват атмосферных осадков можно осуществлять с помощью организации почвенно-растительного покрова для увеличения испарения атмосферных осадков с поверхности солеотвала. При разработке методов рекультивации солеотвалов на ВКМКС нами предлагается реализовать следующие мероприятия.

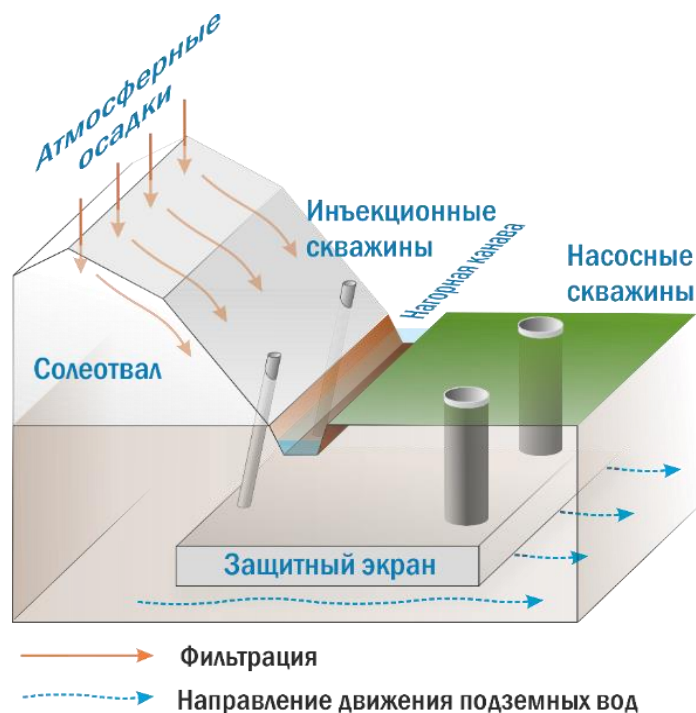


Рисунок 16 – Создание защитных экранов путем осаждения водонерастворимых солей кальция в районах солеотвалов

Техническая рекультивация может осуществляться с помощью строительных отходов и вскрышных пород, накопленных в Березниковско-Соликамского промузле. Слой строительных отходов обеспечит приемлемые для рекультивационных мероприятий уклоны и будет являться буфером при капиллярном движении солей. Присутствие кальцита или гипса способствует снижению токсичного эффекта солей в почве. Кислоты, образующиеся в корневой системе и при разложении органических веществ, способствуют растворению кальцита и гипса с высвобождением кальция, который участвует в ионно-обменных процессах с натрием в почвах.

Биорекультивация является важнейшим этапом улучшения состояния природной среды в районах воздействия калийных предприятий. Основными требованиями к растительному покрову при рекультивации солеотвалов должны являться значительная фитопродуктивность, наличие мощной корневой системы и интенсивное поглощение растениями влаги.

Использование галофитных, солеустойчивых растений для засева верхнего горизонта солеотвалов является малоэффективным. Несмотря на процессы вымывания солей из верхнего горизонта солеотвалов, содержание галита в потенциально корнеобитаемом слое достигает 85%, что не позволит развиваться даже галофитной растительности. При высевании данных видов растений возникнут проблемы адаптации к региональным климатическим условиям и ограниченности семенной базы. Использование для посевов региональных галофитных дикоросов малоперспективно. Например, в Пермском крае распространение солероса солончакового *Salicornia perennans* Willd. ограничено только районом разгрузки древних

рассолоподъемных скважин вблизи с. Усть-Игум. Особенности галофита является низкая биомасса, слабая корневая система и чувствительность к увлажнению, что делает его малоэффективным для рекультивации солеотвалов Верхнекамского месторождения.

Среди видов травянистой растительности предлагается вейник наземный, овсяница луговая, лебеда раскидистая, марь сизая, донник белый, латук татарский; кустарниковая и древесная растительность могут быть представлены березой, ивой и осиной. Данные виды распространены на засоленных почвах обследуемых экосистем, достаточно устойчивы при низких агрохимических показателях и щелочной среде почвенных растворов.

Растительный покров должен обеспечить снижение поступления атмосферных осадков через вещество солеотвалов, что приведет к уменьшению объемов, формирующихся высокоминерализованных дренажных вод, и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Использование данной схемы возможно и на шламохранилищах Верхнекамского месторождения.

Контроль эффективности природоохранных мероприятий и воздействия существующих предприятий осуществляется системой мониторинга состояния окружающей среды, учитывающей специфику распространения техногенных потоков загрязняющих веществ. Поэтому ведение мониторинга на калийном предприятии включает мониторинг состояния всех компонентов окружающей среды: атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почв, растительного и животного мира, ландшафтов. Достоверность результатов такого многокомпонентного мониторинга обеспечивается объективной системой наблюдательных пунктов.

Анализ результатов работы аналогичных предприятий, особенностей калийного производства и распространения приоритетных загрязнителей показал, что при создании системы мониторинга состояния окружающей среды целесообразно выделить 3 зоны: зона значительного влияния, зона существенного влияния, периферийная зона.

Зона значительного влияния приурочена к основным источникам техногенного воздействия проектируемого объекта и чаще всего совпадает с территорией промышленной площадки. Наблюдения за поверхностными и подземными водами, почвами, растительным и животным миром, проводимые в районе солеотвалов и шламохранилищ, показывают, что около них фиксируются максимальные концентрации загрязняющих веществ, и отмечается максимальная техногенная трансформация химического состава. Пункты наблюдения за состоянием компонентов окружающей среды располагаются вблизи источников воздействия и на границе промышленной площадки.

Зона существенного влияния формируется в районах распространения засоленных подземных вод, поверхностных вод и почв около накопителей

отходов калийного производства. Их размеры и форма во многом определяются скоростью и направлением поверхностного и фильтрационного потока. Зона существенного влияния должна ограничиваться санитарно-защитной зоной (СЗЗ) объекта. Так мониторинг состояния атмосферного воздуха, подземных вод, почв, растительности и животного мира, радиационной обстановки и влияния физических факторов проводится на границе СЗЗ.

В некоторых случаях границами существенного влияния может быть гидрографическая сеть. Реки обеспечивают транспорт солей вниз по течению. Поэтому зоны существенного влияния поверхностных вод, в отличие от подземных, имеют линейный характер и могут выходить за пределы СЗЗ. По пути движения засоленных речных вод к устью происходит некоторое снижение минерализации за счет поступления пресных вод притоков и процессов самоочищения. Площадь зоны может меняться в соответствии с развитием горных работ. Основной задачей наблюдений является отслеживание путей миграции загрязняющих веществ и ореола влияния источников. Результаты наблюдений в зоне существенного воздействия служат для обоснования мероприятий по предотвращению негативных изменений на периферии ореолов влияния источников воздействия.

Периферийная зона (зона фонового мониторинга) охватывает остальную территорию мониторинга. В пределах этой зоны отслеживаются фоновые изменения всех показателей, которые могут быть вызваны как разработкой месторождения, так и факторами, не связанными с калийным производством. Относительно равномерное распределение наблюдательных пунктов в периферийной зоне позволяет исследовать в динамике качество поверхностных и подземных вод, почв, изменение видового состава растительности и животного мира, а также проявление случайных, временных и других существующих источников техногенного воздействия. Наблюдения в пределах периферийной зоны ведутся по разреженной сетке.

В пределах выделенных зон для каждого компонента устанавливаются свои требования к размещению наблюдательных пунктов. Например, при расположении наблюдательных пунктов за состоянием атмосферного воздуха учитывается преобладающее направление ветра. Наблюдательные скважины размещаются в зависимости от структуры потока подземных вод и поверхностного стока. Контроль состояния растительности проводится на участках с типичными растительными ассоциациями. Почвенный мониторинг отражает фактическое состояние почв, занимающих доминирующее положение в почвенной структуре. Наблюдательные пункты мониторинга состояния животного мира должны охватывать все основные типы наземных и водных биоценозов, а также учитывать биологические и экологические особенности основных систематических групп представителей животного мира.

Предложенная система мониторинга состояния окружающей среды при разработке месторождений полезных ископаемых позволяет наиболее эффективно отслеживать изменения, как компонентов окружающей среды, так и ландшафтов в целом. Достоверность получаемых данных обеспечит своевременное выявление экологических проблем, связанных с функционированием предприятий и позволит корректировать предусмотренные природоохранные мероприятия.

Заключение

В результате исследования, проведенного с целью установления пространственно-временных закономерностей формирования природно-техногенных ландшафтов в районах интенсивного техногенного галогенеза, автором получены следующие выводы:

1. Установлено развитие гипергенных процессов в солеотвалах и шламохранилищах, определяющих характер экологических последствий. Химический состав дренажных вод характеризуется Na–Cl составом. Окисление реагентов флотации, среди которых преобладают соединения азота, приводит к повышению концентрации соединений азота в фильтрационных водах. Активная роль солевых растворов в выщелачивании глинистых минералов, присутствующих в солеотвалах и шламохранилищах, способствует повышению концентраций микроэлементов, которые активно мигрируют в легкорастворимой форме в окружающую среду.

2. Среди техногенных факторов, определяющих миграцию загрязнителей калийного производства, на первом месте находятся внутренние факторы, связанные с химическими свойствами загрязнителей (высокая растворимость, активное участие в ионном обмене, биотоксичность). Высокие концентрации Cl^- и Na^+ приводят к смене класса наземных и аквальных ландшафтов с гидрокарбонатно-кальциевого на хлоридно-натриевый. Активизация процессов выщелачивания и ионного обмена в системе вода-порода обеспечивает повышенное содержание Ca^{2+} , Mg, SO_4^{2-} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в подземных и поверхностных водах, почвах. Наблюдается смена зональных видов на солеустойчивые ассоциации, при интенсивном засолении резко снижается биомасса и видовое разнообразие.

3. Показана связь локализации техногенных геохимических аномалий и характера поступления поллютантов. Атмотехногенная миграция формирует ореол загрязнения вблизи солеотвалов, шламохранилищ и обогатительных фабрик. Поступление загрязнителей с фильтрационными стоками в подземные и поверхностные воды формирует второй вид засоления, который отличается большей солевой нагрузкой и проявляется на значительном удалении от источников загрязнения в долинах загрязненных рек.

4. Определены природные и техногенные факторы формирования ландшафтно-геохимической структуры в районах природного и

техногенного галогенеза. В условиях близкого залегания соляно-мергельной толщи и выходом на поверхность хлоридно-натриевых вод рассольного горизонта по карстовым, тектоническим трещинам или древним скважинам формируются, в основном, среднепродуктивные нейтральные или слабощелочные солоноватые или слабосоленоватые кислородно-глеевые хлоридно-натриевые трансаквальные ландшафты. Техногенный галогенез сопровождается более интенсивной трансформацией ландшафтно-геохимической структуры. Техногенные отвальные горнопромышленные ландшафты щелочного класса на автономных позициях в результате латеральной и радиальной миграций Na–Cl фильтрационных вод определяют появление низкопродуктивных слабощелочных и щелочных сильносоленоватых кислородно-сероводородных хлоридно-натриевых трансаквальных ландшафтов на фоне зональных пресных кислородно-глеевых трансаквальных и трансаккумулятивных гидрокарбонатно-кальциевых аквальных ландшафтов. В местах близкого залегания высокоминерализованных подземных вод в долинах рек вместо зональных лугово-аллювиальных ландшафтов кислого класса формируются сульфидные солончаковые ландшафты кислого и слабощелочного класса, где засоление почв достигает «очень сильной» степени.

5. Разработаны пространственно-временные модели трансформации почвенных характеристик при разовом аварийном поступлении Na–Cl техногенных потоков в почвы промывного режима и почв супераквальных ландшафтов при различной глубине залегания Na–Cl подземных вод.

6. Создана система эколого-геохимических индикаторов состояния наземных и аквальных ландшафтов в районах разработки калийных месторождений. Наряду с нормативными показателями оценки состояния окружающей среды доказана эффективность использования соотношений химических элементов для анализа природной и техногенной составляющих галогенеза, развитии опосредованных геохимических процессов.

7. Разработаны теоретические основы направлений природоохранных работ для снижения влияния отходов калийной промышленности на окружающую среду, которые включают в себя восстановление защитной функции пород в основании объектов хранения отходов с помощью методов тампонирования горных пород и защиту солевой толщи от атмосферных осадков сформированным почвенно-растительным покровом. Рекультивационные мероприятия дополнены системой мониторинга состояния окружающей среды, учитывающей характер распределения водорастворимых солей и сопутствующих микроэлементов.

Благодарности. Автор выражает благодарность и признательность за внимание и консультации на протяжении всей работы академику РАН, проф. Н. С. Касимову.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Хайрулина Е. А.** Фитоиндикационные показатели загрязнения тяжелыми металлами горно-таежных комплексов / Е. А. Хайрулина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 10–12 (31). – С. 44 – 47. – 0,2 а.л.

2. Максимович Н. Г. Техногенные биогеохимические процессы в Пермском крае / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина**, А. В. Жекин, Е. А. Ворончихина // Геориск. – 2010. – № 2 – С. 38–45. – 0,75 / 0,2 а.л.

3. Максимович Н. Г. Особенности исследования подземных вод лесопарковой зоны крупного промышленного города / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Инженерные изыскания. – 2011. – № 5. – С. 36–44. – 1,0 / 0,5 а.л.

4. **Хайрулина Е. А.** Влияние регионального переноса загрязнителей на трансформацию биогеохимических параметров горно-таежных ландшафтов / Е. А. Хайрулина, Е. А. Никифорова, Е. А. Ворончихина // Теоретическая и прикладная экология. – 2011. – № 1. – С. 61–68. – 0,75 / 0,25 а.л.

5. Максимович Н. Г. Основы мониторинга окружающей среды при разработке месторождения калийных солей / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Инженерные изыскания. – 2012. – № 8. – С. 8–18. – 1,0 / 0,5 а.л.

6. **Хайрулина Е. А.** Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей / Е. А. Хайрулина // Теоретическая и прикладная экология. – 2014. – № 3. – С. 41–45. – 0,42 а.л.

7. Максимович Н. Г. Изучение микробиологических процессов в комплексе инженерных изысканий / Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, **Е. А. Хайрулина**, А. Д. Деменев // Инженерные изыскания. – 2015. – № 9. – С. 40–44. – 0,75 / 0,2 а.л.

8. **Хайрулина Е. А.** Формирование экологической обстановки при разработке месторождения калийных солей / Е. А. Хайрулина // Проблемы региональной экологии. – 2015. – № 4. – С. 140–145. – 0,5 а.л.

9. **Хайрулина Е. А.** Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Е. А. Хайрулина, Л. В. Новоселова, Н. В. Порошина // Географический вестник. – 2017. – № 1 (40). – С. 93–101. – 0,6 / 0,3 а.л.

10. **Хайрулина Е. А.** Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с солесодержащими отходами на поверхностные и подземные воды / Е. А. Хайрулина // Географический вестник. – 2018. – №2 (45). – С. 145–155. – DOI: 10.17072/2079-7877-2018-2-145-155. – 0,9 а.л.

11. **Хайрулина Е. А.** Геоэкологические проблемы разработки калийных месторождений / Е. А. Хайрулина, В. С. Хомич, М. Ю. Лискова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 2. – С. 112 – 126. – 0,65 / 0,25 а.л.

Web of Science: **Khayrulina E. A.** Environmental issues of potash deposit development / E. A. Khayrulina, V. S. Khomich, M. Iu. Liskova // Proceedings of the Tula states university-Sciences of Earth. – 2018. – № 2. – P. 112–126.

12. **Хайрулина Е. А.** Потенциально токсичные элементы в почвах Индустриального района г. Перми / Е. А. Хайрулина, И. В. Тимофеев, Н. Е. Кошелева // Географический вестник. – 2019. – № 2 (49). – С. 80–100. – DOI: 10.17072/2079-7877-2019-2-80-100. – 1,3 / 0,45 а.л.

13. **Хайрулина Е. А.** Проблемы рекультивации солеотвалов калийных предприятий / Е. А. Хайрулина, О. С. Кудряшова, Л. В. Новоселова // Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 90–95. – 0,93 / 0,5 а.л.

Scopus: **Khairulina E. A.** Problems of potash tailings pile remediation / E. A. Khairulina, O. S. Kudryashova, L. V. Novoselova // Gornyi Zhurnal. – 2019. – № 5. – P. 90–95.

14. **Хайрулина Е. А.** Особенности формирования макрокомпонентного состава снежного покрова в крупном центре калийной промышленности г. Березники / Е. А. Хайрулина, Е. Ушакова // Проблемы региональной экологии. – 2020. – № 3. – С. 28–38. – 0,9 / 0,5 а.л.

15. **Хайрулина Е. А.** Трансформация почвенно-растительного покрова в результате влияния изливающихся древних рассолоподъемных скважин на территории Пермского края / Е. А. Хайрулина, Н. В. Митракова, Л. В. Новоселова, Н. В. Порошина // Географический вестник. – 2021. – № 4 (59). – С. 113–129. – 1,1 / 0,3 а.л.

16. **Меньшикова Е. А.** Особенности грунтов и потенциал восстановления природно-технической системы «Хвостохранилище ЕВРАЗ ГОК» / Е. А. Меньшикова, Т. И. Караваева, **Е. А. Хайрулина**, Н. В. Митракова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 9. – С. 54–66. – 1,1 / 0,27 а.л.

Scopus: **Menshikova E. A.** Specific features of soil and ecological state of natural technical system «EVRAZ KGOK tailing dump» / E. A. Menshikova, I. T. Karavaeva, **E. A. Khayrulina**, N. V. Mitrakova // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2021. – Vol. 332, № 9. – P. 54–66.

17. Maximovich N. Artificial geochemical barriers for environmental improvement in a coal basin region / N. Maximovich, **E. Khayrulina** // Environmental Earth Sciences. – 2014. – Vol. 72, is. 6. – P. 1915–1924. – DOI: 10.1007/s12665-014-3099-7. – DOI: 10.1007/s12665-014-3099-7 – 0,5 / 0,25 а.л. (*Scopus*).

18. **Khayrulina E.** Influence of Drainage with High Levels of Water-Soluble Salts on the Environment in the Verhnekamskoe Potash Deposit, Russia / E. Khayrulina, N. Maksimovich // Mine Water and the Environment. – 2018. – Vol. 37, is. 4. – P. 595–603. – DOI: 10.1007/s10230-017-0509-6. – 0,75 / 0,5 а.л. (*Scopus*).

19. Zhang T. On the volumetric stability, chloride binding capacity and stability of Portland cement-GBFS pastes: An approach from the viewpoint of hydration products / T. Zhang, W. Tian, Y. Guo, A. Bogush, **E. Khayrulina**, J. Wei, Q. Yu // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 205. – P. 357–367. – 1,1 / 0,15 а.л. (*Scopus*).

20. Kudryashova O. S. Composition for rock grouting based on insoluble calcium salts for groundwater protection [Electronic resource] / O. S. Kudryashova, A. M. Elokhov, **E. A. Khayrulina**, A. Bogush // Environmental Earth Sciences – 2021. – Vol. 80, is. 5. – Article number 205. – 8 p. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12665-021-09502-z.pdf> (access date: 27.04.2022). – 0,75 / 0,25 а.л. (*Scopus*).

21. Pyankov S. V. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images / S. V. Pyankov, N. G. Maximovich, **E. A. Khayrulina**, O. A. Berezina, A. N. Shikhov, R. K. Abdullin // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Vol. 40, is. 3. – P. 606–621. – 1,3 / 0,16 а.л. (*Scopus*).

22. **Khayrulina E.** Properties of alluvial soils of taiga forest under anthropogenic salinisation / E. Khayrulina, A. Bogush, L. Novoselova, N. Mitrakova // *Forests*. – 2021. – Vol. 12, is.3. – Article number 321. – DOI: 10.3390/f12030321. – 1,0 / 0,25 а.л. (*Scopus*).

23. **Khayrulina E.** Formation of Solonchak in the Area of the Discharged Ancient Brine Wells (Perm Krai, Russia) [Electronic resource] / E. Khayrulina, N. Mitrakova, E. Menshikova, N. Poroshina, A. Perminova // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – Article number 858742. – 15 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/360249255_Formation_of_Solonchak_in_the_Area_of_the_Discharged_Ancient_Brine_Wells_Perm_Krai_Russia (access date: 27.04.2022). – DOI: 10.3389/fenvs.2022.858742. – 1,6 / 0,5 а.л. (*Scopus*).

Патент Российской Федерации:

24. Патент 2743977 Российская Федерация, МПК E21B 33/138, C09K 8/42, E21B 43/32, E21B 43/22, C 1, Состав для снижения водопроницаемости горных пород и способ тампонирования водопроницаемости участков горных пород / Кудряшова О. С. (RU), **Хайрулина Е. А.** (RU); патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ) (RU). – № 2020106365; заявл. 10.02.2020, опубл. 01.03.2021, Бюл. № 7 – 11 с.

Статья в сборнике материалов конференции, представленных в издании, входящем в Web of Science:

25. **Khayrulina E.** Aspects of the Environmental Monitoring on the Territory of Verhnekamskoye Potash Deposit (Russia) / E. Khayrulina // *Mining Meets Water – Conflicts and Solutions : Proceedings of the International Mine Water Association Symposium*. 2016. Leipzig, Germany, July 11–15, 2016. – Leipzig, 2016. – 2016. – P. 383–387. – 0,4 а.л.

Раздел в коллективной монографии:

26. **Хайрулина Е.** Формирование природно-техногенных ландшафтов при разработке месторождения калийных солей / Е. Хайрулина, Л. Новоселова, И. Шестаков, А. Богуш // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири : монография*. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – Т. 2 : Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах. Гл. II/47. – С. 220–223. – 0,35 / 0,1 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

27. **Хайрулина Е. А.** Влияние регионального переноса загрязнителей на заповедные ландшафты / Е. А. Хайрулина, Е.А. Ворончихина // *Геохимия биосферы : доклады Международной научной конференции*. Москва, 15–18 ноября 2006 г. – Москва, 2006. – С. 372–373. – 0,1 / 0,05 а.л.

28. **Хайрулина Е. А.** Оценка современного биогеохимического состояния заповедных экосистем Пермского края / Е. А. Хайрулина, Е. А. Ворончихина // Вестник Пермского университета. Серия Биология. – 2007. – № 5 (10). – С. 155–160. – 0,1 / 0,05 а.л.

29. Максимович Н. Г. Эколого-геохимические проблемы утилизации донных отложений Нижнезырянского водохранилища / Н. Г. Максимович, Е. А. Ворончихина, **Е. А. Хайрулина**, Ю. Н. Шавнина // Геохимия биосферы : сборник материалов и тезисов IV Международного совещания. Новороссийск, 26–30 мая 2008 г. – Новороссийск, 2008. – С. 143–145. – 0,2 / 0,1 а.л.

30. Максимович Н. Г. Техногенные геохимические барьеры как основа природоохранных технологий / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование : труды II Всероссийского симпозиума с международным участием и VIII Всероссийских чтений памяти академика А. Е. Ферсмана. Чита, 24–27 ноября 2008 г. – Чита, 2008 – С. 16–20. – 0,3 / 0,15 а.л.

31. Максимович Н. Г. Искусственные геохимические барьеры как основа природоохранных технологий при разработке месторождений полезных ископаемых / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина**, И. С. Китаева, Е. В. Воробьева, М. С. Первова // Ресурсно-экологические проблемы в XXI веке: инновационное недропользование, энергетика, экологическая безопасность и нанотехнологии : материалы международной конференции. Москва-Алушта, 27 сентября – 04 октября 2009 г. – Москва-Алушта, 2009. – С. 76–78. – 0,22 / 0,04 а.л.

32. Максимович Н. Г. К вопросу организации системы мониторинга состояния окружающей среды на территории разработки месторождения полезных ископаемых / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Синтез знаний в естественных науках. Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование : материалы международной научной конференции. Пермь, 21–25 ноября 2011 г. – Пермь, 2011. – Т. 2. – С. 149–152. – 0,22 / 0,11 а.л.

33. **Хайрулина Е. А.** Влияние стоков солеотвала калийного предприятия на химизм приповерхностной гидросферы / Е. А. Хайрулина, Н. Г. Максимович // Геохимия ландшафтов и география почв : доклады Всероссийской научной конференции. Москва, 04–06 апреля 2012 г. – Москва, 2012. – С. 240–242. – 0,17 / 0,1 а.л.

34. Максимович Н. Г. Геохимические методы в решении проблем охраны окружающей среды / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Географический вестник. – 2013. – № 4 (27). – С. 59–64. – 0,32 / 0,15 а.л.

35. **Хайрулина Е. А.** Формирование окислительных геохимических барьеров в местах выхода на поверхность высокоминерализованных подземных вод / Е. А. Хайрулина // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2014. – № 14. – С. 93–96. – 0,17 а.л.

36. **Хайрулина Е. А.** Проявление сульфидогенеза в таежных ландшафтах западного Прикамья в условиях техногенного галогенеза / Е. А. Хайрулина // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование : труды V Всероссийского симпозиума и XII Всероссийских чтений памяти академика А. Е. Ферсмана. Чита, 10–12 декабря 2014 г. – Чита, 2014. – С. 60–64. – 0,3 а.л.

37. Максимович Н. Г. Формирование загрязнения поверхностных вод в районе разработки месторождения калийных солей / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина**, В. Т. Хмурчик, А. Д. Макурова // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : труды V Международной научно-практической конференции. Пермь, 29–31 мая 2015 г. – Пермь, 2015. – Т. 2. – С. 120–123. – 0,2 / 0,05 а.л.

38. Максимович Н. Г. Геохимические барьеры и рациональное недропользование / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Научно-техническое обеспечение горного производства : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Института горного дела им. Д. А. Кунаева. Алматы, Республика Казахстан, 10–11 сентября 2015г. – Алматы, 2015. – Т. 87. – С. 283–289. – 0,4 / 0,2 а.л.

39. **Хайрулина Е. А.** Ландшафтно-геохимические процессы в районе разработки Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (Пермский край) / Е. А. Хайрулина // География и регион : материалы международной научно-практической конференции. Пермь, 23–25 сентября 2015 г. – Пермь, 2015 – Т. 1. – С. 157–163. – 0,35 а.л.

40. Максимович Н. Г. Минералы геохимических барьеров в зоне влияния отходов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении : Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского : сборник статей. – 2016. – № 19. – С. 324–330. – 0,25 / 0,1 а.л.

41. **Хайрулина Е. А.** Роль физико-химических процессов в системе водопорода в формировании ландшафтов при техногенном галогенезе / Е. А. Хайрулина // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А. И. Перельмана) : доклады всероссийской научной конференции. Москва, 18–20 октября 2016 г. – Москва, 2016. – С. 613–616. – 0,2 а.л.

42. Максимович Н. Г. Геохимические барьеры и обеспечение экологической безопасности в районах с интенсивным техногенным воздействием / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина** // Теория и методы исследований в естественных науках : сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Пермь, 28 ноября 2016 г. – Пермь, 2016. – С. 228–240. – 0,8 / 0,4 а.л.

43. **Хайрулина Е. А.** Влияние шламохранилища с солесодержащими отходами на приповерхностную гидросферу / Е. А. Хайрулина, Н. Г. Максимович // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России. Москва, 04–05 апреля 2017 г. – Москва, 2017. – С. 429–434. – 0,27 / 0,15 а.л.

44. **Хайрулина Е. А.** Развитие сероводородной обстановки в таежных ландшафтах Верхнего Прикамья в условиях техногенного галогенеза / Е. А. Хайрулина, Н. Г. Максимович // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых : материалы международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика

Константина Игнатьевича Лукашева (1907–1987). Минск, Республика Беларусь, 23–25 мая 2017 г. – Минск, 2017. – № 2. – С. 132–134. – 0,24 / 0,12 а.л.

45. **Хайрулина Е. А.** Геохимия аквальных ландшафтов в районах развития галогенных формаций / Е. А. Хайрулина, Н. Г. Максимович // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : труды VI Международной научно-практической конференции. Пермь, 29 мая–01 июня 2017 г. – Пермь, 2017. – Т. 2. – С. 252–255. – 0,24 / 0,12 а.л.

46. Саакян Л. В. Исторический анализ формирования техногенных ландшафтов в горнодобывающих районах / Л. В. Саакян, Н. Г. Максимович, В. С. Хомич, Ш. Г. Асмарян., М. И. Струк, **Е. А. Хайрулина** // Вестник науки и образования. – 2017. – Т. 1, № 7 (31). – С. 73–78. – DOI: 10.20861/2312-8089-2017-31-005. – 0,4 / 0,08 а.л.

47. **Хайрулина Е. А.** Экологический мониторинг в районах складирования отходов с высоким содержанием водорастворимых солей / Е.А. Хайрулина, М.А. Бакланов // Сергеевские чтения. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии : материалы научной конференции в IX Международного форума «Экология» : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Москва, 22 марта 2018 г. – Москва, 2018. – С. 209–215. – 0,27 / 0,15 а.л.

48. **Хайрулина Е. А.** Трансформация ландшафтно-геохимической структуры в районе разработки калийного месторождения / Е. А. Хайрулина // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов : материалы XIII Международной ландшафтной конференции. Воронеж, 14–17 мая 2018 г. – Воронеж, 2018. – Т. 2. – С. 365–366. – 0,2 а.л.

49. **Хайрулина Е. А.** Изменения в системе вода-порода при разработке калийного месторождения / Е. А. Хайрулина, А. А. Богущ // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование : труды VII Всероссийского симпозиума с международной участием и XIV Всероссийских чтений памяти академика А. Е. Ферсмана. Чита, 22–25 августа 2018 г. – Чита, 2018. – С. 106–110. – 0,3 / 0,15 а.л.

50. Митракова Н. В. Формирование засоленных техногенных почв в зоне влияния калийных предприятий / Н. В. Митракова, **Е. А. Хайрулина** // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове : сборник материалов VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ. Томск, 14–19 сентября 2020 г. – Томск, 2020. – С. 142–145. – 0,25 / 0,12 а.л.

51. **Хайрулина Е. А.** Аккумуляция железосодержащих минералов в почвах при разгрузке подземных соленых вод / Е. А. Хайрулина, А. А. Богущ, Н.В. Митракова // Почвы – стратегический ресурс России : тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Сыктывкар, 2020–2022 гг. – Москва–Сыктывкар, 2021. – Ч. 3. – С. 920–922. – 0,1 / 0,05 а.л.

52. Митракова Н. В. Формирование и характеристика почв в условиях долговременного воздействия засоленных подземных вод / Н. В. Митракова,

Е. А. Хайрулина // Почвы – стратегический ресурс России : тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Сыктывкар, 2020–2022 гг. – Москва–Сыктывкар, 2021. – Ч. 2. – С. 234–235. – 0,1 / 0,05 а.л.

53. **Khayrulina E. A.** Chemistry of ground water and surface water under development of potash salt deposit (Urals, Russia) / E. A. Khayrulina, N. G. Maximovich // Book of abstracts of 9th International Symposium on Environmental geochemistry. Aveiro, Portugal, July 15–21, 2012. – Aveiro, 2012. – P. 86–87. – 0,1 / 0,05 а.л.

54. **Khayrulina E. A.** Evolution of technogenic landscapes on the territory of Verhnekamskoye Potash Deposit / E. A. Khayrulina, N. G. Maximovich // Culture and Society for our future Earth : book of abstracts of International Geographical Union Regional Conference [Electronic resource]. Moscow, Russia, August 17–21, 2015. – Moscow, 2015. – P. 145. – 0,05 а.л / 0,03 а.л.

55. **Khayrulina E.** Accumulation of iron-bearing minerals in soils during saline groundwater discharge [Electronic resource] / E. Khayrulina, A. Bogush // Goldschmidt Conference Abstracts. Paris, France, August 13–18, 2017. – Paris, 2017. – URL: <https://goldschmidtabstracts.info/abstracts/abstractView?id=2017005326> (access date: 27.04.2022). – 0,07 / 0,04 а.л.

56. Mitrakova N. Soil monitoring as an indicator of complex salinization under potash mining / N. Mitrakova, **E. Khayrulina** // Mine water: Technological and Ecological Challenges : proceedings of the International Mine Water Association Conference Perm, Russia, July 15–19, 2019. – Perm, 2019 – P. 696–700. – 0,4 / 0,2 а.л.

57. Baklanov M. Methods of environmental bioindication of rivers prone to technogenic salinization / M. Baklanov, P. Mikheev, O. Mikheeva, T. Sheina, **E. Khayrulina** // Mine Water Management for Future Generations : Proceedings of the International Mine Water Association Symposium. Cardiff, Wales, United Kingdom, July 12–16, 2021. – Cardiff, 2021. – P. 37–41. – 0,5 / 0,1 а.л.

58. **Khayrulina E.** Long-time Effect of Ancient Salt Production (Perm Krai, Russia) / E. Khayrulina, N. Mitrakova // Mine Water Management for Future Generations : Proceedings of the International Mine Water Association Symposium. Cardiff, Wales, United Kingdom, July 12–16, 2021. – Cardiff, 2021. – P. 237–242. – 0,4 / 0,2 а.л.

Учебные пособия:

59. Ворончихина Е. А. Основы ландшафтной хемозкологии: учебное пособие по спецкурсу / Е.А. Ворончихина, **Е. А. Ларионова (Хайрулина)**. – Пермь : Изд-во ПГУ, 2002. – 146 с. – 7,2 / 3,6 а.л.

60. Максимович Н. Г. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды: учебное пособие / Н. Г. Максимович, **Е. А. Хайрулина**. – Пермь : Изд-во ПГУ, 2011. – 248 с. – 9,0 / 4,5 а.л.

Подписано в печать 03.10.2022 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 2,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 306.
Отпечатано в ООО "Типография "Здравствуй"
614068, г. Пермь, ул. Данщина, 7Д.
Тел. (342) 270-14-05