

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

На правах рукописи

Воробьёва Дарья Андреевна

**ЭКОГЕОХИМИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА**

1.6.21. Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель
доктор геолого-минералогических наук,
Гусева Н.В.

Томск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ИЗУЧЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ.....	10
1.1. К вопросу о гидросферных экофункциях почв	10
1.2. Гидрохимические и почвенные исследования в Кольском регионе	12
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
2.1. Административное положение	15
2.2. Природные условия.....	15
2.2.1. Климат	15
2.2.2. Рельеф.....	18
2.2.3. Гидрография	20
2.2.4. Почвенный покров	22
2.2.5. Растительность	23
2.2.6. Геологическое строение	24
2.2.6.1. Месторождения полезных ископаемых	27
2.2.7. Гидрогеологические условия	30
2.3. Характеристика техногенного комплекса территории.....	34
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	38
3.1. Методы полевых исследований	38
3.2. Методы лабораторных исследований	50
3.3. Камеральная обработка результатов	53
ГЛАВА 4. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ВОД.....	57
4.1. Химический состав природных вод	57
4.2. Формы миграции химических элементов в воде	73
4.3. Равновесие вод с минералами горных пород	78
4.4. Оценка токсичности природных вод методом биотестирования	82
4.5. Оценка токсичности химических элементов в воде с использованием модели USEtox.....	84
ГЛАВА 5. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ.....	86

5.1 Минералогический и элементный состав почв	86
5.2 Формы нахождения химических элементов в почвах	102
5.3 Оценка токсичности почв методом биотестирования	116
5.4 Оценка токсичности химических элементов в почвах с использованием модели USEtox ..	121
ГЛАВА 6. МЕХАНИЗМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ.....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В экосистемах различного масштаба все компоненты связаны между собой потоками вещества и энергии, что обеспечивает цикличность процессов, устойчивость во времени и высокое качество компонентов природной среды. Однако эти же самые процессы способствуют и распространению материальных загрязнителей. Под влиянием антропогенных факторов может происходить нарушение естественных потоков и перераспределение химических элементов в компонентах окружающей среды, следствием чего может являться трансформация всех элементов ландшафта, включая почвенно-растительный слой вплоть до полного его уничтожения (Бородина, Голов, 2013; Елсукова и др. 2019; Гусева и др., 2020).

Почвенный покров является центром взаимодействия компонентов окружающей среды, выполняя многочисленные глобальные экологические функции, нарушение которых вызывает целую цепочку негативных последствий. Одной из ключевых экологических функций почвы является гидросферная, что предполагает биогеохимическую защиту подземной гидросферы от проникновения аэротехногенного загрязнения. Однако, при длительном антропогенном воздействии происходит снижение сорбционных свойств почвы, ее деградация, а также значительная трансформация ландшафта. Такая проблема отмечается в районах влияния горно-металлургических предприятий во Франции, США, Канаде, Иране, Южной Корее, Китае и других странах (Pirrone et al., 2010; Zhang et al., 2011; Ettler, 2015; Ghayoraneh, Qishlaqi, 2017; Wilkin et al., 2018).

Подобная трансформация лесных ландшафтов произошла и в районе озера Имандра, Кольского региона в результате выбросов сернистого газа, меди и никеля комбинатом «Североникель». Хотя в последнее время комбинат снизил выбросы (Мониторинг окружающей..., 2021), техногенный фактор по-прежнему играет важную роль в формировании химического состава всех компонентов природной среды, в том числе природных вод и почв. Однако, механизмы перераспределения химических элементов между почвами, подземными и поверхностными водами в аспекте их взаимного влияния остаются недостаточно изученными на данной территории.

Цель исследования – выявление эколого-геохимических особенностей компонентов природной среды и обоснование механизмов трансформации их химического состава (на примере центральной части Кольского региона).

Объектом исследования являются природные воды и почвы центральной части Кольского региона (Мурманская область).

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1) определить основные природные и техногенные факторы, влияющие на состояние компонентов природной среды;

2) охарактеризовать эколого-геохимическое состояние природных вод в районе исследования, в том числе на основе определения форм миграции химических элементов и оценки равновесия вод с минералами горных пород;

3) охарактеризовать эколого-геохимическое состояние почв района исследования, в том числе на основе определения форм нахождения химических элементов в почвах;

4) оценить токсичность природных вод и почв района методом биотестирования и по показателю токсического воздействия химических элементов на здоровье человека с использованием модели Usetox;

5) обосновать механизмы трансформации химического состава компонентов природной среды.

Фактический материал. В основу работы положены результаты исследований, проводившихся автором совместно с сотрудниками отделения геологии ИШПР и ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ с 2014 по 2021 гг. В окрестностях озера Имандра летом 2014, 2016, 2020 годов автором опробовано 30 водных объектов (51 проба), среди которых озера, реки, ручьи и родники. В 2016 и 2020 годах проведено опробование почвенных профилей по горизонтам (17 пунктов – 41 проба).

Методы исследования. Для определения макрокомпонентного состава вод использованы методы: титриметрия, фотоколориметрия, пламенная фотометрия, потенциометрия, турбидиметрия, жидкостная хроматография. Микрокомпонентный состав вод определялся масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе NexION 300 фирмы Perkin-Elmer (США). Анализы химического состава вод и почв выполнялись в ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ, аккредитованной на техническую компетентность и независимость.

Формы миграции химических элементов в водах изучались с использованием метода фильтрации и равновесного диализа в полевых и лабораторных условиях. Расчет неорганических форм миграции химических элементов проводился в программном продукте PHREEQC. Оценка степени насыщенности вод вторичными минералами проводилась путем расчета индекса насыщения (SI) в программном продукте PHREEQC, визуализация - с помощью диаграмм полей устойчивости минералов.

Валовое содержание химических элементов в почве определялось методом ICP-MS после разложения навески азотной кислотой в микроволновой печи. Формы нахождения химических элементов в почвах определялись методом последовательных селективных вытяжек по McLaren & Crawford (1973) с изменениями Ладонина (2006). Минеральный состав образцов почв изучался

методами порошковой рентгеновской дифрактометрии и электронной микроскопии в МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ.

Токсичность природных вод и почв оценивалось методом биотестирования с применением тест-объектов инфузория-туфелька (*Paramecium Caudatum*) (ФР 1.39.2015.19242, ФР 1.39.2015.19243) и зеленая протококковая водоросль хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*) (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04). Расчет показателя токсического воздействия химических элементов, содержащихся в водах и почвах, на здоровье человека осуществлялся с использованием модели Usetox (Fantke et al., 2017).

Научная новизна. В работе представлены современные актуальные данные о распространенности более 60 химических элементов в поверхностных, подземных водах и почвах. Впервые проведена оценка равновесия вод с основными минералами водовмещающих пород, как характеристики естественного состояния вод, и установлено, что исследуемые воды находятся на начальных этапах эволюционного развития системы вода-порода. Показано, что антропогенное влияние на природные воды также прослеживается по состоянию их равновесия с вторичными минералами.

Оценена токсичность природных вод и почв методом биотестирования с применением двух тест-объектов: инфузория-туфелька (*Paramecium Caudatum*) и зеленая протококковая водоросль хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*).

Впервые для рассматриваемого района проведена оценка показателей токсического воздействия никеля и меди на здоровье человека с использованием модели USEtox, что позволяет продемонстрировать потенциальное влияние на здоровье человека условий окружающей среды, обусловленных как природными, так и техногенными факторами.

На основе исследования элементного состава природных вод и почв, а также форм нахождения широкого спектра химических элементов в них, в районе влияния металлургического комбината и фоновых участках обоснованы механизмы трансформации химического состава компонентов природной среды как отражение гидросферной экофункции почв.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Влияние природных и техногенных факторов на поверхностные и подземные воды центральной части Кольского региона прослеживается в особенностях как макрокомпонентного, так и микрокомпонентного состава. Высокие содержания основных поллютантов – никеля и меди отмечаются преимущественно в поверхностных водах, а в подземных водах лишь на участках с разрушенным органомным слоем почв. Степень токсичности вод по результатам биотестирования – допустимая, при этом значения показателя токсического воздействия в поверхностных водах для меди выше, чем для никеля.

2. На исследуемой территории влияние выбросов медно-никелевого комбината прослеживается в увеличении концентраций никеля и меди и доли их подвижных форм в иллювиальном (В) горизонте почв. По результатам биотестирования на зеленых водорослях для подзолистого (Е) горизонта почв характерна более высокая степень токсического эффекта. Значения показателя токсического воздействия в почве для никеля выше, чем для меди.

3. Деградация верхнего слоя почв в районе исследования, происходящая за счет длительного техногенного воздействия, приводит к продвижению более подвижных форм химических элементов вниз по почвенному профилю и возрастанию нагрузки на минеральные горизонты. При достижении предела сорбционной способности, зависящего в том числе от уровня загрязнения, почвы утрачивают функцию хемосорбционного защитного барьера, вследствие чего происходит загрязнение подземных вод.

Достоверность результатов работы. Достоверность результатов исследования обеспечена достаточным количеством проб, проанализированных в аккредитованной лаборатории с использованием современного оборудования, детальным анализом фактического материала и литературы по теме исследования, а также апробацией основных научных результатов на различных международных конференциях и публикациями в рецензируемых российских и зарубежных журналах.

Практическая значимость работы. Полученные результаты могут являться научной основой для совершенствования нормативных документов при проведении экологического контроля и оценки рисков для здоровья населения, принятия природоохранных мер с целью улучшения экологической обстановки в окрестностях горно-металлургических предприятий. Материалы диссертационного исследования могут быть внедрены в образовательный процесс при реализации дисциплин «Геоэкология», «Экология» в ВУЗах.

Материалы диссертационного исследования использованы при выполнении работ по гранту РФФИ №19-35-90077 «Аспиранты» - «Почва как регулятор химического состава гидросферы приарктических районов в условиях техногенной нагрузки» (руководитель Гусева Н.В.) и Государственному заданию «Наука» (проект FSWW-0022-2020).

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 17 работах, в том числе 1 статье в журнале, входящем в Перечень рецензируемых научных изданий и рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 2 статьях в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science:

- Воробьева Д.А. Формы миграции никеля и меди в ультрапресных водах центральной части Кольского региона / Д.А. Воробьева, З.А. Евтюгина // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т. 27. – №5. – С. 6-16;

- Гусева Н.В. Особенности взаимодействия в системе вода-порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) / Н.В. Гусева, Д.А. Воробьёва, З.А. Евтюгина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2020. – Т. 331. - № 8. – С. 177-188;

- Воробьёва Д.А. Геохимическая характеристика почв территории с высокой аэротехногенной нагрузкой / Д.А. Воробьёва, Н.В. Гусева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – №6. – С. 149-159; а также в 14 работах – материалах международных конференций и симпозиумов.

Также полученные результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях: Всероссийской конференции с международным участием с элементами научной школы, посвященной 85-летию кафедры ГИГЭ ТПУ «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии» (г. Томск, 2015 г.), Международной экологической студенческой конференции (МЭСК) «Экология России и сопредельных территорий» (г. Новосибирск, 2016 г.), Международном научном симпозиуме им. академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2015-2021 гг.), Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств» (г. Гомель, Беларусь, 2017 г.), 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference) (г. Томск, 2019 г.).

Личный вклад автора. Автор лично принимал участие в комплексных полевых работах по отбору проб природных вод и почв в 2014, 2016 и 2020 гг., а также в пробоподготовке и проведении лабораторных исследований совместно с сотрудниками отделения геологии ИШПР и ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ. Кроме этого, автором выполнены сбор, обработка, анализ и интерпретация полученных данных, проведены расчёты, сформулированы основные защищаемые положения и предложено их доказательство. Обработка данных осуществлялась самостоятельно с помощью программных комплексов PHREEQC, ArcGIS и средств Microsoft Office.

Структура и объем диссертации. Диссертация объёмом 149 страниц машинописного текста состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 126 наименований, содержит 52 рисунка и 31 таблицу.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю, д.г.-м.н. Гусевой Наталье Владимировне за внимание, поддержку и помощь в работе. Особую благодарность автор выражает к.б.н., доценту Апатитского филиала Мурманского государственного технического университета, научному сотруднику Кольского филиала ФИЦ «Единой геофизической службы РАН» Евтюгиной Зинаиде Анатольевне за

организацию научно-исследовательской работы, помощь при полевых исследованиях и советы при подготовке материалов. За консультации и помощь на разных этапах выполнения работы искреннюю благодарность автор выражает к.г.-м.н. Копыловой Ю.Г., к.г.-м.н. Хващевской А.А., к.г.-м.н. Соктоеву Б.Р., к.г.-м.н. Ильенку С.С., к.г.-м.н. Беляновской А.И., к.г.-м.н. Моисеевой Ю.А., к.г.-м.н. Пургиной Д.В., Куровской В.В., Гостевой И.А. и другим членам коллективов отделения геологии ИШПР и ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ, а также к.г.н., старшему научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН Сандимирову С.С. и к.ф.-м.н., ведущему научному сотруднику КоФ ФИЦ ЕГС РАН Асмингу В.Э.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ИЗУЧЕННОСТЬ ТЕРРИТОРИИ

1.1. К вопросу о гидросферных экофункциях почв

Почвенный покров является узлом экологических связей, через который идут непрерывные процессы обмена веществом и энергией между всеми приповерхностными геосферами Земли. Почва наделена многочисленными глобальными функциями, деградация которых может обернуться для цивилизации самыми тяжелыми последствиями (Добровольский, Никитин, 2012).

Под экологическими функциями почв понимается значение почв и почвенных процессов в жизни экосистем, их сохранении и эволюции. Исследование экологических функций почв носят многоаспектный и динамический характер, поэтому изучение форм участия почвы в функционировании и изменении биogeоценозов и геосфер является перспективной задачей. Изучение экологической роли почв должно включать как прямые, так и обратные связи: с одной стороны влияния факторов (атмосферных, гидросферных, биосферных и других компонентов экосистем) на почву, с другой стороны обратное ответное действие самой почвы на всю совокупность влияющих на нее компонентов среды (Добровольский, Никитин, 2012). Кроме того, должны отслеживаться изменения внутреннего функционирования почвенных систем в их взаимодействии со всеми звеньями природных и техногенных комплексов.

Добровольский Г.В. и Никитин Е.Д. (2012) делят экологические функции почв на две большие группы: биogeоценотические и глобальные. Первая группа функций обоснована тем, что почва является составной частью любого наземного биogeоценоза. Сюда входят функции, обусловленные физическими, химическими, физико-химическими и биохимическими свойствами почв, а также информационные и целостные биogeоценотические. Вторая группа функций определяется взаимодействием почвы и других геосфер Земли: атмосферная, литосферная, гидросферная, общегеосферная и этносферная (Добровольский, Никитин, 2012).

Связь почвы и природных вод обуславливается гидросферной экофункцией почвы. В настоящее время выделены четыре глобальные гидросферные функции почв (Добровольский, Никитин, 2012):

- трансформация атмосферных осадков в почвенные и грунтовые воды;
- участие в формировании речного стока и водного баланса;
- фактор биопродуктивности водоемов за счет привносимых почвенных соединений;
- сорбционный защищающий от загрязнений барьер акваторий.

Характер изменения атмосферных осадков при прохождении через почвенный профиль определяется составом самих осадков, генетическими свойствами и составом почв. Осадки как

привносят различные вещества в почву, так и вымывают их из нее. При прохождении через почвенный профиль меняется химический, газовый и изотопный состав воды, она значительно обогащается значительным количеством органических веществ.

Главная форма участия почвы в формировании речного стока – это влияние почвы на соотношение грунтового и поверхностного стока, напрямую зависящее от ее фильтрационной и водоудерживающей способностей.

Вернадский В.И. считал, что почвенный раствор является связующим звеном между морской, речной и дождевой водами. Биопродуктивность водоемов является прямым следствием воздействия почвенного покрова на химический состав поверхностных и грунтовых вод, питающие реки, а через них и на другие акватории, в том числе моря и океаны (Добровольский, Никитин, 1990, 2012). Привнос почвенных соединений обеспечивает водоемы большим количеством биофильных элементов.

Основное проявление защитной функции почв заключается в том, что почва благодаря своей огромной активной поверхности может поглощать многие вредные соединения на пути их миграции в водные экосистемы (Добровольский, Никитин, 2012).

При поступлении загрязняющих веществ, например, тяжелых металлов с атмосферными осадками, определяющим будет их поведение и перераспределение в почвенном горизонте. Процессы осаждения или вторичного высвобождения химических элементов будут оказывать влияние на состояние других компонентов окружающей среды. Решающая роль в распределении, миграции и концентрировании химических элементов принадлежит не столько их валовому содержанию, сколько формам нахождения химических элементов в природных объектах. В результате длительного антропогенного воздействия происходит не только значительное обогащение почв загрязняющими элементами, но и меняется их соотношение в различных формах (Мотузова, 2009). Однако, характер и масштаб этих процессов зависят от многих факторов и будут варьироваться в разных районах.

Выявление форм нахождения микрокомпонентов в почвах позволяет охарактеризовать особенности распределения элементов в почвенных разрезах, находящихся в естественном либо измененном под техногенным воздействием состоянии. Кроме этого соотношений форм нахождения химических элементов в почвах определяет способность почвы выполнять ее основные экологические функций и как природного тела, и как источника плодородия и защиты природных сред от загрязнения, а также определяет влияние почв на сопредельные геосферы (Мотузова, 2009).

Бесспорна связь между устойчивостью почвы к внешнему воздействию и сложностью структуры системы почвенных соединений химических элементов. Существуют примеры резкого падения устойчивости техногенно нарушенных почв, где произошло обеднение

вещественного состава почв, где разрушены структура почв, органические вещества и органоминеральные комплексы. В результате утрачены определенные механизмы связей между элементами системы, между ее подсистемами, ослаблены компенсаторные процессы в каждом звене системы соединений химических элементов почвы, что ведет к утрате устойчивости этого звена и устойчивости почвы в целом (Мотузова, 2009).

Но возможности сорбционной способности почв далеко не беспредельны. В условиях высокой антропогенной нагрузки почвы часто не справляются со своими задачами, что приводит к эвтрофикации водоемов и загрязнению подземных вод.

1.2 Гидрохимические и почвенные исследования в Кольском регионе

Экологическая обстановка в зоне воздействия комбината изучалась многими коллективами исследователей, и к настоящему времени накоплены значительные материалы по содержанию и динамике поллютантов в окружающей среде (Опекунова и др., 2006 а; Даувальтер и др, 2009; Моисеенко, Гашкина, 2015).

В результате деятельности комбината «Североникель» было оказано значительное воздействие на природные ландшафты. В 1966 г. видимые признаки повреждения растительности отмечались лишь на расстоянии 2 и 3 км в северном и южном направлениях от комбината «Североникель» (Евтюгина и др., 2018). К 1985–1986 гг. зона поврежденных лесов достигла 930 км², а на территории 37 км² хвойные леса были полностью разрушены (Poznyakov, 1993). С 1990 г. комбинат «Североникель» последовательно снижал объемы выбросов SO₂: с 232,5 тыс. т/год (в работе Poznyakov, 1993 – 287 тыс. т/год) до 45,8 – в 1999 г. В 2015 г. объем выбросов достиг 36,9 тыс. т. Снижение выбросов тяжелых металлов происходило не так резко, как SO₂. В 1990 г. в атмосферу поступило меди и никеля соответственно 1813 и 2712 т, а в 1999 г. – 873,8 и 1127 т, в 2013 г. выбросы меди достигли 523,8 т, никеля – 374,5 т (данные Кольской ГМК). Сократилась площадь поврежденных лесов – 474 км², но увеличилась площадь погибших (89 км²) (Доклад о состоянии..., 2009). Несмотря на то, что к настоящему времени содержание загрязнителей (меди и никеля) в выбросах комбината снизилось относительно 80–90-х годов прошлого века в несколько раз, в почве (органогенном горизонте) адекватного снижения меди и никеля не отмечено (Евтюгина и др., 2018). В начале XXI столетия количество меди в почве в среднем снизилось в зоне сильного загрязнения в 1,4 раза, среднего – в 2,2 раза относительно 90 годов, а никеля в 1,8 раза и 3,7 раза соответственно (Калабин и др., 2010). Медь, как лучший комплексообразователь, труднее выщелачивается из почвы, чем никель. Естественные процессы самоочищения почвы от тяжелых металлов очень длительны. Рассчитанный на основе

многолетних данных период удаления тяжелых металлов из подзолистой почвы до фонового уровня составил для меди 200 лет, никеля – 90 лет (Евдокимова, 1995, 2011).

В совместном проекте российскими, норвежскими и финскими исследователями проведено комплексное биогеохимическое изучение экосистем Севера Европы (вся территория Финляндии, Кольского п-ова, Карелии, Ленинградской и Архангельской областей и север Республики Коми), всего 1,5 млн км² (Augas et al., 1996). Исследования велись на основе изучения характерных малых водоосборов во всей взаимосвязи образующих ее компонентов: четвертичных отложений, атмосферных осадков, растительности, почв, поверхностных и грунтовых вод. Большая часть материала, была получена при проведении крупных международных проектов «Экогеохимическое картирование и мониторинг западной части Мурманской области и соседней территории Финляндии и Норвегии в масштабе 1:1000000» и международного проекта «Экогеохимическое картирование Восточной части Баренц-региона». Для всей этой обследованной территории определены уровни и варьирование содержания более 40 элементов во всех основных компонентах окружающей среды. Основным природным фактором регионального распределения содержания многих элементов в растениях, почвах, а также атмосферных осадках и поверхностных водах признан биоклиматический фактор. Показано, что аэротехногенное загрязнение посредством прямого или косвенного воздействия изменяет практически все исследованные параметры (несколько сотен) основных компонентов окружающей среды. Уровень поступления основных катионов от промышленности в регионе достаточен для поддержания кислотного статуса почв индустриальной части Кольского полуострова на фоновом уровне, несмотря на присутствие в регионе одних из самых крупных в мире источников веществ, повышающих кислотность почв (Кашулина, 2002; Кашулина, Салтан, 2008).

Позднее для оценки влияния выбросов комбината «Североникель» на формирование химического состава подземных вод проводились мониторинговые исследования Мончегорского полигона, расположенного в непосредственной близости от комбината (Даувальтер, Даувальтер, 2010). В результате поисковых работ, проводившихся в 2008-2010 гг. Центрально-Кольской экспедицией (ОАО «ЦКЭ»), было показано, что на территории локального воздействия выбросов комбината «Североникель» подземные воды защищены от проникновения аэротехногенных меди и никеля на участках с неразрушенным почвенным покровом.

Проблема загрязнения природных вод металлами на Кольском полуострове, как следствие их прямого сброса в составе стоков металлургических комплексов, изменения геохимического круговорота на водосборах горными разработками, выпадения из загрязненной атмосферы и вымывания кислыми дождями рассмотрена в следующих работах: Дудкин, Сандимиров, 2007;

Moiseenko et al. 2013; Kashulina et al., 2014; Моисеенко, Базова, 2016; Vazova, 2017, и является одной из важнейших для охраны водных ресурсов арктического бассейна.

Однако в проведенных исследованиях не обоснована гидросферная экофункция почв, а именно не исследованы геохимические процессы, протекающие в почвах при проникновении атмосферного загрязнения. Кроме того, в данном исследовании показано современное состояние таких компонентов природной среды как вода и почва, в том числе содержание в них более 60 химических элементов, определены формы нахождения химических элементов и выполнена оценка токсичности.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Административное положение

Район исследования расположен в пределах Кольского региона (синоним Мурманская область). Мурманская область – субъект Российской Федерации, расположенный на северо-западе России и входящий в состав Северо-Западного федерального округа. На юге она граничит с Карелией, на западе с Финляндией, на северо-западе с Норвегией (рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 – Положение района исследования

В рамках исследования проводилось опробование водных объектов в Мончегорском, Апатитском, Кировском и Полярнозоринском районах области.

2.2 Природные условия

2.2.1 Климат

Климат Кольского полуострова находится под смягчающим влиянием окружающих его морей и особенно запасов тепла, приносимых северной ветвью теплого течения Гольфстрим. Благодаря этому Баренцево море у города Мурманска не замерзает. Термический режим южного побережья полуострова несколько суровее, так как Белое море зимой покрывается льдом. При удалении вглубь полуострова влияние морей снижается (Ресурсы поверхностных..., 1970).

В горных частях района наблюдается следующая зональность: падение температуры воздуха, увеличение осадков, силы ветра и продолжительности залегания снежного покрова с увеличением абсолютной отметки местности. Различие в ходе метеорологических элементов зависит также от местных климатообразующих факторов: экспозиции склонов, ориентации долин, свойств почвы и пр. В восточной части полуострова вследствие более сглаженных форм рельефа климат отличается меньшей территориальной изменчивостью.

Преобладание поступления в рассматриваемый район воздушных масс атлантического и арктического происхождения и интенсивная циклоническая деятельность над Норвежским и Баренцевым морями, особенно сильная в холодное время года, вместе с другими климатообразующими факторами обуславливают на Кольском полуострове относительно теплую зиму и прохладное лето.

Характерной особенностью погоды является ее неустойчивость и резкая изменчивость, вызываемая частой сменой воздушных масс, перемещением циклонов и фронтов.

На побережье зима продолжается в течение 6 месяцев (ноябрь-апрель), а в центральной части до 7 месяцев (октябрь – апрель). Средняя месячная температура в этот период изменяется от -2 до -14°, постоянно держится снежный покров значительной мощности, часты метели и сильные ветры (преобладающее направление ветров юго-западное, со средними месячными скоростями от 7 до 11 м/сек). Осадков за холодный период выпадает от 100 до 200 мм, при этом наибольшее их количество наблюдается во внутренней возвышенной части полуострова (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Май и октябрь – переходные месяцы. Теплый сезон продолжается 4 месяца; средняя месячная температура наиболее теплого месяца – июля – не превышает 13-14°, при этом довольно часто наблюдаются заморозки.

Средняя годовая температура воздуха на территории Кольского полуострова изменяется от +1° на побережье Баренцева и Белого морей, до -1°, -2° в районах, удаленных от побережий, и до -3°, -4° в горных районах.

Таблица 2.2.1.1 - Средняя месячная и годовая температура воздуха г. Мончегорск, °С (СП 131.13330.2012)

Месяцы												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
-12,8	-12,7	-8,6	-2,5	3,4	10,2	13,8	12,0	6,6	0,2	-5,4	-9,7	-0,5

Кольский полуостров находится в зоне избыточного увлажнения. Осадки довольно значительны и для большей части территории составляют 550-600 мм, достигая 1000 мм и более

в горах. Наибольшее количество осадков выпадает в летние и осенние месяцы, а наименьшее – в марте–апреле.

Снежный покров на Кольском полуострове образуется в среднем в первых числах ноября, в горных районах с увеличением высоты установление снежного покрова наблюдается раньше. Разрушение снежного покрова наблюдается в среднем в первой декаде мая, с запаздыванием в горах.

Начало промерзания почво-грунтов на всей территории Кольского полуострова приходится на середину ноября, а полное оттаивание наступает в июне и в отдельных случаях даже в июле. На конец октября на всей территории полуострова глубина промерзания, как правило, составляет менее 20 см. Максимальная глубина промерзания почво-грунтов в отдельные годы достигает 2-3 м, а в наиболее теплые зимы 60-100 см.

Средняя годовая относительная влажность воздуха составляет около 80%, причем на морских побережьях она несколько выше, чем в центре полуострова, и еще выше – в горных районах.

Направление ветра имеет хорошо выраженный годовой ход. В зимний сезон преобладают ветры южного, летом – северного направления (рисунок 2.2.1.1).

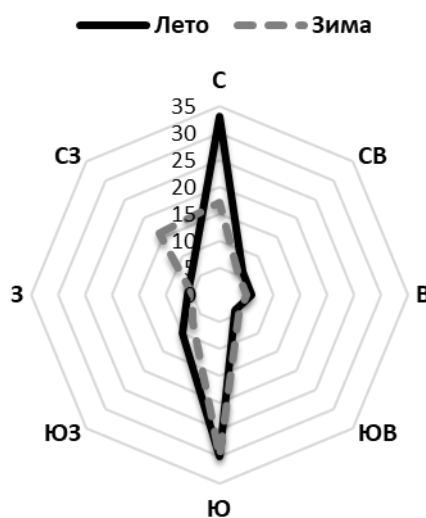


Рисунок 2.2.1.1–Направление ветров в г. Мончегорск в летний и зимний периоды

Средняя годовая скорость ветра около 4-8 м/сек, в центральных районах полуострова – 3-5 м/сек (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Условия переноса и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере определяются скоростью и направлением ветра, повторяемостью температурных инверсий, количеством и характером атмосферных осадков. На Кольском полуострове рассеиванию загрязняющих веществ в значительной степени способствует активная циклоническая деятельность с умеренными и сильными ветрами. В отдельные годы отмечается незначительное преобладание

погоды антициклонального типа со слабыми ветрами, штилями, приземными инверсиями, дымками. При этом наблюдается повышенные концентрации загрязняющих веществ.

2.2.2 Рельеф

В целом для Кольского полуострова характерно значительное различие в рельефе западной и восточной его частей.

Западная часть Кольского полуострова характеризуется сильно расчлененным рельефом. Там расположены большие горные массивы, высотные отметки которых достигают 1000 и более абс. м, разделенные глубокими впадинами, занятыми крупными озерами. Восточная часть Кольского полуострова характеризуется более ровным рельефом (Ресурсы поверхностных..., 1970).

В качестве естественной границы между западной и восточной частями Мурманской области можно принять долину реки Воронья, озера – Ловозеро и Умбозеро и долину реки Умбы. Через западную часть проходит направленная по меридиану глубокая впадина, занятая бассейном рек Колы и Нивы и крупнейшим в области озером Имандра. Почти перпендикулярно к этой впадине, в направлении с запада-северо-запада на восток-юго-восток тянется ряд долин и горных массивов. Последние в центре описываемого района достигают наибольших высот (Яковлев, 1961).

Северные районы Мурманской области занимают приподнятое, холмистое плато, с высотными отметками порядка 200-250 абс. м, которое тянется вдоль Мурманского побережья Баренцева моря от государственной границы до реки Вороньей. На севере это плато обрывается к морю, образуя крутые скалистые берега, с абсолютной высотой 100-120 м. Северное прибрежное плоскогорье пересекает ряд меридионально направленных узких и глубоких ущелий, занятых реками, впадающими в Баренцево море, а также заливов-фиордов: Печенга, Западная Лица и другие.

Крупнейшим из фиордов является Кольский залив, вытянутый к югу, вглубь суши более чем на 50 км и окруженный со всех сторон горами. В течение круглого года он свободен ото льда и иногда замерзает на несколько дней только при сильных и устойчивых морозах, но подобное явление наблюдается довольно редко (Геология СССР, 1958; Яковлев, 1961).

Отдельные возвышенности Мурманского прибрежного плато достигают высоты 350-450 абс. м и имеют мягкие очертания. К югу, на водоразделе рек Туломы и более мелких рек - Уры и Титовки, указанные возвышенности приподнимаются до 500 абс. м.

К югу-западу от Мурманского прибрежного плоскогорья расположена широкая Туломо-Нотозерская впадина, приподнятая над уровнем моря не более чем на 50 м. Поверхность ее

неровная – с холмами и отдельными невысокими горами, разбросанными среди болот и плоских низин, изобилующих мелкими озерами. Указанный район является бассейном озера Нотозеро, рек – Лоты, Ноты и Туломы.

К югу и юго-западу от Туломо-Нотозерской впадины расположен центральный, горный район, который начинается от государственной границы и тянется к востоку-юго-востоку, до озера Ловозеро. Долинами рек Печи и Мончи и глубокими впадинами крупных озер – Монче, Имандра и других этот район расчленен на отдельные массивы – тундры. Среди них наиболее высокие Рослин-тундры (650 абс. м), Сальные тундры (990 абс. м), Чуна и Монча-тундры (600-700 абс. м), Волчьи тундры (900-1000 абс. м). Между озерами Имандра и Умбозеро возвышаются Хибинские тундры, высотой до 1300 абс. м, а между озерами Ловозеро и Умбозеро – Ловозерские тундры, наибольшая высота которых достигает 1150 абс. м.

К югу и юго-западу от горных массивов, расположенных западнее озера Имандра, простирается обширная, южная, озерная низина, приподнятая над уровнем моря на 120-150 м; она занята бассейном среднего течения реки Ноты, многоозерным бассейном реки Пиренги и южной частью озера Имандра. Южно-озерная низина покрыта обширными болотами, среди которых разбросаны многочисленные мелкие озера. Однако и здесь изредка встречаются небольшие холмы и гряды высотой до 450-500 абс. м.

Южнее Хибинских гор и восточнее южной окраины озера Имандры до среднего течения реки Умбры расположена холмистая Имандра-Умбрская низина на высоте 100-150 м над уровнем моря. Большая часть низины занята болотами и многочисленными озерами, среди которых возвышаются отдельные холмы высотой до 300 абс. м. Здесь расположены бассейны озер: Имандра и Колвицкого, и западных притоков реки Умбы. На юго-востоке указанная низина примыкает к Кандалакшскому берегу Белого моря.

На крайнем юго-западе Мурманской области, за пределами Кольского полуострова, южный горный массив резко снижается, переходя в низину озера Ковдозеро. Здесь расположена серия озер, связанных между собой короткими, порожистыми реками-протоками.

Восточная, полуостровная, часть Мурманской области характеризуется преобладающим мелко и крупнохолмистым рельефом. Рельеф побережья Баренцева моря в восточной части Мурманской области такой же, как и в ее западной части. Он представляет собой приподнятое, холмистое плато, которое вдоль берега Баренцева моря и Воронки Белого моря образуют крутые склоны, с отметкой рельефа 50-60 абс. м. Это плато пересечено множеством поперечных трещин и ущелий, по которым протекают реки Харловка, Восточная Лица и Иоканга, впадающие в Баренцево море. На востоке это плато пререзается одной из крупных рек области – Пономем, несущим свои воды в Белое море (Яковлев, 1961).

2.2.3 Гидрография

Сложность геологических и орографических условий, наличием вблизи земной поверхности водоупорных кристаллических пород, большое количество выпадающих осадков и относительно малое испарение наложили свой отпечаток и на характер гидрографической сети Кольского полуострова. Здесь весьма развита речная сеть, а по количеству озер полуостров занимает одно из первых мест в России; низменные и слаборасчлененные участки территории нередко представляют собой крупные заболоченные пространства (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Реки. Реки Кольского полуострова принадлежат к бассейнам двух морей – Баренцева и Белого; водораздел проходит с запада на восток – от государственной границы с Финляндией к горлу Белого моря через Сальные, Хибинские, Ловозерские тундры и горную гряду Кейвы. Отсюда на север и юг текут главнейшие реки полуострова. Занимая срединное положение, водораздел обуславливает небольшую длину стекающих с него рек, сбросовый характер их продольных профилей и небольшие площади водосборов.

Для большинства рек полуострова типичны узкие, слаборазработанные, врезаемые в твердые кристаллические породы долины. Форма их V-образная, а часто каньонообразная. Следуя направлениям горных разломов, они имеют резкие коленчатые изгибы, многочисленные перепады (стремнины, пороги, водопады), чередующиеся с тихими спокойными участками (плесами). Многие реки следует рассматривать как озерно-речные системы. Они состоят из чередующихся озер и коротких порожистых и бурных проток, причем у некоторых рек протяженность озер превосходит длину речных участков. Обилие проточных озер является результатом подпруживания русла в одних случаях выходящими на поверхность скальными породами, в других – моренными валунами нагромождениями.

Речные поймы наиболее развиты на реках равнины центральной части полуострова, в частности в верхнем и среднем течении рек Поноя и Варзуги. На остальной части территории преобладает односторонняя, прерывистая пойма. Типичные русла рек – немеандрирующие.

Реки, прорезая на своем пути твердые горные породы, изобилуют порогами и перекатами. Продольные профили крупных рек, впадающих в моря, характеризуются спокойным начертанием в верхнем и среднем течении и крутым падением в низовьях; профили малых рек имеют ступенчатый характер. Плесовые участки, часто переходящие в проточные озера, имеют большую ширину и глубину, скорость течения здесь в межень порядка 0,10 – 0,15 м/сек и менее; порожистые участки мелководные, как правило неширокие, со скоростями течения, достигающими 2-3 м/сек, а иногда и более.

Наибольшее распространение имеют реки озерного типа. На своем пути они пересекают ряд озер, образуют перепады, пороги, водопады. Озерные реки собирают воду с обширных территорий и отличаются большой водностью. Из рек этого типа следует особо выделить реки-каналы, которые отличаются малой протяженностью и почти не имеют боковых притоков, сбрасывая главным образом воды крупных озер и водохранилищ.

К группе горных рек относятся малые водотоки, стекающие с возвышенностей Кольского полуострова. Они представляют собой небольшие стремительные потоки, бегущие в узких скалистых долинах, с многочисленными порогами и водопадами. Типичной рекой этой группы являются р. Малая Белая, стекающая по западному склону Хибинских гор и впадающая в оз. Имандра; водосборная площадь ее всего 82,8 км², длина 13 км, падение около 350 м (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Озёра. Наибольшее распространение озера имеют в центральной и северной частях полуострова.

По происхождению озера делятся на две группы – ледниковые и тектонические. Ледниковые озера - это небольшие водоемы, нередко расположенные среди болот. Чаще всего они имеют округлую форму и малые глубины. Встречаются также запрудные озера, которые образовались в результате преграждения мореной какого-либо поверхностного стока воды. Ложа этих озер обычно имеют вытянутую овальную форму и глубины до 4-6 м.

Озера тектонического происхождения лежат в глубоких котловинах, имеют вытянутую форму и сложную конфигурацию береговой линии. Рельеф дна таких озер неровный; встречаются впадины глубиной до 100 м. К озерам тектонического происхождения относятся почти все крупные водоемы рассматриваемой территории: Имандра, Ловозеро, Умбозеро, Колвицкое и другие.

Болота. Болота на Кольском полуострове занимают более 20% площади. Распределены болота по территории неравномерно. В прибрежной тундровой зоне болота с наличием торфяной залежи встречается редко и как элемент ландшафта не оказывают существенного влияния на составляющие водного баланса.

Характерным является многообразие типов болот. Наибольшее развитие имеют верховые болота, питающиеся атмосферными осадками. По долинам рек и другим депрессиям рельефа, а также по склонам в местах выхода грунтовых вод широкое развитие имеют типично низинные болота и болота различных переходных стадий к верховым (Ресурсы поверхностных..., 1970).

2.2.4 Почвенный покров

На Кольском полуострове получили развитие почвы четырех типов: тундровые, подзолистые, болотные, в небольшой степени дерновые и производные от них: подзолисто-болотные или дерново-подзолистые почвы (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Тундровые почвы свойственны зоне тундр, а также горным вершинам и склонам, поднимающимся над границей лесной растительности. Почвы этого типа относятся к начальной стадии почвообразовательных процессов и представлены в основном примитивными горнотундровыми почвами, которые развиваются почти исключительно на обломках коренных пород. Слой их редко достигает 10 см, и они никогда не покрывают значительных пространств. Такие почвы типичны для северной приморской полосы берега вблизи г. Мурманска и для горных районов (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Наиболее характерными для Кольского полуострова являются подзолистые почвы. К подзолам относится большая часть минеральных почв территории. Они развиваются на любых породах (кроме элювия) в зоне тайги, в подзоне лесотундры, часто встречаются в тундровой зоне, там, где нет избыточного увлажнения. На Кольском полуострове типичны подзолы с мощностью слоя 15-50 см; маломощные подзолы встречаются в предгорьях Хибин, окрестностях г. Мурманска и некоторых других местах; подзолы большой мощности (слоем более 50 см) мало распространены; встречаются они в низинах (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Для подзолов характерен дифференцированный профиль (рисунок 2.2.4.1), состоящий из подстилки - органогенного горизонта (O) толщиной 3–8 см; беловатого, осветленного за счет удаления красящих соединений железа и перегноя подзолистого или элювиального горизонта (E), толщиной от 2 до 20-30 см; иллювиального горизонта коричневых или охристых тонов (B), образовавшийся в результате иллювиального накопления алюминиево-железисто-гумусовых комплексных соединений, постепенно переходящего в материнскую породу (C) (Национальный атлас..., 2011).



Рисунок 2.2.4.1 – Типичный разрез подзолистых почв в Кольском регионе

Подзолистые почвы, сформировавшиеся на песчаных породах континентального и морского происхождения, существенно различаются по содержанию и запасам азота и гумуса, образование и накопление которого зависит от интенсивности биологических процессов, увлажнения почвогрунтовой толщи и характера растительного покрова (Экологический атлас..., 1999).

Болотные почвы на Кольском полуострове распространены на очень обширных площадях, большая часть из которых характеризуется слаборазложившимся торфом.

По механическому составу на рассматриваемой территории преобладают песчаные и супесчаные почвы, в значительной степени завалуненные (Ресурсы поверхностных..., 1970).

2.2.5 Растительность

Мурманская область расположена в пределах двух географических зон - тундры и тайги. Между ними тянется небольшая полоса лесотундры. Зона тундры занимает северную окраину Кольского полуострова шириной от 20-30 км на западе, до 120 км в средней части и выклинивающуюся на востоке (Экологический атлас..., 1999).

На морском побережье преобладают кустарничковые тундры, по мере удаления от моря кустарничковые тундры сменяются лишайниково-кустарничковыми и лишайниковыми. Растительность здесь представлена такими растениями как: вороника, толокнянка альпийская, брусника и карликовая березка-ерник.

К югу размещаются кустарниковые (ерники и ивняковые) тундры. Ивняки растут обычно на пологих склонах и в понижениях, имеющих травяной покров, представленный осоками, некоторыми видами разнотравья и злаков (купальница, гравилат, лабазник, герань лесная, мытник, сабельник, незабудки, свидина шведская, сфагновые мхи).

Лесотундровая растительность представлена березовыми редколесьями и криволесьями (береза извилистая), травяно-кустарничковыми зеленомошными и лишайниковыми. Подлеском обычно служит можжевельник и ерник. К северу высота березы уменьшается от 6-8 до 1,5 м. В средней части лесотундровой полосы береза имеет форму плодовых деревьев (Экологический атлас..., 1999).

Лесная зона, включая лесотундру, занимает около 80 % площади Мурманской области, но сами леса составляют только 23 % территории. Остальная часть лесной зоны занята лесотундровыми березняками, болотами и водоемами.

Леса области в основном представлены елью, сосной и березой. Ель преобладает на востоке и севере, а сосна на западе и юге. В еловых лесах преобладает сибирская ель. Елово-березовые леса представлены моховыми, главным образом, зеленомошными, лишайниково-

зеленомошными и лишайниковыми типами. Сосново-березовые леса представлены преимущественно лишайниковым типом. Кустарниковый ярус здесь почти не выражен, изредка встречаются можжевельник и карликовая береза.

По долинам рек растут ивняки, березовые и елово-березовые леса с травяным покровом.

Болота занимают 37 % площади всей области, наиболее широко развиты грядово-мочажинные болота, а также бугристые болота, для которых характерны бугры многолетней мерзлоты, оттаивающие летом до 30-55 см.

В горах и возвышенностях развита вертикальная поясность. Лесной пояс сменяется лесотундровыми березняками. В горных лесотундровых березняках деревья растут редко, промежутки заняты лишайниками, занимающими до 40-70 % площади. Над лесным и лесотундровым поясом выше 350-400 абс. м поднимаются горные тундры. В нижней части склонов (до 400-600 абс. м) развиты кустарниковые и кустарниково-лишайниковые тундры.

Выше 700 абс. м располагается пояс высокогорной разреженной растительности с бедным составом мхов и лишайников, покрывающих 1-5 % площади. Остальная территория занята каменистыми россыпями и каменными полями, на камнях господствуют эпилитные лишайники (Экологический атлас..., 1999).

2.2.6 Геологическое строение

Территория Кольского полуострова занимает восточную часть Балтийского щита, сложенного породами кристаллического фундамента и рыхлыми четвертичными отложениями (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Распространенные дочетвертичные кристаллические породы относятся к образованиям архейского, протерозойского и частично палеозойского возраста. Представлены они метаморфическими и эффузивными комплексами, прорезанными на больших площадях интрузиями, главных образом гранитов. Наибольшее площадное распространение имеют архейские гранитно-гнейсовые породы, слагающие ядра антиклиналей.

Остатки хребтов на Кольском полуострове, приподнятые в виде горстов, свидетельствуют о тектонических процессах, которые сопровождались образованием сложной системой трещин-разломов, разрывов, сбросов, преимущественно параллельных и перпендикулярных общему простиранию пород.

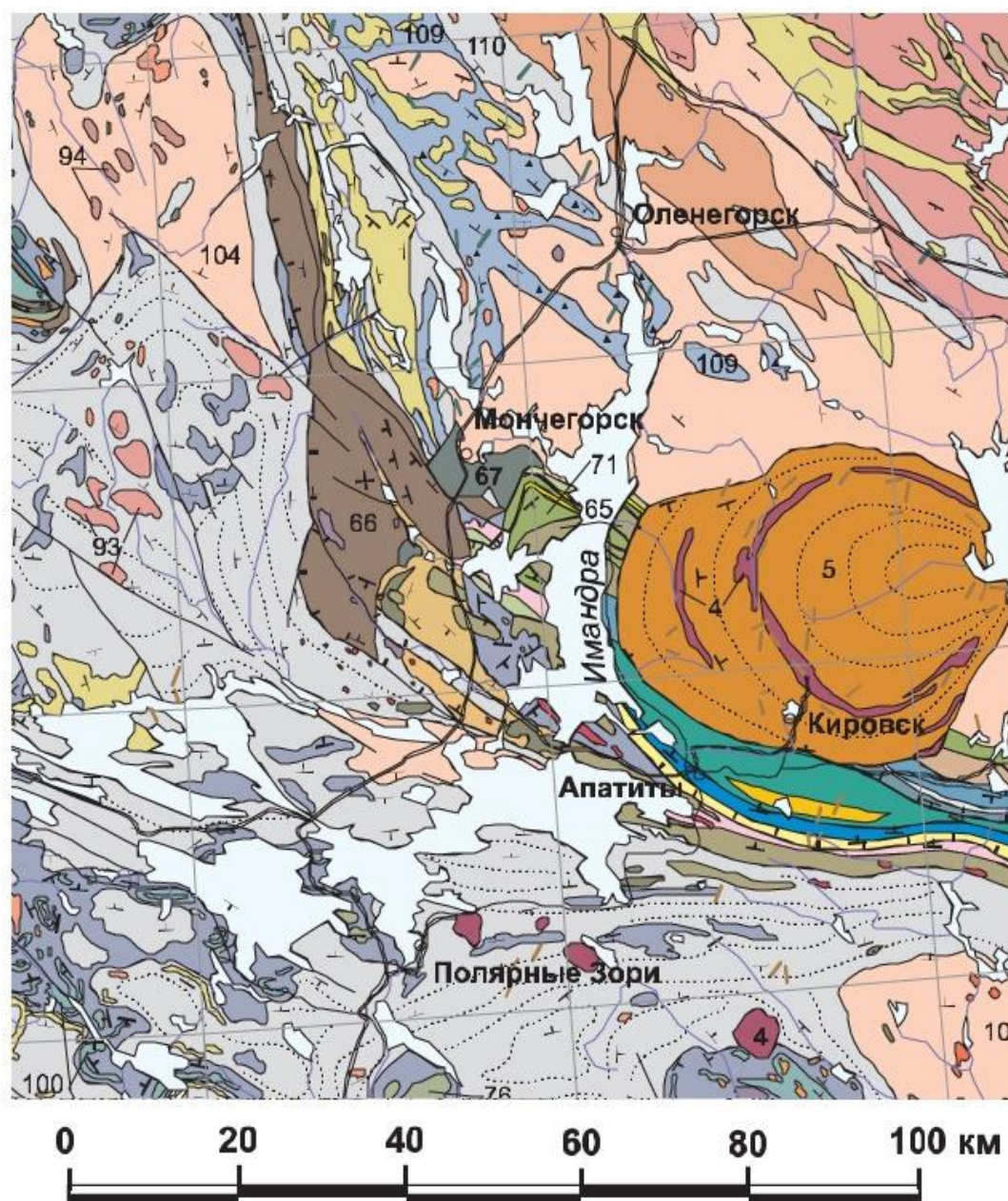


Рисунок 2.2.6.1 – Геологическая карта дочетвертичных отложений района исследования. (Геологическая карта..., 2001) (Условные обозначения представлены на рисунке 2.2.6.2)

Осадочные и вулканогенные породы	Интрузивные породы	Преобладающий состав
		<u>Девон</u>
3		Ультраосновные щелочные вулканы, алевролиты, туфопесчанники, туфы
	4 5 6	Щелочные ультрамафиты / нефелиновые сиениты / карбонатиты, дайки щелочных пород d_1 ; трубки взрыва кимберлитов, щелочных пикритов, меланефелинитов
7		Азгитовые, пикритовые порфириды, гравелиты, песчаники, глинистые сланцы
		<u>Нижний (ранний) протерозой</u>
		<u>Калевий</u>
	29 30 31	Перидотиты, пироксениты, габбро, габбро-анортозиты / субщелочные габбро, акериты / щелочные и нефелиновые сиениты, фойдолиты
37		Базальтовые порфириды, диабазы
38		Базальты, зеленые и углеродистые сланцы, туфы пикритовых порфиритов
39		Переслаивание андезитовых и базальтовых порфиритов, туфов, алевропелитовых сланцев
		<u>Ятулий</u>
51 52 53		Аркозовые песчаники, кварциты / известняки, доломиты / алевролитовые сланцы, филлиты
54		Диабазы, базальтовые, андезитовые порфириды, туфы, щелочные базальты
55 56		Кварциты, аркозовые песчаники, сланцы / известняки, доломиты, карбонатные сланцы
		<u>Сариолий</u>
57 58		Пикритовые, диабазовые порфириды, туфы / риолиты, дациты, туфы
59		Конгломераты, полимиктовые, аркозовые песчаники, кварциты, сланцы
		<u>Сумий</u>
	65	Нориты, габбронориты, диориты
	66	Габбро-анортозиты, габбро, диориты
	67 68	Перидотиты, пироксениты, габбронориты / лерцолиты, габбронориты
71 72		Базальтовые порфириды, мандельштейны, диабазы
76		Андезито-базальты, амфиболиты
		<u>Нестратифицированные комплексы неопределенного возраста</u>
	81	Габбро-амфиболиты, метаультрабазиты
	82	Нориты, габбронориты, вебстериты
		<u>Верхний (поздний) архей</u>
		<u>Лопий</u>
	87 88	Габбро, габбро-лабрадориты; дайки мафитов d_1 / кварцевые монзониты, монцодиориты
89		Метагравелиты, метапесчаники, аркозовые
90		Кварциты, мусковит-кварцевые, плагио-кианит-ставролитовые сланцы
91		Кианитовые, ставролит-кианитовые, силлиманитовые с гранатом и углеродистые сланцы
	93	Эндербиты, граниты, гранодиориты, монцодиориты
	94	Диориты, гранодиориты, плагиограниты
98 99		Кислые, средние метавулканы / гастингститовые гнейсы
100 101 102		Основные метавулканы, метакоматииты / метавулканы среднего, кислого и основного состава / конгломераты, метапсаммиты, основные и кислые метавулканы, кварциты
103		Слюдяные, гранат-слюдяные парагнейсы и сланцы, конгломераты, кварциты
	104 105	Гранодиориты, тоналиты, плагиограниты / эндербиты
		<u>Кольско-беломорский нестратифицированный комплекс</u>
106 *		Слюдяные, гранат-слюдяные гнейсы с кианитом и (или) силлиманитом
107 *		Гнейсы, амфиболиты, кальцифиры
108 *		Гнейсы, амфиболиты, железистые кварциты
109 *		Гнейсы, амфиболиты с месторождениями железистых кварцитов
		<u>Комплекс основания</u>
110 *		Биотитовые, амфибол- и пироксен-биотитовые гнейсы, мигматиты, тоналито-гнейсы, гранодиорито-гнейсы, амфиболиты

Рисунок 2.2.6.2 – Условные обозначения к геологической карте (рисунок 2.2.6.1)
(Геологическая карта..., 2001)

Четвертичные отложения представлены комплексом ледниковых образований верхнечетвертичного возраста: основной мореной, песчаными водно-ледниковыми отложениями, торфяниками, крупнообломочными элювиальными и делювиальными образованиями горных районов, песчанно-глинистыми морскими и озерными отложениями. Наибольшее распространение имеют валунные пески и супеси основной морены (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Распространение того или иного комплекса указанных выше пород обуславливает развитие в них определенных форм рельефа. К архейским гранитам и гнейсам приурочены денудационные равнины, пересеченность которых связана с перемещением отдельных глыб по сбросовым трещинам. Мелкая пересеченность рельефа обуславливается ледниково-аккумулятивными формами. На протерозойских осадочно-эффузивных породах, если они собраны в складки, развивается в основном горно-сельговый рельеф, существенным элементом которого являются гряды, сложенные коренными породами и вытянутые в одном направлении.

На палеозойских осадочных породах, залегающих горизонтально, образуются, как правило, структурные плато с эрозионными формами рельефа (восточная часть Кольского полуострова). Горные массивы приурочены к относительно молодым интрузиям, с ними связаны самые высокие массивы региона: Ловозерские, Хибинские, Чунские, Волчьи, Сальные тундры (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Хибинский массив является сложным интрузивным телом, сложенным разнообразными комплексами щелочных пород (нефелиновых сиенитов) и сформировавшимся в несколько интрузивных фаз (Геология СССР, 1958).

2.2.6.1 Месторождения полезных ископаемых

Эколого-геохимическое состояние ландшафтов Кольского региона определяется влиянием природных источников геохимического воздействия (главным образом месторождений полезных ископаемых) и характером техногенной нагрузки (Экология России, 2000).

За счет расположения здесь многочисленных медно-никелевых, апатит-нефелиновых, редкометалльных и других месторождений (рисунок 2.2.6.1.1) в регионе формируется повышенный природный фон по многим химическим элементам (Экология России, 2000).

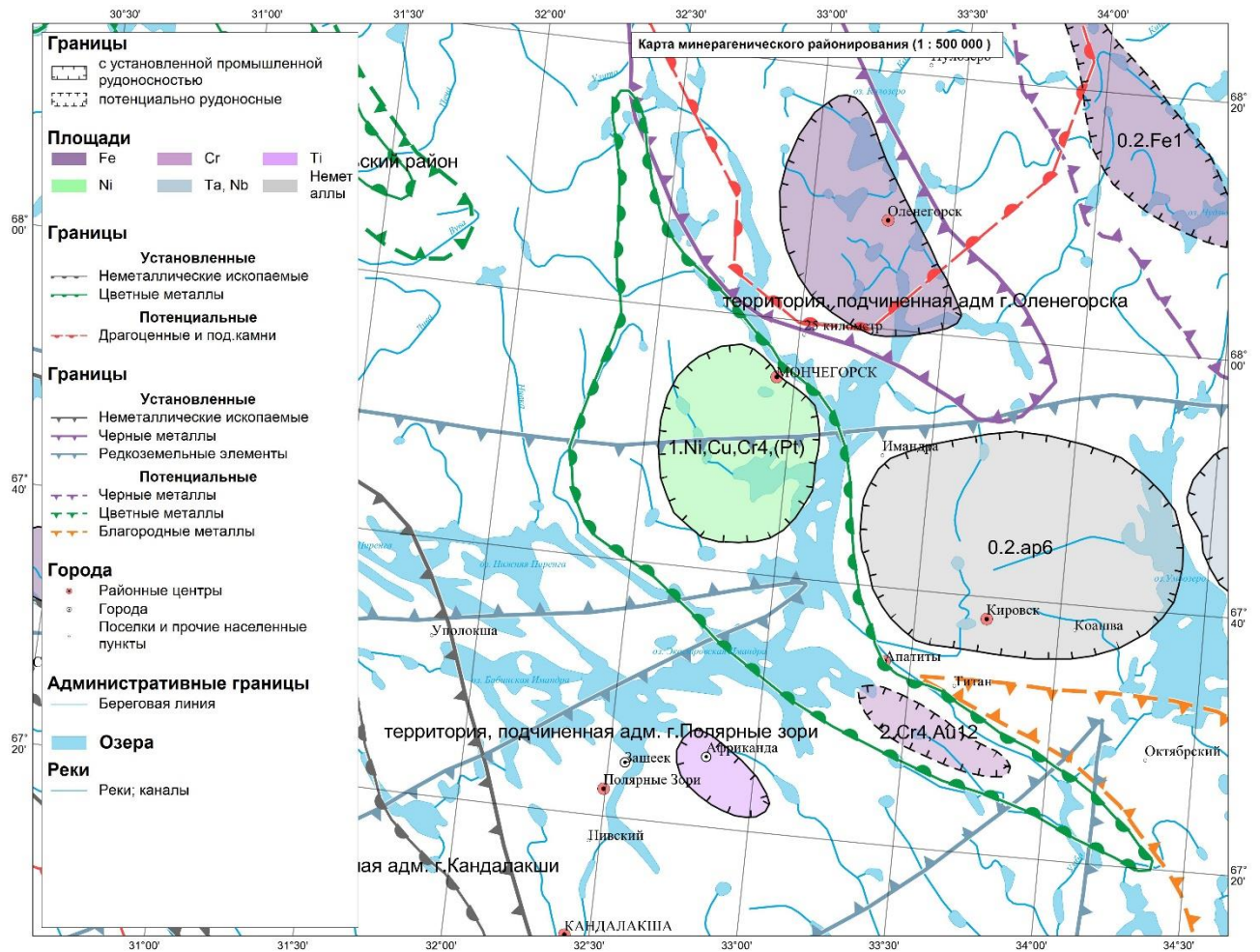


Рисунок 2.2.6.1.1 – Карта минерагенического районирования территории 1:500 000

(Интерактивная электронная..., 2021)

Минерально-сырьевая база прилегающей к Мончегорску территории представлена месторождениями хрома, медно-никелевых руд, кварцитов, диатомитов, строительных камней, песчано-гравийных материалов, проявлениями металлов платиновой группы (рисунок 2.2.6.1.2).

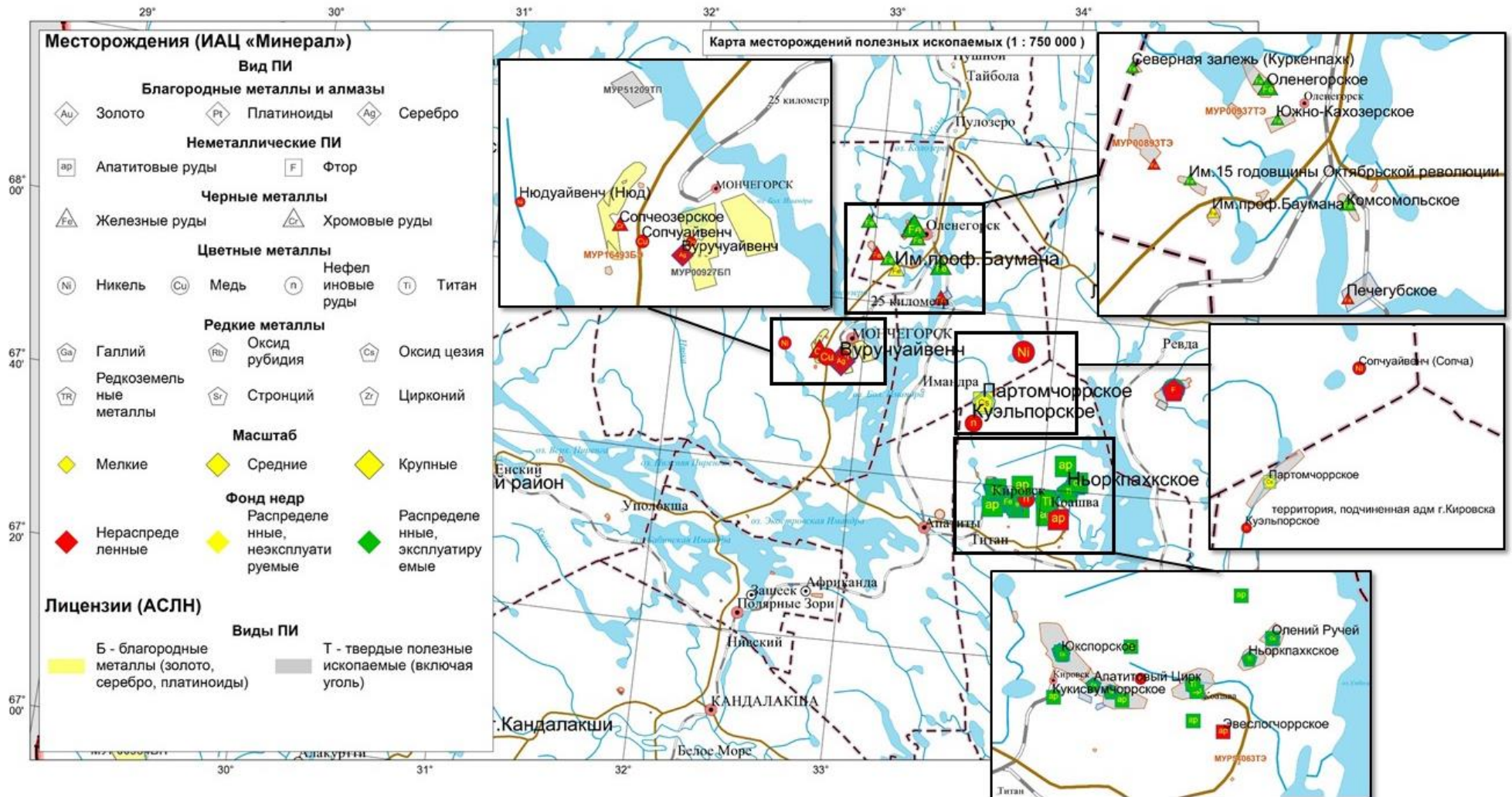


Рисунок 2.2.6.1.2 – Карта месторождений полезных ископаемых 1:750 000 (Интерактивная электронная..., 2021)

Наибольшее значение имеют следующие полезные ископаемые:

- Хром. Сопчеозерское месторождение хромитов расположено в 4 км от жилой застройки г. Мончегорска и в 3 км от промышленной площадки комбината «Североникель». Полого падающая хромитовая залежь (от 160 до 260-280 м) прослежена на 1,2 км, имеет мощность от 3-10 м в приповерхностной части до 30-34 м на глубине.

- Никель, медь. Обнаружены два месторождения сульфидных медно-никелевых руд с забалансовыми запасами «Нюд» и «Сопча». Месторождение медно-никелевых руд «Нитис – Кумужья - Травяная» полностью отработано в прошлые годы.

- Металлы платиновой группы (МПГ). Основные перспективы в отношении МПГ связаны с месторождениями «Южно - Сопчинский», «Вуручайвенч» «Морошковое озеро». Руды относятся к малосульфидному платино-металльному типу с содержанием МПГ в среднем 5-7 г/т. Основные полезные компоненты: палладий, платина, родий, золото, серебро.

2.2.7 Гидрогеологические условия

На территории Кольского полуострова распространены преимущественно порово-пластовые воды рыхлых четвертичных отложений и трещинные воды кристаллических пород.

Подземные воды четвертичных отложений являются безнапорными, реже – слабонапорными. Глубина залегания их колеблется от нуля до 2 м в понижениях, до 2-4 м на склонах и до нескольких десятков метров на возвышенностях. Зеркало их редко бывает горизонтальным, обычно оно повторяет рельеф поверхности, но в сглаженном виде, и имеет наклон в сторону отрицательных форм. Подземные воды движутся от более возвышенных мест к пониженным, образуя подземные потоки. При отсутствии уклона движения воды не происходит, и тогда образуются подземные бассейны.

Подземные воды изверженных и метаморфических пород являются наиболее распространенными на данной территории и обеспечивают основную часть подземного питания поверхностных водотоков (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Подземные воды, приуроченные к водоносным комплексам коренных пород, большей частью безнапорные, реже слабонапорные и только в местах глубоких тектонических трещин обладают высоким напором. Движение воды в коренных породах происходит по трещинам, глубина залегания уровня подземных вод составляет 100-150 м, реже 250 м и лишь в горных районах на отдельных участках она может достигать 300-600 м (Африканда, Хибинский массив, Печенгский район).

Основная часть подземных вод формируется в верхней трещиноватой зоне коренных пород. Глубина залегания их зависит от рельефа и увеличивается от склонов к вершинам, где

может достигать сотен метров. Подземные воды этой зоны в условиях гористой и сильно расчлененной местности подпитывают воды четвертичных отложений.

Вблизи депрессий и речных долин в горных районах верхняя трещиноватая зона кристаллического фундамента перекрывается рыхлыми осадочными породами. Уровень подземных вод коренных пород оказывается выше их поверхности, в связи с чем трещинные воды переходят в трещинно-напорные и обводняют четвертичные отложения. В этом случае образуется единый водоносный горизонт коренных пород и четвертичных отложений, глубина залегания которого определяется гипсометрическим положением четвертичных отложений и формой рельефа.

Кроме подземных вод четвертичных отложений и верхней трещиноватой зоны кристаллических пород, на территории Кольского полуострова развиты жильные воды, вскрываемые скважинами на глубинах до 500 м и приуроченные к зонам тектонических нарушений и контактам интрузий.

Основное питание подземных вод как четвертичных отложений, так и коренных пород осуществляется за счет атмосферных осадков. На участках с горным рельефом в местах развития сильно трещиноватых пород (Хибинские и Ловозерские тундры) процессы инфильтрации значительно ускоряются, создавая тем самым благоприятные условия для формирования подземного стока. В местах, где тектонические трещины расположены ниже уровня современных морских и озерных бассейнов, осуществляется дополнительное питание трещинных вод за счет инфильтрации вод поверхностных водоемов. В местах, где коренные породы покрыты четвертичными отложениями, эти воды инфильтруются через песчаные грунты, достигают кристаллических пород и образуют водоносные горизонты. Сильно ослабляются процессы инфильтрации в местах распространения на поверхности глинистых пород или при мощных горизонтах торфа.

Помимо инфильтрации, пополнение подземных вод верхней трещиноватой зоны может происходить путем подпитывания водоносных горизонтов водами, поступающими под напором по трещинам из более глубокого залегающих коренных пород.

Отсутствие выдержанного водоупора у верхнего водоносного горизонта коренных пород обуславливает питание подземных вод на всей площади их распространения. Иными словами, область питания подземных вод зоны интенсивного водообмена совпадает с областью их распространения. Наиболее интенсивное питание подземных вод происходит на водоразделах и отдельных возвышенностях.

Хорошо развитая гидрографическая сеть и глубокие эрозионные врезы рек, прорезающие верхнюю трещиноватую зону коренных пород, определяют разгрузку подземных вод в непосредственной близости к областям питания. Как правило, разгрузка подземных вод

происходит в понижениях рельефа: в горных районах преимущественно в виде родников, а в районах денудационных равнин – в реки и озера. Постоянными, действующими в течение всего года местами разгрузки подземных вод в горных районах являются глубоко врезанные долины, где осуществляется непрерывное подземное питание рек, и круглогодично действуют родники (Ресурсы поверхностных..., 1970).

Общая направленность движения подземных вод на рассматриваемой территории определяется дренирующим влиянием окружающих морей – Белого и Баренцева, которые служат основным базисом всего континентального стока этого района. В то же время, благодаря наличию на территории крупных озер – Имандра, Ловозеро, Умбозеро и других, приуроченных к обширным котловинам тектонического происхождения, формируется подземный сток регионального направления к указанным дренам. Наряду с котловинами крупных озер на направление стока подземных вод аналогичное влияние оказывают долины основных рек района – Туломы, Поноя, Умбы и др.

Режим подземных вод на территории определяется климатическими условиями Кольского полуострова, гидрогеологическими и геоструктурными особенностями Балтийского кристаллического щита.

В периоды интенсивного снеготаяния или во время затяжных дождей величина инфильтрации превышает величину подземного стока, что приводит к увеличению ресурсов подземных вод. В морозные зимы или засушливые летние периоды пополнение ресурсов подземных вод значительно снижается или даже прекращается совсем, что приводит к их уменьшению (Ресурсы поверхностных..., 1970).

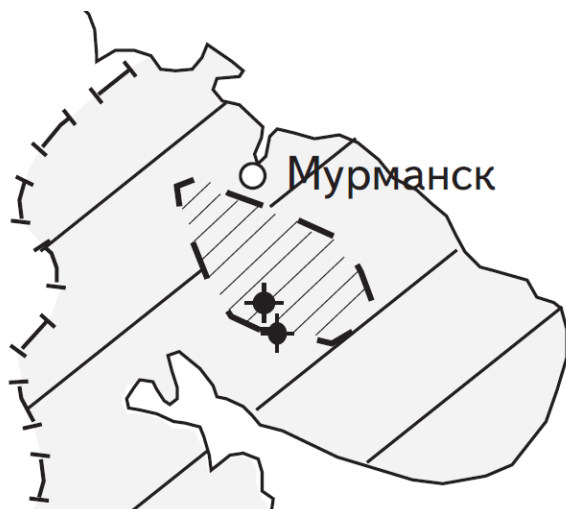
Наивысший уровень подземных вод наблюдается летом (июль) или осенью (октябрь), наиболее низкий приходится обычно на конец зимы (март – апрель).

Изменение подземного стока по территории совпадает с общим уменьшением высоты местности и расчлененности рельефа в направлении с запада на восток и от центральной горной части Кольского полуострова в сторону побережий и колеблется от 2,0 до 5,0 л/сек*км² и больше – рисунок 2.2.7.1 (Гидрогеология СССР, 1971; Ресурсы поверхностных..., 1970).



Рисунок 2.2.7.1 – Средний многолетний подземный сток (л/сек км²) на Кольском полуострове (по Н.П. Небожевой) (Ресурсы поверхностных..., 1970)

Грунтовые воды в четвертичных и коренных отложениях и гидравлически с ними связанные напорные водоносные горизонты рассматриваемой территории характеризуются очень низкой естественной защищенностью (Экология России, 2000) – рисунок 2.2.7.2.








- | | | |
|---|---|--|
|  | 1 | области незащищенных грунтовых вод; территории с преобладающим модулем техногенной нагрузки, тыс.т/км ² : |
|  | 2 | 2 - <1, 3 - >10; 4 - границы областей с разным модулем техногенной нагрузки; 5 - водозаборы с подтягиванием природных некондиционных вод |
|  | 3 | |
|  | 4 | |
|  | 5 | |

Рисунок 2.2.7.2 – Фрагмент схематической карты естественной защищенности и загрязнения подземных вод (данные ВСЕГИНГЕО) (Экология России, 2000)

2.3 Характеристика техногенного комплекса территории

В регионе наиболее развиты горнодобывающая, металлургическая и топливно-энергетическая отрасли. В центральной части Мурманской области расположены следующие основные промышленные предприятия региона: ОАО комбинат «Североникель» Кольской ГМК, ОАО «Апатит», «Олкон», Кольская АЭС, Кандалакшский алюминиевый завод, Ловозерский ГОК, а также прилегающие к ним города и поселки. Схема основных производств, располагающихся на территории, представлена на рисунке 2.3.1.

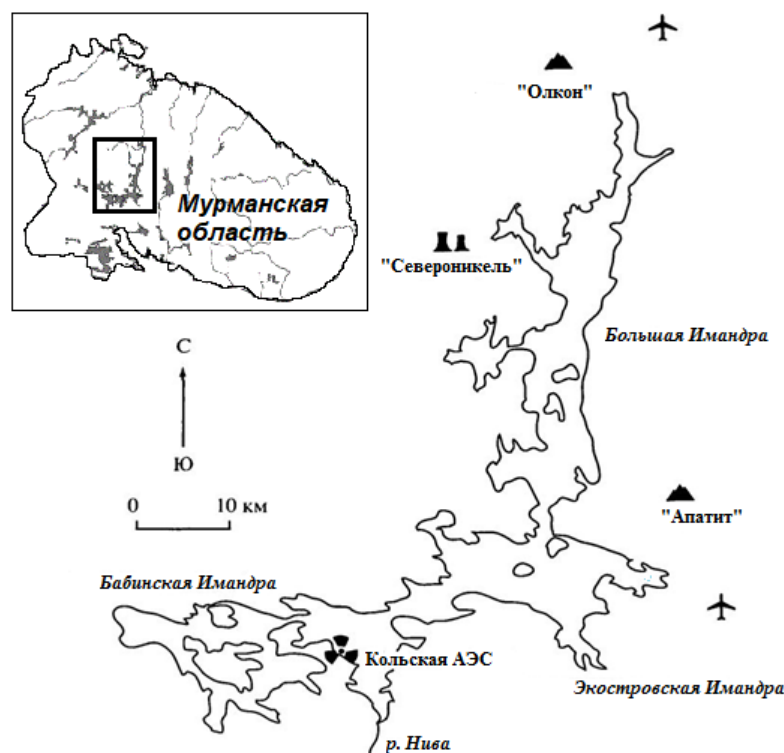


Рисунок 2.3.1 - Схема расположения основных производственных предприятий в пределах водосбора озера Имандра (Антропогенные модификации..., 2002)

Промышленное освоение апатит-нефелиновых месторождений на берегах озера Имандра (города Апатиты и Кировск) с огромными запасами фосфатов было начато в 30-е годы нашего столетия: в 1929 г. был введен в эксплуатацию Апатитовый рудник, а в 1931 г. - первая обогатительная фабрика (АНОФ-1), стоки от которой поступали в хвостохранилище в верховьях реки Жемчужной. В 1963 г. была пущена в эксплуатацию вторая обогатительная фабрика (АНОФ-II) и сооружен отстойник-накопитель в губе Белой озера Имандра (Антропогенные модификации..., 2002).

В 1938 г. был построен комбинат «Североникель», включающий плавильный комплекс по получению меди, никеля, кобальта, а также золота, серебра, платины и селена. До 1960 г. использовалась местная руда (рудник «Ниттис-Кумужье» на водосборе озера Имандра) с

высоким содержанием металлов и низким содержанием серы. До 1950 г. производство никеля и меди не превышало 10 000 и 6300 т соответственно. В 1960 г. после расширения и реконструкции комбината его продукция увеличилась в 2,7 раза.

С 1940 г. комбинат сбрасывает сточные воды в северо-западную часть озера Имандра - губу Монче. Объем сточных вод в 1970 г. составлял 25 млн м³/год. С 1973 г. в производстве в основном стала использоваться руда из Норильска (400 тыс. т/год), содержание сульфатов в которой в три раза выше, чем в местном сырье (Антропогенные модификации..., 2002).

Одновременно возросло загрязнение водосборной площади озера за счет атмосферного переноса. Приоритетными загрязнителями воздуха Кольского полуострова, включая водосбор озера Имандра, среди жидких и газообразных веществ являются сернистый газ (91,2 %) и монооксид углерода (2,8 %), среди твердых - апатитонефелиновая пыль (62 %) и неорганическая пыль (37 %), в том числе тяжелые металлы. Современный региональный уровень выпадения антропогенной серы на водосбор озера Имандра оценивается в 1-3 г/м² год. Комбинат «Североникель» выбрасывает в атмосферу около 40 % от общего количества отходящего газа (Антропогенные модификации..., 2002). Динамика выбросов SO₂ в окружающую среду на площадке Мончегорск представлена на рисунке 2.3.2.

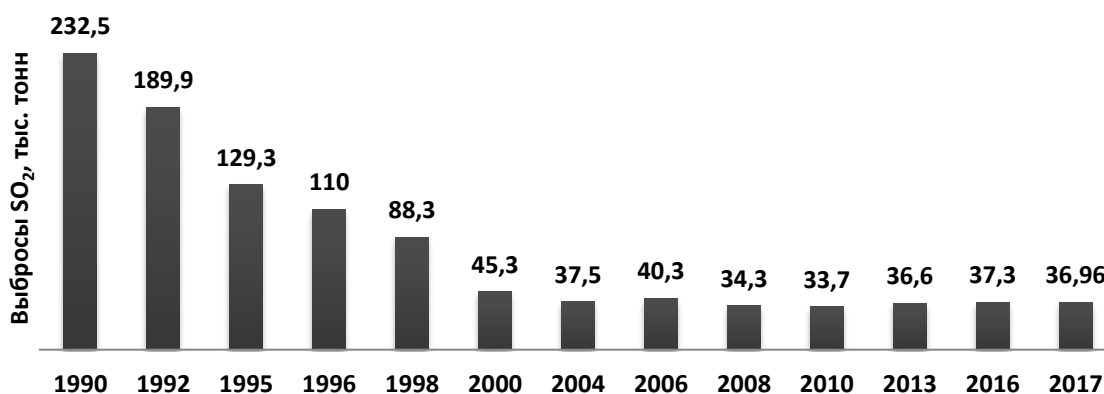


Рисунок 2.3.2 – Динамика выбросов SO₂ в окружающую среду на площадке Мончегорск (Мониторинг окружающей..., 2021)

Выбросы сернистого газа привели к закислению водосбора, особенно малых озер, в районе Чуна, Волчьих и Сальных тундр, сложенных гранитогнейсовыми формациями.

Наибольшую опасность в выбросах представляют тяжелые металлы. Вблизи комбината «Североникель» на открытую местность (в том числе и на территорию Лапландского заповедника) выпадает значительное количество никеля и меди (Антропогенные модификации..., 2002). Динамика выбросов Ni и Cu в окружающую среду на площадке Мончегорск представлена на рисунке 2.3.3.

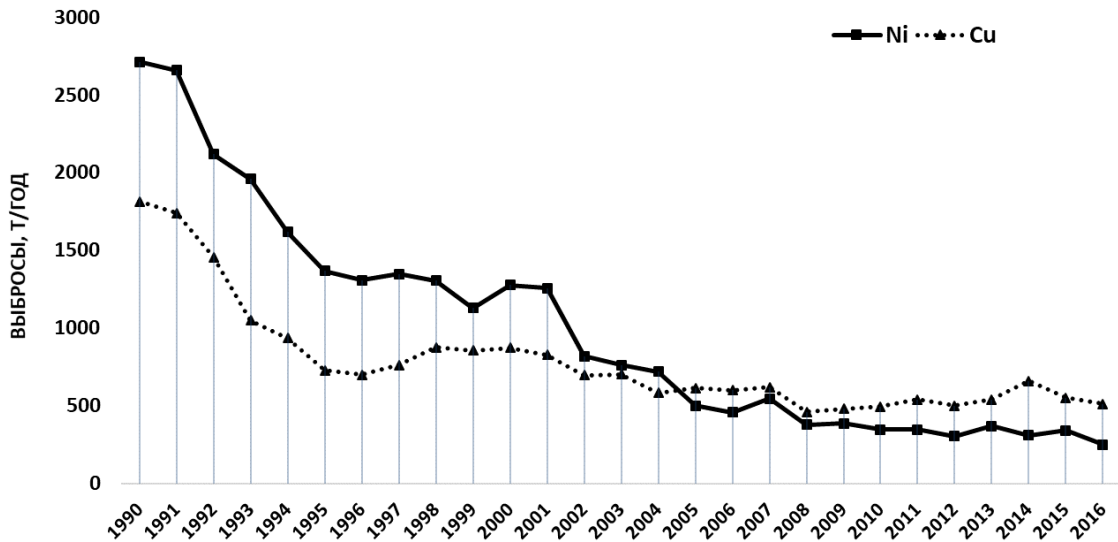


Рисунок 2.3.3 – Динамика выбросов Ni и Cu в окружающую среду на площадке Мончегорск (Мониторинг окружающей...,2021)

Результатом длительного аэротехногенного загрязнения на значительных территориях является существенная деградация ландшафтов вплоть до уничтожения растительности и естественного почвенного покрова с образованием техногенных пустошей (Экология России, 2000) – рисунки 2.3.4 и 2.3.5.

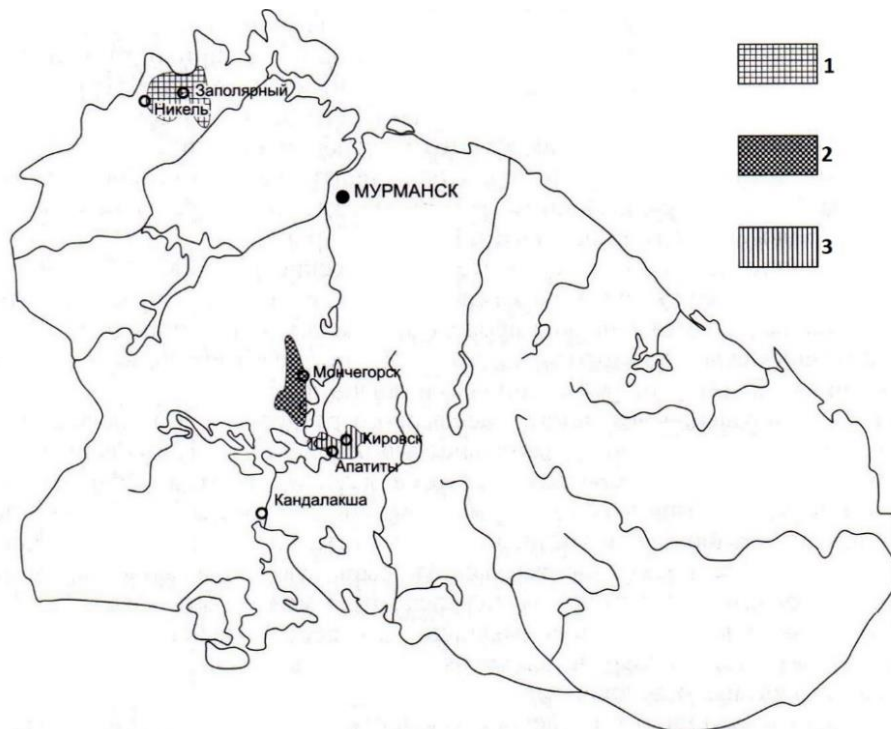


Рисунок 2.3.4 – Экологическое состояние геологической среды в результате воздействия горнодобывающих, топливно-энергетических и других комплексов на территории Кольского полуострова (Экологический атлас...,1999): 1 – интенсивное загрязнение почв; 2 – интенсивное загрязнение почв и механическое нарушение геологической среды; 3 – наиболее интенсивное механическое нарушение геологической среды



А



Б

Рисунок 2.3.5 – Техногенная пустошь в зоне воздействия выбросов медно-никелевого комбината (площадка Мончегорск)

Сейчас комбинат «Североникель» совместно с комбинатом «Печенганикель» (г. Никель-п. Заполярный) составляют АО «Кольская горно-металлургическая компания (КГМК), которое в свою очередь является дочерним предприятием ПАО ГМК «Норильский никель».

Технологическая цепочка Кольской ГМК начинается в г. Заполярный, где расположены рудник «Северный», обогатительная фабрика и участок обжига плавильного цеха. В 30-ти километрах, в п. Никель (недалеко от российско-норвежской границы) находится ещё один рудник, «Каула-Котсельваара», и плавильный цех. В городе Мончегорск размещаются рафинировочные мощности - рафинировочный и металлургический цеха, а также цех электролиза никеля.

Нормативные размеры санитарно-защитной зоны (СЗЗ) устанавливаются СанПиН 2.2.1/2.1.1.120-03 в соответствии с санитарной классификацией предприятий, производств и объектов. Кольская горно-металлургическая компания (комбинат «Североникель») относится к I классу санитарной вредности, для которого СЗЗ определяется размером 1000 м.

Однако, в соответствии с разработанным в 2002 году институтом «Гипроникель» проектом расчетная СЗЗ комбината с учетом снижения выбросов составляет 2400 м и вплотную примыкает к селитебной территории города, согласовано Центром государственного санитарно-эпидемиологического надзора.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Методы полевых исследований

В окрестностях озера Имандра летом 2014, 2016 и 2020 годов опробовано 30 водных объектов (51 проба), среди которых озера, реки, ручьи и выходы подземных вод – родники. В 2016 и 2020 годах проведено опробование почв по горизонтам (17 пунктов – 41 проба) преимущественно в тех же точках, где отбирались пробы поверхностных и подземных вод. Схема размещения пунктов опробования водных объектов и почв представлена на рисунке 3.1.1.

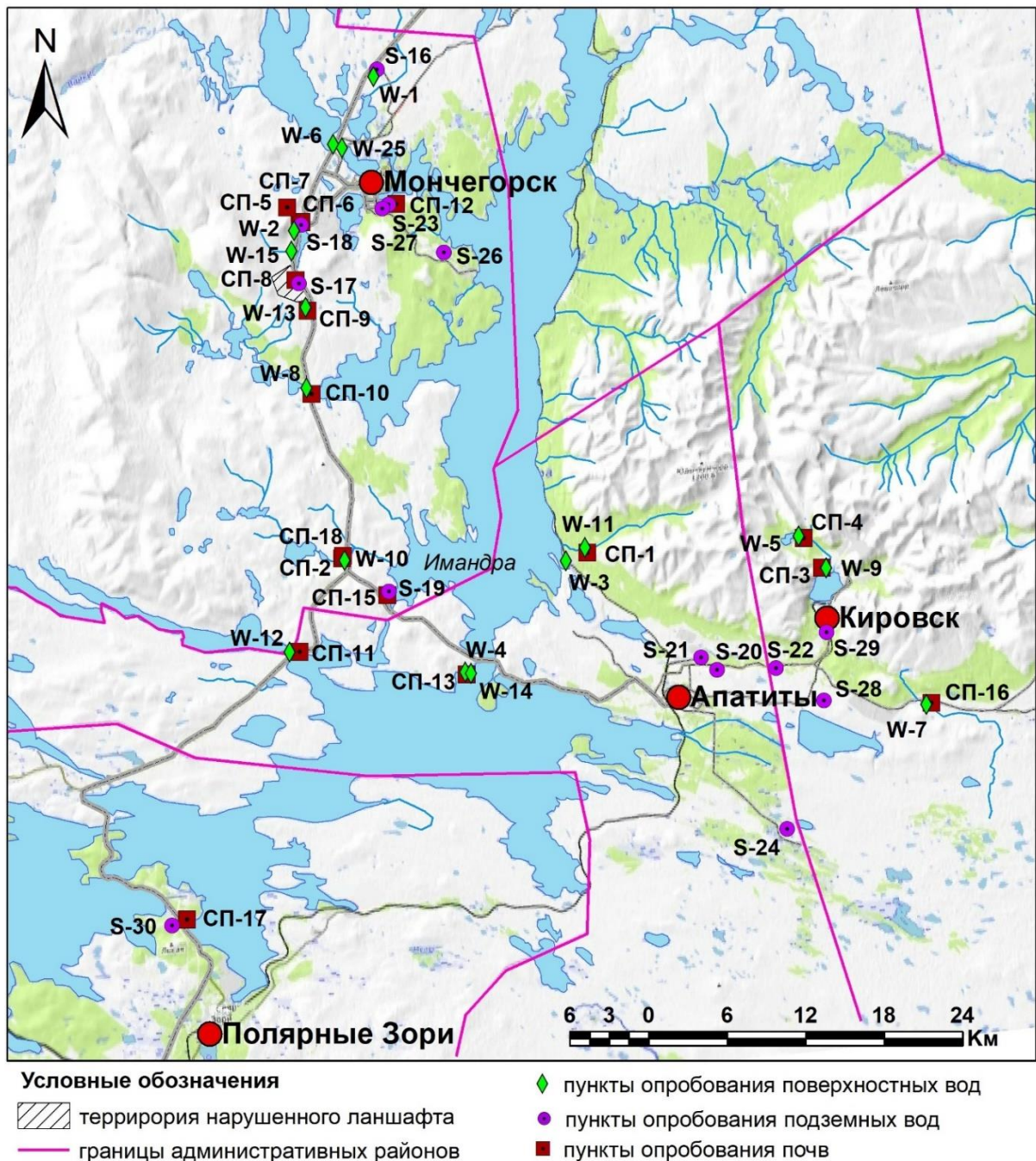


Рисунок 3.1.1 – Карта-схема пунктов гидрогеохимического и почвенного опробования

В соответствии с природными и техногенными условиями в пределах территории исследования выделены следующие зоны: 1) район Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра), 2) территория холмисто-увалистой равнины (западная часть водосбора озера Имандра), на которой в свою очередь выделены зоны воздействия выбросов комбината «Североникель» (на расстоянии 2-35 км от комбината) и условно-фоновая (на расстоянии 35-60 км от комбината). Условно-фоновая зона выделена в соответствии с результатами исследований региона (Опекунова и др., 2006 а), согласно которым на расстоянии 35-60 км от комбината наблюдается значительное уменьшение концентрации основных элементов-загрязнителей (никеля и меди) в природных средах, что подтверждено и результатами в текущем исследовании.

Опробование водных объектов. Вода отбиралась в полиэтиленовые бутылки объемом 0,5 л для определения ионного состава вод и два флакона по 50 мл – для исследования микрокомпонентного состава. Одна из проб отбиралась без пробоподготовки, вторая – фильтровалась в полевых условиях через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм с использованием шприца. Для определения растворенного органического углерода отбиралась проба 50 мл и консервировалась путем добавления ортофосфорной кислоты.

Емкости для исследования ионного состава предварительно многократно ополаскивались отбираемой водой, заполнялись до краев и закрывались без пузырьков воздуха полиэтиленовыми крышками. При отборе пробы фиксировалась дата, время, место отбора пробы.

Характеристика пунктов опробования водных объектов в зоне влияния выбросов медно-никелевого комбината.

Мочажина у родника «Болотный» (W-1) расположена между 1271 и 1272 км автотрассы «Кола», в 10,5 км на северо-восток от г. Мончегорска, в 50 м от автотрассы на заболоченной приозерной равнине, в 100 м от родника «Болотный». Плоская кочковатая болотистая низина.

Озеро у родника «Дорожный» (W-2) размером 30 x 50 м, глубиной более 1 м, в 30 м выше родника «Дорожный». Проба отобрана у восточного берега. Вокруг этого водоема полосой 0,5-0,7 м растут единичные представители кустарниковых форм ив, берез. В целом, ближайшая к озеру территория, является техногенной пустошью. Озеро является, своего рода, коллектором талых и собственно атмосферных вод. На дне озера образовались отложения из разрушенных и смытых с ближайшей территории органогенных горизонтов лесных почв.

Озеро Монче (W-6), точка отбора находится примерно в 50 м от трассы на берегу озера имеются гаражи для лодок и катеров.

W-13 ручей «7 километр» находится примерно в 7 км на юго-запад от промышленной площадки г. Мончегорска. Ручей представляет собой небольшой водоток, шириной 30-40 см,

окруженный техногенным редколесьем и болотом. Растительность: хвощ, береза (1-2 м), ива, ерник, багульник болотистый, пушица.

W-15 (ручей юго-восточного склона г. Ниттис) - горная речка, стекающая с юго-восточного склона горы Ниттис, впадающая в озеро Сопчъявр. Место отбора – у моста, за которым находится устье. Ширина около 6 м, глубина 0,3-0,5 м. Растительность на левом берегу – ивы и березы (1-7 м), разнотравье, с правого берега – техногенная пустошь.

Река Монча W-25, проба отобрана на левом берегу, в 100 м ниже по течению от автомобильного моста. Русло реки сложено крупными валунным и галечниковым материалом, берега сложены песчаным, песчано-галечниковым материалом с низкорослой кустарничковой растительностью.

Родник S-16 «Болотный» расположен между 1271 и 1272 км автотрассы «Кола», в 10,5 км на северо-восток от г. Мончегорска, в 50 м от автотрассы на заболоченной приозерной равнине озера Кутръявр. Имеется дорожный знак «Родник». Плоская кочковатая болотистая низина песчано-галечными отложениями, покрывающими коренное ложе. Участок чуть зарос ивняком с подстилкой болотного разнотравья. Родник восходящий (мощные песчаные грифоны среди болота) в зоне разгрузки трещинно-жильных вод архея по вертикальным зонам разлома. Дальнейший сток по заболоченной низине в озеро Кутръявр. Питание – за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных глубинных зон. Выход каптирован металлической трубой диаметром 1,2 м, задавленной в песчано-галечные отложения на 0,3 м для исключения подтока поверхностных вод. Труба высотой 0,8 м оборудована отводом диаметром 70 мм для перетока воды. Каптажное сооружение выполнено летом 2001 г. До этого дебит родника не определялся, а пробы воды характеризовали смешение родниковых вод с болотными. От автотрассы до родника по болотине проложены крепкие деревянные мостки, а над каптажным сооружением построена деревянная площадка. Посещаемость высокая. Внешнее загрязнение возможно, в связи с открытым выходом (Ананьев, 2010).

Родник S-17 «Горный» («Габбрский») расположен на юго-восточном склоне горы Монче-Тундра в районе 1253 км автотрассы «Кола» С.-Петербург—Мурманск, в 120 м юго-западнее автотрассы, в средней части склона горы у выезда на территорию бывшего карьера «Габбро». Из растительности — угнетенная ива и лиственные кустарники. Растительная подстилка практически отсутствует. Родник восходящий – разгрузка трещинно-жильных вод габброноритов Мончегорского плутона по вертикальным зонам разломов в четвертичные отложения склона. Под песчано-гравийным валом – небольшой приямок радиусом 1,5 м, где отмечен выход 4-х больших песчаных грифонов, прижатых к валунно-скальному основанию. Питание – за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных глубоких зон. Каптаж выполнен железобетонными конструкциями и лотками, надежно защищая

от загрязнения сам выход родника. Далее — отвод по железобетонным лоткам к кирпичному зданию, где производится водоотбор. Сток далее по рельефу склона ручья. Посещаемость очень высокая, часты очереди. Постоянно действующий (Ананьев, 2010).

Родник S-18 «Дорожный» расположен на 1257 км автотрассы «Кола» в придорожном откосе, у подножия юго-восточного склона горы Ниттис, в 50 м от северного берега озера Сопчъявр. Тип родника – нисходящий, рассеянный, представляет собой зону разгрузки присклоновых озерно-ледниковых отложений в дорожном откосе высотой около 2 м. Питание атмосферное с инфильтрацией через песчано-галечниковые отложения озерных вод. Верхний водоупор отсутствует. Склон пологий, заболоченный, в 30 м выше родника — озеро размером 30 x 50 м, глубиной более 1 м. Выход в дорожном откосе высотой около 2 м. Каптажное сооружение представляет собой подпорную бетонную водосборную стенку, облицованную гранитными плитами. Водосбор — в нержавеющей трубу диаметром 50 мм. Слив — в приямок, обрамленный каменными плитами, а далее — в придорожную канаву (Ананьев, 2010).

Родник S-23 «Спортивный» расположен на юго-восточной окраине г. Мончегорска у подножия северо-западного склона горы Поадзуайвенч, в 150 метрах к юго-востоку от здания спортивной детско-юношеской школы олимпийского резерва (СДЮШОР) спорткомитета г. Мончегорска, возле лыжной стартовой площадки на правом берегу безымянного ручья. Тип родника – нисходящий, представляет собой зону разгрузки трещиноватых дунитов раннего карелия (протерозоя) (K11) вдоль зоны тектонического разлома в делювиально-ледниковые отложения склона. Питание – за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных глубинных зон. Выход каптирован от непосредственного выхода родника (в 3-5 м) до водоприемника утепленной нержавеющей трубой диаметром до 50 мм. Водоприемник представляет собой деревянное стилизованное здание (теремок) с зоной отдыха. Сток родника канализован в ниже протекающий ручей. Родник постоянно действующий (Ананьев, 2010).

Родник S-26 «Крепость» расположен на 8 км автодороги Мончегорск–Риж-Губа, на борту кварцитового карьера. Самоизливающаяся скважина в период разведки кварцитового месторождения «Риж-Губа», переоборудованная ОАО «Мончегорская теплосеть», для забора воды. Скважиной вскрыт напорный горизонт метабазальтов и парагнейсов раннего протерозоя ($K_1^2sd_2^{1-3}$). Скважина обустроена металлическим оголовком с отводом для набора воды (Ананьев, 2010).

Родник S-27 «Горнолыжный» расположен в нижней части северного склона горы Ньюдауйвенч на территории горнолыжной базы Мурманской областной СДЮШОР. Склон средней крутизны сложен делювиальными образованиями (edIII-N) (крупные глыбы) местных кристаллических пород (дуниты и нориты нижнего карелия (протерозоя) $nK_1^1 m$). Поверхность склона за счет обломков горных пород мелкокочковатая, замшелая, поросла разнотравьем и

угнетенными кустарником и ельником. Тип родника - нисходящий, представляет собой линейный выход трещинных вод протерозоя вдоль зоны тектонического разлома в делювиальные отложения, сформировавшие многочисленные высачивания по склону, собирающиеся в небольшой ручей. Питание за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных глубинных зон (Ананьев, 2010).

Характеристика пунктов опробования водных объектов в условно-фоновой зоне.

Озеро Девичья Ламбина (W-8) - проточное озеро р. Вите. Место отбора пробы - узкий песчаный берег (заросли трав у берега) рядом обрыв, растительность на обрыве: березы, ели. Берег мелкий, место отбора пробы около 40 см. На берегу много отдыхающих, мусор на берегу так и в реке. Течение слабое.

Река Курка (W-10), проба отобрана у левого берега, 40 м от дороги и моста. Течение спокойное. Растительность берегов: береза, ель, ольха, сосна, можжевельник, травостой, осоковые. На правом берегу мочажинно-кочкарное болото.

Река Чуна (W-12) вытекает из озера Чуозеро. Проба отобрана за автомобильным мостом, 200 м от впадения в озера Имандра.

Ручей КПП (W-14) протекает через елово-осиновый лес. Из растительности так же присутствуют вороника, брусника, черника. Территория бывшего КМП (комплексный мониторинговый полигон). Сейчас гостиничный комплекс «Тиетта».

Родник S-19 «Кислая губа» расположен на восточном берегу Кислой губы озера Имандра, под уступом второй озерной террасы, в сосново-елово-березовом лесу. Лес высокий, достигает 15 м в высоту. Так же произрастают обильно мох, крапива, различные травы.

Тип родника – нисходящий, представляет собой зону разгрузки озерно-ледниковых образований в зоне выклинивания суглинистых образований ледникового происхождения. Питание родника совместное – трещинными водами архея и атмосферными осадками (Ананьев, 2010).

Родник S-30 «Проезжий» расположен между 1179 и 1180 км автотрассы «Кола» Санкт-Петербург – Мурманск, слева, в 5 м от трассы, в кювете. Плоская заболоченная равнина, сложенная ледниковыми образованиями (gП10s), перекрывающими кварцевые гнейсо-диориты среднего – позднего лопия (архея) (pvL₂₋₃). Самоизливающаяся разведочная скважина, вскрывшая напорный горизонт трещинных вод архея. Питание - за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из глубинных трещинных зон. Оголовок скважины закрыт металлической крышкой с отводом, на который одет пластиковый шланг для забора воды. У скважины устроен деревянный настил с крышей. Слив в дренажную придорожную канаву (Ананьев, 2010).

Характеристика пунктов опробования озера Имандра и водных объектов района Хибинского массива.

На озере Имандра отобрано две пробы: W-3 (Озеро Большая Имандра), у железнодорожной станции «Хибины», недалеко от дамбы хвостохранилища предприятия «Апатит»; W-4 - Экостровская Имандра (КМП, «Тиетта»), у пристани гостиничного комплекса «Тиетта».

Озеро Малый Вудъявр (W-5) расположено между холмами Хибинских гор примерно в 1,5 км от г. Кировска. Озеро окружено криволесьем с примерной высотой деревьев 2-3 метра (заросли ивы, карликовые березки, березы). Озеро не глубокое, у берега мель, на середине озера глубина около 1,5 метров. В воде озера, как на берегу, так и в центре, содержит ил, однако в целом вода озера прозрачная.

Река Айкуайвенйок (W-7), пробы отобраны у берега, течение бурное. Выше по течению (50 м) дорога, водопропуск бетонный.

Река Вудъяврйок (W-9) шириной 5-6 м, течение бурное. Проба отобрана на территории Полярно-Альпийского ботанического сада-института (ПАБСИ).

Река Малая Белая (W-11). Примерная ширина реки 12 м. Питание реки снеговое (по окраске воды). Растительность левого берега: ель обыкновенная, береза пушистая, жимолость, ива, лесная герань, лютик едкий, подорожник, клевер, брусника, костяника. Растительность правого берега: голубика, побеги сосны, можжевельник, иван-чай, черника, лишайник, брусника, вороника, мниум. Лесная подстилка торфянистая. Берега сложены моренами: склон песчаный, русло сложено валунами, заболоченности нет.

Родник S-20 «Молодежный» расположен в районе бывшего пос. Молодежный. Родник нисходящий, точечный, является, скорее всего, зоной разгрузки водоносного горизонта флювиогляциальных отложений в зоне выклинивания водоупорных образований либо коренных пород. Питание за счет инфильтрации атмосферных осадков. Растительность: густой елово-лиственный (осины, березы) лес с густой мохово-брусничной подстилкой, хвощ, иван-чай, лесная герань и т.д. Каптаж родника примитивный - в валунники старого русла уложена металлическая труба, засыпана песчано-гравийным материалом, обложена камнями с приямком для забора воды, деревянными решетками. Далее сток по уклону рельефа мелким ручейком. Возможно внешнее загрязнение в связи с открытостью каптажа (Ананьев, 2010).

Родник S-21 «Поддорожный» расположен на правом берегу реки Большой Белой, в 200 м от моста через реку в сторону АНОФ-2, вблизи кислородного цеха, в придорожной низине. Участок спланирован дорогами и промышленными сооружениями, поэтому охарактеризовать генетически выход родника достаточно трудно. Тип родника – нисходящий, сам выход – из-под дорожного полотна в придорожной канаве, заросшей ивняком. Это, скорее всего, зона разгрузки

отложений склона предгорий Хибин. Питание за счет инфильтрации атмосферных осадков в делювиальные (edIII+H) и флювиогляциальные (fIIIos) образования, формирующие предгорные склоны горного массива Хибин. Каптаж выполнен металлической трубой из-под дороги, частично собирающей рассеянный сток родника. Далее по придорожной канаве воды родника собираются в ручей, впадающий в реку Большую Белую. Для забора воды сооружена металлическая лестница и площадка (Ананьев, 2010).

Родник S-22 «Прихибинский» расположен между 8 и 9 км автодороги Апатиты-Кировск в придорожной канаве возле здания ДПС, на левом берегу р. Большой Белой, в средней части пологого склона. Родник смешанного типа - восходящий по зонам разломов, обрамляющих предгорья Хибинского массива, разгружающийся в толщу флювиогляциальных верхнечетвертичных образований, стекающих далее по уклону в долину реки Большой Белой. Питание родника комплексное - за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока из трещинно-жильных зон разломов. Склон порос лиственным лесом, заболочен, кочковат. Автодорога является искусственным барьером для поверхностного стока с участка водораздела. Выход родника обустроен каменно-бетонной стеной с установкой 12 металлических отводов на высоте 0,6 м от дна. Мусор вблизи выхода родника отсутствует. Вода прозрачная без вкуса и запаха (Ананьев, 2010).

Родник S-24 «Эврика» расположен юго-восточнее г. Апатиты, в 1,5 км слева от дороги под крутым склоном ледниковых образований (оза), на территории СОТ «Эврика». Озово-грядовый вал высотой 10–12 м (fIIIos), сложенный разнотекстурными песками с гравием и галькой залегает на валунно-галечных образованиях ледникового возраста (gIIIos), переходящих в современный аллювий (aH) близрасположенного ручья. Четвертичные отложения залегают на амфиболитах витегубской свиты позднего архея (L_{3vt}). Тип родника – восходящий, представляет собой зону разгрузки трещинно-жильных вод позднего архея, вероятно по локальному тектоническому нарушению, перекрытому толщей аллювиальных осадков. Питание горизонта смешанное – за счет подтока глубинных вод и инфильтрации атмосферных осадков. Каптажное сооружение представляет собой притопленный деревянный сруб 1,2x1,2 м, высотой 0,2 м от земной поверхности, глубиной внутренней части до 0,5 м. Внизу сруба – отверстие для стока воды. Выпуск ручьем между камнями по склону и дороге. Сруб углублен в аллювиальные образования, ограничивает выход группы восходящих грифонов, гонящих белый тонкозернистый песок. Подходы к роднику по обводненному валуннику, поросшему замшелым еловым лесом (Ананьев, 2010).

Безымянный родник S-28 в поселке Титан представляет собой водосборный колодец, каптированный бетонной трубой, перекрытой сверху бетонной крышкой. Сбоку колодца – выход

металлической трубы, из которой самоизливается вода. Прилегающая территория залесена и заболочена.

Самоизливающаяся скважина в г. Кировске (S-29) расположена в 50 м от автодороги. Расход более 350-450 м³/сут, высота напора над уровнем земли >5 м. Скважина не перекрывается, излив воды происходит круглогодично.

Опробование почв. Всего на территории исследования было заложено 17 почвенных разрезов. Выемка почвенных образцов производилась, начиная со дна почвенной ямы, так как в дальнейшем нижние слои почвы засыпаются почвенной массой верхних горизонтов. Затем образцы высушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались через сито с размером пор 1 мм. Описание пунктов опробования почв представлено в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Описание пунктов опробования почв

Зона	Координаты	Шифр	Горизонт	Глубина, см	Описание	Привязка	Растительность
Зона воздействия	N67°41'01" E32°49'11"	СП-2	В	15	цвет бурый, глинистый, на дне закопушки вода	Левый берег реки Курка	береза, ель, ольха, сосна, можжевельник, травостой, осоковые
	N67°55'00" E32°47'34"	СП-5	В	8-23	почва эродирована до минеральных горизонтов, цвет ржаво-бурый, завалуненность	близ родника «Дорожный», между автомобильной трассой и карьером у подножья г. Ниттис, на вершине небольшого холма (2 км от комбината «Североникель»)	ель, береза, толокнянка
	N67°54'58,93" E32°47'34,95"	СП-6	Е	5-12	цвет светло-серый		ель, береза, толокнянка
			В	12-20	цвет ржаво-бурый, завалуненность		ель, береза, толокнянка
	N 67° 54' 59" E 32° 47' 35"	СП-7	С	30-50	цвет палево-бурый	ель, береза, толокнянка	
	N67°52'22,8" E32°47'11,59"	СП-8	Е	1-8	цвет серый, сверху углистое вещество, граница с горизонтом В размыта	У родника «Горный» («Габбрский») (4 - 4,5 км от комбината «Североникель»)	береза, ива, багульник,
			В	8-24	цвет бурый		
	N67°52'22,7" E32°47'13,05"	СП-9	В1	2-10	цвет бурый	техногенное редколесье, 7 км от комбината «Североникель»	пушицевое болото, береза, вороника, хвощ, злаковые, ива, отпад
			В2	10-16	цвет светло-бурый		
С			16-42	цвет палевый, завалуненность			

Зона	Координаты	Шифр	Горизонт	Глубина, см	Описание	Привязка	Растительность
Зона воздействия	N67°51'14,68" E32°47'54,42"	СП-10	О	0-4		22-23 км от комбината «Североникель»	ель, береза, черника, вороника
			Е	4-10	цвет светло-серый		
			В1	10-17	цвет ярко бурый (рыжий)		
			В2	17-24	цвет палево-бурый		
			С	24-48	цвет палевый, сильная завалуненность		
	N67°55'22,3" E32°57'29,3"	СП-12	О	0-13	много неразложившейся органики	У родника «Спортивный»	береза, ель, иван- чай, черника, папоротник
			Е	13-21	цвет серый		
			В1	21-37	цвет светло-бурый, завалуненность		
			В2+С	37-58	цвет темно-бурый, сильная завалуненность		
	N64°41'1,68" E32°49'15,54"	СП-18	Е	10-22	глыбовый грунт с песчаным заполнителем (размер глыб до 0,5 м). Заполнитель – серый песок, маловлажный, мелкозернистый, пронизан корнями деревьев	лес на левом берегу реки Куркенйок	лиственный лес (береза)
			В	22-27	глыбовый грунт с песчаным заполнителем (размер глыб до 0,5-0,8 м). Заполнитель- песок ржаво-бурый, маловлажный, мелкозернистый		

Зона	Координаты	Шифр	Горизонт	Глубина, см	Описание	Привязка	Растительность
Условно-фооновая зона	N67°44'48,67" E32°50'3,35"	СП-11	Е	2-8	цвет светло-серый	на срезанном склоне	осина, черника, кукушкин лен
			В1	6-22	цвет бурый		
			В2	22-32	цвет светло-бурый		
			С	32-50	цвет палевый, завалуненность		
	N67°36'0,37" E32°59'52,19"	СП-13	Е	9-15	цвет светло-серый	Территория КМП (гостиничный комплекс «Тьетта», 17 км от автодороги Апатиты - Мурманск	береза, ель, вороника, брусника, черника
			В1	15-27	цвет бурый		
			В2	27-39	цвет светло-бурый		
			С	39-59	цвет палевый, слитой (песок разнозернистый + галька)		
	N67°39'10,426" E32°53'34,174"	СП-15	О	2-10	неразложившийся опад и корни перемешанные с минеральным материалом, черно-бурый	у родника «Кислая губа», в лесу на берегу озера Имандра	елово- сосновый лес с брусничной растительной подстилкой
			А	10-29	песок ржаво-бурый, маловлажный, с включением гальки и гравия		
			Е	29-48	песок серый, пылеватый, маловлажный, с включением гальки и гравия		
			В	48-54	песок маловлажный, мелко- и среднезернистый, с редкими включениями гальки		
	N67°23'43,08" E32°28'54,84"	СП-17	Е	0-23	песок серый, маловлажный, мелкозернистый, пылеватый, с включением корней и гравийно-галечниковой смеси	у родника «Проезжий», на окраине соснового леса	брусника, береза
			В	23-52	песок ржаво-бурый, маловлажный, мелкозернистый, с включением гальки		

Зона	Координаты	Шифр	Горизонт	Глубина, см	Описание	Привязка	Растительность
Район Хибинского массива	N67°40'32" E33°13'35"	СП-1	В	15-20	цвет серо-охристый, песок разнозернистый, сильная завалуненность	Левый берег реки малая Белая	березово- еловый лес
	N67°38'39,6" E33°40'15,3"	СП-3	В	20	цвет темно-бурый, заторфованность, завалуненность, много неразложившегося органического вещества	Территория ПАБСИ	осина, береза, ель, рябина, герань лесная, злаковые, папоротник, подморенник, щитовник лесной
	N67°40'06,6" E33°38'18,0"	СП-4	В	30-35	цвет темно-бурый, сильная заторфованность, много неразложившегося органического вещества, завалуненность	У озера Малый Вудъявр (восточный берег)	березовое криволесье, ель
	N67°32'53,64" E33°48'53,22"	СП- 16	А	2-18	супесчаный материал, маловлажный, серовато-бурый с включением разнозернистого песка, изрезан корнями растительности	у реки Айкуайвенйок	береза
Е			18-39	песок пылеватый, ржаво-бурый, маловлажный, сильнопористый с включением гравия и редкими включениями гальки			
В			39-51	супесь плотная, серовато-бурая, полутвердая, пылеватая			

3.2. Методы лабораторных исследований

Химический анализ вод проводился в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (ПНИЛ ГГХ ТПУ). Для определения макрокомпонентного состава вод были использованы следующие методы анализов: пламенная фотометрия, жидкостная хроматография, фотоколориметрия, потенциометрия, титриметрия, турбидиметрия. Микрокомпонентный состав вод определялся масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе NexION 300 фирмы Perkin-Elmer (США).

Определение содержания органического углерода (C_{org}) выполнялось методом высокотемпературного каталитического окисления соединений углерода до диоксида углерода на анализаторе Liquid TOC компании Elementar с детектором инфракрасного излучения.

Для **определения форм миграции химических элементов** в воде в полевых условиях проводилась фильтрация воды через фильтр с размерами пор 0,45 мкм. Дополнительно к этому в лабораторных условиях была проведена процедура равновесного диализа. Для этого диализный мешок с размером пор 0,001 мкм, заполненный деионизованной водой, помещался в предварительно промытый сосуд для диализа. Сосуд заполнялся исследуемой водой и плотно закрывался крышкой. Далее проба выдерживалась в течение 24 часов, после чего проводилось определение химического состава внутренней (вода внутри диализного мешка) и внешней (вода вне диализного мешка) среды. Проведение таких полевых и лабораторных экспериментов позволило определить соотношение взвешенной ($>0,45$ мкм), коллоидной фракций (0,45–0,001 мкм), а также истинно растворенной формы ($<0,001$ мкм) химических элементов в природных водах (Nystand, Osterholm, 2013).

Валовое содержание химических элементов в почвах определялось методом ICP-MS после разложения навески HNO_3 в микроволновой печи.

Определение **органического вещества почвы** проводилось согласно ГОСТ 26213-91, **pH водной вытяжки из почвы** согласно ГОСТ 26423-85.

Определение форм нахождения химических элементов в почвах проводилось методом последовательных селективных вытяжек по (McLaren & Crawford, 1973) с изменениями (Ладонин, 2006). Навески массой 4 г помещаются в центрифужные пробирки вместимостью 50 мл и приливаются 40 мл экстрагирующего раствора – таблица 3.2.1 – (соотношение почва: экстрагирующий раствор 1:10). Пробирки взбалтываются 1 час. Затем проводится центрифугирование в течение 10 мин при скорости вращения ротора 7500 об/мин. Надосадочная жидкость сливается и отправляется на аналитические исследования (ICP-MS). Остаток почвы после предыдущих обработок заливается следующим экстрагирующим раствором.

Таблица 3.2.1 - Экстрагирующие растворы, используемые при последовательном фракционировании

№ п/п	Выделяемая фракция (группа)	Экстрагирующий раствор
I	Водорастворимая	деионизованная H ₂ O
II	Обменная	0,05 М Ca(NO ₃) ₂
III	Специфически сорбированная	2,5% CH ₃ COOH
IV	Связанная с органическим веществом	K ₄ P ₂ O ₇ , pH 11
V	Связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn	Реактив Тамма при облучении ультрафиолетом, pH 3,3
VI	Остаточная	Кислотное разложение остатка HNO ₃ в микроволновой печи

Минеральный состав образцов почв изучался методами порошковой рентгеновской дифрактометрии и электронной микроскопии в МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ.

Определение токсичности методом биотестирования проводилось с применением двух тест-объектов:

1. Экспресс-метод (для вод ФР 1.39.2015.19242, для почв ФР 1.39.2015.19243) с применением прибора «БИОТЕСТЕР» с использованием тест-объекта *Paramecium Caudatum* – инфузория-туфелька. Этот метод основан на способности тест-объекта реагировать на присутствие в водной среде веществ, представляющих опасность для их жизнедеятельности, и направлено перемещаться в направлении изменения концентраций этих веществ (хемотаксическая реакция), избегая их вредного воздействия.

В кювете создается градиент концентраций химических веществ: на взвесь инфузорий в загустителе наслаивается испытуемая жидкость, после чего в течение 30 минут происходит перераспределение инфузорий по зонам. В случае если исследуемая проба не содержит токсических веществ, в кювете будет наблюдаться концентрирование клеток инфузорий в верхней зоне. При этом, чем выше токсичность пробы, тем меньшая доля инфузорий перемещается в верхнюю зону (исследуемую пробу).

Критерием токсического действия является значимое различие в числе клеток инфузорий, наблюдаемых в верхней зоне кюветы в контрольной пробе по сравнению с этим показателем, наблюдаемым в исследуемой пробе.

Количественная оценка, характеризующая токсическое действие, производится путем расчета соотношения числа клеток инфузорий, наблюдаемых в контрольной и исследуемой пробах, и выражается в виде индекса токсичности (Т, %):

$$T = \frac{I_{\text{ср.к.}} - I_{\text{ср.а.}}}{I_{\text{ср.к.}}} * 100, \quad (3.2.1)$$

где $I_{\text{ср.к.}}$, $I_{\text{ср.а.}}$ – средние показания прибора для контрольных и анализируемых проб соответственно (%).

По величине индекса анализируемые пробы классифицируются по степени их токсичности на 3 группы: допустимая степень токсичности ($0 < T < 40$); умеренная степень токсичности ($41 < T < 70$); высокая степень токсичности ($T > 71$ %).

2. Методика определения токсичности проб вод и водных вытяжек по изменению оптической плотности тест-культуры зеленой протоккокковой водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) в лабораторных условиях. Оптическая плотность тест-культуры водоросли после 22 часов роста измеряется с помощью фотоэлектроколориметра (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04).

Методика основана на регистрации различий в величине оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль) и в тестируемых пробах вод и водных вытяжек (опыт), в которых эти вещества могут присутствовать.

Критерием токсичности воды является снижение на 20 % и более (подавление роста) или увеличение на 30 % и более (стимуляция роста) величины оптической плотности культуры водоросли, выращиваемой в течение 22 часов на тестируемой воде по сравнению с ее ростом на контрольной среде, приготовленной на дистиллированной воде.

Пробы вод и водных вытяжек из грунтов, почв и осадков сточных вод анализируются в 100, 33, 11, 3,7 и 1,2 %-ной концентрациях (ряд разбавлений, кратных трем – 9, 27, 81, 243, 729 раз).

Относительную (в %) разницу средней величины оптической плотности для каждого разведения по сравнению с контролем (I) рассчитывают как:

$$I = \frac{(\bar{D}_k - \bar{D}_o)}{\bar{D}_k} * 100, \quad (3.2.2)$$

где \bar{D}_k и \bar{D}_o - средние значения оптической плотности в контроле и в опыте, соответственно.

В случае превышения критерия токсичности в виде 20 % подавления роста, рассчитывается величина токсичной кратности разбавления (ТКР) вод и водных вытяжек по формуле 3.2.3. Если превышен критерий токсичности в виде 30 % стимулирования роста, то расчет ТКР проводится по формуле 3.2.4. При этом значение индекса I для варианта с подавлением роста приводится со знаком (+), а при стимуляции - со знаком (-).

$$\text{ТКР} = 10 \frac{(I_6 P_6 - I_n P_n) \times (I_n - 0,2) + I_6 P_n}{I_n - I_6}, \quad (3.2.3)$$

$$\text{ТКР} = 10^{\frac{(\lg P_6 - \lg P_M) \times (I_M - 0,3)}{I_M - I_6} + \lg P_M}, \quad (3.2.4)$$

где P_6 - величина разбавления (наибольшая), при которой индекс отклонения был ниже критерия токсичности; P_M - величина разбавления (меньшая), при которой индекс отклонения был выше критерия токсичности; I_6 и I_M - величины соответствующих этим разбавлениям индексов I , выраженные в долях.

В качестве P_6 и P_M используется та пара наибольших разбавлений, между которыми имеет место переход индекса I (формула 3.2.2) величины установленного критерия токсичности.

Качество тестируемой воды устанавливается на основе ее токсикологических характеристик через величину токсичной кратности разбавления вод и водных вытяжек. Для этого из результатов биотестирования разведений пробы воды, кратных трем, выбирают то разбавление, для которого рассчитанный индекс отклонения (I) превысил критерий токсичности воды.

Таблица 3.2.2 – Токсикологические характеристики качества испытуемой воды

Величина разбавления тестируемой воды, при которой превышен критерий токсичности	Качество воды
1 (неразбавленная)	слаботоксичная
3	среднетоксичная
9	токсичная
27	сильнотоксичная
81	гипертоксичная

Если в ряду разбавлений имеются отклонения в оптической плотности как в ту, так и другую сторону, качество воды устанавливается по наибольшей величине разбавления, для которой превышен критерий токсичности. Если критерий токсичности не превышен ни при одном разведении воды, включая ее исходный неразбавленный вариант, проба считается нетоксичной.

3.3. Камеральная обработка результатов

Название химического типа вод давалось в соответствии с «правилом оттенков», согласно которому название химического типа воды складывается отдельно из ведущих анионов и катионов, содержания которых превышают 25 мг-экв%. При этом на первое место в названии ставятся анионы от 25 %-экв в возрастающем порядке, затем катионы в таком же порядке.

Методика расчета форм миграций химических элементов в природных водах. Для расчета неорганических форм миграции химических элементов был использован программный продукт PHREEQC. Для расчета в модель закладывались содержания основных ионов и концентрации никеля и меди, а также все ассоциаты указанных элементов.

Методика расчета равновесий подземных вод с минералами горных пород. В основу изучения геохимических процессов в системе вода-порода положены методы равновесной термодинамики и анализ элементарных реакций, начальными продуктами которых являются основные породообразующие минералы и вода, конечными – вторичные минералы, а также ионы и нейтральные молекулы, которые перешли в жидкую фазу. Расчеты проводились согласно методикам, изложенным в опубликованных работах (Гаррелс, 1968, Зверев, 1982). Оценка степени насыщенности вод вторичными минералами проводилась двумя способами: расчетом индекса насыщения и с помощью построения диаграмм полей устойчивости минералов. Индекс насыщения (SI), рассчитывался с помощью программного продукта PHREEQC. Значения индекса насыщения изменяются от отрицательных значений при ненасыщенности вод вторичными минералами до положительных при пересыщенности вод.

Для определения стадии взаимодействия подземных вод была проведена оценка степени их насыщенности вторичными минеральными продуктами: оксидами, гидроксидами, каолинитом, монтмориллонитом, гидрослюдой, кальцитом, гипсом и на основе положений теории о геологической эволюции системы вода-порода С.Л. Шварцева сделан вывод об этапах взаимодействия рассматриваемых вод с горными породами.

Коэффициенты концентрации химических элементов в воде и почвах рассчитывались относительно среднего содержания элементов в выборке. Значение коэффициента >1 свидетельствует о накоплении химического элемента в данном водном объекте или горизонте почв.

Методика оценки токсичности элементов с использованием модели USEtox.

Расчет показателя токсического воздействия химических элементов, содержащихся в воде и почвах, на здоровье человека осуществлялся с использованием возможностей модели Usetox (Fantke et al., 2017).

Согласно экологической модели USEtox, расчет показателя токсического воздействия химических элементов, на здоровье человека рассчитывается согласно формуле:

$$IS = \sum CF_{x,i} \times M_{x,i}, \quad (3.3.1)$$

где IS – общий показатель токсического воздействия химического элемента на здоровье человека (измеряется в CTU_{hum} – относительная единица токсичности для здоровья человека); $CF_{x,i}$ – характеристический коэффициент токсичности химического элемента x в компоненте природной среды i (Дали/кг); $M_{x,i}$ – масса химического элемента x в компоненте природной среды i (в кг).

Характеристические факторы для оценки потенциального ущерба здоровью человека (Дали/кг выбросов) Ni (II) и Cu (II) для геозоны «Центральная Азия» взяты из модели USEtox - таблица 3.3.1 (Fantke et al., 2017).

Таблица 3.3.1 – Характеристический коэффициент токсичности (CF), Дали/кг выбросов

CF	Элемент	
	Ni (II)	Cu (II)
Fr.waterC	6.2E+05	1.4E+07
Nat.soilC	9.0E-07	1.2E-07

Согласно формуле, разработанной Перминовой Т. (Brates et al., 2019) - формула 3.3., масса химического элемента x рассчитывается исходя из его концентрации в компоненте природной среды i ($C_{x,i}$) на каждом исследуемом участке территории:

$$M_{x,i} = \frac{C_{x,i} \times V_i \times \rho_i}{10^6}, \quad (3.3.2)$$

где: $M_{x,i}$ – масса химического элемента x в компоненте природной среды i (кг), $C_{x,i}$ – концентрация химического элемента x в компоненте природной среды i (мг/кг); V_i – объем природной среды i (м³); ρ_i – плотность природной среды i (кг/м³).

Данные по концентрациям химических элементов ($C_{x,i}$) в компонентах природной среды (воде и почвах) получены аналитически с помощью метода ICP-MS.

Плотность воды (ρ_w) 1000 кг/м³. Объемная плотность почвы (ρ_s) является табличным значением, взятым из документации USEtox и составляет 1500 кг/м³.

Объем среды i рассчитывается по следующей формуле:

$$V_i = h_i \times S_i \quad (3.3.3)$$

где: V_i - объем среды i (м³), h_i (м) – это высота среды i ; S_i – площадь среды i (м²).

Для водных объектов в качестве высоты среды использовалось значение их средней глубины (h_i), в качестве площади среды – площадь бассейна водного объекта (S_i).

В данной работе представлен подход к изменению расчета оценки воздействия на здоровье человека химических элементов в почвах. В модели USEtox при расчете CF учитывается только верхний слой почвы (0,1 м). В модифицированном расчете общего объема почвы в качестве высоты среды (почвы) применяется мощность генетического почвенного горизонта.

Для расчета массы химического элемента в почвах в качестве площади среды использовались площади административно-территориальных единиц Мурманской области (таблица 3.3.2).

Таблица 3.3.2 – Площади административно-территориальных единиц Мурманской области, используемы для расчета площади среды (почв)

№ п/п	Район	Площадь (S), км ²	Пункты опробования почв
1	Апатитский	2500	СП-1, 13
2	Мончегорский	3400	СП-2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 18
3	Кировский	3600	СП-4, 3
4	Полярнозоринский	1000	СП-17

ГЛАВА 4. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ВОД

4.1 Химический состав природных вод

Особенностью вод рассматриваемого района является весьма низкая минерализация, при этом ее величина варьирует в весьма широких пределах от 20 до 216 мг/дм³, что с учетом приуроченности выходов подземных вод к разным геоморфологическим формам предопределяет необходимость их анализа отдельно. Подземные воды предгорья Хибин (восточная часть водосбора озера Имандра) в среднем характеризуются более высокой минерализацией 74–201 мг/дм³ относительно все рассматриваемых вод и являются нейтральными гидрокарбонатными кальциевыми (рисунок 4.1.1).

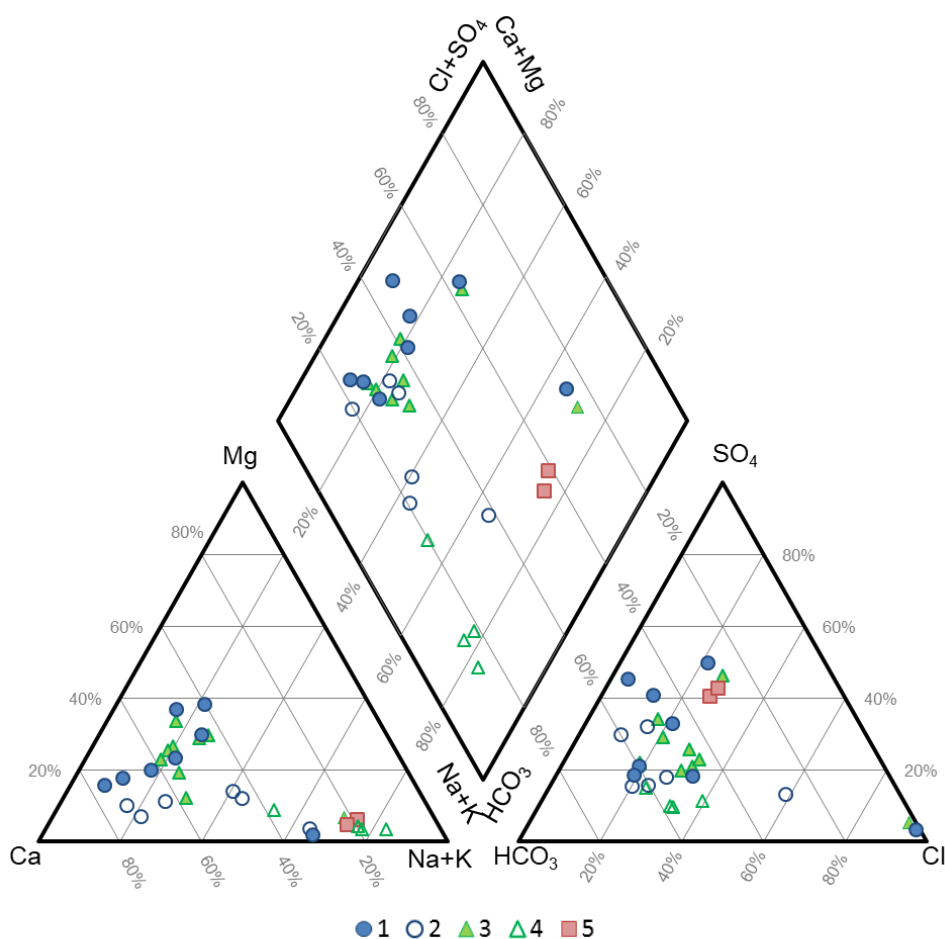


Рисунок 4.1.1 - Диаграмма Пайпера с нанесением данных по химическому составу природных вод водосбора озера Имандра: 1 - подземные воды, приуроченные к холмисто-увалистой равнине; 2- подземные воды предгорья Хибинского массива; 3 - поверхностные воды, приуроченные к холмисто-увалистой равнине; 4 – поверхностные воды Хибин; 5 – озеро Имандра

Максимальная величина минерализации среди вод рассматриваемой части территории, составляющая 201 мг/дм³, отмечается в роднике «Поддорожный» (S-21), который находится на территории промышленной площадки второй апатит-нефелиновой обогатительной фабрики (АНОФ-2), воды родника являются слабощелочными сульфатно-гидрокарбонатными натриевыми. Здесь же обнаружен нитрат-ион в количестве 33 мг/дм³, а фтор содержится в максимальных концентрациях среди всех рассматриваемых подземных вод 0,55 мг/дм³. Остальные родники не проявляют признаки значительного загрязнения, отмечаются лишь повышенные концентрации калия (5,1 мг/дм³) и нитрат-иона (2 мг/дм³) в роднике «Прихибинский» (S-22), а также хлорид-иона (10,3 мг/дм³) в роднике «Молодежный» (S-20). Концентрация кремния в подземных водах изменяется в пределах 4,0-6,2 мг/дм³ и в среднем составляет 5,2 мг/дм³.

Минерализация подземных вод, приуроченных к холмисто-увалистой равнине (западная часть водосбора озера Имандра) изменяется от 30 до 216 мг/дм³. Величина рН изменяется от 5,82 до 7,07. Концентрация кремния в водах варьируется от 3,36 до 9,58 мг/дм³ и в среднем составляет 6,11 мг/дм³.

При этом в родниках «Кислая губа» (S-19) и «Спортивный» (S-23) разгружаются нейтральные преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые подземные воды с минерализацией 67-82 мг/дм³ и содержанием сульфат-иона 7,6-11,1 мг/дм³. Содержание кремния в водах родников «Спортивный» (S-23) и «Болотный» (S-16) равнинной части исследуемого водосбора значительно превышает концентрацию основных катионов и составляет 8,4-9,6 мг/дм³ (таблица 4.1.1).

В родниках, расположенных в зоне воздействия выбросов комбината «Североникель», происходит некоторая трансформация анионного состава, и воды становятся гидрокарбонатно-сульфатными – родник «Дорожный» (S-18) и сульфатно-гидрокарбонатными – родники «Болотный» (S-16), «Горный» (S-17), при содержаниях сульфат-иона 8–13 мг/дм³.

Воды родника «Проезжий» (S-30) отличаются гидрокарбонатно-хлоридным и кальциево-натриевым составом и самой высокой среди рассматриваемых вод минерализацией – 216 мг/дм³.

В нейтральных гидрокарбонатных поверхностных водах района Хибин (озеро Малый Вудъяр W-5; р. Айкуайвенйок W-7; р. Вудъяврйок W-9; р. Малая Белая W-11) прослеживается преобладание натрия и калия над кальцием и особенно магнием при минерализации в среднем 26 мг/дм³ и содержании кремния 2,6 мг/дм³, что обусловлено влиянием распространенных здесь щелочных пород богатых калием и натрием (Evtugina et al. 2016; Дудкин, Сандимиров, 2007).

Таблица 4.1.1 - Химический состав природных вод водосбора озера Имандра

№	pH	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Мин.	NO ₃ ⁻	F ⁻	Si	C _{орг}	Fe	Mn	Al	Ni	Cu
Подземные воды района Хибинского массива																			
S-20	7,56	3,4	62,5	9,8	10,3	22,5	1,3	7,0	1,2	115	0,07	<0,1	4,1	н.д.	19,7	0,1	10,4	<0,05	0,24
S-21	7,38	5,5	101,3	35,7	3,0	38,6	4,2	16,5	2,0	201	32,8	0,55	6,2	н.д.	37,6	2,8	6,8	<0,05	0,15
S-22	7,43	3,3	67,0	10,5	2,4	12,7	2,1	11,3	5,1	111	1,95	<0,1	6,2	н.д.	0,3	0,2	8,5	<0,05	<0,05
S-24	6,58	7,04	45,8	7,06	1,3	14	1,2	2,5	1,9	74	<0,1	н.д.	4,6	н.д.	10,3	н.д.	0,82	<0,05	<0,05
S-28	6,83	5,3	73,2	14	3,8	13	2,4	11	3,8	129	8,3	н.д.	6,1	н.д.	18,5	0,07	9,09	<0,05	0,14
S-29	7,58	5,3	73,2	30,1	4,0	14,0	1	27	9,4	172	13,6	н.д.	4,0	н.д.	12,0	0,03	17,5	<0,05	0,34
Подземные воды холмисто-увалистой равнины																			
S-16*	6,78	12,3	29,2	13,0	2,6	7,5	4,4	3,8	1,4	62	0,44	<0,1	8,4	1,89	6,8	0,05	9,9	0,44	0,24
S-17*	6,54	9,1	13,3	8,0	0,8	5,5	1,1	1,6	0,3	31	1,29	<0,1	3,7	1,82	5,8	0,1	7,8	3,44	0,19
S-18*	5,96	17,4	11,6	12,6	2,5	5,1	2,0	2,8	0,6	37	1,51	<0,1	4,5	2,02	6,5	0,8	11,0	6,41	1,00
S-19	6,72	9,2	37,8	7,6	2,8	10,7	2,8	3,7	2,0	67	1,09	<0,1	5,0	н.д.	0,2	0,1	7,9	0,61	0,71
S-23*	7,07	3,5	48,7	11,1	1,9	11,1	5,2	3,4	1,1	82	0,21	<0,1	9,6	1,67	4,7	0,1	11,5	0,58	0,28
S-26*	6,25	8,8	88,5	60	1,85	42	5,3	3,7	2,6	204	0,1	н.д.	6,5	н.д.	51,4	0,07	0,23	0,08	0,05
S-27*	6,02	5,3	18,3	3,5	0,6	5,5	0,9	0,97	0,12	30	0,12	н.д.	3,4	н.д.	3,1	0,26	28,2	4,59	1,7
S-30	5,82	7,5	51,2	5,6	85	21,5	0,9	49,4	2,4	216	0,24	н.д.	7,9	н.д.	94,3	102,9	39,8	16,4	14,2

Продолжение таблицы 4.1.1

№	pH	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Мин.	NO ₃ ⁻	F ⁻	Si	C _{орг}	Fe	Mn	Al	Ni	Cu
	мг/дм ³														мкг/дм ³				
Поверхностные воды района Хибинского массива																			
W-5	7,29	3,0	17,1	1,5	0,6	0,9	0,2	5,8	1,5	27	<0,1	0,19	2,6	1,85	13,7	0,7	80,1	0,08	0,27
W-7	7,14	4,4	17,1	2,5	0,6	2,7	0,4	3,8	0,9	28	0,17	0,15	2,2	н.д.	4,7	0,3	25,2	0,06	0,15
W-9	7,29	3,0	16,4	1,5	0,5	1,4	0,2	5,6	1,4	27	0,1	0,17	2,9	2,09	3,7	0,7	42,1	0,10	0,15
W-11	6,91	3,5	13,9	1,5	0,7	1,2	0,1	4,9	1,1	23	<0,1	0,20	2,9	2,17	1,7	0,2	24,9	0,06	0,04
Поверхностные воды холмисто-увалистой равнины																			
W-1*	6,9	7,9	33,0	5,5	53,5	9,6	1,8	35,0	1,5	140	<0,1	<0,1	7,0	11,4	460,2	6,1	100,2	32,16	17,89
W-2*	5,99	15,7	9,6	9,5	2,6	3,9	1,6	2,5	0,4	30	<0,1	<0,1	1,8	3,82	127,0	3,6	21,3	56,93	15,67
W-6*	6,74	3,3	13,4	3,2	1,1	3,4	1,3	1,8	0,5	25	0,07	<0,1	3,1	н.д.	1,1	3,1	68,0	26,86	15,19
W-8	6,62	4,4	11,0	2,4	0,8	2,6	0,8	1,0	0,2	19	<0,02	<0,1	2,2	н.д.	1,5	5,6	134,0	5,97	5,04
W-10	6,27	14,0	9,5	3,4	0,7	3,1	0,9	1,0	0,3	19	<0,1	<0,1	2,2	4,63	52,6	9,1	52,9	3,83	3,86
W-12	7,05	2,6	7,9	2,5	0,8	2,9	0,6	1,3	0,3	16	<0,1	0,01	2,7	4,24	23,6	1,4	28,4	0,96	1,05
W-13*	6,77	5,2	16,5	7,5	1,2	5,9	1,4	2,1	0,1	35	<0,1	<0,1	3,7	3,92	8,7	1,3	17,9	43,09	18,5
W-14	6,95	5,3	13,2	3,6	1,3	4,8	0,6	2,5	0,6	27	<0,1	<0,1	6,4	12	193,9	10,0	99,7	4,28	4,14
W-15*	6,99	4,0	13,4	3,2	0,5	3,1	1,3	1,1	0,2	23	0,1	<0,1	2,6	н.д.	0,2	1,5	32,2	2,63	1,18
Озеро Имандра																			
W-3	7,05	2,6	21,0	15,0	4,0	3,0	0,6	12,2	2,3	58	<0,1	0,29	1,1	3,61	38,6	12,2	171,2	3,52	2,40
W-4	7,1	5,3	23,7	19,6	5,4	4,5	0,6	15,4	2,6	72	<0,1	0,33	0,2	4,04	27,9	13,4	32,6	4,09	2,97

Примечание: н.д. – нет данных, * воды, приуроченные к холмисто-увалистой равнине и находящиеся в зоне воздействия выбросов медно-никелевого комбината

В реках равнинной, западной части рассматриваемой территории формируются нейтральные воды с минерализацией 16-27 мг/дм³. По соотношению анионов воды преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные с долей хлорид-ионов – от 5 до 11%-экв. Катионный состав рассматриваемых поверхностных вод преимущественно магниевый-кальциевый со значительным процентным содержанием натрия (15-22 %-экв) и содержанием кремния 2,1-2,7 мг/дм³.

Содержание кремния в поверхностных водах равнинной части исследуемого водосбора соизмеримо с концентрацией кальция и значительно выше концентраций других катионов. Высокая концентрация кремния обнаружена в ручье на территории бывшего КПМ (комплексного мониторингового полигона) (W-14). Здесь при минерализации вод 27 мг/дм³ концентрация кремния составляет 6,4 мг/дм³, существенно превышающая концентрацию других катионов.

Наименьшие содержания кремния – 0,16 мг/дм³ обнаружены в озере Имандра (W-4) при минерализации 72 мг/дм³ и высоких концентрациях сульфат-иона и натрия и в водах озера Дорожное (W-2) - 1,8 мг/дм³ при минерализации 30 мг/дм³, содержании сульфат-иона 9,5 мг/дм³ и преобладанием кальция и натрия над концентрацией кремния.

В водах озера Дорожное (W-2) при уменьшении pH 5,99 отмечается некоторое повышение свободной углекислоты 15,7 мг/дм³, что обусловлено процессами минерализации органических веществ ($C_{орг} = 3,82$ мг/дм³). В целом концентрация органических веществ в поверхностных водах не превышает 4,6 мг/дм³ в отдельных точках концентрация повышается до 12 мг/дм³ (W-1 и W-14).

Значительно отличается химический состав вод в точке (W-1), представляющей собой мочажину рядом с родником «Болотным» (S-16). Минерализация вод составляет 140 мг/дм³, а концентрация кремния - 7,02 мг/дм³, что втрое превышает среднюю минерализацию и концентрацию кремния в поверхностных водах района исследования и в большей степени соответствует составу подземных вод. В водах мочажины отмечено максимальное содержание хлорид-иона 53,5 мг/дм³, что составляет почти 70 % от общей суммы содержания анионов в этих водах.

В поверхностных водах участка с нарушенным лесным ландшафтом (ручей 7 км -W-13) отмечается несколько повышенное содержание сульфат-иона 7,5 мг/дм³. Воды здесь сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые с высокой долей магния и натрия (рисунок 4.1.1).

В водах озера Имандра (W-3, 4) минерализация составляет 58-72 мг/дм³, что несколько выше, чем в рассматриваемых поверхностных водах, при этом отмечается почти равное соотношение гидрокарбонат и сульфат-иона. По катионному составу воды здесь натриевые, при уровне кальция в 19-22 %-экв, а магния и калия 5-7,5 %-экв.

В подземных водах в отличие от поверхностных прослеживается увеличение концентраций кремния, магния, кальция, сульфат-иона и общей минерализации при относительно постоянных концентрациях калия, натрия и хлор-иона (таблица 4.1.1).

Сравнение химического состава подземных вод основных гидрогеохимических провинций зоны гипергенеза (Шварцев, 1998) и исследуемого района (таблица 4.1.2) позволяет отметить, что содержание кремния в подземных водах водосбора озера Имандра сопоставимо с уровнем его содержания в подземных водах провинций выщелачивания. Однако, минерализация вод в этих провинциях существенно выше, чем на изучаемой территории.

Обращает на себя внимание и то, что в столь маломинерализованных водах отношение содержания кремния к сумме основных катионов достигает 0,26, что для подземных вод выщелачивания наблюдается только в провинции тропического климата, при общей минерализации 161 мг/дм³ и содержании Si – 9,8 мг/дм³ (таблица 4.1.2).

Таблица 4.1.2 – Содержание кремния в подземных водах основных провинций зоны гипергенеза

Показатель	Подземные воды провинций выщелачивания (Шварцев, 1998)				Подземные воды континентально го засоления (Шварцев, 1998)	Подземн ые воды водосбор а озера Имандра
	тропическог о климата	многолетне й мерзлоты	горных областей	умеренно го климата		
Si, мг/дм ³	9,8	4,0	7,1	6,2	14,6	5,7
Si/∑катионов	0,26	0,14	0,10	0,07	0,04	0,26
Минерализация, мг/дм ³	161	121	270	337	1322	109

Также можно отметить нехарактерное для низкоминерализованных вод соотношение содержания кремния к содержанию основных катионов (таблица 4.1.3). В подземных водах восточной части водосбора озера Имандра концентрации кальция и натрия превышают содержание кремния. В то же время в западной части содержание кремния соизмеримо с содержанием кальция и вдвое превышает концентрацию натрия. В целом в подземных водах водосбора озера Имандра концентрации кремния существенно превышают концентрации магния и особенно калия. Такой характер обогащения вод катионами объясняются особенностями взаимодействия вод с минералами вмещающих пород.

Таблица 4.1.3 – Соотношение катионов в подземных водах водосбора озера Имандра (Кольский полуостров)

№	Родник	Минерализация, мг/дм ³	Si, мг/дм ³	Si/Ca	Si/Mg	Si/Na	Si/K	Si/ Σкатионов
Холмисто-увалистая равнина								
S-16	«Болотный»	61,8	8,37	1,1	1,9	2,2	6,2	0,49
S-17	«Горный»	30,5	3,70	0,7	3,5	2,3	14,1	0,44
S-18	«Дорожный»	37,3	4,52	0,9	2,2	1,6	7,3	0,43
S-19	«Кислая Губа»	67	4,97	0,5	1,8	1,4	2,4	0,26
S-23	«Спортивный»	82,2	9,58	0,9	1,9	2,9	8,9	0,46
S-26	«Крепость»	204	6,48	0,15	1,2	1,74	2,5	0,12
S-27	«Горнолыжный»	30	3,36	0,61	4,0	3,5	28	0,45
S-30	«Проезжий»	216	7,9	0,37	9,3	0,16	3,3	0,11
Район Хибинского массива								
S-20	«Молодежный»	115	4,10	0,2	3,1	0,6	3,5	0,13
S-21	«Поддорожный»	201	6,23	0,2	1,5	0,4	3,1	0,10
S-22	«Прихибинский»	111	6,22	0,5	2,9	0,6	1,2	0,20
S-24	«Эврика»	74	4,56	0,33	3,8	1,8	2,4	0,23
S-28	в пос. Титан	129	6,08	0,47	2,5	0,55	1,6	0,20
S-29	в г. Кировск	172	3,97	0,28	4,0	0,15	0,42	0,08

В маломинерализованных слабокислых водах складываются благоприятные условия для накопления элементов-гидролизатов (Гусева, 2018). В рассматриваемых водах происходит накопление алюминия, концентрации которого варьируются от 0,2 до 171,2 мкг/дм³. При этом концентрации железа и марганца не высоки и в среднем составляют 31,8 и 4,3 мкг/дм³ соответственно. Наблюдается положительная корреляционная связь между указанными элементами и растворенным органическим веществом, максимальные концентрации этих элементов в водах обнаруживаются в пробах с наибольшим содержанием $C_{орг}$. Например, в водах мочажины (W-1) и ручья КМП (W-14), где содержание $C_{орг}$ составляет 11,4 и 12,0 мг/дм³, концентрации Fe достигают 460 и 194 мкг/дм³, Mn - 6,1 и 10,0 мкг/дм³, Al - 100 мкг/дм³. В водах озера Имандра также отмечено повышенное содержание марганца 12,0-13,0 мкг/дм³ и алюминия достигает 171 мкг/дм³ (таблица 4.1.1).

В силу особенностей техногенного влияния промышленных предприятий в пределах рассмотренного района концентрации никеля и меди изменяется от 0,02 до 66,32 мкг/дм³ и от

0,01 до 20,32 мкг/дм³ соответственно. При этом содержание указанных элементов в подземных водах значительно ниже, чем в поверхностных, лишь в отдельных точках отмечаются относительно высокие концентрации. В роднике «Дорожный» (S-18), расположенном в двух километрах на ЗЮЗ от источника пылегазовых выбросов (Ананьев, 2010), концентрации Cu и Ni составляют 1 мкг/дм³ и 6,4 мкг/дм³.

Хорошо известна способность меди образовывать прочные комплексы с органическим веществом. Никель же может сорбироваться органоминеральным слоем донных отложений, подобно иллювиальному горизонту подзолистых почв (Евтюгина, Асминг, 2013). Возможно, именно таким образом происходит удаление меди и никеля при фильтрации вод из озера в родник, в котором концентрация Cu в 16 раз меньше ее концентрации в озере, а содержание Ni в 9 раз меньше его концентрации в озере. Вместе с тем концентрации никеля и меди в роднике «Дорожном» (S-18) на порядок превышают таковые в других родниках.

Относительно повышенное содержание никеля отмечается и в роднике «Горный» (S-17) – 3,44 мкг/дм³, а содержание меди здесь – 0,19 мкг/дм³. Он расположен в 4 км от промплощадки Мончегорск, в нем происходит разгрузка трещинно-жильных вод габбро-норитов Мончегорского плутона по вертикальным зонам разломов в четвертичные отложения склона. На площади возможной инфильтрации атмосферных вод лес разрушен, лесная подстилка отсутствует и формируется пустошь техногенная (Ананьев, 2010).

В ионном составе родниковых вод, по сравнению с поверхностными, отмечается увеличение концентраций сульфат-иона, кальция, магния и кремния при почти неизменных концентрациях натрия, калия и хлор-иона, и повышается общая минерализация. В соотношениях содержания некоторых химических элементов в поверхностных ($C_{\text{пов}}$) и подземных водах ($C_{\text{подз}}$) также существуют различия (рисунок 4.1.2).

Так, например, в пределах холмисто-увалистой равнины (западная часть территории водосбора озера Имандра), в поверхностных водах, по сравнению с содержаниями в подземных, отмечаются более высокие концентрации V, Fe, Co, Cu, Ge, As, Rb, Sb, Tl, Th. В поверхностных водах в районе Хибинского массива содержания Mn, Y, Nb, Ru, Pd, Sn, лантаноидов (кроме Lu), Hg, Pb превышают таковые в подземных водах.

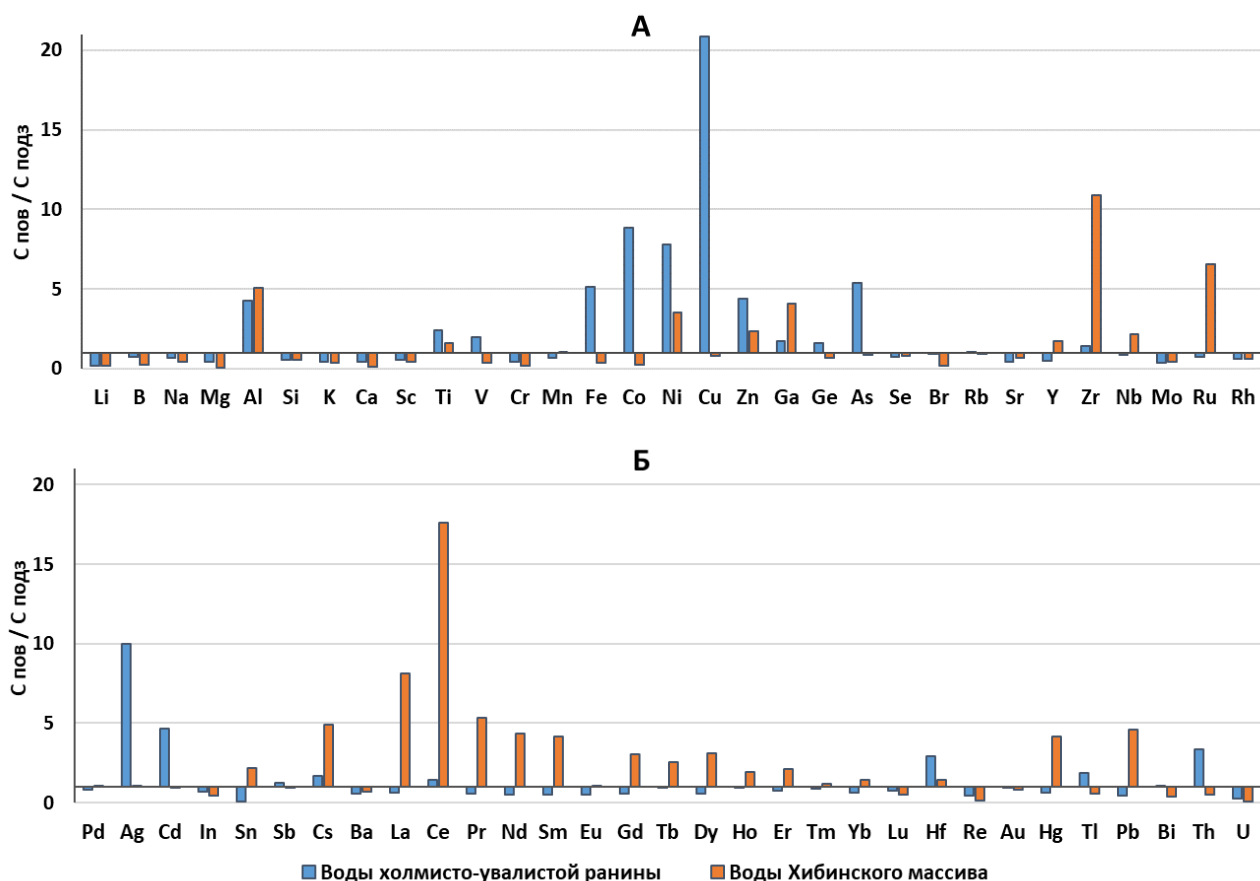


Рисунок 4.1.2 – Отношение содержания химических элементов в поверхностных водах ($C_{\text{пов}}$) к содержанию их в подземных водах ($C_{\text{подз}}$) для территорий холмисто-увалистой равнины и Хибинского массива

Различия микрокомпонентного состава природных вод рассматриваемых частей территории могут быть связаны как с их металлогеническими особенностями, так и с техногенным влиянием медно-никелевого комбината. Отмечается, что в поверхностных водах холмисто-увалистой равнины значительно больше содержания Li, Mg, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Zn, Ge, As, Br, Ag, Cd, Re, Tl, Bi, Th, а также Co, Ni и Cu относительно поверхностных вод территории Хибинского массива (рисунок 4.1.3).

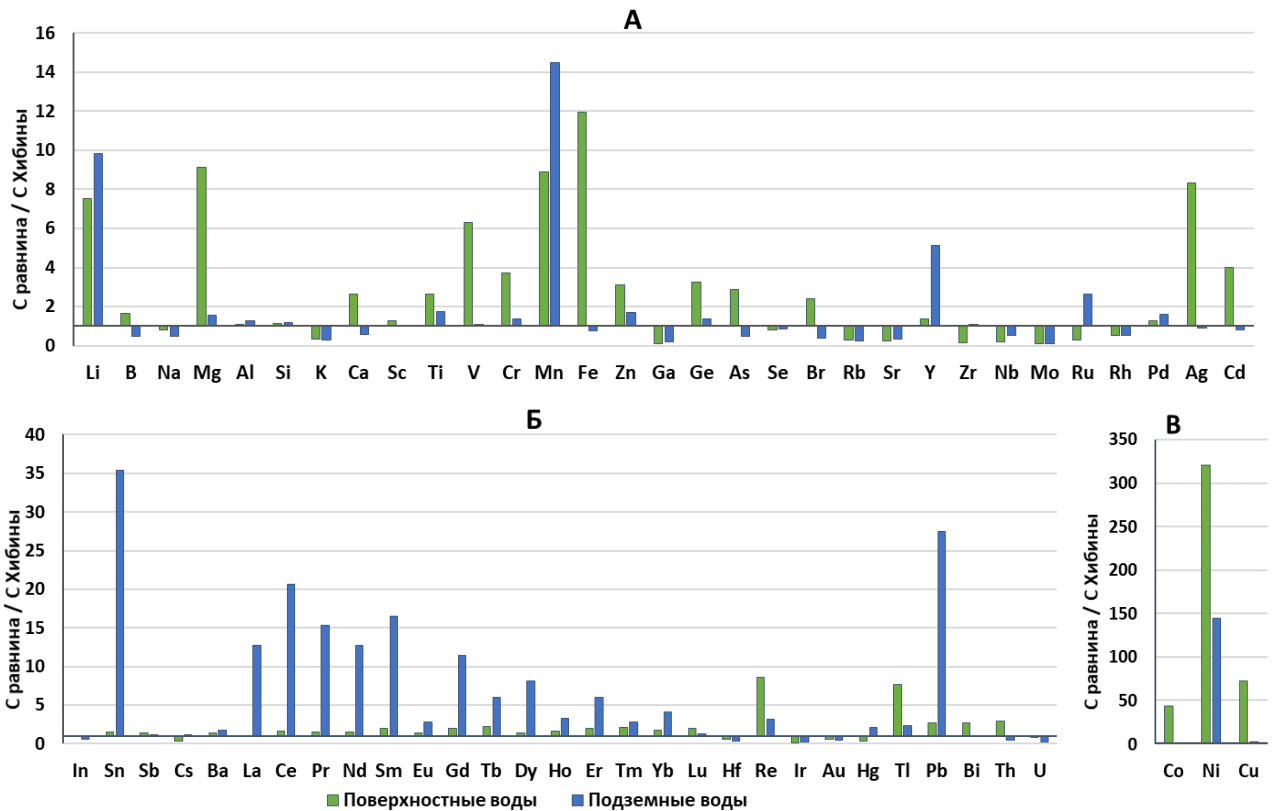


Рисунок 4.1.3 – Отношение содержания химических элементов в поверхностных и подземных водах территории холмисто-увалистой равнины ($C_{\text{равнина}}$) относительно территории Хибинского массива ($C_{\text{Хибинны}}$)

В подземных водах холмисто-увалистой равнины содержания Li, Mn, Y, Ru, Sn, РЗЭ, Pb и Ni превышают таковые в подземных водах Хибин. Природные воды территории Хибинского массива отличаются более высокими концентрациями Na, K, Sc, Ga, Se, Rb, Sr, Nb, Mo, Rh, In, Cs, Hf, Ir, Au, U.

Данные по микрокомпонентному составу разных групп рассматриваемых природных вод, представлены в таблице 4.1.4. Отмечается, что концентрации Ni и Cu в водах холмисто-увалистой равнины значительно превышают содержания этих элементов в водах территории Хибинского массива, а также изменяются в очень широком диапазоне. Это показывает наличие влияния выбросов медно-никелевого комбината и приводит к разделению западной части водосбора озера Имандра на два участка: зона воздействия и условно-фоновая зона.

Таблица 4.1.4 – Распространенность химических элементов в водах исследуемой территории, мкг/дм³

Элемент	Холмисто-увалистая равнина (западная часть водосбора озера Имандра)		Район Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра)		Озеро Имандра
	Поверхностные воды	Подземные воды	Поверхностные воды	Подземные воды	
Li	<u>0,01-0,45</u> 0,15	<u><0,01-7,30</u> 1,01	<u>0,01-0,07</u> 0,02	<u>0,01-0,21</u> 0,10	0,34
B	<u>0,39-5,60</u> 1,57	<u>0,31-8,0</u> 2,09	<u>0,34-1,79</u> 0,95	<u>0,56-10,0</u> 4,32	27,6
Al	<u>3,19-134</u> 45,0	<u>0,01-39,82</u> 10,57	<u>14,83-84,63</u> 41,77	<u>0,82-17,53</u> 8,28	101,9
Sc	<u>0,07-0,32</u> 0,15	<u>0,13-0,41</u> 0,26	<u>0,09-0,13</u> 0,11	<u>0,14-0,34</u> 0,25	0,01
Ti	<u><0,05-2,33</u> 0,61	<u>0,05-0,66</u> 0,25	<u><0,05-0,44</u> 0,23	<u><0,05-0,23</u> 0,14	1,62
V	<u>0,23-1,72</u> 0,82	<u>0,11-0,82</u> 0,42	<u>0,08-0,19</u> 0,13	<u>0,15-0,86</u> 0,40	0,44
Cr	<u>0,19-0,66</u> 0,34	<u>0,09-3,06</u> 0,79	<u>0,04-0,18</u> 0,09	<u>0,29-0,78</u> 0,57	0,21
Mn	<u>0,41-9,98</u> 4,24	<u>0,02-102,9</u> 6,65	<u>0,16-0,96</u> 0,48	<u>0,03-2,81</u> 0,46	12,8
Fe	<u>0,20-460,2</u> 68,5	<u>0,13-94,3</u> 13,3	<u>0,07-21,6</u> 5,7	<u>0,26-37,6</u> 17,3	33,3
Co	<u>0,02-0,69</u> 0,25	<u>0,008-0,073</u> 0,028	<u>0,003-0,013</u> 0,006	<u>0,001-0,066</u> 0,024	0,03
Ni	<u>0,96-66,3</u> 26,2	<u>0,08-16,37</u> 3,35	<u>0,05-0,15</u> 0,08	<u>0,02-0,03</u> 0,02	3,81
Cu	<u>1,05-20,3</u> 10,5	<u>0,05-1,7</u> 0,50	<u>0,01-0,29</u> 0,14	<u>0,01-0,34</u> 0,18	2,69
Zn	<u>0,26-3,04</u> 1,62	<u>0,05-0,85</u> 0,37	<u>0,20-1,01</u> 0,52	<u>0,05-0,72</u> 0,22	0,72
Ga	<u>0,001-0,036</u> 0,015	<u><0,005-0,033</u> 0,009	<u>0,04-0,31</u> 0,19	<u>0,01-0,10</u> 0,05	0,125
Ge	<u>0,001-0,021</u> 0,006	<u><0,001-0,021</u> 0,004	<u><0,001-0,006</u> 0,002	<u><0,001-0,013</u> 0,003	<0,001
As	<u>0,03-0,70</u> 0,31	<u>0,006-0,29</u> 0,06	<u>0,05-0,20</u> 0,11	<u>0,04-0,27</u> 0,13	0,32

Элемент	Холмисто-увалистая равнина (западная часть водосбора озера Имандра)		Район Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра)		Озеро Имандра
	Поверхностные воды	Подземные воды	Поверхностные воды	Подземные воды	
Se	<u><0,001-0,49</u> 0,17	<u>0,04-0,52</u> 0,23	<u><0,001-0,38</u> 0,21	<u><0,001-0,76</u> 0,27	0,13
Br	<u>2,9-28,3</u> 8,5	<u>1,8-21,9</u> 9,5	<u>1,0-14</u> 3,6	<u>4,7-98,3</u> 24,1	4,8
Rb	<u>0,07-1,9</u> 0,56	<u>0,01-1,62</u> 0,53	<u>1,25-2,95</u> 2,06	<u>0,18-9,2</u> 2,3	3,73
Sr	<u>6,8-44,8</u> 15,6	<u>10,1-141,2</u> 36,5	<u>42,1-131,9</u> 70,9	<u>8,5-290,7</u> 107,5	56,4
Y	<u>0,0072-0,096</u> 0,033	<u>0,0047-0,59</u> 0,072	<u>0,015-0,042</u> 0,024	<u>0,0019-0,059</u> 0,014	0,076
Zr	<u>0,0026-0,062</u> 0,013	<u>0,0008-0,043</u> 0,0091	<u>0,011-0,36</u> 0,09	<u>0,0018-0,02</u> 0,0085	0,097
Nb	<u><0,005-0,0074</u> 0,0033	<u>0,0001-0,01</u> 0,0038	<u>0,0012-0,033</u> 0,016	<u>0,00008-0,028</u> 0,0075	0,035
Mo	<u>0,0082-0,45</u> 0,12764	<u>0,0042-1,55</u> 0,3774	<u>0,87-2,27</u> 1,62633	<u>0,001-25,8</u> 4,06581	2,96
Ru	<u><0,005-0,0035</u> 0,0016	<u><0,005-0,013</u> 0,0022	<u>0,0019-0,0094</u> 0,0056	<u><0,005-0,0025</u> 0,00085	<0,005
Rh	<u><0,001-0,0023</u> 0,00087	<u>0,0004-0,0049</u> 0,0014	<u>0,00054-0,0044</u> 0,00164	<u>0,00041-0,0058</u> 0,0026	<0,001
Pd	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Ag	<u><0,005-0,069</u> 0,02	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Cd	<u><0,001-0,059</u> 0,017	<u><0,001-0,014</u> 0,004	<u>0,002-0,011</u> 0,004	<u><0,001-0,017</u> 0,004	0,001
In	<u>0,001-17,8</u> 5,9	<u><0,001-23,5</u> 8,5	<u><0,001-18,1</u> 6,5	<u><0,001-23,7</u> 15,8	-
Sn	<u><0,005-0,065</u> 0,013	<u><0,005-1,51</u> 0,137	<u><0,005-0,021</u> 0,009	<u><0,005-0,011</u> 0,004	0,008
Sb	<u>0,005-0,055</u> 0,022	<u><0,001-0,166</u> 0,018	<u>0,01-0,024</u> 0,016	<u><0,001-0,076</u> 0,017	0,083
Te	<u><0,005-0,053</u> 0,021	<u><0,005-0,026</u> 0,0055	<u><0,005-0,012</u> 0,0052	<0,005	<0,005

Элемент	Холмисто-увалистая равнина (западная часть водосбора озера Имандра)		Район Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра)		Озеро Имандра
	Поверхностные воды	Подземные воды	Поверхностные воды	Подземные воды	
Cs	$\frac{<0,002-0,012}{0,0036}$	$\frac{<0,002-0,0064}{0,0021}$	$\frac{<0,002-0,021}{0,01}$	$\frac{<0,002-0,0068}{0,002}$	0,014
Ba	$\frac{2,3-23,0}{10,6}$	$\frac{0,78-83,3}{19,5}$	$\frac{0,91-12,1}{7,3}$	$\frac{0,15-17,5}{10,9}$	2,71
La	$\frac{0,015-0,309}{0,08}$	$\frac{0,0013-1,56}{0,132}$	$\frac{0,056-0,142}{0,084}$	$\frac{<0,0005-0,043}{0,010}$	0,256
Ce	$\frac{0,004-0,424}{0,112}$	$\frac{<0,0005-1,04}{0,08}$	$\frac{0,024-0,189}{0,068}$	$\frac{<0,0005-0,009}{0,004}$	0,412
Pr	$\frac{0,003-0,075}{0,02}$	$\frac{<0,0005-0,370}{0,036}$	$\frac{<0,0005-0,021}{0,013}$	$\frac{<0,0005-0,009}{0,002}$	0,051
Nd	$\frac{0,008-0,251}{0,067}$	$\frac{<0,0005-1,35}{0,128}$	$\frac{0,027-0,061}{0,044}$	$\frac{<0,0005-0,030}{0,010}$	0,173
Sm	$\frac{0,0007-0,038}{0,011}$	$\frac{<0,0005-0,223}{0,022}$	$\frac{0,001-0,015}{0,006}$	$\frac{<0,0005-0,005}{0,001}$	0,024
Eu	$\frac{0,0009-0,008}{0,003}$	$\frac{<0,0005-0,04}{0,006}$	$\frac{0,001-0,003}{0,002}$	$\frac{<0,0005-0,003}{0,002}$	0,008
Gd	$\frac{0,0007-0,033}{0,009}$	$\frac{<0,0005-0,164}{0,017}$	$\frac{0,002-0,008}{0,004}$	$\frac{<0,0005-0,007}{0,001}$	0,025
Tb	$\frac{<0,0005-0,003}{0,001}$	$\frac{<0,0005-0,004}{0,001}$	$\frac{<0,0005-0,001}{0,0006}$	<0,0005	0,003
Dy	$\frac{<0,0005-0,016}{0,005}$	$\frac{<0,0005-0,078}{0,009}$	$\frac{0,001-0,007}{0,003}$	$\frac{<0,0005-0,005}{0,001}$	0,015
Ho	$\frac{<0,0005-0,004}{0,001}$	$\frac{<0,0005-0,004}{0,001}$	$\frac{<0,0005-0,002}{0,001}$	<0,0005	0,003
Er	$\frac{<0,0005-0,009}{0,002}$	$\frac{<0,0005-0,021}{0,003}$	$\frac{<0,0005-0,003}{0,001}$	$\frac{<0,0005-0,002}{0,0006}$	0,005
Tm	$\frac{<0,0005-0,001}{0,0006}$	$\frac{<0,0005-0,002}{0,0006}$	<0,0005	<0,0005	0,001
Yb	$\frac{<0,0005-0,0051}{0,0018}$	$\frac{<0,0005-0,014}{0,0029}$	$\frac{<0,0005-0,0018}{0,001}$	$\frac{<0,0005-0,0025}{0,0007}$	0,005
Lu	$\frac{<0,0005-0,001}{0,00052}$	$\frac{<0,0005-0,0019}{0,0007}$	$\frac{<0,0005-0,0005}{0,0003}$	$\frac{<0,0005-0,0007}{0,0005}$	0,001
Hf	$\frac{<0,0005-0,0059}{0,0012}$	$\frac{<0,0005-0,003}{0,0005}$	$\frac{<0,0005-0,0059}{0,0021}$	$\frac{<0,0005-0,0056}{0,0015}$	<0,0005

Элемент	Холмисто-увалистая равнина (западная часть водосбора озера Имандра)		Район Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра)		Озеро Имандра
	Поверхностные воды	Подземные воды	Поверхностные воды	Подземные воды	
Ta	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
W	<u><0,01-0,06</u> 0,02	<0,01	<u>0,01-0,07</u> 0,04	<u><0,01-0,44</u> 0,22	0,25
Re	<u><0,001-0,008</u> 0,003	<u>0,001-0,024</u> 0,008	<0,001	<u><0,001-0,006</u> 0,003	<0,001
Os	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Ir	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Pt	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Au	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Hg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Tl	<u>0,0011-0,013</u> 0,0039	<u>0,001-0,0050</u> 0,0021	<u><0,001-0,0011</u> 0,00051	<u><0,001-0,0026</u> 0,00088	0,003
Pb	<u>0,0039-0,24</u> 0,093	<u>0,0006-2,13</u> 0,21	<u>0,0065-0,083</u> 0,034	<u>0,0015-0,027</u> 0,0075	0,056
Bi	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Th	<u><0,005-0,025</u> 0,007	<u><0,005-0,0052</u> 0,0021	<u><0,005-0,0064</u> 0,0024	<u><0,005-0,01</u> 0,0047	0,01
U	<u>0,00059-0,049</u> 0,018	<u>0,0002-0,29</u> 0,068	<u>0,01-0,04</u> 0,022	<u>0,03-1,04</u> 0,29	0,087

Примечание к таблице: в числителе дроби – минимальное и максимальное содержание, в знаменателе – среднее значение

В таблице 4.1.5. представлены значения коэффициентов концентраций химических элементов в разных группах природных вод.

Таблица 4.1.5 – Значения коэффициентов концентраций химических элементов (геохимические ряды) в природных водах исследуемого района

Зона	Группы вод	Геохимические ряды
Холмисто-увалистая равнина (западная часть водосбора озера Имандра)	Поверхностные воды в зоне влияния комбината (W-1, W-2, W-6, W-13, W-15, W-25)	$\text{Ni}_{3,8}\text{-Cu}_{3,7}\text{-Co}_{3,3}\text{-Ag}_{2,7}\text{-Cd}_{2,6}\text{-Te-Zn}_{2,3}\text{-Fe=As=V-Ge}_{1,7}\text{-Tl}_{1,6}\text{-Bi}_{1,4}\text{-Sb}_{1,3}\text{-Ti}_{1,2}\text{-Pd-Al}_{1,1}\text{-Pb}_1\text{-Pt=Br}$
	Условно-фоновые поверхностные воды (W-8, W-10, W-12, W-14)	$\text{Th}_{2,6}\text{-Ce}_{2,3}\text{-Al}_{2,2}\text{-Er}_{2,1}\text{-Ti}_2\text{-Fe}_{1,9}\text{-Tb}_{1,8}\text{-Mn-Lu}_{1,7}\text{-Ho=Yb=Hf-Tl}_{1,6}\text{-Dy=Pr-Gd}_{1,5}\text{-Nd=La=Tm-Sm}_{1,4}\text{-Y}_{1,3}\text{-Zn-Ta}_{1,2}\text{-P}_{1,1}\text{-Hg=Ge=I-Co}_1\text{-Eu=As}$
	Подземные воды в зоне влияния комбината – разрушенный ландшафт (S-17, S-18)	$\text{Pt}_{1,9}\text{-Be}_{1,7}\text{-Ge}_{1,5}\text{-Te}_{1,3}\text{-Yb=Au-Re}_{1,2}\text{-Lu}_{1,1}\text{-Tm=Se-Si}_1$
	Подземные воды в зоне влияния комбината (S-16, S-23, S-26, S-27)	$\text{Li}_3\text{-Cr}_{2,8}\text{-Pt}_{2,7}\text{-Mg}_{2,5}\text{-Bi}_{2,3}\text{-Hg}_{2,2}\text{-Si}_{1,9}\text{-Ca}_{1,7}\text{-Sc=Ta-Ba}_{1,6}\text{-Pd}_{1,3}\text{-V-Be}_{1,2}\text{-U-Br}_1\text{-K=Rh}$
	Условно-фоновые подземные воды (S-19)	$\text{Sn}_{34,6}\text{-Pb}_{21}\text{-Sb}_{3,9}\text{-Tm}_{3,7}\text{-Bi}_{3,5}\text{-Er}_{3,3}\text{-Ho=Tb-Y}_{3,1}\text{-Lu}_{2,7}\text{-U-Se}_{2,5}\text{-Sm}_{2,4}\text{-Nd}_{2,3}\text{-Eu=Gd-Pr}_{2,1}\text{-Yb}_2\text{-Dy}_{1,9}\text{-Ba}_{1,8}\text{-La-I}_{1,7}\text{-K}_{1,5}\text{-Br}_{1,4}\text{-Pd-Ca}_{1,2}\text{-Li-Si}_{1,1}\text{-Cs=Mg=Cr=Sc-Rb}_1$
Район Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра)	Поверхностные воды (W-5, W-7, W-9, W-11)	$\text{Ga}_{3,9}\text{-Zr}_{3,4}\text{-Ru}_{2,6}\text{-Be-Hg}_{2,4}\text{-Cs}_{2,1}\text{-Hf}_{1,9}\text{-Nb}_{1,8}\text{-Rb-Sr}_{1,6}\text{-Mo}_{1,4}\text{-Al-Au}_{1,3}\text{-Ta}_{1,1}\text{-Rh-Se}_1\text{-W}$
	Подземные воды (S-20, S-21, S-22, S-24, S-28, S-29)	$\text{U}_{3,7}\text{-Mo}_{3,6}\text{-K}_{2,7}\text{-Br}_{2,4}\text{-Ca=Sr-Rb}_2\text{-Na-Rh}_{1,7}\text{-In-Au}_{1,6}\text{-B}_{1,4}\text{-Hf-Se}_{1,3}\text{-Sc-Bi}_{1,2}\text{-I=Si=Cr-Mg}_{1,1}\text{-Th}_1\text{-Lu=Ga}$
Озеро Имандра (W-3, W-4)		$\text{B}_{8,8}\text{-W}_{5,8}\text{-Ce}_{4,4}\text{-Ti}_{3,9}\text{-Nb=Sb-Zr}_{3,6}\text{-Al}_{3,4}\text{-Rb}_{3,2}\text{-Mn}_3\text{-Tb-Cs}_{2,9}\text{-Yb}_{2,7}\text{-La-Mo}_{2,6}\text{-Ho-Ga}_{2,5}\text{-Tm-Dy=Na=Gd-Pr}_{2,3}\text{-Be-K}_{2,2}\text{-Er-Th}_{2,1}\text{-Nd=Eu-As}_{1,9}\text{-Sm=-Y}_{1,7}\text{-Sr}_{1,2}\text{-Lu-Tl}_{1,1}\text{-U-Fe}_1$

Эти данные показывают различия в характере накопления химических элементов в различных типах водных объектов, а также в природных водах различных частей исследуемой территории, в том числе указывая на наличие техногенного влияния.

При сравнении химического состава исследуемых вод с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков, согласно (СанПиН 1.2.3685-21) наблюдается превышение нормативов по Ni для следующих водных объектов: мочажины у родника «Болотный» (W-1) - 1,6 ПДК, озера «Дорожного» (W-2) - 2,9 ПДК, озера Монче (W-6) – 1,3 ПДК. В водах мочажины у родника «Болотный» (W-1) также наблюдается превышение ПДК по Fe в 1,5 раза.

По более ранним оценкам (Экологический атлас...,1999) в исследуемом районе в поверхностных водах превышение ПДК по S, Ni, Cu и P доходило до 5-10 раз (рисунок 4.1.4).

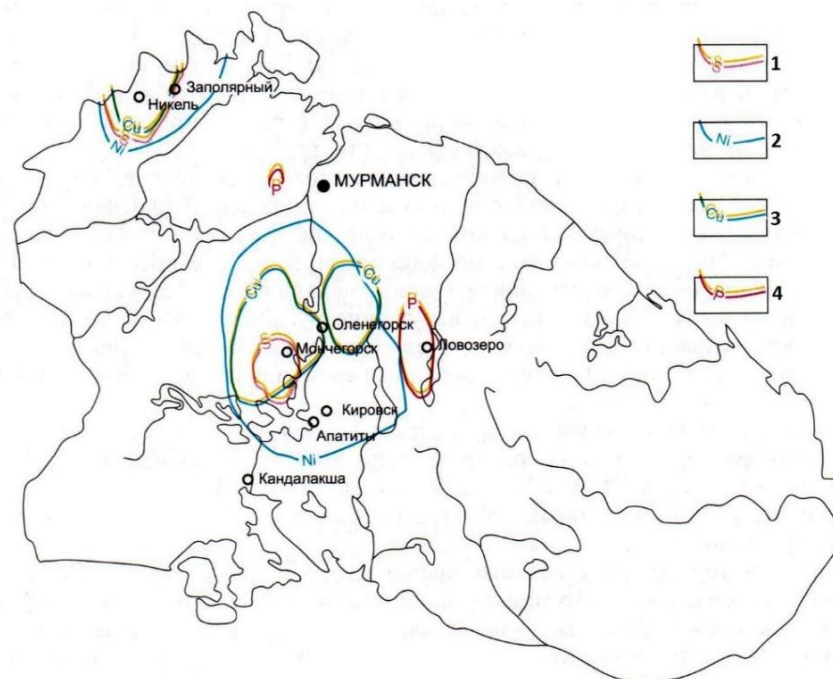


Рисунок 4.1.4 – Экологическое состояние природных вод в результате воздействия горнодобывающих, топливно-энергетических и других комплексов на территории Кольского полуострова (Экологический атлас...,1999). Превышение ПДК в поверхностных водах соответствующими элементами в 5-10 раз: 1 – серой, 2 – никелем, 3 – медью, 4 – фосфором

В сравнении со средним содержанием химических элементов для подземных вод зоны выщелачивания (Шварцев, 1998) в рассматриваемых водах наблюдается повсеместное превышение содержания Sc, которое доходит до 5,8 раз. Так же есть превышения в некоторых пунктах опробования по Na, K, Ni, Cu, Rb, Sr, Mo, Ba.

При сравнении микрокомпонентного состава исследуемых поверхностных вод с кларком речных вод по В.В. Гордееву и А.П. Лисицину (Соловов, 1990) также наблюдаются превышения по Sc и отдельные превышения для достаточно широкого ряда элементов: Na, Mg, Si, K, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Se, Rb, Sr, Nb, Mo, лантаноиды, W.

4.2 Формы миграции химических элементов в воде

Соотношение различных форм химических элементов в воде изменяется от конкретных геохимических условий среды их миграции, а также наличия соответствующих ионов-комплексообразователей (лигандов). Присутствие в значительных количествах тех или иных ионов существенно сказывается на формах миграции химических элементов (Кириухин и др., 1993). Процессы миграции элементов и их распределение при взаимодействии воды и пород невозможно правильно интерпретировать и прогнозировать, не зная их миграционных форм в природных водах различного химического состава (Крайнов и др., 2012).

Миграционные формы химических элементов в природных водах определяют расчетными и экспериментальными методами. Расчетными методами, например, устанавливаются растворенные формы миграции химических элементов на основе положения о том, что ион-комплексообразователь взаимодействует с лигандом и образует соединение (Линник, Набивалец, 1986).

Среди экспериментальных методов чаще применяются диализ и фильтрация, использование которых позволяет выделить взвешенную, коллоидную и истинно растворенную формы нахождения химических элементов в природных водах. К взвесям относят частицы, имеющие размер более 0,45-0,50 мкм, частицы меньшего размера – коллоидные и растворенные формы. Границу между ними в большинстве случаев провести трудно, однако (Ren et al., 2010; Nystrand, Österholm, 2013) определяют ее как 0,001 мкм.

Результаты химического анализа природных вод до и после процедуры фильтрации и равновесного диализа показывают, что в природных водах изучаемой территории растворенная форма миграции (совокупность коллоидной и истинно растворенной форм) преобладает над взвешенной фракцией. В растворенной форме в водах данной территории находятся Cu, Ni, Cs, Cr, K, Na, K, Mg, B, Re, U, Co, W, Zr, Li, Sb, Si, Tb, Ga, Tm, Ta, Se. Однако, взвешенная фракция для некоторых элементов является преобладающей, например, для Th, Tl, La, Se, Sb, Dy (рисунок 4.2.1).

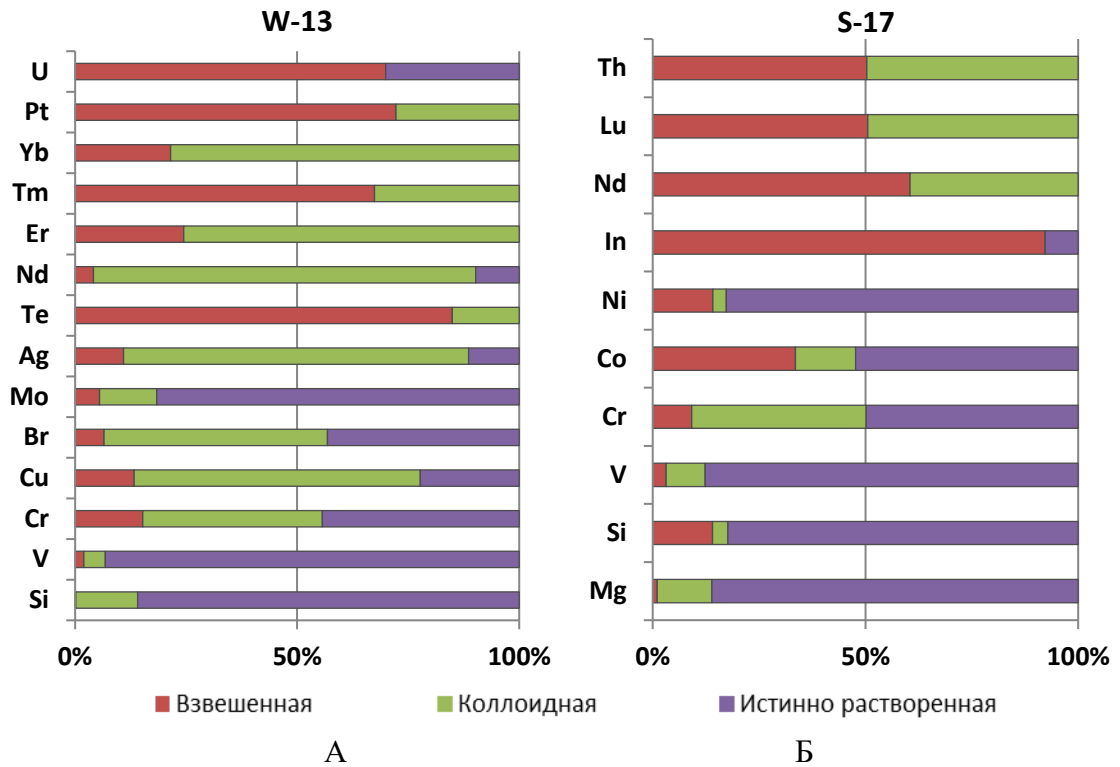


Рисунок 4.2.1 – Соотношение различных фракций химических элементов в поверхностных (точка W-13) (А) и подземных (точка S-17) (Б) водах

Доминирующую роль среди растворенных фракций играет истинно растворенная форма. Миграция Na, Mg, Si, V, Cr, Ga, Ni происходит, преимущественно, в истинно растворенной форме. Значительная доля Th в подземных водах мигрирует во взвешенной форме, а в поверхностных водах в растворенной (причем превалирует коллоидная фракция). Для U наоборот, в подземных водах преобладает растворенная форма, в поверхностных – взвешенная (рисунок 4.2.2).

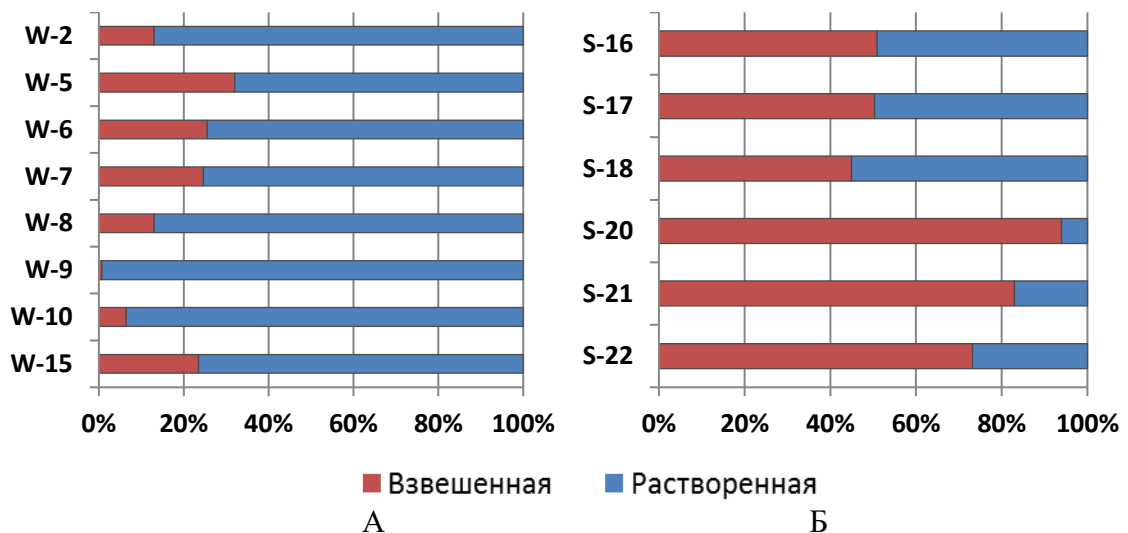


Рисунок 4.2.2 – Формы миграции Th в поверхностных (А) и подземных (Б) водах

Следует также отметить, что в водотоках W-7 и W-15 для никеля наблюдается равные доли взвешенной и растворенной фракций, что также отмечено во многих пробах для фосфора (Воробьева, 2016).

На примере родника «Горный» и ручья «7 км» в таблице 4.2.1 показано соотношение взвешенной, коллоидной и истинно растворенной форм меди и никеля в водах по результатам эксперимента с использованием фильтрации и равновесного диализа, а также общее содержание этих элементов, определенное из исходной (валовой) пробы и по сумме трех фракций.

Таблица 4.2.1 – Распределение форм миграции никеля и меди в воде по результатам эксперимента с использованием фильтрации и равновесного диализа (мг/л)

Элемент	Формы миграции				
	Общая концентрация (валовая проба)	Общая концентрация (сумма)	Взвешенная	Коллоидная	Истинно растворенная
Родник «Горный» (S-17)					
Ni	0,00332	0,00498	0,00032	0,00197	0,00269
Cu	0,00016	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Ручей «7 км» (W-13)					
Ni	0,0462	0,0684	0,0030	0,0264	0,0390
Cu	0,0179	0,0176	0,0018	0,0044	0,0114

Примечание: н.д. – нет данных

В рассматриваемых водах (таблица 4.2.1) растворенная форма миграции никеля и меди (совокупность коллоидной и истинно растворенной форм) преобладает над взвешенной фракцией и составляет 94-97% для Ni и 90% - для Cu. Доминирующую роль среди растворенных фракций играет истинно растворенная форма: 58-60% для Ni; 72% - для Cu. Находясь в растворенном состоянии, химические элементы могут мигрировать в форме простых ионов и комплексных соединений, что определяет, в том числе, и токсическое воздействие этих элементов на экосистему (Лукина и др., 2004).

Для всех исследуемых вод концентрации Ni и Cu почти не изменяются после фильтрации через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм, то есть, эти металлы мигрируют в растворённой форме (совокупность коллоидной и истинно растворенной форм).

Таким образом, в природных водах в районе озера Имандра (Мурманской области) преобладает растворенная форма миграции химических элементов. Однако появляется существенный ряд химических элементов, для которых взвешенная форма миграции становится преобладающей. Среди растворенных фракций преобладает истинно растворенная форма.

Разные миграционные формы одного и того же химического элемента имеют иногда различную степень токсического воздействия, что непременно необходимо учитывать при

исследованиях в области охраны окружающей среды (Будников, 1998; Давыдова и др., 2014). Растворенные формы тяжелых металлов, несвязанные в комплексы, являются в большинстве случаев токсичными. Катионные формы, например, меди (Cu^{2+} , CuOH^+ , $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$) существенно опаснее ее нейтральных или анионных форм. В то же время связывание меди в металлорганические соединения резко понижает их вредное воздействие (Крайнов и др., 2012). Этот факт является весьма важным при оценке эколого-геохимического состояния природных вод, особенно в зоне влияния сбросов и выбросов горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятий, как, например, в Кольском регионе.

В связи с этим, а также с металлогенетическими особенностями изучаемой территории и влиянием воздушных выбросов никеля и меди, были более подробно изучены формы миграции этих элементов в истинно-растворенной фракции с помощью расчетов в программном продукте PHREEQC.

Так, анализируя неограниченные формы миграции химических элементов, установлено, что никель мигрирует в основном в виде иона Ni^{2+} (рисунок 4.2.3).

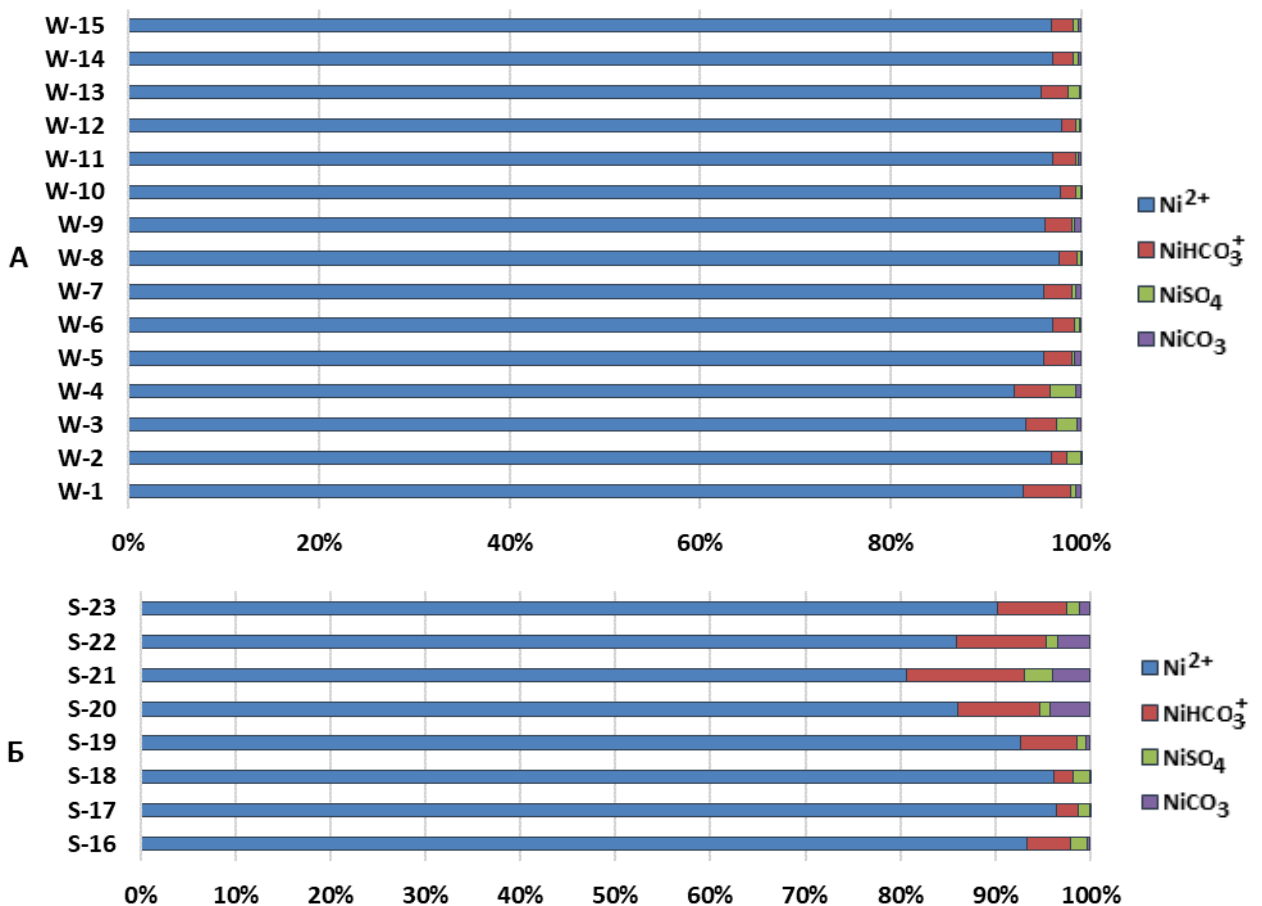


Рисунок 4.2.3 – Формы миграции никеля в поверхностных (А) и подземных (Б) водах района озера Имандра

В поверхностных водах доля этого иона составляет 93-98%, в подземных – 81-96%. Также никель мигрирует в соединении с гидрокарбонат-ионом NiHCO_3^+ . Процентное содержание этого иона напрямую зависит от содержания HCO_3^- . При минимальных концентрациях гидрокарбонат-иона 7,9-11,6 мг/дм³ (точки W-2, 8, 10, 12, S-18) доля NiHCO_3^+ составляет 1,4-2%. Доля комплексного соединения никеля с гидрокарбонат-ионом возрастает до 8-7-12,4% в более минерализованных водах родников предгорья Хибинского массива (S-20, 21, 22), с содержанием HCO_3^- 62,5-101,3 мг/дм³. Здесь возрастает доля NiCO_3 3,4-4,2%.

Так же в водах с наиболее высокой концентрацией SO_4^{2-} никель мигрирует в виде NiSO_4 . В водах озера Имандра (W-3, 4) доля NiSO_4 составляет 2,2-2,7% при содержании сульфат-иона 15-19,6 мг/дм³, а в водах родника «Поддорожный» (S-21) 3% при 35,7 мг/дм³ SO_4^{2-} .

Формы миграции меди в поверхностных и подземных водах района озера Имандра представлены на рисунке 4.2.4. Медь двухвалентная мигрирует в трех основных формах: Cu^{2+} , CuCO_3 , CuOH^+ . В поверхностных, как и в подземных водах преобладает форма Cu^{2+} .

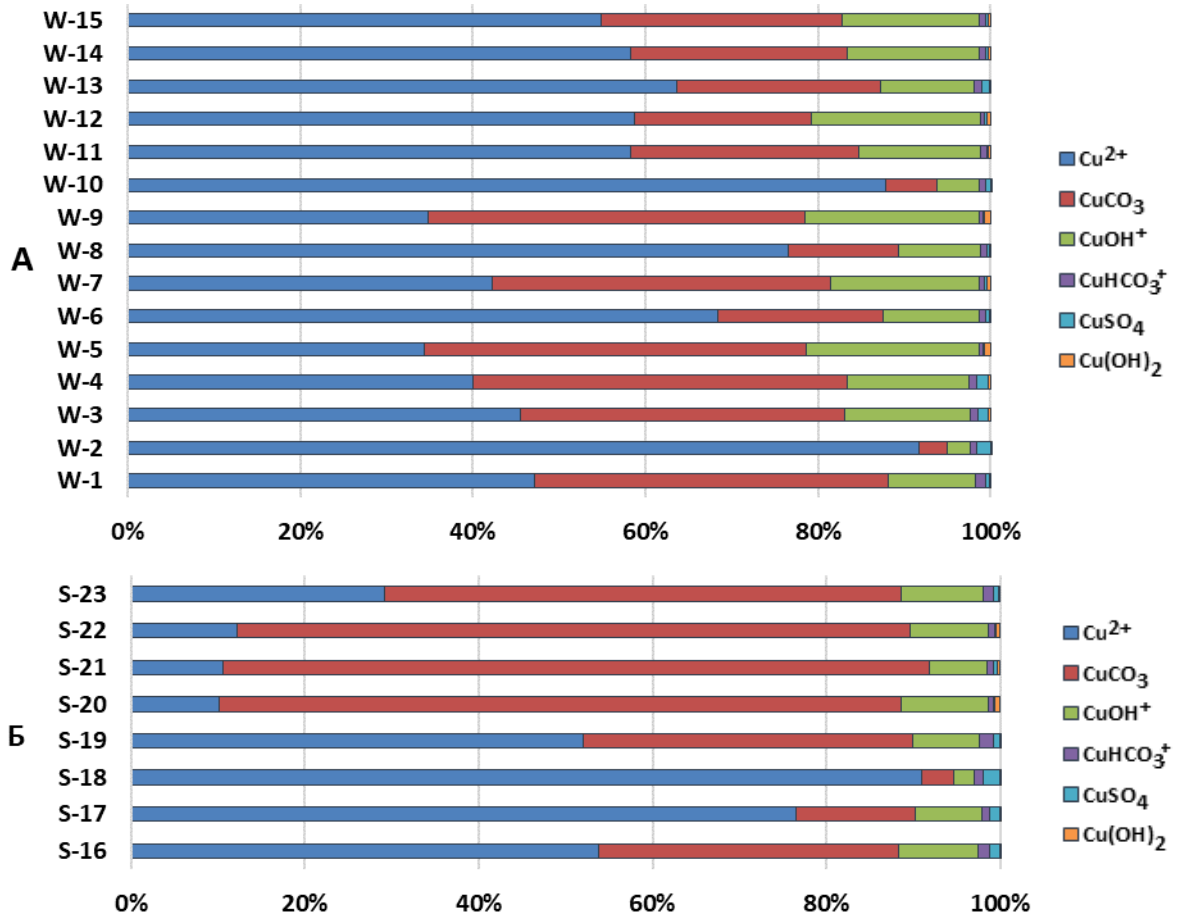


Рисунок 4.2.4 – Формы миграции меди в поверхностных (А) и подземных (Б) водах района озера Имандра

Однако в водах родников предгорья Хибин (S-20, 21, 22), его доля составляет лишь 10-12%, при миграции в виде CuCO_3 77-81%.

Доля CuOH^+ в поверхностных водах составляет 3-20%, в подземных 2-10%. При этом минимальная доля данной формы миграции отмечается в слабокислых водах ($\text{pH} = 5,96-6,27$) озера Дорожного (W-2), реки Курка (W-10) и родника «Дорожного» (S-18).

4.3 Равновесие вод с минералами горных пород

Обогащение вод химическими элементами происходит в процессе взаимодействия их с горными породами. Как было показано в работах (Алексеев и др. 2005; Шварцев и др. 2007) на начальных этапах взаимодействия воды в значительной степени неравновесны с минералами горных пород. Здесь активно протекают процессы растворения первичных минералов, в результате которых максимальное количество элементов переходит в раствор. О резко неравновесном состоянии рассматриваемых вод по отношению к первичным минералам свидетельствует положение точек вне полей устойчивости альбита, анортита, мусковита, анальцима, Mg-хлорита (рисунок 4.3.1).

Согласно оценке степени насыщения вторичными минералами рассматриваемые воды не насыщены относительно оксидов и гидроксидов марганца, магния, свинца, кальция - значения индекса насыщения минимальны (порядка -40...-10) (таблица 4.3.1). При этом значительных отличий в степени насыщенности поверхностных и подземных вод не отмечается.

Таблица 4.3.1 – Значения индекса насыщения (SI) вод района озера Имандра вторичными минералами группы оксидов и гидроксидов

Минералы		Поверхностные воды			Подземные воды		
Название	Формула	мин	средн	макс	мин	средн	макс
Сурик	Pb_3O_4	-45,17	-40,09	-36,71	-48,02	-42,11	-36,78
Платтнерит	PbO_2	-26,83	-23,96	-22,28	-27,82	-24,56	-22,59
Массикот	PbO	-10,10	-9,00	-8,15	-11,03	-9,71	-7,79
Глет	PbO	-9,90	-8,80	-7,95	-10,83	-9,51	-7,59
Известь	CaO	-24,79	-23,14	-22,54	-24,74	-22,48	-20,93
Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-14,90	-13,24	-12,64	-14,85	-12,59	-11,04
Гаусманит	Mn_3O_4	-26,83	-20,30	-16,33	-29,03	-23,33	-16,33
Бернессит	MnO_2	-18,72	-15,37	-13,74	-19,49	-16,30	-13,37
Пиролюзит	MnO_2	-16,66	-13,31	-11,68	-17,43	-14,24	-11,31
Манганит	MnOOH	-10,61	-8,14	-6,74	-11,35	-9,13	-6,65
Пирохроит	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	-10,45	-8,86	-7,69	-11,17	-9,92	-7,88

Минералы		Поверхностные воды			Подземные воды		
Название	Формула	мин	средн	макс	мин	средн	макс
Брусит	Mg(OH) ₂	-9,10	-7,74	-7,19	-9,07	-7,06	-5,99
Гидроксид Ni	Ni(OH) ₂	-7,99	-6,53	-5,38	-30,98	-13,19	-6,78
Гидроксид Zn (ам)	Zn(OH) ₂	-8,08	-6,68	-5,79	-8,69	-7,19	-6,25
Гидроксид Zn	Zn(OH) ₂	-7,80	-6,40	-5,52	-8,41	-6,91	-5,97
Куприт	Cu ₂ O	-6,30	-3,17	-1,27	-6,95	-5,41	-4,41
Гидроксид Cu ²⁺	Cu(OH) ₂	-4,31	-2,78	-1,87	-4,67	-3,84	-3,06
Тенорит	CuO	-3,28	-1,75	-0,84	-3,64	-2,81	-2,03
Халцедон	SiO ₂	-2,00	-0,87	-0,38	-0,66	-0,48	-0,25
Гидроксид Al ³⁺ (ам)	Al(OH) ₃	-1,32	-0,87	-0,20	-2,14	-1,70	-1,35
Бемит	AlOОН	0,90	1,35	2,02	0,08	0,52	0,87
Гиббсит	Al(OH) ₃	1,19	1,64	2,31	0,37	0,81	1,16
Диаспор	AlOОН	2,60	3,05	3,73	1,79	2,22	2,58
Ферригидрит	Fe(OH) ₃	-0,27	1,18	2,92	-1,36	1,13	2,54
Лепидокрокит	FeOОН	1,55	3,00	4,74	0,46	2,95	4,36
Гетит	FeOОН	2,43	3,88	5,62	1,34	3,83	5,24
Гематит	Fe ₂ O ₃	7,26	10,16	13,63	5,09	10,06	12,87

Рассматриваемые воды близки к насыщению оксидами кремния (халцедон, кристобалит), меди (куприт, тенорит, гидроксид двухвалентной меди), а также алюминия (аморфный Al(OH)₃).

Воды района насыщены такими гидроксидами, как бемит, диаспор, гиббсит. Не смотря на низкие концентрации железа в рассматриваемых водах, наблюдается их насыщенность соединениями железа: гетитом, гематитом, лепидокрокитом, а также ферригидритом во всех рассматриваемых водах, кроме родника Дорожный (S-18). Наибольшие значения индекса насыщения подземных вод гематитом отмечены в родниках предгорья Хибинского массива (Молодежный S-20, Поддорожный S-21, Прихибинский S-22).

Согласно анализу диаграмм (рисунок 4.3.1) все рассматриваемые воды насыщены каолинитом и лишь в отдельных точках отмечается равновесие с Са- и Mg-монтмориллонитами и иллитом. Это характерно для родников предгорья Хибин (S-20, 21, 22) и родника Спортивный (S-23), расположенного у подножия северо-западного склона горы Поадзуайвенч на окраине г. Мончегорск.

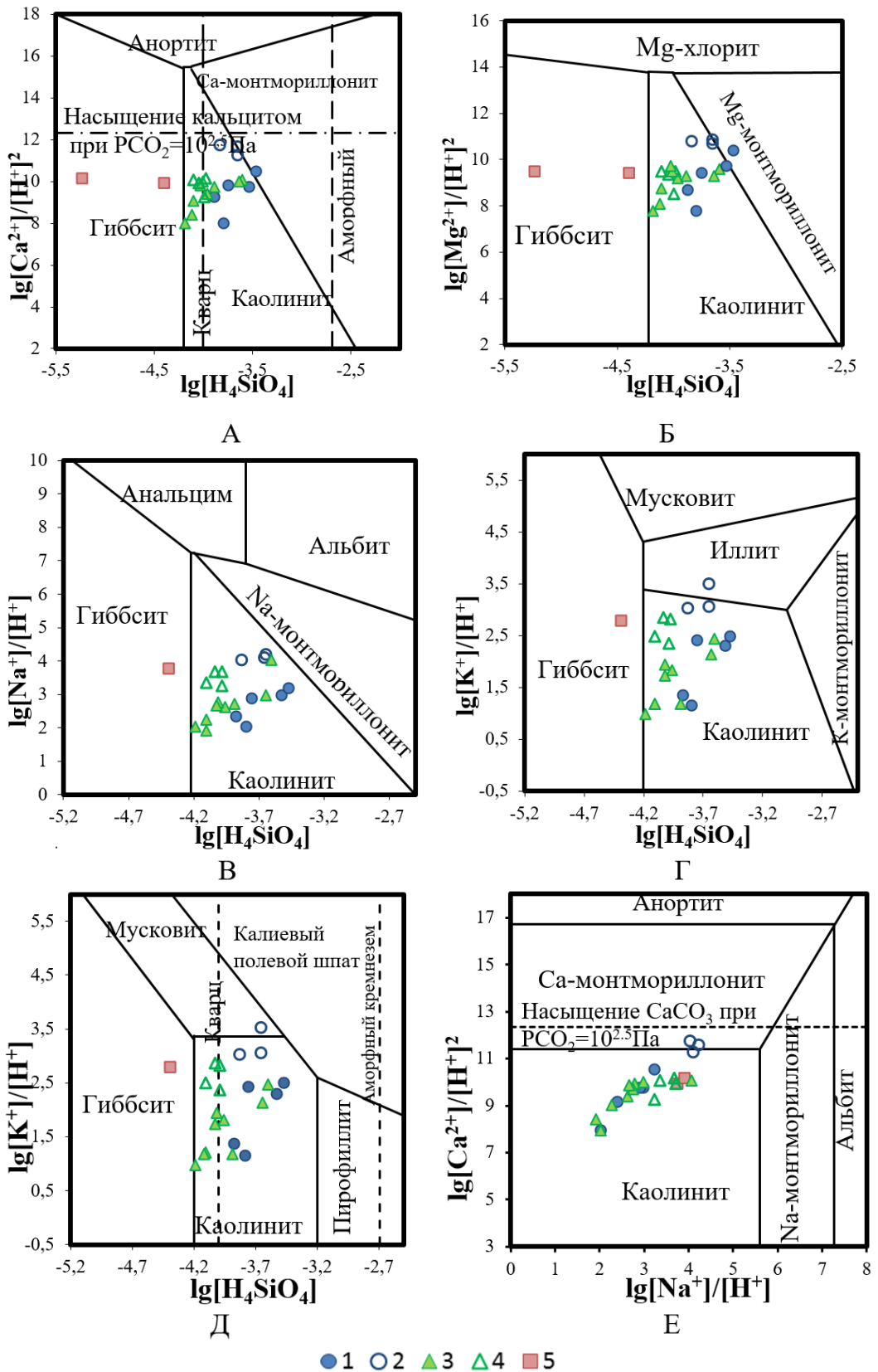


Рисунок 4.3.1 – Диаграммы полей устойчивости алюмосиликатных минералов с нанесением данных по химическому составу природных вод водосбора озера Имандра: 1 - подземные воды, приуроченные к холмисто-увалистой равнине; 2- подземные воды предгорья Хибинского массива; 3 - поверхностные воды, приуроченные к холмисто-увалистой равнине; 4 – поверхностные воды Хибин; 5 – озеро Имандра

При изучении минерального состава двух почвенных разрезов в районе исследования в изобилии обнаружены аморфные неорганические твердые фазы – гели – гидрогётит-гель, гель гидроксид кремния (опал), нонтронит, гидрослюда и т.д. (Евтюгина и др., 2019).

Насыщенность рассматриваемых вод вторичными минералами, как и стадия эволюционного развития системы вода-порода, определяется, прежде всего, природными условиями района исследования.

Среднегодовое количество осадков довольно значительно и для большей части территории составляет 550-600 мм, иногда достигая 1000 мм и более в горных районах. Средний многолетний подземный сток составляет 3-5 л/(сек*км²) (Ресурсы поверхностных..., 1970). Соответственно, при столь непродолжительном контакте с горными породами происходит формирование ультрапресных подземных вод, находящиеся на начальных стадиях взаимодействия в системе вода-порода.

В водах происходит накопление основных солеобразующих компонентов и кремния, при этом масштабы накопления последнего сопоставимы с масштабами обогащения вод кальцием, и превышают масштабы поступления магния и натрия, а отсутствие геохимических барьеров в виде равновесных фаз только способствует этому процессу. Горные породы являются также источником элементов-гидролизатов, однако геохимическая среда рассматриваемых вод не способствует их накоплению в растворе. Указанные элементы являются хорошими комплексообразователями, но низкие концентрации органических кислот в водах не способствуют формированию растворенных органоминеральных комплексов, что приводит к образованию оксидных и гидроксидных соединений и осаждению последних из раствора.

Насыщенность вод вторичными оксидами и гидроксидами алюминия и железа также, как и каолинитом является типичным для рассматриваемых природно-климатических условий. Однако наличие среди околоравновесных фаз тенорита и куприта свидетельствует о наличии дополнительного источника поступления меди вследствие техногенного воздействия.

Наличие большого количества равновесных вторичных фаз, представленных оксидами и гидроксидами, а также глинами способствует активному развитию в водах сорбционных процессов, что также будет способствовать выводу из раствора не только минералообразующих элементов, но и ряда других химических элементов, сорбированных на поверхности вторичных соединений. Этот факт нельзя игнорировать при оценке эколого-геохимического состояния вод и степени антропогенного воздействия на природные воды.

4.4 Оценка токсичности природных вод методом биотестирования

Живые организмы (включая человека) могут быть подвержены негативному влиянию не только отдельных загрязняющих веществ, но и комплексному влиянию веществ, содержащихся в водах и почвах в концентрациях значительно ниже ПДК или фоновых значений. Такие комплексы веществ могут иметь аддитивный или даже синергический эффект. Токсическое воздействие загрязнения на организмы и экосистемы не может быть оценено только с помощью химического анализа (Fernandez et al., 2005), а также с помощью различных тестов на токсичность (DeFu et al., 2015; Wolfram et al., 2012).

В настоящее время оценку качества воды, включающую содержание физиологически вредных примесей, принято контролировать дифференцированными химическими анализами, а пригодность – сравнением с существующими нормативами. Однако количественное определение отдельных токсикантов, из-за различного характера их взаимодействия, не дает возможности в полной мере дать оценку биологической опасности экосистемам, что делает систему биологического тестирования более привлекательной. Предоставляя мало информации о природе токсического агента, биотестирование дает возможность с большой достоверностью определять степень общей токсичности объекта исследований. Методы биотестирования отличаются высокой чувствительностью и позволяют идентифицировать наличие токсических веществ в концентрации до 10^{-8} %.

Результаты биотестирования природных вод исследуемого района с использованием тест-объекта *Paramecium Caudatum* – инфузория-туфелька (ФР 1.39.2015.19242) представлены в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 – Результаты биотестирования природных вод центральной части Кольского региона (тест-объект *Paramecium Caudatum*)

Пункт опробования		Индекс токсичности (Т), %.	Степень токсичности
Зона воздействия			
W-2	озеро Дорожное	16	Допустимая
W-6	озеро Монче (исток реки Монча)	22	Допустимая
W-13	микроручей «7 километр»	8	Допустимая
W-13	микроручей-2 «7 километр»	26	Допустимая
W-15	ручей юго-восточного склона горы Ниттис	27	Допустимая
S-16	родник «Болотный»	16	Допустимая

Продолжение таблицы 4.4.1.

Пункт опробования		Индекс токсичности (Т), %.	Степень токсичности
Зона воздействия			
S-17	родник «Горный»	9	Допустимая
S-18	родник «Дорожный»	10	Допустимая
S-23	родник «Спортивный»	27	Допустимая
Условно-фоновая зона			
W-8	река Вите (озеро Девичье Ламбино)	23	Допустимая
W-10	река Курка	12	Допустимая
S-19	родник «Кислая губа»	3	Допустимая
Район Хибинского массива			
W-5	озеро Малый Вудъявр	27	Допустимая
W-7	река Айкуайвенйок	20	Допустимая
W-9	река Вудъяврйок	23	Допустимая
W-11	река Малая Белая	20	Допустимая
S-20	родник «Молодежный»	40	Допустимая
S-21	родник «Поддорожный»	43	Умеренная
S-22	родник «Прихибинский»	16	Допустимая

Значение индекса токсичности изменяется в пределах от 3 до 43%. Рассматриваемые воды в основном характеризуются допустимой степенью токсичности. Только воды родника «Поддорожный» (S-21) отличаются умеренной степенью токсичности, где индекс токсичности составляет 43% (рисунок 4.4.1).

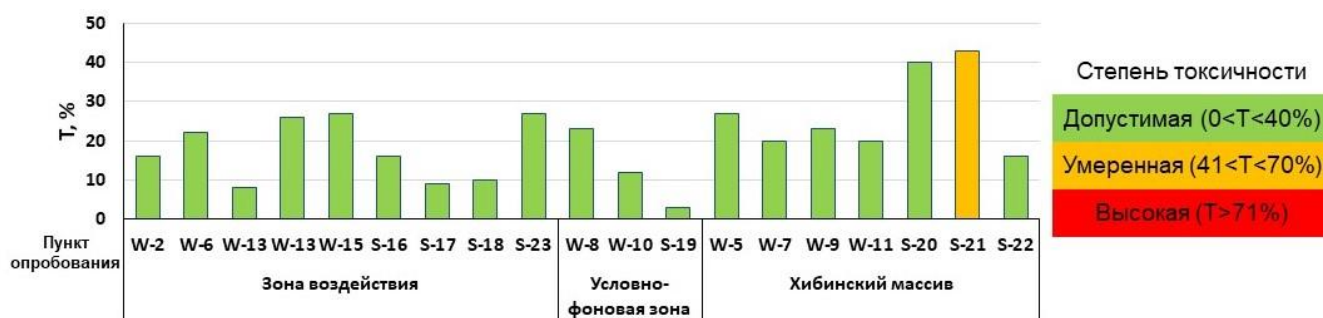


Рисунок 4.4.1 – Значения индекса токсичности (Т, %) для природных вод исследуемого района по результатам биотестирования с тест-объектом *Paramecium Caudatum*

Данный родник расположен в придорожной низине, на промплощадке апатит-нефелиновой обогатительной фабрики (Ананьев, 2010). Это, возможно, повлияло на формирование химического состава вод родника и появление токсического эффекта.

Воды родника «Молодежный» (S-20) характеризуются допустимой степенью токсичности, однако, значение индекса токсичности 40% находится на границе классификационной группы. Данный родник находится в районе бывшего пос. Молодежный, вниз по склону от автотрассы.

Минимальный индекс токсичности отмечается у вод родника «Кислая губа» (S-19), значение индекса составляет 3%. Родник находится в сосново-елово-березовом лесу, на восточном берегу Кислой губы озера Имандра, в 50 м от базы отдыха (Ананьев, 2010).

Стоит отметить, что родниковая вода активно используется населением для питьевых целей, а многочисленные озера являются популярными местами отдыха.

Таким образом, природные воды района водосбора озера Имандра Кольского полуострова характеризуются допустимой степенью токсичности, что может говорить о том, что экосистема способна поглощать и перерабатывать токсикант в определенных пределах. Острое токсическое действие начнется, когда этот потенциал будет исчерпан (Александрова, 2009). Воды исследуемого района находятся не в критическом экологическом состоянии, но уже сейчас на фоне долговременного антропогенного воздействия стоит принимать меры для предотвращения развития хронического токсического эффекта.

4.5 Оценка токсичности химических элементов в воде с использованием модели USEtox

Результаты проведенных исследований показывают, что такие природные среды как вода и почва в зоне техногенного воздействия накапливают значительное количество элементов, в том числе токсичных, что представляет потенциальную угрозу для здоровья человека. Многие ионы металлов потенциально токсичны, поэтому важно понимать их транспорт и распределение в окружающей среде, а также пути, по которым они могут передаваться человеку (Spurgeon et al., 2011). Воздействие тяжелых металлов может вызвать множество проблем со здоровьем у людей. Длительное воздействие может вызывать некоторые неврологические расстройства (Alquezar et al., 2020; Chin-Chan et al., 2015). Поэтому встает вопрос об оценке воздействия загрязняющих веществ на отдельные элементы экосистем, воздух, воду, почву, в том числе на человека и его здоровье. В связи с этим, была проведена оценка токсичности отдельных элементов для человека, для чего была выбрана экологическая модель USEtox.

Все расчеты проводились для никеля и меди, поскольку они признаны основными загрязнителями исследуемой территории (Barsova et al., 2019; Kyllönen et al., 2020; Moiseenko et

al., 2006; Сандимиров, 2020). По основным свойствам Ni и Cu обладают одинаково высоким уровнем биохимической активности, отсутствием чрезмерной токсичности и долгой экологической судьбой (Shabbir et al., 2020; Shahzad et al., 2018). Однако, в отличие от Cu, Ni является канцерогенным и обладает более высокой способностью к биоконцентрации (Rinklebe, Shaheen, 2017; Shahzad et al., 2018). Cu, напротив, имеет более высокую эффективность накопления и растворимость (Кривошеин и др., 2000).

Расчеты показателей воздействия на здоровье человека в поверхностных водах района отражают тенденцию распределения валовых значений содержания Ni и Cu в воде, которые в свою очередь зависят от расстояния от источника загрязнения (таблица 4.5.1).

Таблица 4.5.1 – Содержание ($C_{\text{вода}}$, мкг/дм³) и общий показатель токсического воздействия на здоровье человека (IS, STU_{hum}) никеля и меди в поверхностных водах исследуемого района

Пункт опробования		Расстояние от источника загрязнения, км	Ni		Cu	
			$C_{\text{вода}}$	IS	$C_{\text{вода}}$	IS
Зона воздействия						
W-6	озеро Монче (исток реки Монча)	4	26,9	791	15,2	9954
Условно-фоновая зона						
W-8	река Вите (озеро Девичье Ламбино)	14,7	5,97	25	5,04	465
W-10	река Курка	27,5	3,83	0,18	3,9	3,9
W-12	река Чуна	34,5	0,96	10	1,05	248
Район Хибинского массива						
W-11	река Малая Белая	33	0,063	0,1	0,043	1,5
W-5	озеро Малый Вудъявр	44,5	0,079	0,2	0,27	13,9
W-9	река Вудъяврйок	47,5	0,102	0,1	0,154	3,4
W-7	река Айкуайвенйок	59	0,061	0,02	0,154	1

Наибольшие значения показателя токсического воздействия отмечаются для озера Монче, расположенного в 4 км от комбината

В целом общий уровень значений показателя токсического воздействия в воде для меди выше, чем для никеля.

ГЛАВА 5. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ

5.1 Минералогический и элементный состав почв

Почва является депонирующей средой, накапливающей химические элементы, особенно это становится важным в условиях длительной техногенной нагрузки (Varsova et al., 2019). Почвы Кольского полуострова достаточно хорошо исследованы в разных аспектах в связи с высоким уровнем антропогенного влияния (Кашулина, 2017, 2018; Елсукова и др., 2019; Ревич, 2020).

На распределение химических элементов по почвенному разрезу влияют многие параметры, в том числе рН и содержание органического вещества (таблица 5.1.1).

Таблица 5.1.1 – Значения рН_{Н2О} и содержания органического вещества почв исследуемого района

Зона	Пункт опробования	Горизонт	Расстояние, км	рН _{Н2О}	Органическое вещество почвы, %
Зона воздействия	СП-5	В	2	4,68	4,13±0,62
	СП-6	Е		-	2,99±0,6
		В		-	10,6±1,06
	СП-7	С			5,74
	СП-12	Е	5	4,67	1,23±0,25
		В1		4,76	2,75±0,55
		В2С		4,86	3,56±0,53
	СП-8	Е	7	4,72	2,13±0,43
		В		4,60	7,26±0,73
	СП-9	В1	7,5	4,61	4,79±0,72
		В2		5,08	2,81±0,56
		С		5,27	2,18±0,44
	СП-10	Е	14,7	4,31	3,69±0,55
		В1		4,61	2,28±0,46
		В2		4,83	1,67±0,33
		С		4,86	1,58±0,32
СП-18	Е	27	4,55	4,16±0,63	
	В		4,98	4,94±0,74	
СП-2	В	27,5	5,00	4,69±0,7	

Зона	Пункт опробования	Горизонт	Расстояние, км	pH _{H2O}	Органическое вещество почвы, %	
Условно- фоновая зона	СП-15	О	30	4,58	3,68±0,55	
		А		5,12	1,39±0,28	
		Е		5,50	1,64±0,33	
		В		5,16	1,82±0,36	
	СП-11	Е	34,5	4,56	1,87±0,37	
		В1		4,65	1,49±0,3	
		В2		4,60	1,17±0,23	
		С		4,89	0,51±0,1	
	СП-13	Е	37,5	4,43	1,29±0,26	
		В1		4,68	1,94±0,39	
		В2		4,85	1,27±0,25	
		С		4,76	0,66±0,13	
	СП-17	Е	60	4,60	3,69±0,55	
		В		5,04	1,28±0,26	
	Район Хибинского массива	СП-1	В	33	5,54	2,6±0,52
		СП-4	В	44,5	5,00	31,3±3,13
СП-3		В	47,5	5,29	7,41±0,74	
СП-16		А	58,5	6,62	4,16±0,62	
		Е		6,51	7±0,7	
		В		6,50	2,73±0,55	

Рассмотренные почвы в основном характеризуются кислой и слабокислой реакцией среды, значения pH варьируются в пределах от 4,31 до 5,74 для западной части водосбора озера Имандра, и от 5,0 до 6,62 для района Хибинского массива. Полученные данные укладываются в диапазон типичных значений pH для подзолистых почв (Почвоведение, 1988). Отмечается возрастание значений pH с глубиной по почвенному профилю. В среднем наиболее кислая реакция характерна для подзолистого горизонта: 4,75 в зоне воздействия, 4,53 в условно-фоновой зоне. Почвы Хибинского массива имеют более высокие значения pH, в среднем здесь отмечается слабокислая реакция (pH=5,91) – рисунок 5.1.1.

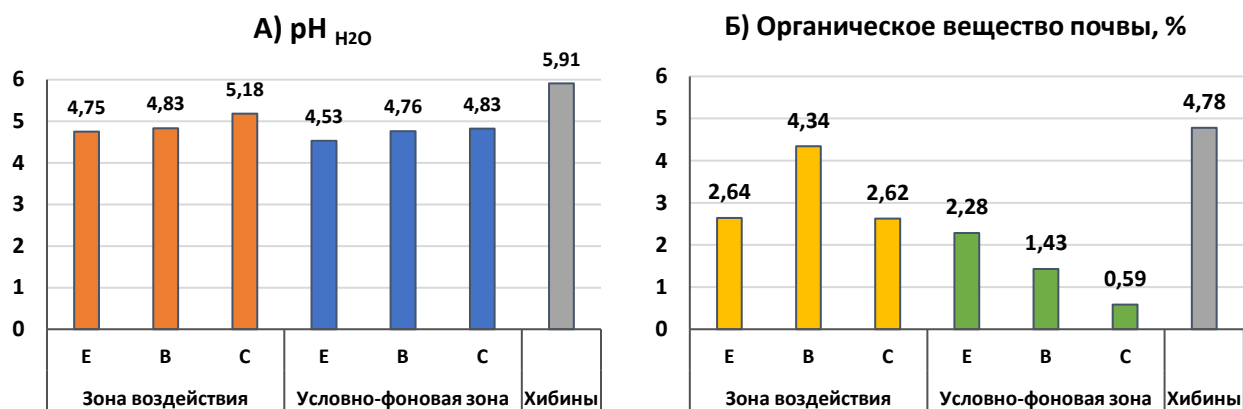


Рисунок 5.1.1 – Распределение средних значений pH H₂O (А) и содержания органического вещества (Б) по почвенным горизонтам в разных зонах исследуемой территории

Содержание органического вещества почвы изменяется в среднем в пределах от 2,64 до 4,34 % с максимумом в иллювиальном горизонте для зоны воздействия, от 0,59 до 2,28 % с максимумом подзолистом горизонте для условно-фоновой зоны. Такая разница в распределении органического вещества по почвенному профилю может быть связана с эродированностью верхней части почвенно-растительного покрова в зоне воздействия пылегазовых выбросов комбината, что способствует более свободной миграции органических веществ в ниже лежащие слои почвы. В целом диапазон полученных значений согласуется с результатами исследований других авторов (Почвоведение, 1988; Переверзев, 2011).

На территориях с высоким техногенным влиянием часто фиксируется значимое концентрирование химических элементов, накопление и миграция которых зависит от строения и свойств почвенного профиля. Установлено, что в верхних органогенных горизонтах почвы в зоне влияния комбината «Североникель» (г. Мончегорск) зафиксированы чрезвычайно высокие концентрации Ni и Cu (Экологический атлас..., 1999; Кашулина, 2017; Елсукова и др., 2019) – рисунок 5.1.2.

Концентрации Ni, Cu, Co, Cd и Pb в верхнем горизонте почвы выше, чем в иллювиальном (Елсукова и др., 2019). Все это говорит о том, что данные металлы поступают из загрязненной атмосферы (Ettler, 2015; Елсукова и др., 2019; Evseev, Krasovskaya, 2017; Kyllönen et al., 2017).

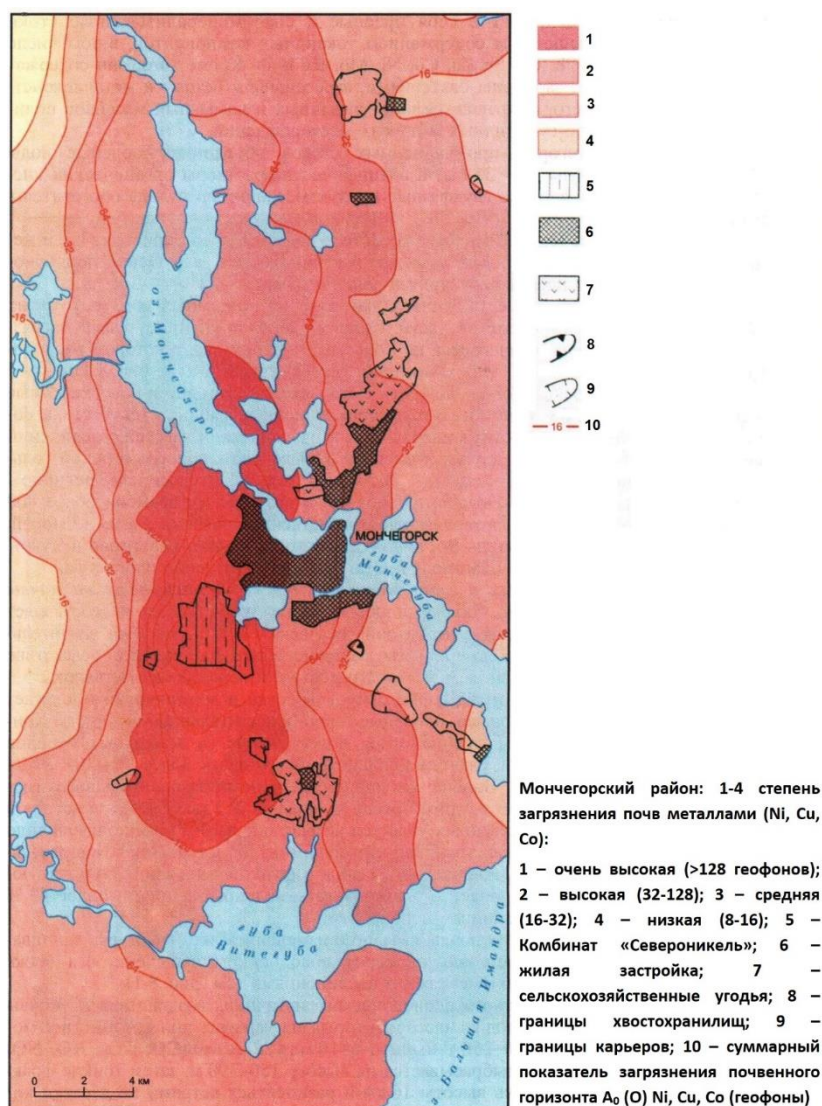


Рисунок 5.1.2 – Степень загрязнения почв металлами в Мончегорском районе (Экологический атлас...,1999)

В почвах, подверженных техногенному загрязнению, накапливаются не только так называемые приоритетные, но и сопутствующие в рудах и других вспомогательных веществах (топливо и прочее) рассеянные элементы (Лукина и др., 2004).

В сравнении с кларками верхней части континентальной коры по (Ярошевский, 2009) для рассматриваемых почв наблюдается пониженное содержание большинства элементов по всем горизонтам, в том числе редкоземельных. Исключения составляют Br, I и Cl, что объясняется близостью моря, а также Te, Se, повышенное содержание которых связано с металлогенетическими особенностями территории (таблица 5.1.2). Также для никеля наблюдается превышение кларка до 1,5 раз для горизонта В для точек, в 2-7 км от комбината (СП-5, 6, 8, 9).

Таблица 5.1.2 - Значения кларка концентраций химических элементов в почве относительно кларков химических элементов верхней части континентальной коры по Ярошевскому, 2009

Зона воздействия
Te₂₂-I₂₁-Br_{7,2}-Cl_{4,2}-Se_{3,9}-Ag_{0,83}-Pd_{0,82}-Ni_{0,75}-Cu_{0,63}-Hg_{0,5}-Cl_{0,36}-Cr_{0,35}-Co_{0,28}=Cd-Fe_{0,26}-V_{0,22}=As-Zn_{0,2}-Li_{0,19}-Al_{0,18}-Pb_{0,16}-Mg_{0,15}=Ce-Mo_{0,14}-Mn_{0,12}=Pr-La_{0,11}-Nd=Eu=Gd=Th-Cs_{0,1}=Sm-In_{0,09}-Tb_{0,08}=Dy-Y_{0,06}=Ho=Er=Tl=Bi=U-Rb_{0,05}=Ba=Tm=Yb=Lu-Be_{0,03}=Ca=Nb=Sn=Sb-K_{0,02}-Sr_{0,01}=Zr=W
Условно-фоновая зона
Te_{7,1}-I_{5,9}-Cl_{2,6}-Se_{1,6}-Br_{0,88}-Pd_{0,31}-Ag_{0,19}-Hg_{0,18}-Mo_{0,17}-Fe_{0,16}-Li_{0,15}-Cu_{0,14}=Ga-V_{0,12}=Zn=Ce-Cr_{0,11}=Ni-Ti_{0,1}=Pb-As_{0,09}=Pr=Th-Al_{0,08}=Co=La=Nd-Cd_{0,07}=Cs_{0,07}-Sm_{0,07}-Eu_{0,07}-Gd-Mg_{0,05}=Sc=Mn=Rb=Tb=Bi-In_{0,04}=Dy=U-Be_{0,03}=Y=Ho=Er=Tm=Yb=Lu=Tl-Nb_{0,02}=Sn=Ba-V_{0,01}=K=Ca=Ge=Sb=Hf=W
Район Хибинского массива
Pd₄₀-I_{34,3}-Te_{14,5}-Se₁₂-Br_{7,8}-Cl_{5,3}-Ag_{4,7}-La_{2,7}-Ce_{2,6}-Pr_{2,3}-Eu_{1,9}-Nd_{1,85}-Nb_{1,51}-Sm_{1,46}-Gd_{1,31}-Zr_{1,24}-Hf_{1,14}-As_{1,12}-Sr_{1,02}-Tb_{0,96}-Dy_{0,86}-Mo_{0,81}-U_{0,8}-Y_{0,65}=Ho=Be-Th_{0,62}=Er-Tm_{0,52}-Zn_{0,51}-Yb_{0,46}-Hg_{0,4}-Lu_{0,38}-Cd_{0,37}-Al_{0,31}=Cu-Pb_{0,3}-Mn_{0,28}-Cs_{0,24}-Ba_{0,22}-Li_{0,18}-W_{0,17}-Fe_{0,15}-Ni_{0,14}=Co-Sb_{0,13}-Rb_{0,12}-Na_{0,11}-Mg_{0,08}=V=Cr-K_{0,06}-In_{0,05}=Sc=Bi=Tl-Ta_{0,04}-Sn_{0,03}

В почвах Хибинского массива также наблюдаются превышения по Pd, Ag, Zr, Hf, As, Sr и PЗЭ.

Те же закономерности по превышениям содержания химических элементов в выборке (исключая хлор) наблюдаются и при сравнении со значениями кларков по (Григорьев, 2009).

В сравнении с кларком почв Земли (Алексеев, Алексеев, 2013), в изучаемых почвах наблюдаются повсеместные превышения по Cl. Для Ni и Cu наблюдается превышение по всем горизонтам в зоне наиболее интенсивного воздействия выбросов комбината (СП-5...СП-10), тогда как в условно-фоновых точках (СП-11 и 13) такого не наблюдается (значения кларка концентрации <1).

По сравнению с кларком городских почв (Алексеев, Алексеев, 2013) наиболее отчетливо выделяется Ni – с аналогичным (как и в сравнении с кларком почв Земли) распределением превышений. По меди превышение в 1,5 раза есть только для горизонта В в точках СП-5 и СП-8. Содержание остальных элементов (исключая Cl) ниже кларковых значений.

По средней концентрации элементов в верхней части континентальной коры (Taylor, McLennan, 1985) также есть превышения для рассматриваемых почв по PЗЭ и Hf в районе Хибин (СП-3), и для Ni до 2 раз и Cu до 2,4 раз в зоне воздействия.

Содержание V, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg, Pb также оценивалось относительно валовой предельно (ПДК) или относительно (ОДК) допустимой концентрации для почв согласно (СанПиН 1.2.3685-21). Единичные случаи превышения норматива отмечены для почв Хибинского массива (СП-3) для Zn 1,2 ОДК и As 2,2 ОДК. В зоне воздействия содержание Cu составляет 1,8 ОДК для иллювиальных горизонтов, Ni 1,2-4,4 ОДК. Для других рассматриваемых элементов превышения отсутствуют.

На территории Мурманской области осуществлялся контроль за химическим загрязнением почвы по следующим веществам и химическим соединениям: бенз(а)пирен, никель, кадмий, мышьяк, медь, нефтепродукты, цинк, ртуть, свинец, микробиологическим и паразитологическим показателям (Доклад о состоянии..., 2020). Согласно этим данным, имеются превышения нормативов по меди и никелю на отдельных административных территориях: г. Мончегорск, Печенгский район (рисунок 5.1.3) – местах расположения основных источников промышленного загрязнения области: горно-металлургических комбинатов «Североникель» и «Печенганикель».

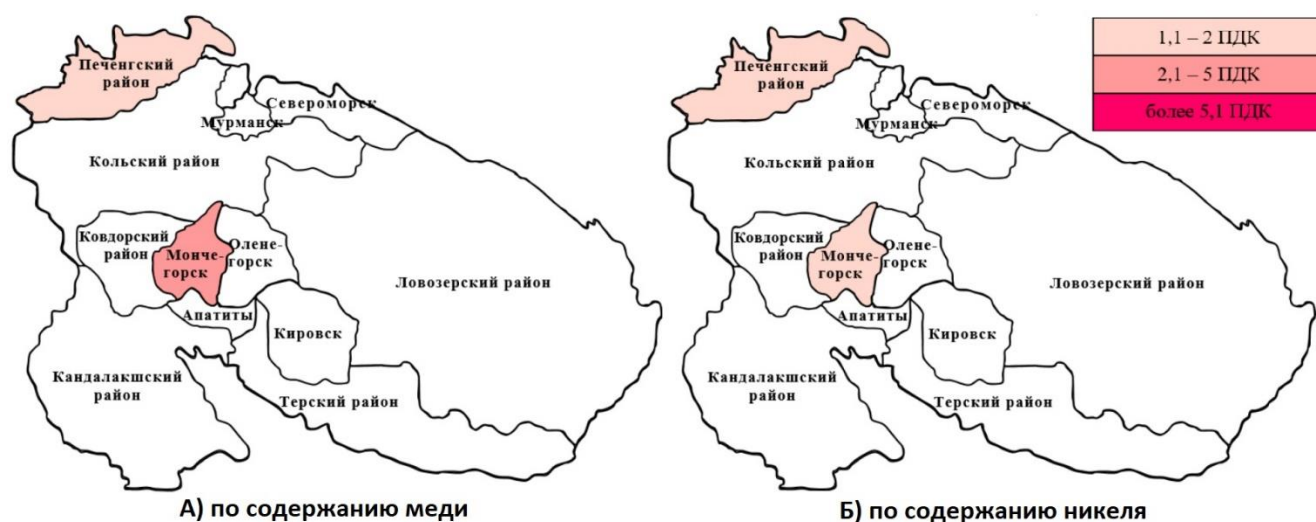


Рисунок 5.1.3 – Ранжирование административных территорий Мурманской области по средней концентрации химических веществ в почве населенных мест за 2017-2019 гг. (по данным социально-гигиенического мониторинга) (Доклад о состоянии..., 2020)

Для подзолистых почв, формирующихся в холодных местностях с хорошим промывным режимом, характерен элювиально-иллювиально-дифференцированный профиль: подзолистый или элювиальный горизонт (E) обедненный химическими элементами относительно других минеральных горизонтов, иллювиальный горизонт B, образовавшийся в результате иллювиального накопления алюминиево-железисто-гумусовых комплексных соединений, постепенно переходящий в материнскую породу (C). Как видно на рисунке 5.1.4 в горизонте E наблюдается пониженное содержание большинства химических элементов относительно других

горизонтов. Исключения составляют Та, Рб и Вi для зоны воздействия, Мо, Аg и Sn для условно-фоновой зоны.

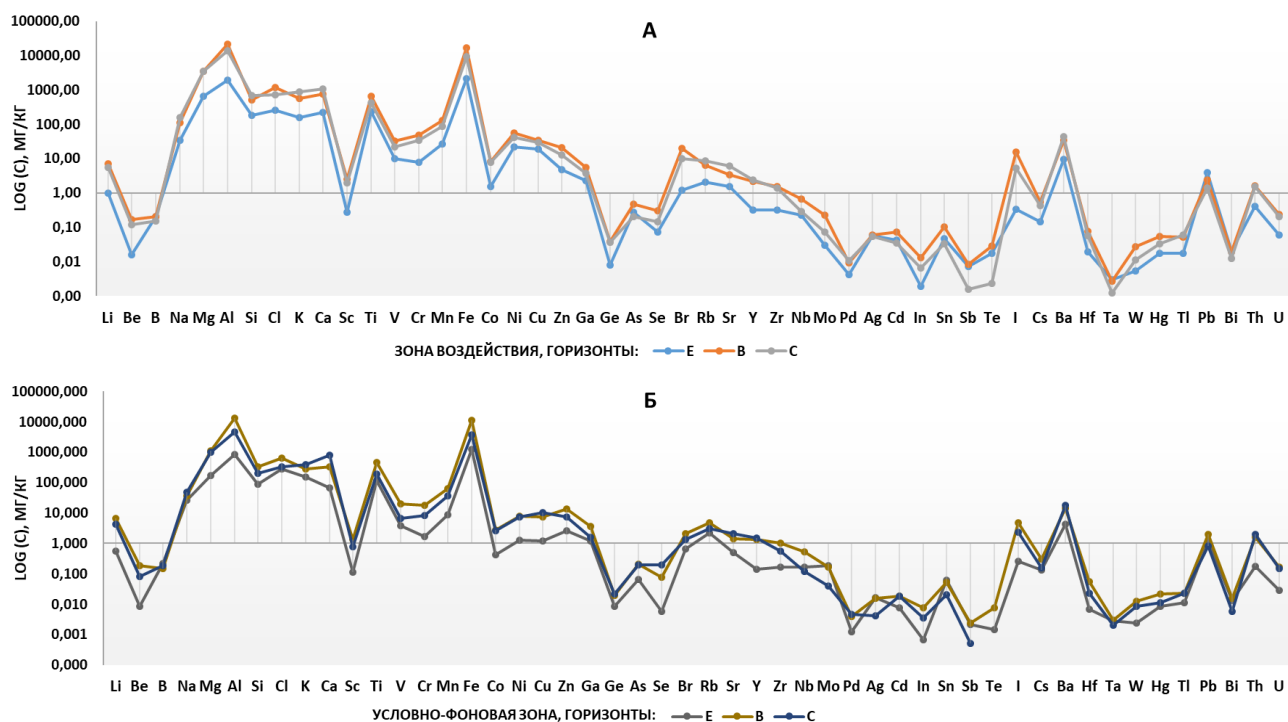


Рисунок 5.1.4 – Содержание химических элементов в различных почвенных горизонтах в зоне воздействия (А) и условно-фоновой (Б)

В иллювиальном горизонте В, согласно особенностям генетического профиля подзолистых почв, происходит концентрирование химических элементов. Это находит отражение в геохимических рядах (таблица 5.1.3), где для иллювиальных горизонтов наблюдается большее количество элементов, с коэффициентом концентрации >1.

Таблица 5.1.3 – Значения коэффициентов концентраций химических элементов в почве

Зона	Почвенный горизонт	Геохимические ряды
Зона воздействия	Е	Pb_{1,55}-Bi_{1,22}-Te_{1,02}-Cu₁-Cd_{0,94}-Sb_{0,9}-Ni_{0,89}-B_{0,82}-Ag_{0,68}-Sn_{0,68}-Hg_{0,58}-V_{0,57}-Ti_{0,55}-Si_{0,53}=As-Tl_{0,52}-Ga_{0,45}-Mg_{0,36}=Co-Cr_{0,35}-Cl_{0,33}=Cs-Se_{0,31}-Rb_{0,3}-Zn_{0,29}-In-Ca_{0,28}=Mn-K_{0,26}-Ba_{0,25}-Fe_{0,24}-Sc_{0,22}-Li_{0,21}-Th_{0,19}-Nd_{0,15}=Ta-Al_{0,14}=Pr=Sm-La_{0,13}=Gd-Br_{0,12}=Mo=Ce=W=U-Tb_{0,11}-Ge_{0,09}=Dy-Na_{0,08}=Y=Ho-Eu_{0,07}=Er=Tm=Yb=Lu-Nb_{0,06}=Pd-Be_{0,04}=I-Sr_{0,03}-Hf_{0,02}-Zr_{0,01}
	В	Ni_{2,23}-Cr_{2,18}-Br_{2,01}-Sc_{1,94}-In_{1,93}-Co_{1,9}-Fe_{1,86}-Mg_{1,85}-Hg_{1,83}-Cu_{1,81}-I_{1,78}-V_{1,77}-Te_{1,69}-Cd_{1,65}-Al_{1,6}-Ti_{1,58}-Cl_{1,57}-Li_{1,48}=Tl-Sn_{1,46}-Si_{1,45}-Mn_{1,39}-Se_{1,29}-Zn_{1,27}-Cs_{1,23}-Bi_{1,22}-Ga_{1,12}-Sb_{1,03}-K_{0,95}-Ca_{0,94}=Mo-Rb_{0,93}=Pb-As_{0,91}-Ba_{0,88}-B_{0,83}-Th_{0,75}-Ag_{0,72}-Lu_{0,71}-Yb_{0,63}-W_{0,6}-Tm_{0,59}-Er_{0,57}-Y_{0,55}-Ho_{0,54}-

Зона	Почвенный горизонт	Геохимические ряды
	В	Dy _{0,52} -U _{0,48} -Tb _{0,46} -Gd _{0,45} -Ge _{0,42} -Sm _{0,4} -Be _{0,39} -Eu _{0,37} -Nd _{0,34} -Pr _{0,3} -Na _{0,27} -Ce _{0,26} -La _{0,25} -Nb _{0,17} -Pd _{0,14} =Ta-Hf _{0,09} -Sr _{0,07} -Zr _{0,05}
	С	Si₂-Mg_{1,9}-Co_{1,85}-Tl_{1,73}-Ni_{1,7}-Cu_{1,61}-Cr_{1,56}-Sc_{1,52}-K_{1,5}-Ca_{1,38}-Rb_{1,25}-V_{1,19}-Li_{1,18}-Ba_{1,17}-Hg_{1,1}-Al_{1,04}=Fe-Ti_{1,03}-In_{1,01}-Br₁-Mn_{0,95}-Cs_{0,94}-Cl_{0,93}-Cd_{0,8}-Zn_{0,79}-Bi_{0,77}-Ga_{0,73}=Lu-Th_{0,71}-Ag_{0,65}-Yb_{0,64}-B_{0,62}-Se_{0,61}-Ce_{0,6}-Y_{0,59}=I=Tm-Er_{0,58}-Ho_{0,56}-Pb_{0,55}-Dy_{0,54}-Gd_{0,52}-Tb_{0,5}-Sn_{0,48}=Sm-Nd_{0,43}-Eu_{0,41}=U-Ge_{0,4}-As_{0,39}=Pr-Na_{0,38}-La_{0,32}-Mo_{0,3}-Be_{0,27}-W_{0,26}-Sb_{0,19}-Pd_{0,16}-Te_{0,14}-Sr_{0,13}-Nb_{0,07}=Hf-Ta_{0,06}-Zr_{0,04}
Условно-фоновая зона	Е	Sn _{0,89} -B _{0,88} -Bi _{0,8} -Mo _{0,76} -Pb _{0,48} -Cl _{0,38} -Rb _{0,33} -Tl _{0,32} -Cs _{0,29} =Hg-Ti _{0,28} =Sb-Si _{0,26} =K-Ga _{0,24} -V _{0,22} -Ag _{0,19} -Cd _{0,17} -Zn _{0,15} -Fe _{0,14} =Ta-Li _{0,12} =As-Ba _{0,11} -Mn _{0,1} =Co=In-Mg _{0,09} =Ca=Sc=Ge=Te-Cr _{0,08} =Th-Na _{0,07} =Br-Al _{0,06} =Cu=U-Ni _{0,05} =W-Y _{0,04} =Nb=Nd=Sm=Gd=Tb=Tm=Lu-I _{0,03} =La=Ce=Pr=Dy=Ho=Er=Yb-Be _{0,02} =Se=Pd=Eu-Sr _{0,01} =Zr=Hf
	В	Li_{1,43}-Fe_{1,23}-In_{1,13}-V_{1,09}-Ti_{1,08}-Sc_{1,04}-Si_{0,97}-Al_{0,95}-Bi_{0,94}-Cl_{0,86}-Zn_{0,83}-Cr_{0,82}-Sn_{0,78}-Pb_{0,77}-Th_{0,75}-Ga_{0,73}-Hg_{0,72}-Rb_{0,7}-Mo_{0,69}=Cs-Mn_{0,67}=Tl-Co_{0,65}-B_{0,59}=Mg-I_{0,55}-K_{0,48}-Lu_{0,46}-Te_{0,45}-Be_{0,43}=Cd-Tm_{0,42}=Yb-Ca_{0,41}=Cu-As_{0,39}-Ba_{0,38}-Er-Tb_{0,37}=Dy-Ho_{0,36}-Y_{0,34}-Se_{0,33}=Gd=U-Ni_{0,32}-Ce_{0,31}-Sb_{0,3}=Sm-Nd_{0,28}=Eu=W-Pr_{0,24}-Ge_{0,21}=Br-Ag_{0,19}-La_{0,18}-Ta_{0,15}-Nb_{0,13}-Na_{0,09}-Hf_{0,07}-Pd_{0,06}-Sr_{0,03}=Zr
	С	Ca₁-Th_{0,92}-Li_{0,89}-Se_{0,86}-B_{0,76}-Tl_{0,65}-K_{0,64}-Sc_{0,61}=Co=Ce-Si_{0,58}-Mg_{0,55}=Cu-In_{0,53}=Nd-Pr_{0,5}-Sm_{0,49}-Ba_{0,47}=Gd=Tb-La_{0,46}-Ti_{0,45}=Zn=Rb=Lu-Cl_{0,44}-Fe_{0,42}=Cd-Dy_{0,41}-Mn_{0,4}=Tm-Cr_{0,39}=Yb-Y_{0,38}=Eu-V_{0,37}=Ho=Er=Hg=Bi-As_{0,36}-Cs_{0,35}-Al_{0,33}-Pb_{0,32}-Ni_{0,31}=Ga=Sn-U_{0,3}-I_{0,26}-Ge_{0,24}-W_{0,2}-Be_{0,18}-Mo_{0,16}-Br_{0,14}-Na_{0,12}-Ta_{0,1}-Pd_{0,07}=Sb-Ag_{0,05}-Sr_{0,04}-Nb_{0,03}=Hf-Zr_{0,02}
Район Хибинского массива		Zr_{6,3}-Sr_{6,2}-Pd₆-Nb_{5,9}-Na_{5,5}-La_{5,4}-Ta_{5,3}-Hf_{5,26}-Pr_{5,17}-Be_{5,1}=Eu_{5,1}-Nd₅=Ce-Sm_{4,9}-U_{4,8}-Gd_{4,7}=W=Tb-Dy_{4,6}=Ho=Y-Er_{4,5}=Tm_{4,45}-Yb_{4,4}-Lu_{4,1}-Ag_{3,9}-As_{3,6}-Th_{3,4}=Mo-Ba_{3,3}=Ge-Sb_{3,2}-Ca_{2,9}-Se_{2,6}-Ga_{2,5}-K_{2,4}-Zn_{2,3}=Mn-B_{2,1}=Cs-I_{1,95}-Rb_{1,9}-Pb_{1,86}-Al_{1,84}-Cd_{1,67}-Br_{1,56}-Cl_{1,4}-Sn_{1,14}-Hg_{1,08}-Li_{1,04}-Tl_{0,94}-Bi_{0,92}-Si_{0,87}-Ti_{0,86}=Te-Mg_{0,81}-In_{0,79}-Cu_{0,76}-Co_{0,74}-Fe_{0,72}-Sc_{0,64}-V_{0,51}-Cr_{0,35}-Ni_{0,34}

При рассмотрении одноименных почвенных горизонтов в зоне воздействия наблюдается повышение концентраций большинства химических элементов относительно условно-фоновой зоны (рисунок 5.1.5).

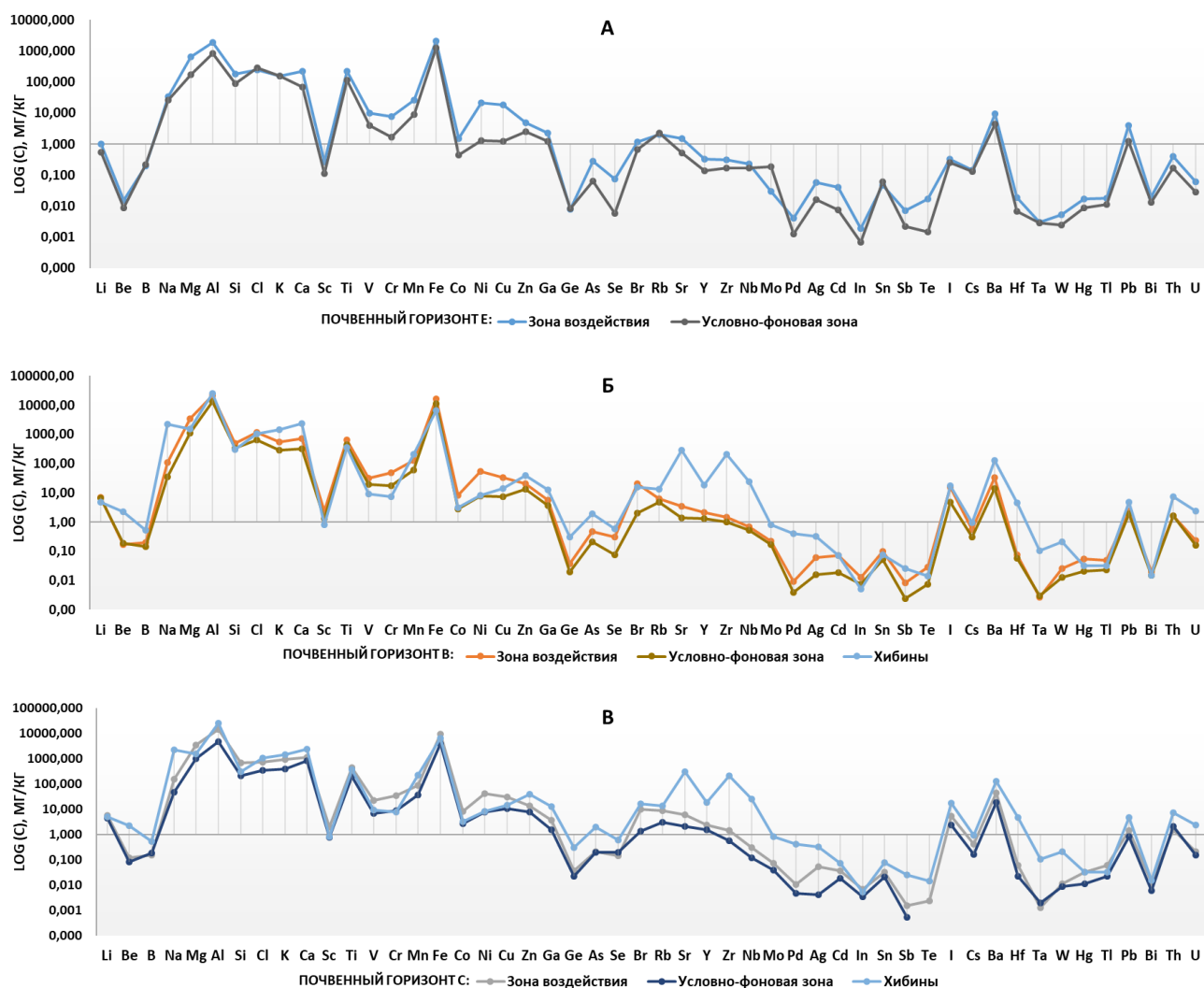


Рисунок 5.1.5 – Содержание химических элементов в различных зонах исследуемого района в почвенных горизонтах Е (А), В (Б) и С (В)

Особенно значительные превышения ($C_{\text{зона воздействия}} / C_{\text{условно-фоновая зона}}$) в горизонте Е наблюдаются для Ni - 17, Cu - 15,4, Se - 12,7; в горизонте В для Br - 9,7; в горизонте С для Ag - 12,7.

Для таких элементов как Se, Ta и Th отмечается возрастание концентрации в горизонте С в условно-фоновой зоне относительно зоны воздействия.

Подробнее рассмотрим содержание в почвах редкоземельных элементов (РЗЭ включающие La и лантаноиды) - рисунок 5.1.6. В горизонте Е содержание этих элементов ниже относительно других почвенных горизонтов. Отмечается, что содержание РЗЭ в почвах района Хибинского массива резко преобладает над их содержанием в почвах западной части водосбора озера Имандра.

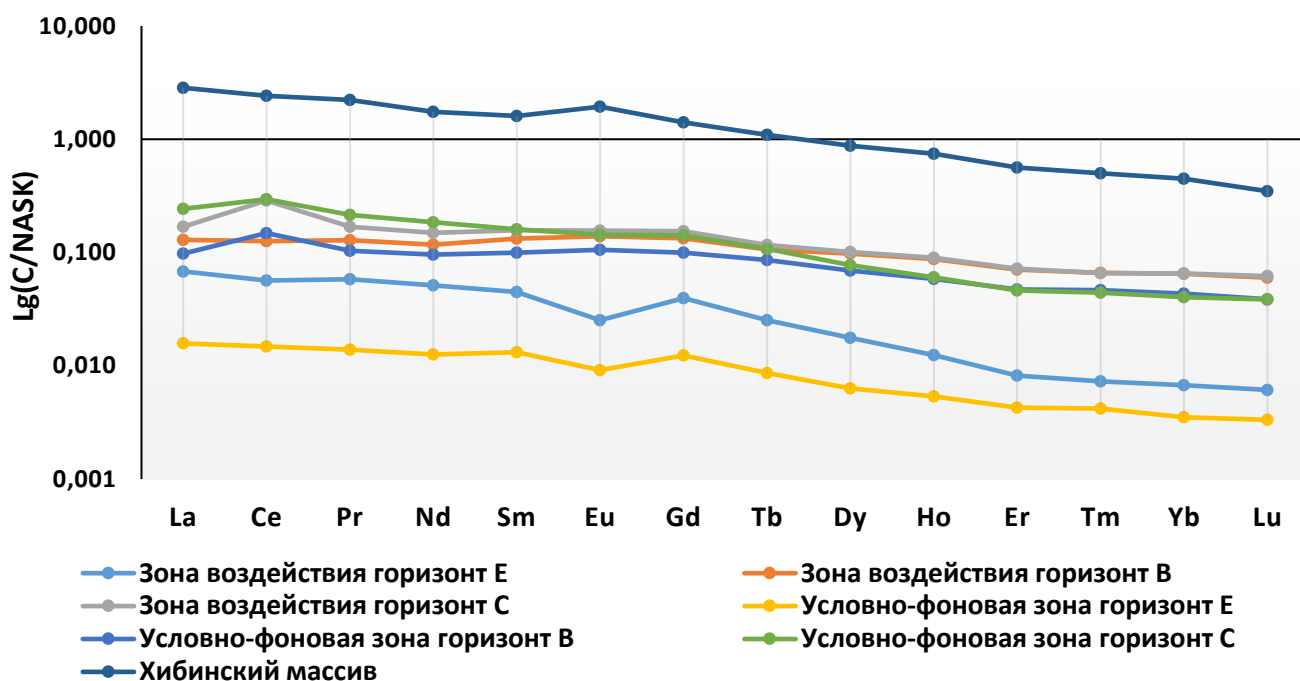


Рисунок 5.1.6 – Графики распределения редкоземельных элементов в различных почвенных горизонтах исследуемого района, нормированные на NASC (Gromet et al., 1984)

Согласно рисунку 5.1.7, содержание РЗЭ в зоне воздействия в подавляющем большинстве случаев превышает их концентрации в одноименных почвенных горизонтах условно-фоновой зоны.

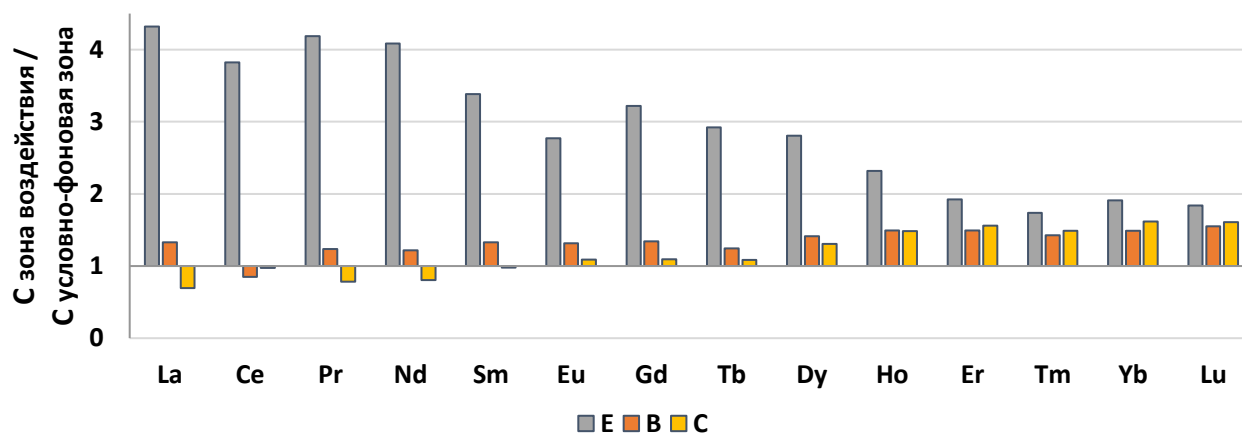


Рисунок 5.1.7 – Отношение содержаний редкоземельных элементов в различных почвенных горизонтах в зоне воздействия ($C_{\text{зона воздействия}}$) и условно-фоновой ($C_{\text{условно-фоновая зона}}$) зоне

Особенно значимое преобладание отмечается для подзолистого горизонта (от 1,7 раз для Tm до 4,3 раз для Lu).

В случаях La, Ce, Pr, Nd, Sm для горизонта С наблюдается повышенные концентрации в условно-фоновой зоне, для Ce еще и в горизонте В.

Существенный вклад в радиоактивность поверхностных образований различных зон России вносят содержания радиоактивных элементов в аллювиально-делювиальных отложениях

и коренных горных породах. Это особенно заметно на окраинах европейской территории России, более обнаженных в возвышенных и горных местах. В Кольско-Карельском регионе высоким содержанием радиоактивных элементов выделяется Хибино-Понойская область (в центре Кольского полуострова) - относительно повышенная в рельефе тектоно-магматическая область активизации (Экология России, 2000) – рисунок 5.1.8.



Рисунок 5.1.8. – Схема полей повышенных по отношению к фону содержаний естественных радиоактивных элементов в геологических объектах (по Высокоостровской Е.Б., Краснову А.И.) (Экология России, 2000): 1 – уран-238 в горных породах и почвах; 2 – торий-232 и калий-40 в поверхностных отложениях; 3 – уран-238 в поверхностных водах; 4 – месторождения и рудопроявления урана

Хибино-Понойская область характеризуется самой высокой для европейской территории России радиоактивностью и смешанной урано-ториево-калиевой специализацией пород. Содержания урана здесь составляют $(4-16) \cdot 10^{-4}\%$, калия 3-4 %, тория - $(10-12) \cdot 10^{-4}\%$. Резко повышенной радиоактивностью в районе Хибин отличается щелочной комплекс, представленный нефелиновыми сиенитами раннепалеозойского возраста. Содержания урана в породах Ловозерского и Хибинского массивов достигают $(18-20) \cdot 10^{-4}\%$, тория - $(25-30) \cdot 10^{-4}\%$, калия - 5-6% (Экология России, 2000).

Почвы гумидной зоны в целом на 60-70% обеднены естественными радиоактивными элементами по сравнению с их содержанием в подстилающих горных породах. В лесных дерново-подзолистых почвах содержание естественных радиоактивных компонентов доходит до $2 \cdot 10^{-4}\%$ по урану, $6 \cdot 10^{-4}\%$ по торию и 1,5% по калию (Экология России, 2000).

На территории холмисто-увалистой равнины содержания Th изменяются в пределах 0,6-3,31 мг/кг при среднем значении 1,19 мг/кг, содержание U от 0,02 до 0,3 мг/кг при среднем

0,13 мг/кг. При этом минимальные концентрации этих элементов приурочены к подзолистому горизонту – рисунок 5.1.9.

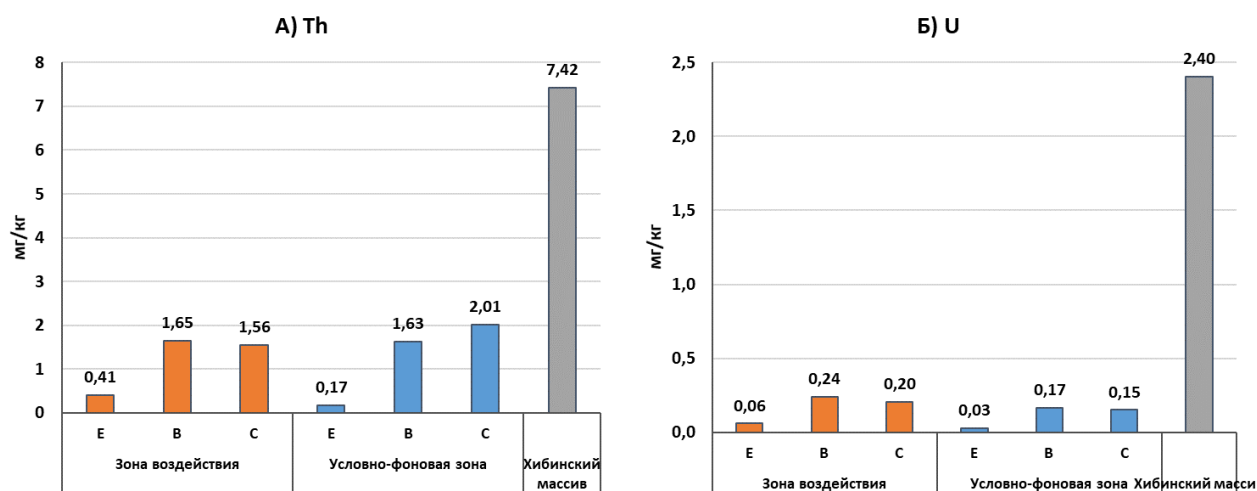


Рисунок 5.1.9 – Содержание Th (А) и U (Б) в почвах исследуемого района

Для почв района Хибинского массива, которые относятся к Хибино-Понойской области, характерны более высокие средние содержания Th и U и более широкий диапазон разброса значений, чем для западной части исследуемого района. Здесь содержание Th колеблется в пределах от 1,32 до 22,72 мг/кг, при среднем 7,42 мг/кг, содержание U от 0,98 до 7,94 мг/кг, при среднем значении 2,4 мг/кг.

Так же для почв района Хибинского массива характерны более высокие значения отношения Th/U по сравнению с равнинной территорией – рисунок 5.1.10. Самые низкие значения Th/U для горизонта E подзолистых почв холмисто-увалистой равнины. Для этой части территории отмечается некоторое повышение содержания Th в пунктах СП-5(В), СП-10(С) и СП-13 горизонты В1, В2 и С.

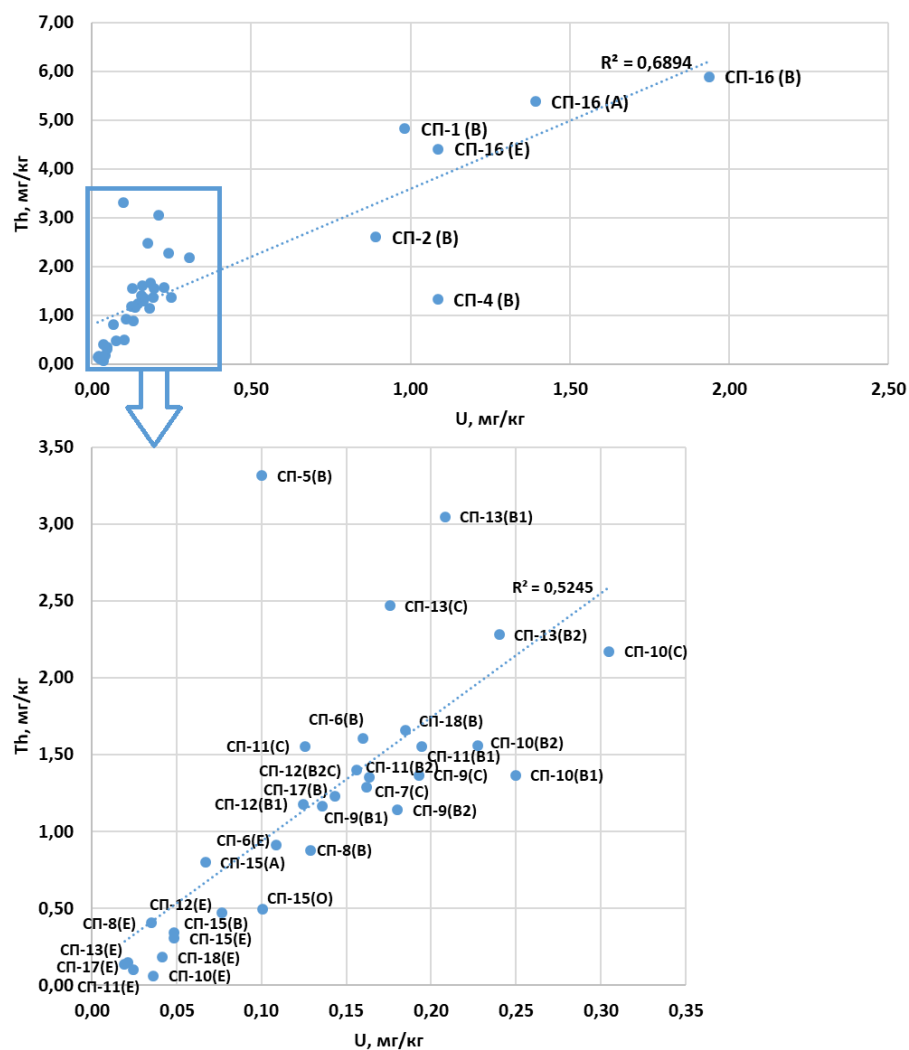


Рисунок 5.1.10 – Отношение Th и U в различных почвенных горизонтах исследуемого района

В силу особенностей природных и техногенных факторов никель и медь признаны основными элементами-загрязнителями на Северо-Западе России - как приоритетные компоненты выбросов комбинатов медно-никелевого производства (Barsova et al., 2019; Kyllönen et al., 2017). Их значительное концентрирование наблюдается в зоне воздействия источника пылегазовых медно-никелевого комбината, особенно в иллювиальном горизонте (таблица 5.1.4).

Таблица 5.1.4 – Статистические параметры содержания никеля и меди в почвах зон воздействия и условного фона

Параметр	Зона воздействия		Условно-фоновая зона		Хибинский массив	
	Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
Среднее геометрическое, мг/кг	34,1	25,9	4,6	4,4	7,7	13,0
Стандартная ошибка	5,8	3,1	1,0	1,3	1,4	2,7

Параметр	Зона воздействия		Условно-фоновая зона		Хибинский массив	
	Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
Минимум, мг/кг	3,20	5,79	1,0	0,4	3,3	6,8
Максимум, мг/кг	88,2	60,7	10,9	14,7	12,6	24,6
Медиана, мг/кг	37,1	30,3	6,5	6,3	8,3	12,9
Стандартное отклонение	25,3	13,3	3,7	4,8	3,7	6,5
Коэффициент вариации, %	58,0	45,7	60,6	72,6	40,1	46,0

В зоне воздействия содержания меди и никеля в горизонтах В и С превышают кларковые значения, в том числе ориентировочно допустимые значения (ОДК) содержания химических веществ в почвах (рисунок 5.1.11).

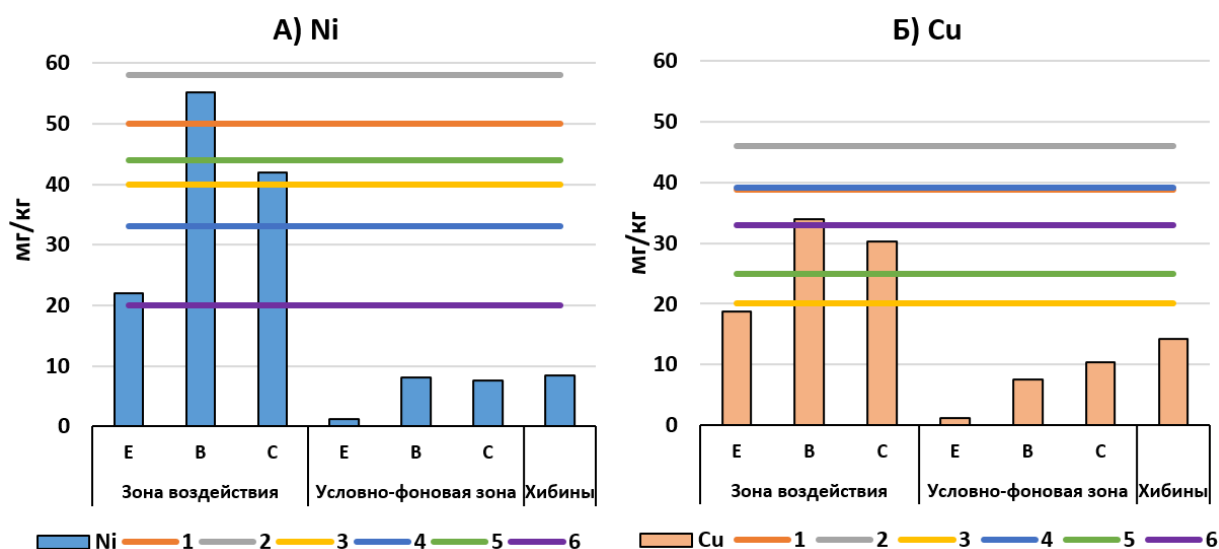


Рисунок 5.1.11 – Сопоставление концентраций никеля (А) и меди (Б) в исследуемых почвах с: 1 - средним содержанием в верхней части континентальной коры по (Григорьеву, 2009); 2 - кларком верхней части Земной коры по (Ярошевскому, 1990); 3 - кларком почв Земли по (Алексеевко, 2013); 4 - кларком городских почв по Алексеевко, 2013; 5 - средней концентрацией в верхней части континентальной коры по (Taylor, McLennan, 1985) с обновлением для никеля (McLennan, 2001); 6 - ОДК для песчаных и супесчаных почв по (СанПиН 1.2.3685-21)

Для хорошо промытого элювиального (подзолистого Е) горизонта характерны наиболее низкие содержания рассматриваемых элементов, что закономерно для данного типа почв. Однако для точек в пределах 2-20 км содержание никеля и меди все же существенно. Так минимальные концентрации этих металлов в горизонте вымывания (Е) отмечены в условно-фоновой зоне СП-

13 (32 км): Ni – 1,0 мг/кг, Cu – 0,4 мг/кг; СП-11 (38 км): Ni – 1,2 мг/кг, Cu – 1,2 мг/кг, тогда как максимумы в точке СП-6: Ni – 53,9 мг/кг, Cu – 33,0 мг/кг в зоне воздействия (рисунок 5.1.12).

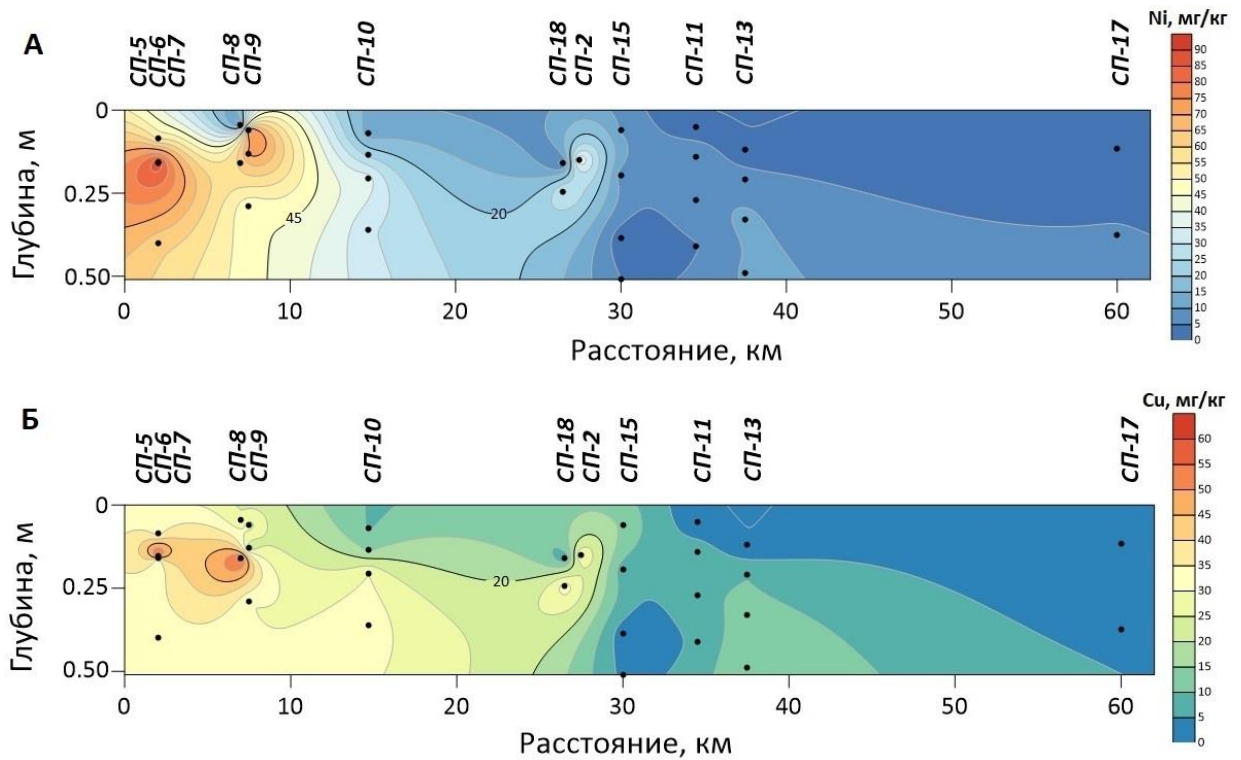


Рисунок 5.1.12 – Распределение концентраций никеля (А) и меди (Б) (мг/кг) в почве по глубине (м) и расстоянию от источника загрязнения (км)

Для иллювиального горизонта вмывания (В) характерно накопление элементов. Здесь минимумы составляют для Ni – 5,6 мг/кг, Cu – 3,9 мг/кг для СП-17. Максимумы концентраций составляют для никеля 88,2 мг/кг, для меди 60,7 мг/кг в точке СП-5.

Данные по изучению минералогического состава с использованием рентгенофазового анализа показывают, что в составе исследуемых почв преобладают Ca-Na-Mg-K алюмосиликаты (таблица 5.1.5). В пункте СП-10 основными минералами в составе почв являются магнезиогорнблендит, кварц и альбит. В горизонте В2 предположительно встречен титанит.

В пункте СП-8 присутствует железосодержащий актинолит, содержание которого в горизонте В составляет 43,3%.

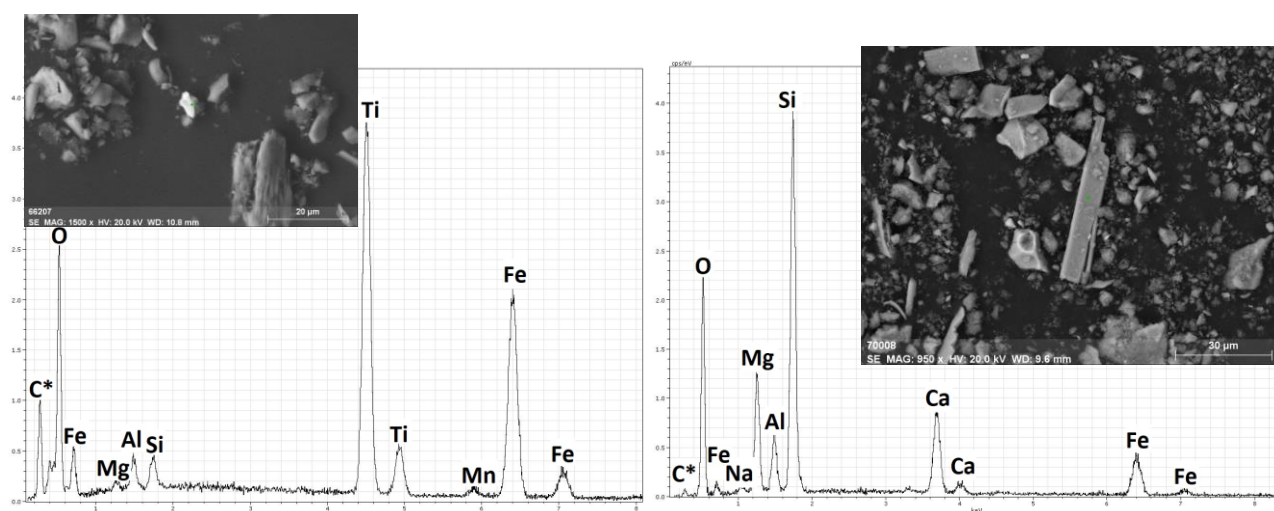
Таблица 5.1.5 – Минералогический состав почв по результатам рентгенофазового анализа, %

Минерал	СП-8		СП-10			
	Е	В	Е	В1	В2	С
актинолит	5,1	43,3	-	-	-	-
альбит	21,1	22,1	23,5	23,6	26	35,4
анальцим	0,2	-	0,4	-	-	-
анортит	23,3	22	26,4	-	-	-

Минерал	СП-8		СП-10			
	Е	В	Е	В1	В2	С
кварц	39,7	12,1	40,1	25,1	16,5	23,3
клинохлор	-	-	-	9,5	4,6	-
магнезиогорнблендит	-	-	10,9	31,7	37,8	28,5
микроклин	-	-	-	9,8	8,7	12,5
титанит	-	-	-	-	3,1	-
форстерит	-	-	-	-	2,8	-
цеолит	-	0,4	-	0,3	-	0,2
шабазит	0,1	-	-	-	-	-
энстатит	10,5	-	-	-	-	-

Также согласно (Евтюгина и др., 2019) в исследованном районе в изобилии обнаружены аморфные неорганические твердые фазы – гели – гидрогётит-гель, нонтронит, гель гидрооксид кремния (опал) и прочее.

На макроуровне не всегда возможно выявить трансформацию, происходящую в минеральном составе под воздействием техногенных факторов. В этой связи были проведены исследования с использованием электронной микроскопии, которые показали, что в рассматриваемых почвах наиболее часто встречаются частицы оксидов железа, титана и алюминия, а также Mg-, Fe-, Ca- алюмосиликаты (рисунок 5.1.13).

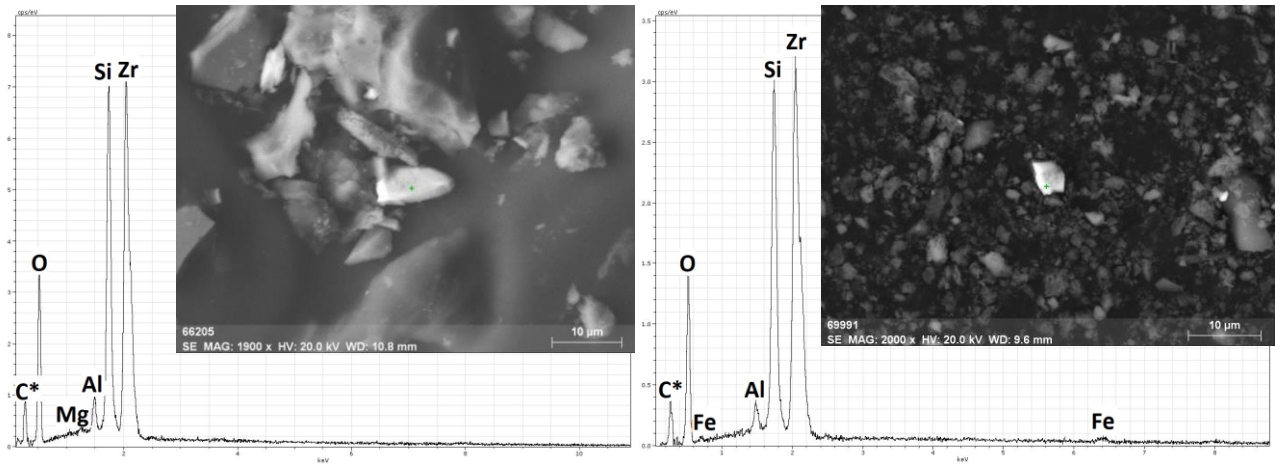


А) СП-8(Е) Состав (% масс): О - 35,8; Fe - 31,3; Ti - 29,7; Al - 1,0; Mn - 1,0; Si - 0,8; Mg - 0,3.

Б) СП-10(В2) Состав (% масс): О - 42,6; Si - 21,1; Fe - 11,3; Ca - 9,5; Mg - 9,8; Al - 4,3; Na - 0,8.

Рисунок 5.1.13 – Микрочастицы, обнаруженные в различных горизонтах исследуемых почв

Также в разных горизонтах встречаются соединения циркония (рисунок 5.1.14).

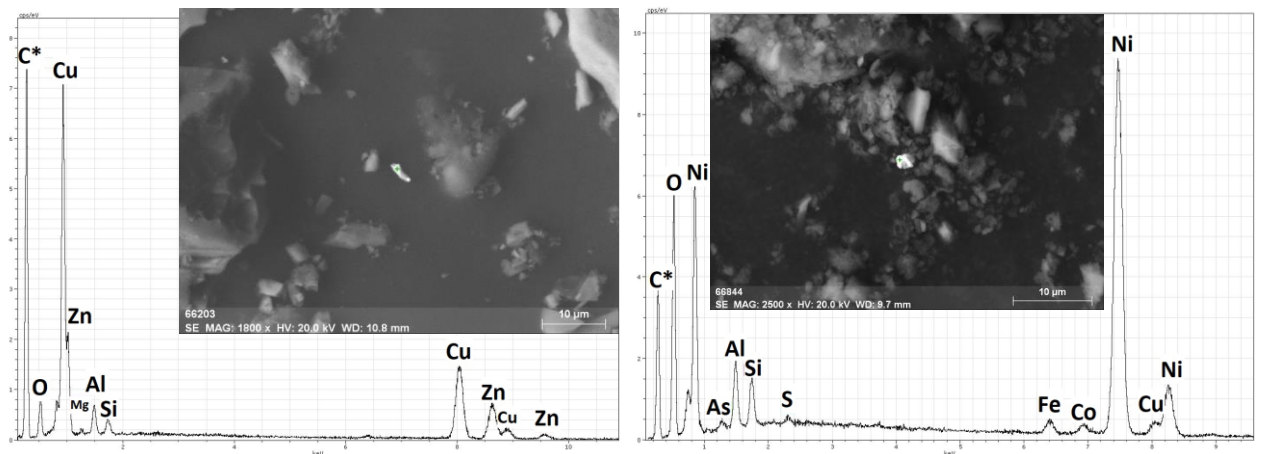


А) СП-8(Е) Состав (%масс): Zr - 48,7; O - 36,2; Si - 13,4; Al - 1,4; Mg - 0,2

Б) СП-10(В1) Состав (%масс): Zr - 45; O - 35,7; Si - 12; Al - 1,3; Fe - 0,6; Mg - 0,2

Рисунок 5.1.14 – Микрочастицы, содержащие цирконий, обнаруженные в исследуемой почве

В пункте опробования СП-8 в 7 км от источника пылегазовых выбросов обнаружены собственные минеральные фазы меди и никеля (рисунок 5.1.15).



А) СП-8(Е) Состав (%масс): Cu - 52,7; Zn - 30,9; O - 8,4; Al - 4,7; Si - 1,8; Mg - 1,5

Б) СП-8(В) Состав (%масс): Ni - 74; O - 14,8; Cu - 3,3; Al - 2,9; Si - 1,6; Co - 1,5; Fe - 1,3; As - 0,4; S - 0,2

Рисунок 5.1.15 – Микрочастицы меди и никеля, обнаруженные в почве в зоне влияния комбината

5.2 Формы нахождения химических элементов в почвах

Оценка опасности загрязнения не ограничивается только определением валового содержания химических элементов. Поскольку геохимическая подвижность и токсическое действие поллютантов определены не только их массовым поступлением, но и зависит от их форм и характера закрепления минеральными и органическими носителями (Водяницкий, 2005).

В геохимии, геологии, геоэкологии и почвоведении используются различные методы и приемы оценки форм нахождения элементов в горных породах, донных осадках и почвах, среди которых основными являются методы химического фракционирования, в том числе последовательная экстракция из одной навески (Кузнецов, Шимко, 1990). Метод постадийных вытяжек нашел применение при изучении структуры геохимических полей, геохимических поисках полезных ископаемых, изучении геохимии почвенного покрова, определении геохимических аспектов техногенного воздействия и охраны окружающей среды (Кузнецов, Шимко, 1990; Hei et al., 2016; Qureshi et al., 2020; Khadhar et al., 2020; Zhang et al., 2020; Khorasanipour, Rashidi, 2020).

В целом для почв концентрации и формы нахождения химических элементов определяются главным образом составом и свойствами почвообразующих пород и генезисом и свойствами почв. Для территорий расположения крупных промышленных объектов также важную роль играют масштабы и химический состав техногенных эмиссий, и собственно формы нахождения химических элементов в техногенных потоках (Лукина и др., 2004).

Важными факторами, влияющими на содержание, распределение и формы химических элементов, в том числе тяжелых металлов, в бореальных почвах, является их переувлажненность, слабокислая и кислая реакция среды, а также явления, связанные с периодическим промерзанием и протаиванием почв. Эти факторы в целом способствуют увеличению подвижности большинства тяжелых металлов и возможности их перераспределения между эффективными фазами почв (Пинский, 2004; Опекунова и др., 2006 а).

Определение форм нахождения химических элементов в почвах проводилось методом последовательных селективных вытяжек из одной навески по (McLaren, Crawford, 1973) с изменениями (Ладонин, 2006), с выделением следующих фракций:

I. Водорастворимая фракция является легкодоступным источником питания растений и представлена свободными ионами или комплексными соединениями.

II. Обменная фракция – поведение химических элементов определяется процессами ионного обмена. Эта фракция выделяется экстрагированием за счет разрушения слабых электростатических взаимодействий, удерживающих химические элементы.

III. Специфически сорбированная. Под специфически сорбированными химическими элементами, входящими в состав различных твердофазных соединений, нужно понимать всю их совокупность, удерживаемую почвенными компонентами за счет связей, отличных от ионной (то есть необменно). Это элементы в виде ионов, входящих в состав поверхностных комплексов, могут быть закреплены на дефектах кристаллических решеток и так далее.

IV. Фракция, связанная с органическим веществом, характеризует долю химических элементов, связанных с органическим веществом.

V. Фракция, связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца, содержит химические элементы, образующие прочные комплексы на поверхности железомарганцевых конкреций.

VI. Остаточная фракция содержит химические элементы, прочно закрепленные в кристаллических решетках минералов почвы и неспособные выходить в раствор при применении перечисленных выше экстрагентов.

В системе соединений химических элементов почвы выделяется «матрица» - прочносвязанные соединения, которые составляют ядро системы и отражают единство почв одного генетического ряда (Мотузова, 2009). В спектре постадийных вытяжек она соответствует остаточной фракции. Результаты эксперимента показывают, что множество химических элементов остается связано в остаточной фракции (IV). На нее в среднем приходится от 60 до 99% от общего содержания химических элементов.

По подвижным соединениям можно судить о влиянии на почвы изменяющихся внешних условий, которые обеспечивают пространственное и временное изменение и разнообразие свойств почв (Мотузова, 2009).

В исследуемом районе в водорастворимой фракции (I) находится значительная часть брома – в среднем 14%. В подзолистом горизонте в зоне воздействия здесь находится 22,3% Br, когда как в условно-фоновой зоне лишь 6,1%. Для иллювиального горизонта (B) обратная тенденция - 9,4 и 23,1% для зоны воздействия и фоновых условий соответственно (рисунок 5.2.1).

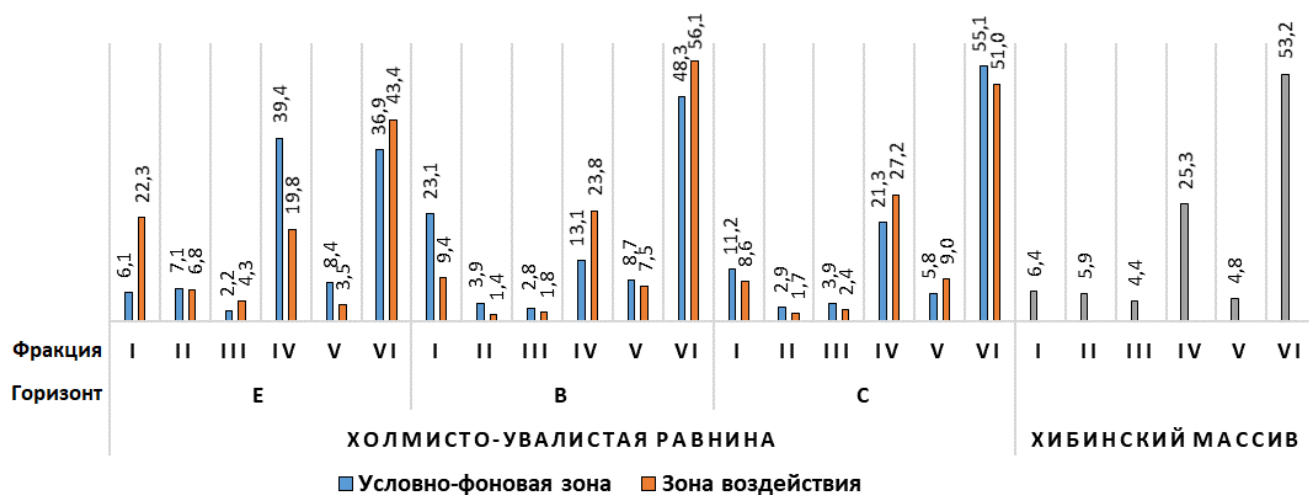


Рисунок 5.2.1 – Формы нахождения брома в исследуемых почвах (% от суммы всех фракций). Фракции: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, VI - остаточная

Обменная фракция (II) является ведущей или значительной по содержанию и составляет в среднем в зоне воздействия / условно-фоновой зоне для Mg – 18/47, Ca - 90/92, Mn - 17/38, Ni - 16/15, Sr - 77/88, Cd – 47/73, Ba - 24/17% от суммы всех фракций соответственно (таблица 5.2.1).

Таблица 5.2.1 – Распределение химических элементов в почвах по фракциям

Зона	Пункт (расстояние до комбината)	Почвенный горизонт	Фракции				
			I Водорастворимая	II Обменная	III Специфически сорбированная	IV Связанная с органическим веществом	V Связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn
Зона воздействия	СП-5 (2 км)	B	Br Ni	Ca Sr Cd <i>Mg Mn</i> Zn Ba Ni	<i>Cu Pb</i> Be Ca Cd Ba Ni	B Na K Rb Zr Mo Pd Sb U <i>Ti Cu As Ba La Ce Pr Nd Sm Gd Dy Er Yb</i> <i>Pt Pb</i> Al V Fe Cr Mn Ni Zn Ga Br	<i>Cu</i> Be Na Si K Co Ni As Br Rb Zr Sb I
	СП-6 (2 км)	E	-	Be Mg Ca Mn Co Ni Sr Ba <i>Zn</i>	Cu <i>Si Ba</i> Mg Ca Ni	B Na K Ti Cr Zn As Rb Zr Mo Pd Sb Hf Pt Th U <i>Al V Fe Cu La Nd Gd Dy Pb</i> Ga Ce Pr	<i>Si Hf</i> Na K Rb Sb
		B	Ni	Ca Sr Cd Mg Mn Ni Zn Ba	<i>Cu Cd</i> Be Ca Ni	B Na K Se Rb Mo Sb <i>Cu Br Pd La Gd Tb Dy Ho Er Hf</i> Sc Ti Cr Ge As I Ce Pr Nd Sm Eu Yb Lu	<i>Te</i> Na Al K Co Ni Rb
	СП-7 (2 км)	C	-	Ca Sr Cd <i>Mg</i> Mn	Ba <i>Si Cd</i>	B Na K Ti As Rb Zr Mo Sb U <i>Be Sc Lu Hf</i> V Cr Ga La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Pb	<i>B Si Hf</i> Al Cu I
	СП-12 (5 км)	E	Br	Ca Mn Ni Cd Ba <i>Mg Br</i> Co	Si <i>Be Mn Cu I Ba</i> Ca Co Cd	B Na K Ti Ge As Rb Zr Mo Pd Sb I La Ce Pr Nd Sm Eu Ho Yb Lu Hf Ta Th U <i>Sc V Cr Mn Fe Cu Ga Cs Gd Tb Dy Er Tm</i> <i>Pb</i> Al Si Co	<i>Hf Ta</i> Rb Zr
		B1	-	Ca Sr Cd <i>Ba</i> Mg Mn	Be <i>Si Ba</i> Ca Sr Cd	B Na K Ge As Br Rb Zr Mo Pd Sb Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Th U <i>Sc Ti Fe La Ce PrNd SmEu Gd Tb Dy Pb</i> B Al V Cr Ni Cu Ga	<i>Hf Ta</i> Sb
		B2C	-	Ca Sr Cd Mg Mn Ni	<i>Be Ba</i> Al Ca Ni Cd	B Na Si K Sc Ti Cr As Br Mo Pd Sb I Hf Ta U <i>V Cu Ge La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho</i> <i>Er Tm Yb Lu Pb Th</i> Al Fe Ni Cs	<i>Si Hf Ta</i> Al Cr Ni Ga As Br Pd Sb I

Зона	Пункт (расстояние до комбината)	Почвенный горизонт	Фракции				
			I Водорастворимая	II Обменная	III Специфически сорбированная	IV Связанная с органическим веществом	V Связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn
Зона воздействия	СП-8 (7 км)	E	<i>Br</i>	Be Ca Ni Sr <i>Mg Mn Cu</i> <i>Cd Ba</i> <i>Co</i>	Cu	B Na K Sc Zn Rb Yb Lu Hf U <i>Ti Cr As Ho Er Tm Pt Pb Th</i> <i>Al Si V Fe Eu Gd Tb Dy</i>	Mo <i>Sc Hf</i>
		B	-	Ca Sr <i>Cd Ba</i>	<i>Cu Sr Cd Ba</i>	B Na K Rb Zr Sb <i>Si Pd Lu Hf Th U</i> <i>Sc Ti Cr As La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb</i> <i>Dy Ho Er Tm Yb Pb</i>	Mo <i>Ni</i>
	СП-9 (7,5 км)	B1	<i>Ni</i>	Ca Sr Cd <i>Ba</i> <i>Mg Mn Ni</i>	<i>Si Cd</i> <i>Be Ca Ni Cu Sr</i> <i>Ba</i>	B Na Si K Rb Zr Sb Hf U <i>Sc Ti As Br I P rNd Sm Eu Gd Tb Dy Ho</i> <i>Er Tm Yb Lu Pb Th</i> <i>Al V Cr Cu Ge Cs La Ce</i>	<i>B Si Sb Hf</i> <i>Na Al K Co Ni</i> <i>Rb</i>
		B2	<i>Br</i>	Si Ca Sr Cd <i>Mg Mn Ba</i> <i>Ni</i>	Be Ba <i>Cd La</i> <i>Ni Cu Sr</i>	B Na K Sc Ge As Rb Zr Mo Pd Sb La Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Tm Yb Lu Hf Th U <i>Al Ti Br I Ce Er Pb</i> <i>V Cr Co Ni Cu Zn Cs</i>	<i>B Al Si Hf</i> <i>Ni Zr Pd Sb</i>
		C	<i>Br</i>	Ca Sr Cd <i>Ba</i> <i>Mg Mn Ni</i>	Si <i>Ba</i> <i>Be Ca Ni Cu Sr</i> <i>Cd</i>	B K Ti Rb Zr Mo Sb Hf U <i>Sc As Cs Lu</i> <i>Be V Cr Cu Ga Br I La Ce Pr Nd Sm Eu</i> <i>Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Pb Th</i>	<i>B Si</i> <i>Al K Ni Rb Pd</i> <i>Sb Hf</i>
	СП-10 (15 км)	E	-	Mg Ca Co Ni Sr Cd <i>Mn Ba</i> <i>Zn</i>	<i>Cu</i> <i>Ca Ni Sr Cd</i>	B Na K Sc Zn Rb Zr Sb Lu Hf U <i>Ti Cr Fe Ge Ho Er Tm Yb Pb</i> <i>Al Si V As Br La Ce Pr Nd Sm Eu Gd</i> <i>Tb Dy Th</i>	Cu <i>Si</i>
		B1	-	Ca Sr <i>Cd</i> <i>Ba</i>	<i>Be Ca Sr</i>	B Na K Rb Sb Hf <i>Si Sc Zr Mo U</i> <i>Al Mn As Br La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb</i> <i>Dy Ho Er Tm Yb Lu Pb Th</i>	Mo <i>Si Cu</i>

Зона	Пункт (расстояние до комбината)	Почвенный горизонт	Фракции				
			I Водорастворимая	II Обменная	III Специфически сорбированная	IV Связанная с органическим веществом	V Связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn
Зона воздействия	СП-10 (15 км)	B2	-	Ca Sr <i>Cd</i> Ba	-	B Na K Rb Sb Hf <i>Zr Pd Pt Pb U</i> Si Sc Ti Zn Ge As Br I La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Th	Mo <i>Hf</i> Si Cu Sb I
		C	-	Ca Sr <i>Cd</i> Be Ba	Ca Ge Sr Ba La Pr	B Na K Rb Zr Sb Hf <i>Mo Pd Pb U</i> Al Sc Ti Zn As Br I Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Th	Mo <i>B Hf</i> Si Cu Sb I
	СП-2 (27,5 км)	B	-	Ca Sr Cd <i>Ba</i> Ni Zn	As Br <i>Be Si Ge Cd</i> Ca Sr Ni Cu Ga Sr I Ba	Be Na Si K As Br Rb Mo Zr Pd Sb Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Lu Hf U <i>Cu Ge I La Pb Th</i> Al Ti V Cr Mn Fe Co Ga	<i>Si Hf Pt</i> Na Sb
Условно-фоновая зона	СП-11 (34,5 км)	E		Mg Ca Mn Co Sr Cd <i>Ni Zn Pd Ba</i>	Si <i>Al Cr</i> Mg Ca Cu Sr Cd Eu Gd Pb	B Na K Sc Ti Cr Fe Zn As Rb Zr Pd Sb Yb Hf Th U <i>Al Si V Cu La Ce Pr Nd Sm Dy Ho</i> Mn Co Ni Ga I Er Pb	<i>Si Sc Hf</i> B Na Ti Gd Er
		B1	<i>Br</i>	Ca Sr Cd <i>Mg</i> Mn Ni Ba	<i>Si</i> Be Ca Sr Cd La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Lu Pb	Na K As Rb Zr Mo Pd Sb Hf U <i>Ti I Th</i> Al V Cr Zn Ga Cs La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Lu Pb	<i>Hf</i> Na Co Ni As Br Rb Zr Pd Sb
		B2	<i>Br</i>	Ca Sr Cd <i>Mg Mn</i> Ni Rb Ba	<i>Si</i> Be Ca Cu Sr Cd Cs Ba La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Lu Pb	Na K Rb Zr Mo Pd Sb Hf U <i>Sc As I Th</i> V Cr Cu Ga Ge Cs La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Lu Pb	<i>Si Hf</i> Na Al Co Ni Cu Rb Pd Sb

Зона	Пункт (расстояние до комбината)	Почвенный горизонт	Фракции				
			I Водорастворимая	II Обменная	III Специфически сорбированная	IV Связанная с органическим веществом	V Связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn
Условно-фоновая зона	СП-11 (34,5 км)	C	-	Mg Ca Mn Sr Cd Ni Rb Ba	Si <i>Be</i> Mg Al Mn Fe Co Ni Cu Ga Sr Cd Ba La Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Lu	B Na K Ti Rb Zr Mo Pdn Sb Hf U <i>Sc Cr Br Lu Th</i> V Fe Co Ni Cu Ga As Ba Eu Gd Yb	<i>Hf</i> B Si Ti Fe Co Ni Cu Zr Sb Ce
	СП-13 (37,5 км)	E	-	Mg Ca Mn Co Ni Sr Cd <i>Ba</i> Rb	<i>Si Cu</i> Ca Cd	B Na Si Sc Cr Br Rb Zr Mo Pd Sb Hf Th U <i>V Fe As La Ce Pr Nd Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Pb</i> Al Ni	<i>Hf</i> <i>Si Cu</i> Sb
		B1	Br	Ca Sr Cd <i>Mn</i> Mg Ni Ba	<i>Si</i> Ca Cu Sr Cd La Pb	B Na K Rb Zr Mo Pd Sb U <i>Ti As Hf</i> Sc Cu Br Nb I La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Th	<i>B</i> Rb Sb
		B2	Br	Mg Ca Sr Cd <i>Mn</i> B Ni Ba	Si Cu Ge Sr Cd La Ce Pr Gd Pb	Na K Rb Zr Mo Pd Sb <i>Ti Hf U</i> Sc As Br La Ce Pr Nd Sm Eu Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Th	B Na K Sb
		C	Br	Mg Ca Sr Cd <i>Mn</i> Ni Ba	<i>Si</i> Be Al Co Cu Cs La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Pb	B Na K Ti Rb Zr Mo Sb U <i>Sc As Hf</i> V Cr Ga Br I Lu Th	Cu
Хибины	СП-1 (33 км)	B	-	Ca Cd <i>B Mg</i> Mn Ni Sr	Si Be Ca Ge Sr Cd Ba	B K Ti Rb Mo Sb <i>As Br Ba U</i> Na Al Si V Cr Fe Ni Zn Ga Zr Pd Cs La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Yb Hf Pb	Si K Cu Sb Pt

Примечание к таблице 5.2.1: выделено **жирным** – преобладающая фракция элементов в % от суммы всех фракций; *курсивом* – фракция занимает второе место после остаточной, но ее содержание значительно, не менее 20%; обычный шрифт - фракция занимает второе место после остаточной, но ее содержание не превышает 5%

Причем высокая доля обменной фракции независимо от почвенного горизонта подзолистых почв холмисто-увалистой равнины отмечается для Ca, Sr и Cd (таблица 5.2.2).

Таблица 5.2.2 – Содержание некоторых химических элементов в обменной фракции (II), % от суммы всех фракций

Элемент	Зона воздействия			Условно-фоновая зона			Хибинский массив
	Е	В	С	Е	В	С	
Mg	40,6	10,9	13,0	84,2	24,3	56,7	34,6
Ca	91,7	88,7	90,1	92,3	92,5	91,9	85,6
Mn	37,1	11,8	10,2	70,1	21,4	39,2	8,5
Ni	45,2	7,0	5,1	38,6	6,1	8,3	8,9
Sr	83,8	75,6	73,1	90,8	87,2	85,3	10,5
Cd	54,5	41,7	53,2	82,9	67,7	72,1	66,4
Ba	37,5	18,8	20,3	29,4	11,9	16,3	6,0

Тогда как для Mg, Mn, Ni и Ba наблюдается увеличение процентной доли рассматриваемой фракции только в подзолистом горизонте (Е). При этом отмечается общее увеличение этой фракции по всем горизонтам для Ba в зоне воздействия, а для Mn и Mg в условно-фоновой зоне.

Отмечается также, что для Sr характерно стабильно высокое содержание в обменной фракции (II) во всех почвенных горизонтах территории холмисто-увалистой равнины, тогда как в почвах Хибинского массива эта фракция составляет только 10,5%.

Специфически сорбированная фракция (III) является значительной для Be, Cu, Ni, Cd, Ba и часто является ведущей для Si, содержание которого в данной фракции составляет в среднем 18,4% в зоне воздействия и 29,4% в условно-фоновой зоне.

Общее увеличение по всем горизонтам в зоне воздействия отмечается по Ca, Sr, Cd, Ba, в условно-фоновой зоне по Al, Si, Cr, Fe, Zn, Ge, Pb (таблица 5.2.3), а также РЗЭ.

Увеличение процентной доли рассматриваемой фракции в подзолистом горизонте (Е) наблюдается для следующих элементов: Al, Si, Cr, Mn, Fe, Ca, Ni, Cu, Zn, Ba, тогда как в иллювиальном горизонте Be, Ge, Cd.

Таблица 5.2.3 – Содержание некоторых химических элементов в специфически сорбированной фракции (III), % от суммы всех фракций

Элемент	Зона воздействия			Условно-фоновая зона			Хибинский массив
	Е	В	С	Е	В	С	
Be	12,9	17,5	17,6	10,3	13,9	21,4	14,6
Al	8,5	4,4	7,3	17,1	5,1	8,8	5,6
Si	19,0	16,9	21,2	30,6	26,5	34,1	56,7
Ca	7,3	8,4	6,4	7,2	6,1	4,9	7,2
Cr	6,6	1,7	2,9	20,7	3,9	10,7	7,5
Mn	10,4	4,5	2,2	7,5	5,4	7,0	4,8
Fe	2,7	0,5	0,9	5,4	1,4	5,2	1,7
Co	11,6	3,4	1,8	8,4	3,8	6,7	3,0
Ni	14,9	6,1	3,9	10,1	3,8	5,5	3,6
Cu	26,9	12,3	7,0	19,8	10,2	10,5	6,0
Zn	6,7	3,8	4,6	8,6	5,3	10,5	4,0
Ge	4,2	5,4	9,3	8,8	10,2	18,6	6,1
As	8,3	4,2	4,8	5,1	6,5	8,8	6,2
Se	7,5	3,4	3,4	2,0	6,1	8,7	4,3
Sr	7,2	8,2	8,4	6,8	6,3	5,7	8,6
Cd	11,6	16,4	15,1	9,4	13,2	7,8	14,1
Ba	16,0	14,9	24,2	12,1	8,6	13,5	15,4
Pb	7,9	7,6	5,2	16,2	14,1	23,5	6,3

Стоит отметить, что для всех РЗЭ отмечается увеличение процентной доли специфически сорбированной фракции в условно-фоновой зоне до 6,2-11,9% при том, что в зоне воздействия она составляет от 3,7 до 6,5%.

Микроэлементы, связанные с органическим веществом, оказывают меньший вклад в общий уровень содержания микроэлементов в почве из-за относительно невысокой доли содержания и значительно меньшей устойчивости по сравнению с минеральными носителями микроэлементов (Мотузова, 2009). Однако, как видно из таблицы 5.2.1, органическое вещество играет важную роль в связывании многих химических элементов (в том числе редкоземельных в рассматриваемых почвах. Для таких элементов как В, Na, К, Rb, Zr, Мо, Sb, U, Hf, и Та фракция, связанная с органическим веществом (V), является ведущей и составляет в среднем от 45 до 95%. Для W, Sc, Ti, As, Se, Pb, Th эта фракция тоже составляет значительную долю от 13 до 45%.

Доказано, что фульвокислоты, как и гуминовые кислоты, формируют с лантаноидами прочные комплексные соединения (Переломов, 2007). Как видно на рисунке 5.2.2 в зоне воздействия отмечается значительное повышение доли фракции, связанной с органическим веществом (V) относительно условно-фоновой зоны в горизонте В и С для всех РЗЭ, в горизонте Е для Sm, Eu и Ho.

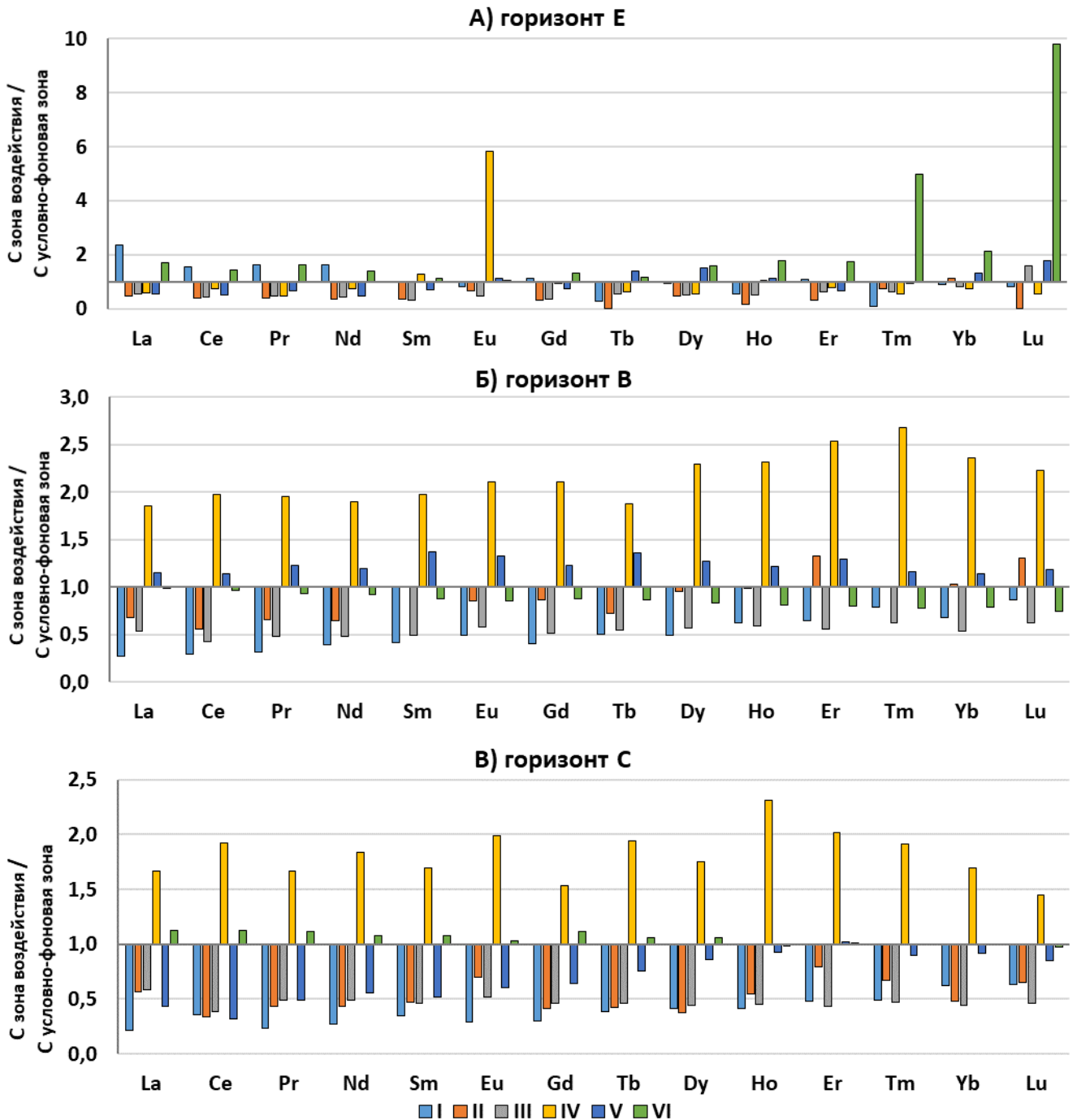


Рисунок 5.2.2 – Отношения содержаний редкоземельных элементов в почвенных горизонтах по фракциям в зоне воздействия к условно-фоновой зоне ($C_{\text{зона воздействия}} / C_{\text{условно-фоновая зона}}$) зоне. Фракции: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, VI - остаточная

Также для РЗЭ в горизонте В отмечается повышение доли фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (V) в зоне воздействия относительно условного фона, а в горизонте С – остаточной фракции (VI).

Формы нахождения тория и урана в почвенных горизонтах в зоне воздействия и условно-фоновой зоне, а также территории Хибинского массива представлен на рисунке 5.2.3.

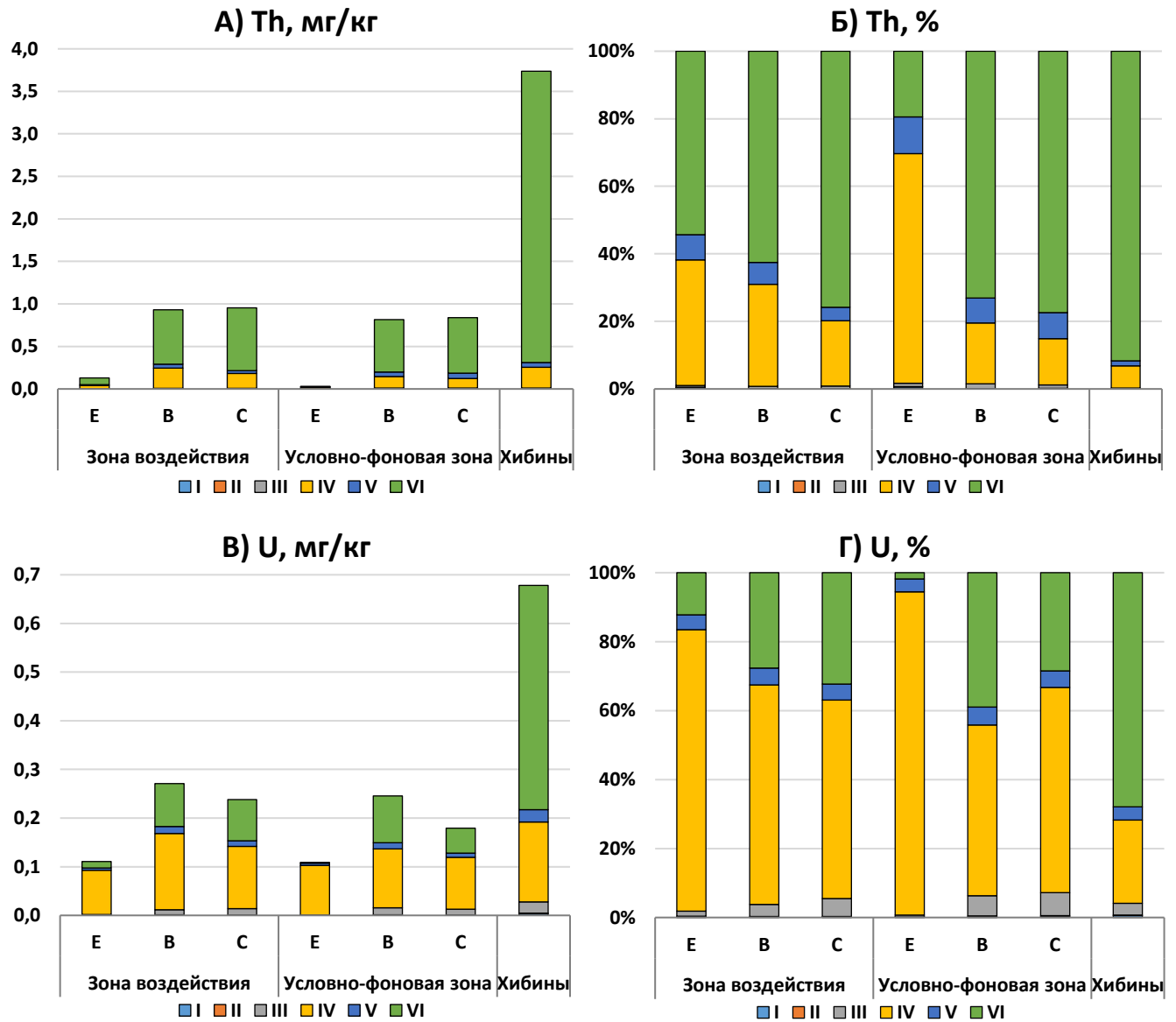


Рисунок 5.2.3 – Формы нахождения тория и урана в почвенных горизонтах (в мг/кг и % от суммы всех фракций) района исследования. Фракции: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, VI - остаточная

В подзолистом горизонте почв условно-фоновой территории наблюдается самое низкое валовое содержание Th при том, что здесь отмечено самая высокая доля фракции, связанной с органическим веществом (V) – 68%. В этом же горизонте и самая высокая доля U связана с этой фракцией (94%). Но в отличие от Th, для U доля фракции, связанной с органическим веществом

(V) в других горизонтах как в зоне воздействия, так и условно-фоновой также значительно высока: 50-82%.

Для таких элементов как В, Si, Mo, Sn, Sb, Hf, Ta фракция, связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (V) составляет значительную долю, которая может составлять до 40%. Для Mo наблюдается значительное повышение процентной доли данной фракции в зоне воздействия до 32,8 / 22,6 / 18,4% в горизонтах E, B и C соответственно, в сравнении с условно-фоновой зоной - 2,0 / 8,0 / 5,9%.

Формы нахождения никеля и меди в почвенных горизонтах в зоне воздействия и условно-фоновой зоне представлен на рисунке 5.2.4.

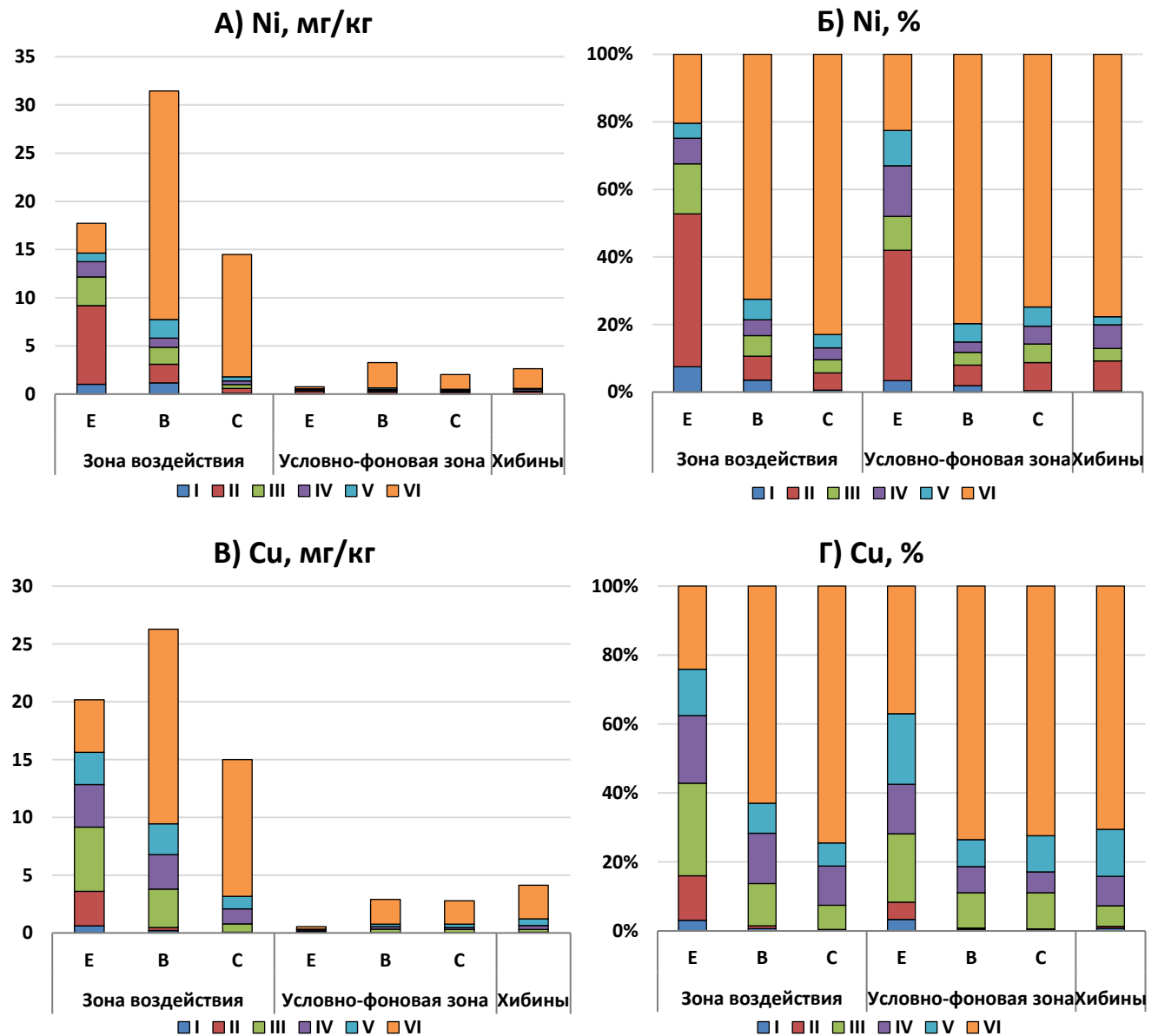


Рисунок 5.2.4 – Формы нахождения никеля и меди в почвенных горизонтах (в мг/кг и % от суммы всех фракций) района исследования. Фракции: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, VI - остаточная

На рисунке 5.2.4 представлено абсолютное содержание химических элементов во фракциях почвы в мг/кг, а также их процентные доли от суммы всех фракций.

Первый способ представления результатов позволяет лучше оценить общее накопление элементов в разных почвенных горизонтах, а также изменение содержания каждой фракции в зависимости от расстояния от источника загрязнения, тогда как второй способ позволяет нагляднее отразить изменения во взаимодействии элементов с почвенными компонентами при разной степени техногенного воздействия.

Как уже отмечалось ранее, наиболее интенсивное накопление никеля и меди отмечается в иллювиальном горизонте (В) в зоне воздействия выбросов комбината. В целом же для горизонта В характерно преобладание остаточной фракции – 42-98% как для никеля, так и для меди.

Для подзолистого горизонта (Е), по сравнению с иллювиальным горизонтом (В), свойственен более дифференцированный фракционный состав химических элементов. Формы нахождения никеля здесь характеризуется уменьшением доли остаточной фракции и заметным преобладанием обменной формы (25-60% от суммы всех фракций) (рисунок 5.2.5).

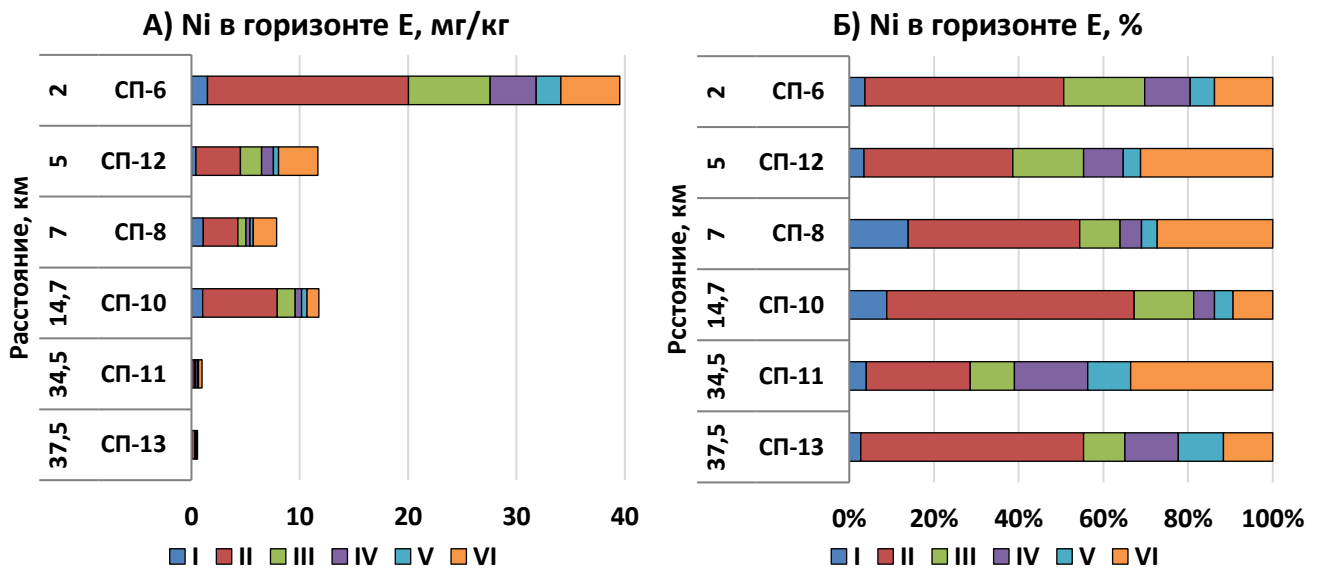


Рисунок 5.2.5 – Формы нахождения никеля в подзолистом горизонте в мг/кг (А) и % от суммы всех фракций (Б) района исследования. Фракции: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, VI - остаточная

Для меди в горизонте E отмечено более равномерное распределение по пяти фракциям (II-III-IV-V-VI) – от 3 до 33%, несмотря на значительную разницу в валовых содержаниях элемента в почве зоны воздействия и условно-фоновой территории (рисунок 5.2.6).

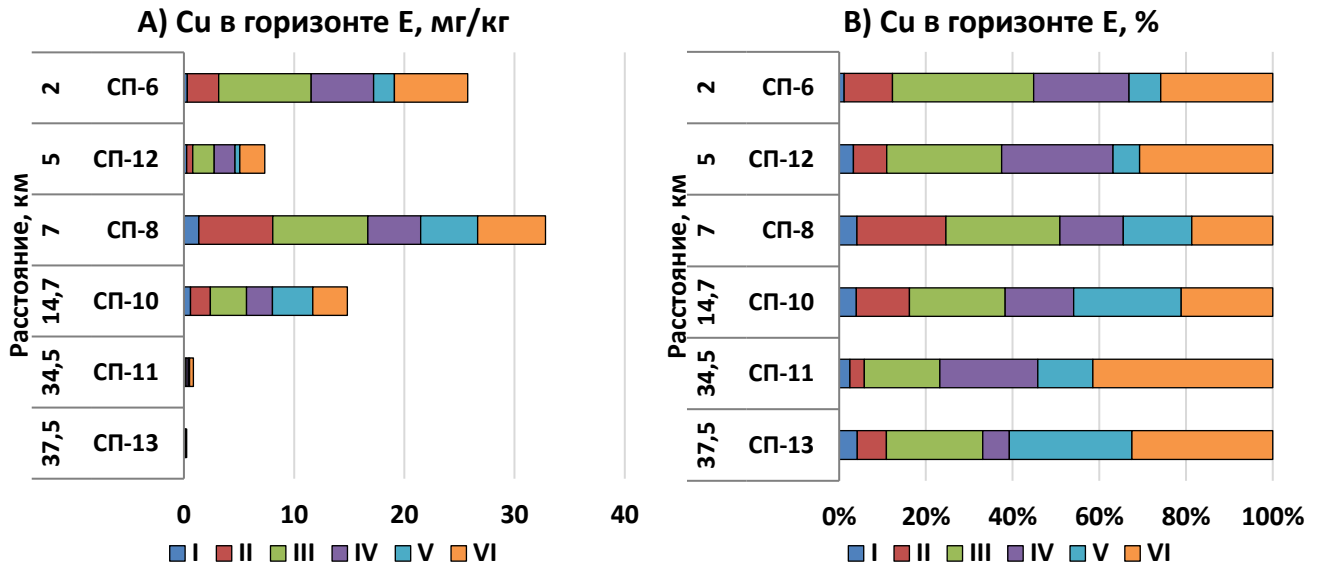


Рисунок 5.2.6 – Формы нахождения никеля и меди в подзолистом горизонте в мг/кг (А) и % от суммы всех фракций (Б) района исследования. Фракции: *I* - водорастворимая, *II* - обменная, *III* - специфически сорбированная, *IV* - связанная с органическим веществом, *V* - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, *VI* - остаточная

В зоне воздействия отмечается значительное повышение долей следующих фракций никеля относительно условного фона (таблица 5.2.4): водорастворимой (I), специфически сорбированной (III) и фракции, связанной с органическим веществом (IV); для меди: обменной (II), и фракции, связанной с органическим веществом (IV).

Эти данные свидетельствуют об увеличении доли подвижных соединений никеля и меди, слабо связанных с почвенными компонентами.

Таблица 5.2.4 – Отношения содержаний никеля и меди по фракциям в зоне воздействия к условно-фоновой зоне ($C_{\text{зона воздействия}} / C_{\text{условно-фоновая зона}}$)

Элемент	Горизонт	Фракции					
		I	II	III	IV	V	VI
Ni	Е	2,2	1,2	1,5	0,5	0,4	0,9
	В	1,8	1,1	1,6	1,5	1,1	0,9
	С	1,5	0,6	0,7	0,7	0,7	1,1
Cu	Е	0,9	2,6	1,4	1,4	0,7	0,7
	В	1,2	2,8	1,2	1,9	1,1	0,9
	С	0,9	0,7	0,7	1,9	0,6	1,0

Примечание к таблице: цвет ранжирует значения отношений (более высокие значения отмечены более интенсивным цветом)

Профиль почв представляет собой «слоеный пирог», характеризующийся системой геохимических барьеров. Подзолистые почвы отличаются наличием поверхностно-почвенного (биохимического) барьера, который принимает на себя «первый удар» при техногенном воздействии и выполняет барьерные функции, предохраняющие минеральные горизонты от загрязнения. Иллювиальный горизонт подзолов является ярким примером внутрипочвенного хемосорбционного геохимического барьера, что связано, главным образом, с аккумуляцией аморфных гидроксидов Fe, Mn и Al и их органо-минеральных соединений (Национальный атлас..., 2011).

В зоне воздействия выбросов медно-никелевого комбината выделены территория техногенно-нарушенного ландшафта там, где эродирован растительный слой, и территория, где этот слой сохранен. Данные в таблице 5.2.5 показывают, что деградация верхнего (органогенного) слоя приводит к продвижению более подвижных форм химических элементов вниз по почвенному профилю.

Таблица 5.2.5 – Отношения содержаний никеля и меди по фракциям на участке с разрушенным растительным слоем к территории с сохраненным растительным слоем в зоне воздействия (С разрушен / С сохранен)

Элемент	Горизонт	Фракции					
		I	II	III	IV	V	VI
Ni	E	2,5	1,2	0,9	0,8	1,1	0,7
	B	7,4	1,3	1,4	0,8	1,8	0,8
Cu	E	0,8	2,1	1,1	0,7	1,9	0,7
	B	2,2	1,6	2,8	1	2,1	0,8

Примечание к таблице: цвет ранжирует значения отношений (более высокие значения отмечены более интенсивным цветом)

Кроме того, отсутствие поверхностного биогеохимического барьера увеличивает нагрузку на минеральные почвенные горизонты, где в итоге увеличивается содержание поллютантов во фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (таблица 5.2.5).

5.3 Оценка токсичности почв методом биотестирования

Оценка токсичности водных вытяжек из почв методом биотестирования проводилась с использованием двух тест-объектов: инфузория-туфелька - *Paramecium Caudatum* (ФР.1.39.2015.19243) и водоросли хлорелла *Chlorella vulgaris Beijer* (ПНД Ф Т 14.1:2:4.10-2004).

Согласно результатам биотестирования с использованием тест-объекта инфузория-туфелька, рассматриваемые почвы в основном характеризуются допустимой степенью токсичности (таблица 5.3.1). Индекс токсичности здесь изменяется в пределах от 0,21 до 97,5%. Минимум отмечен для горизонта Е, в почвенном разрезе СП-13 на условно-фоновой территории.

Таблица 5.3.1 – Результаты биотестирования водной вытяжки из почв (тест-объект *Paramecium Caudatum*)

Зона	Пункт опробования	Горизонт	Расстояние, км	Индекс токсичности (Т), %	Степень токсичности
Зона воздействия	СП-5	В	2	16,4±2,9	Допустимая
	СП-7	С		4,3±0,4	Допустимая
	СП-12	Е	5	61,1±4,5	Умеренная
		В1		4,1±0,3	Допустимая
		В2С		4,8±0,4	Допустимая
	СП-8	Е	7	97,5±1,1	Высокая
		В		39,5±2,7	Допустимая
	СП-9	В1	7,5	35,5±1,3	Допустимая
		В2		0,25±0,02	Допустимая
		С		10,7±2,1	Допустимая
	СП-10	Е	14,7	6,1±0,7	Допустимая
		В1		82,7±1,9	Высокая
		В2		3,1±0,2	Допустимая
		С		5,4±0,5	Допустимая
СП-2	В	27,5	9,9±1,0	Допустимая	
Условно-фоновая зона	СП-11	Е	34,5	17,5±1,7	Допустимая
		В1		57,4±4,1	Умеренная
		В2		67,1±3,3	Умеренная
		С		5,0±0,4	Допустимая
	СП-13	Е	37,5	0,21±0,02	Допустимая
		В1		2,6±0,1	Допустимая
		В2		1,7±0,2	Допустимая
		С		4,6±0,5	Допустимая

Зона	Пункт опробования	Горизонт	Расстояние, км	Индекс токсичности (Т), %	Степень токсичности
Хибинский массив	СП-1	В	33	36,8±4,1	Допустимая
	СП-4	В	44,5	48,0±4,2	Умеренная
	СП-3	В	47,5	44,1±2,2	Умеренная

Умеренной степенью токсичности отличаются почвенный горизонт Е разреза СП-12 (Т=61,1%) в зоне воздействия, горизонты В1 и В2 пункта СП-11 (57,4 и 67,1% соответственно) в условно фоновой зоне, а также почвы территории Хибинского массива обладают достаточно высокими показателями индекса токсичности СП-4 - 44,5% и СП-3 – 47,5%, что может быть связано с генетической особенностью элементного состава почв.

Высокая степень токсичности дважды отмечена в зоне воздействия: для точки СП-8 в подзолистом горизонте (97,5%), и в горизонте В1 СП-10 (82,7%) (рисунок 5.3.1).

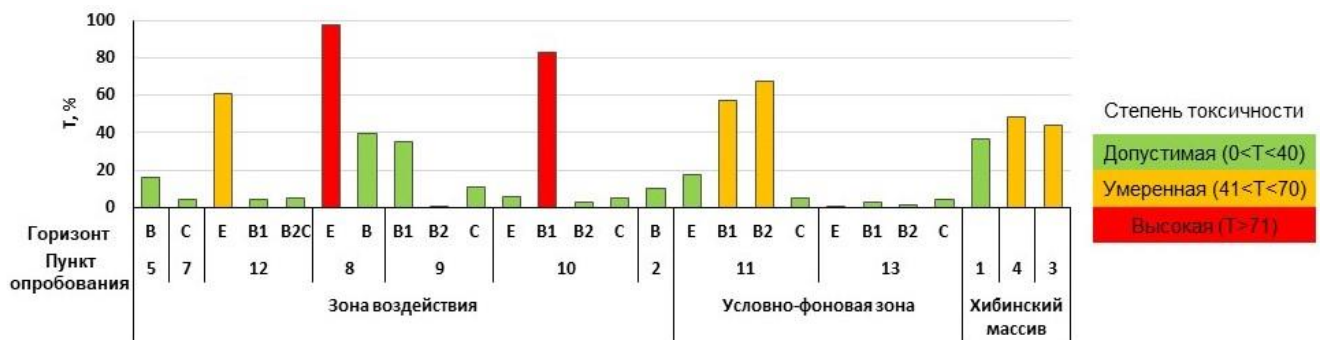


Рисунок 5.3.1 – Значения индекса токсичности (Т, %) для почв исследуемого района по результатам биотестирования с тест-объектом *Paramecium Caudatum*

В другом эксперименте по определению токсического действия методом биотестирования с использованием тест-объекта *Chlorella vulgaris Beijer* критерием токсичности пробы воды является снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом на 20 % и более в случае подавления роста тест-культуры или ее повышение на 30 % и более - при стимуляции ростовых процессов. При этом значение индекса токсичности для варианта подавления роста приводится со знаком (+), а при стимуляции - со знаком (-). Кроме того, устанавливается величина токсичной кратности разбавления (ТКР) водных вытяжек из почв (таблица 5.3.2).

Таблица 5.3.2 – Результаты биотестирования водной вытяжки из почв (тест-объект *Chlorella vulgaris Beijer*)

Пункт опробования	Горизонт	Расстояние, км	Индекс токсичности, %	Токсичность пробы	ТКР
Зона воздействия					
СП-5	В	2	-33,9±1,5	Слаботоксичная	1,97
СП-7	С		-38,6±1,7	Токсичная	4,50
СП-12	Е	5	-88,3±1,4	Гипертоксичная	101,55
	В1		-91,3±1,3	Сильнотоксичная	38,13
	В2С		-21,2±0,7	Нетоксичная	1,00
СП-8	Е	7	22,6±1,3	Слаботоксичная	1,30
	В		-32,3±1,3	Токсичная	11,02
СП-9	В1	7,5	-40,0±1,8	Токсичная	6,22
	В2		-30,5±1,3	Слаботоксичная	1,26
	С		-42,1±0,4	Слаботоксичная	2,82
СП-10	Е	14,7	-72,8±0,7	Сильнотоксичная	33,73
	В1		-52,9±0,9	Токсичная	15,13
	В2		-48,2±1,2	Среднетоксичная	3,42
	С		-38,3±2,5	Слаботоксичная	1,48
СП-2	В	27,5	-61,8±2,0	Среднетоксичная	9,54
Условно-фоновая зона					
СП-11	Е	34,5	-35,8±2,5	Сильнотоксичная	28,85
	В1		66,1±0,9	Слаботоксичная	4,30
	В2		71,9±0,6	Токсичная	11,20
	С		-37,2±0,9	Слаботоксичная	1,60
СП-13	Е	37,5	-35,6±0,7	Слаботоксичная	1,51
	В1		-54,1±1,1	Токсичная	9,00
	В2		-38,6±1,8	Слаботоксичная	2,43
	С		-32,2±0,7	Слаботоксичная	2,38
Район Хибинского массива					
СП-1	В	33	-14,1±2,1	Нетоксичная	1,00
СП-4	В	44,5	-27,5±2,2	Среднетоксичная	3,81
СП-3	В	47,5	-82,0±1,4	Среднетоксичная	7,29

Из 26 протестированных проб сложилось следующее их количественное распределение по степени токсичности: нетоксичная – 2 пробы, слаботоксичная – 10, среднетоксичная – 4, токсичная – 6, сильнотоксичная – 3, гипертоксичная – 1.

Стоит отметить, что более высокая степень токсического эффекта характерна для подзолистого горизонта, при чем как для зоны воздействия (СП-12, СП-10), так и для условного фона (СП-11). Это может быть связано с наличием большей доли подвижных форм химических элементов в данном почвенном горизонте, выявленной для данного типа почв. Соответственно максимальная величина токсичной кратности разбавления (101,55 раз) отмечена для горизонта Е в пункте СП-12, расположенном на юго-восточной окраине г. Мончегорска у подножия северо-западного склона горы Поадзуайвенч. Нижележащий горизонт В1 в этом разрезе также проявляет сильнотоксичную реакцию (ТКР 38,13), тогда как для горизонта С токсического эффекта не обнаружено (рисунок 5.3.2).

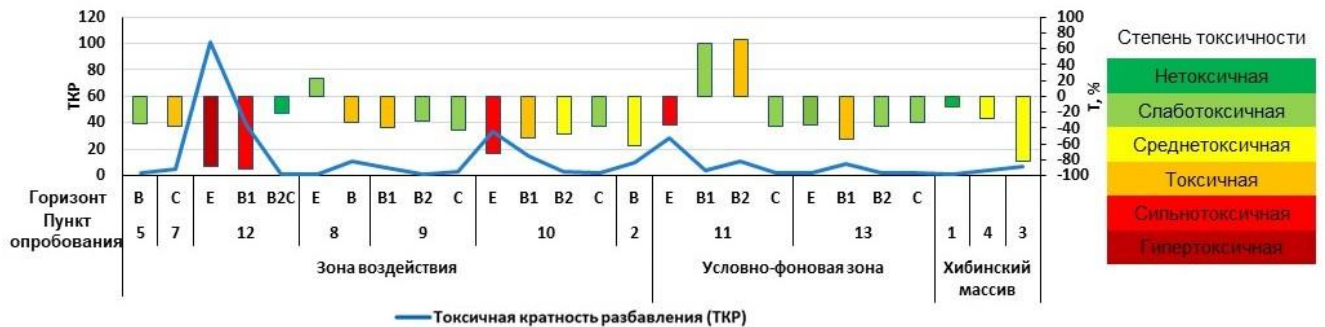


Рисунок 5.3.2 – Значения индекса токсичности (Т, %) и токсичной кратности разбавления (ТКР) для почв исследуемого района по результатам биотестирования с тест-объектом *Chlorella vulgaris Beijer*

Для почвенных вытяжек из горизонтов В1 и В2 пункта опробования СП-11 отмечены положительные значения индекса токсичности, что говорит о том, что данные образцы приводят к подавлению роста тест-объекта (водоросли), тогда как все прочие пробы почв, напротив, приводят к его стимуляции.

Для оценки связи токсичности и элементного состава почв был проведен корреляционный анализ. Результаты показывают, что почвы исследуемой территории отличаются отсутствием значимых корреляционных связей между индексом токсичности и валовым содержанием химических элементов. Это может говорить о том, что оценка токсичности почв не может основываться только на валовом содержании химических элементов, поскольку их геохимическая подвижность и токсическое действие зависит от их форм и характера закрепления фазами-носителями (Водяницкий, 2005).

5.4 Оценка токсичности химических элементов в почвах с использованием модели USEtox

Для оценки загрязнения почв (Souza et al., 2017), как и в модели USEtox, обычно используется «активная» высота верхнего слоя почвы, которая в стандартных расчетах составляет 0,1 м. Считается, что этот слой является основным источником пыли, которая распространяется с ветровым потоком, при дыхании может попадать в организм человека и, таким образом, воздействовать на его здоровье. Однако такой подход не учитывает наличия нарушенности поверхностного слоя почвы и особенностей накопления химических элементов в разных генетических горизонтах почв (Kashulina et al., 2010, 2014). Использование в расчетах высоты только «активного» слоя или рассмотрение его как единственного потенциального источника воздействия может привести к недооценке негативного воздействия на здоровье населения.

В подзолистом типе почв концентрации химических элементов, в том числе Ni и Cu, значительно различаются между горизонтами в одной точке отбора проб. Мы наблюдаем более низкое содержание в подзолистом горизонте E, с резким увеличением накопления в горизонте B при незначительном снижении к горизонту C. На Кольском полуострове формируются маломощные подзолистые почвы, из-за чего глубина $\sim 0,1$ м может соответствовать иллювиальному горизонту, в котором сосредоточена основная масса химических элементов. Также верхний слой почвы может быть нарушен хозяйственной и промышленной деятельностью или вследствие интенсивного загрязнения окружающей среды, что приводит к обнажению более глубоких почвенных горизонтов, вплоть до материнских пород (Yu et al., 2014; Wu et al., 2020). Так почвы из более глубоких горизонтов становятся основным источником пыли, которая может распространяться с ветровым потоком и, как следствие, влиять на здоровье местного населения. Поэтому при оценке токсического воздействия химических элементов в почвах расчет проводился не только с использованием «активной» высота верхнего слоя почвы 0,1 м (IS_d), но и с учетом мощности почвенного горизонта (IS_m). Такой подход больше соответствует локальным условиям территории: это учитывает природную дифференцированность почвенного профиля и наличие техногенных трансформаций ландшафта – разрушение верхних почвенных горизонтов. Это позволяет избежать завышения или занижения результатов оценки воздействия.

Рассчитанные показатели токсического воздействия Ni и Cu для фоновых почв имеют более низкие значения и изменяются в меньших пределах, чем для зоны воздействия (таблица 5.4.1). Это можно объяснить долгосрочным поступлением этих химических элементов на территорию исследования.

Таблица 5.4.1 – Содержание ($C_{\text{почва}}$, мг/кг) и общий показатель токсического воздействия на здоровье человека (IS_m , STU_{hum}) никеля и меди в почвах исследуемого района

Зона	Пункт отprobования	Расстояние от источника загрязнения, км	Горизонт	Глубина, см	Мощность, см	Ni		Cu	
						$C_{\text{почва}}$	IS_m	$C_{\text{почва}}$	IS_m
Зона воздействия	СП-5	2	В	8-23	15	88,17	60	60,66	5,5
	СП-6	2	Е	5-12	7	53,94	17	32,99	1,4
			В	12-20	8	87,80	28	32,13	1,6
	СП-7	2	С	30-50	20	61,89	57	33,07	4
	СП-12	5	Е	13-21	8	32,46	12	20,00	1,0
			В1	21-37	16	36,00	26	27,26	2,6
			В2С	37-58	21	29,45	28	25,87	3,3
	СП-8	7	Е	1-8	7	7,71	2	24,94	1,1
			В	8-24	16	61,16	45	57,83	5,6
	СП-9	7,5	В1	2-10	8	75,84	28	32,42	1,6
			В2	10-16	6	70,67	19	22,10	0,8
			С	16-42	26	45,78	54	30,29	4,8
	СП-10	14,7	Е	4-10	6	12,34	3	9,76	0,4
В1			10-17	7	24,24	8	14,17	0,6	
В2			17-24	7	37,06	12	29,91	1,3	
С			24-48	24	30,76	34	31,58	4,6	
СП-18	27	Е	10-22	12	3,2	2	5,79	0,4	
		В	22-27	5	30,35	7	32,56	1,0	
СП-2	27,5	В	15	15	39,53	27	30,26	2,7	
Условно-фоновая зона	СП-15	30	О	2-10	8	9,48	3	14,13	0,7
			А	10-29	19	7,54	7	6,63	0,8
			Е	29-48	19	1,7	1,5	2,12	0,2
			В	48-54	6	5,08	1,4	3,89	0,1
	СП-11	34,5	Е	2-8	6	1,23	0,3	1,22	0,04
			В1	6-22	16	9,65	7	7,76	0,7
			В2	22-32	10	9,26	4	9,01	0,5
			С	32-50	18	4,59	4	5,88	0,6

Зона	Пункт опробования	Расстояние от источника загрязнения, км	Горизонт	Глубина, см	Мощность, см	Ni		Cu	
						С _{почва}	IS _m	С _{почва}	IS _m
	СП-13	37,5	Е	9-15	6	0,97	0,2	0,38	0,01
			В1	15-27	12	7,64	3	9,72	0,5
			В2	27-39	12	10,89	4	11,28	0,6
			С	39-59	20	10,56	7	14,74	1,3
	СП-17	60	Е	0-23	23	1,25	0,4	1,12	0,05
			В	23-52	29	5,56	2	3,9	0,2
Хибинский массив	СП-1	33	В	15-20	5	12,62	2	10,36	0,2
	СП-4	44,5	В	30-35	5	3,34	1	6,76	0,2
	СП-3	47,5	В	20	20	11,33	11	24,60	3,1
	СП-16	58,5	А	2-18	16	8,28	6	18,3	2
			Е	18-39	21	6,3	6	9,92	1,3
			В	39-51	12	8,36	5	15,44	1,2

В точках опробования, расположенных в непосредственной близости от источника загрязнения, показатели токсического воздействия рассматриваемых химических элементов значительно выше. Наибольшие значения показателя токсического воздействия Ni в почвах наблюдаются для точек отбора проб на расстоянии 2,0-7,5 км от источника загрязнения, причиной чего можно назвать техногенный фактор.

Общий уровень значений показателя токсического воздействия в почве для никеля выше, чем для меди, в отличие от воды, где наблюдается обратная картина.

В горизонте Е отмечены самые низкие концентрации никеля и меди и, соответственно, самые низкие показатели токсического воздействия. Однако, игнорирование результатов анализа горизонтов В и С или не рассмотрение их в качестве потенциального источника загрязнения может привести к недооценке потенциального негативного влияния на здоровье населения.

Согласно диаграммам (рисунок 5.4.1), можно увидеть различия между значениями показателя токсического воздействия рассчитанными по умолчанию (IS_d) и модифицированным (IS_m).

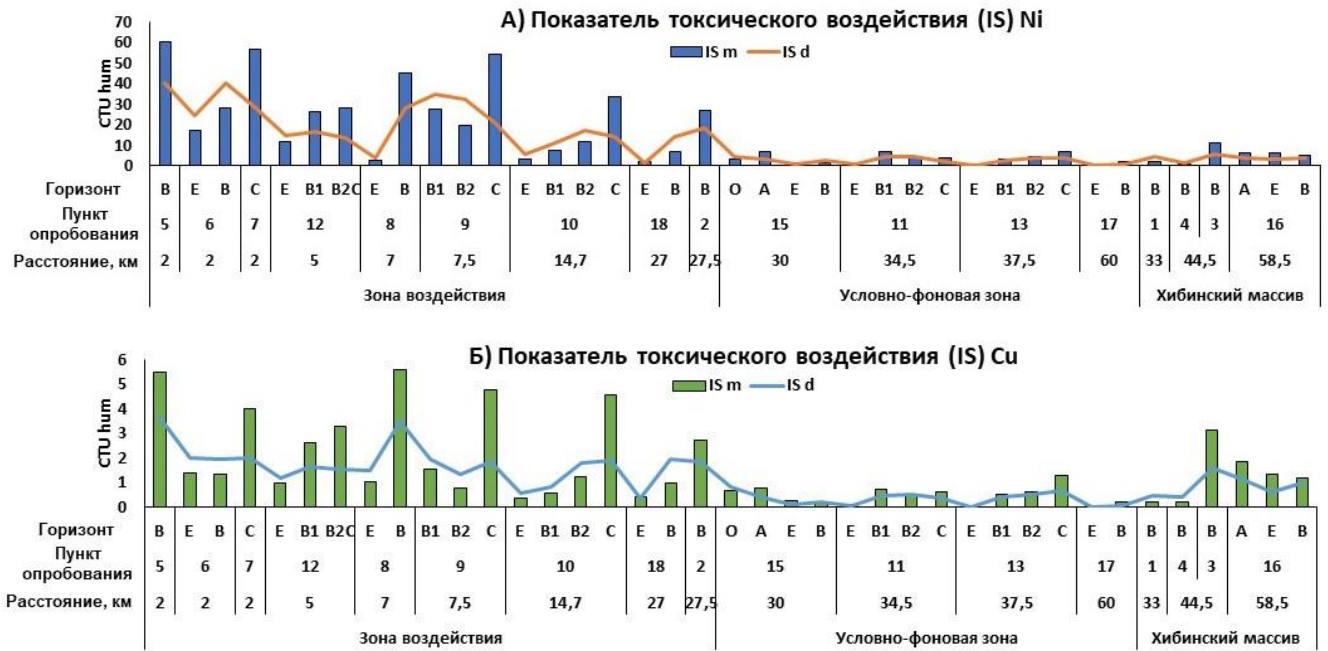


Рисунок 5.4.1 – Распределение показателя токсического воздействия (IS) никеля (А) и меди (Б) по почвенным горизонтам и расстоянию от источника загрязнения

Как отмечалось ранее, рассматриваемая территория характеризуется техногенным нарушением почвенного профиля и размывом верхних горизонтов. В то же время результаты исследования подчеркивают, что глубина и мощность почвенного горизонта являются критическими параметрами для оценки воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Для подобных территорий необходимо проводить адаптированный расчет оценки воздействия на здоровье человека с учетом особенностей (в том числе техногенной нарушенности) ландшафта, с учетом существующего или возможного нарушения естественного почвенного профиля.

ГЛАВА 6. МЕХАНИЗМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Современное эколого-геохимическое состояние ландшафтов европейской части России определяется преимущественно характером техногенной нагрузки и влиянием природных геохимических факторов: геологического строения и, главным образом, наличием месторождений полезных ископаемых (Экология России, 2000).

Основным источником промышленного загрязнения в центральной части Кольского региона является горно-металлургический комбинат «Североникель» (г. Мончегорск). Промышленные выбросы в атмосферу (тяжелые металлы, соединения серы) составляют десятки тысяч тонн в год (Экология России, 2000). Кроме этого, физико-географические особенности района исследований определяют специфический характер распространения загрязняющих веществ. Территория комбината с востока ограничена озером Имандра и Хибинским горным массивом, с запада к ней подходят горные системы Волчьих, Монче- и Чуна-тундр. Промплощадка комбината расположена на слабохолмистой местности и примыкает к северным подножиям гор Монча и Сопча. Их относительное превышение над уровнем комбината составляет около 250 м. С запада от комбината простирается хребет Чуна-тундра, имеющий относительное превышение над его уровнем около 800 м и служащий естественной преградой распространению токсичных выбросов. В соответствии с этим основная масса загрязненного воздуха перемещается меридианально, преимущественно в южном направлении (Опекунова и др., 2006 а).

Результатом интенсивного аэротехногенного загрязнения является существенная деградация ландшафтов на значительной территории вплоть до уничтожения растительности и естественного почвенного покрова с образованием техногенных пустошей (Экология России, 2000). В целом район характеризуется повышенным геохимическим фоном по некоторым элементам ввиду наличия многочисленных медно-никелевых, апатит-нефелиновых, редкометалльных и других месторождений (Экология России, 2000).

Оценивая состояние природных вод, также необходимо обосновать соотношение природных и техногенных источников веществ (Li, Wu, 2010; Amalfitano et al., 2014; Lorenzo et al., 2015).

Водосборная территория озера Имандра характеризуется распространением преимущественно ультрапресных нейтральных и слабощелочных вод гидрокарбонатного кальциевого состава. Специфика вод проявлена в ионном составе, но в большей мере в микрокомпонентном: повышенные концентрации никеля и меди в поверхностных водах западной части территории свидетельствует о техногенном влиянии выбросов комбината

«Североникель». Однако, поверхностные воды на исследуемой территории не проявляют серьезного токсического эффекта. Это говорит о том, что водные экосистемы региона, в виду высокой интенсивности водообмена, еще не потеряли способность поглощать и перерабатывать токсиканты. Однако на фоне долговременного аэротехногенного загрязнения этот потенциал может быть исчерпан в любой момент.

Рядом работ (Шварцев, 1998, 2007; Алексеев и др., 2005; Marques, Chambel, 2017; Chudaev et al., 2019) показано, что основным природным процессом, определяющим формирование химического состава вод, является взаимодействие их с горными породами. Формируя с горными породами единую систему, воды непрерывно растворяют минералы и обогащаются химическими элементами, при этом этот процесс носит эволюционный характер и на каждом этапе своего развития система вода-порода характеризуется своей спецификой (Алексеев и др., 2005; Шварцев и др., 2007). На начальных стадиях взаимодействия с горными породами воды характеризуются максимальной агрессивностью, что сопровождается интенсивным переходом химических элементов в раствор. На этих этапах отсутствуют геохимические барьеры, лимитирующие накопление основных солеобразующих компонентов в растворе. Однако насыщенность вод к оксидам и гидроксидам и активное развитие сорбционных процессов сопровождаются выводом из раствора некоторых микрокомпонентов. Этот факт является весьма важным при оценке эколого-геохимического состояния природных вод в районах активной хозяйственной деятельности, особенно в зоне влияния предприятий горнодобывающего и металлургического сектора.

Все рассматриваемые воды являются неравновесными с первичными алюмосиликатными минералами и находятся в состоянии насыщения гидроксидами и оксидами железа и алюминия, в меньшей степени меди, каолинитом и в отдельных точках иллитом, Са- и Mg-монтмориллонитом. С позиций эволюционного развития система вода-порода в пределах рассматриваемой территории находится на начальных стадиях, что обусловлено в большей степени влиянием природных факторов, а именно высокой интенсивностью водообмена. Однако наличие околоравновесной минеральной фазы оксидов и гидроксидов меди свидетельствует о значительном влиянии на процессы взаимодействия в системе вода-порода и техногенных факторов.

Вода на своем пути неизбежно попадает в почву, значение которой во влагообмене между различными природными компонентами чрезвычайно велико: на ее поверхности и в ее толще происходит резко выраженные изменения скорости и направления передвижения воды, изменения ее свойств и самое главное – ее химического состава. Почва, принимая на себя атмосферные осадки, преобразует их либо в парообразную влагу, либо во влагу поверхностного

стока, либо в воды различных видов подземного стока (Роде, 1963). Это и является проявлением одной из глобальной гидросферной функции почв (Добровольский, Никитин, 2012).

В поверхностном почвенном стоке химические элементы мигрируют в виде растворенных соединений и в составе взвесей твердых почвенных частиц.

В толще почв трансформация химического состава атмосферных осадков происходит, главным образом, за счет взаимодействия раствора с компонентами почв: прочносвязанными и подвижными соединениями (рисунок 6.1) (Мотузова, 2009).

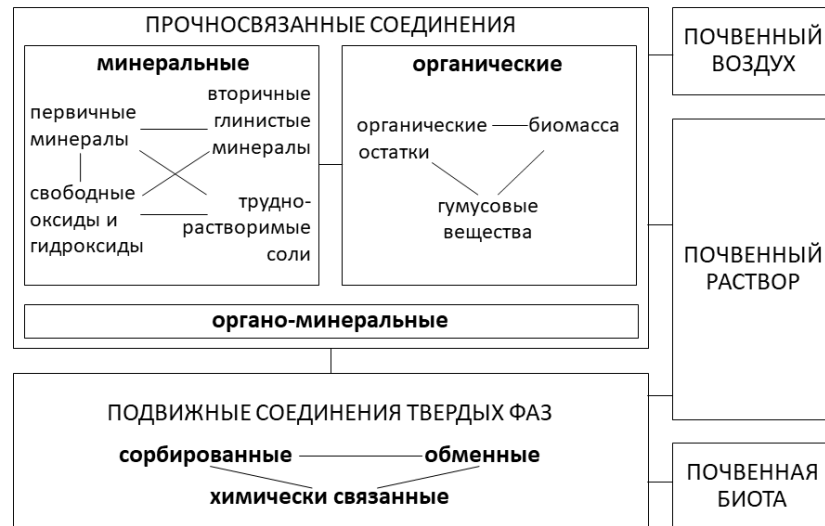


Рисунок 6.1 – Система соединений химических элементов почвы (Мотузова, 2009)

На долю прочносвязанных соединений приходится основная часть общего содержания микроэлементов в почвах (до 90% и более). К ним относятся химические элементы в составе первичных минералов исходных пород и вторичных минералов силикатной (глинистые минералы) и несиликатной (оксиды и гидроксиды металлов, соли) природы (Мотузова, 2009). В спектре постадийных вытяжек они соответствуют остаточной фракции (VI), где в рассматриваемых почвах остается связано большинство химических элементов, и на которую в среднем приходится от 60 до 99% от общего содержания химических элементов, а также фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (V), которая для таких элементов как В, Si, Mo, Sn, Sb, Hf, Ta составляет до 40%.

Химические элементы, прочносвязанные в составе органических остатков и продуктов их трансформации (в том числе гумусовых веществ), тоже оказывают значительное влияние на уровень общего содержания микроэлементов в почве. На рассматриваемой территории в почвах с ним связана основная доля редкоземельных элементов, В, Na, К, Rb, Zr, Mo, Sb, U, Hf, и Ta (от 45 до 95%), а также W, Sc, Ti, As, Se, Pb, Th (от 13 до 45%). Органические соединения обладают значительно меньшей устойчивостью по сравнению с минеральными носителями микроэлементов, поэтому существует риск перехода тяжелых металлов в более подвижную

миграционную форму вследствие разрушения органических соединений, с которыми они связаны, под действием, например, техногенного фактора.

Подвижные формы химических веществ (водорастворимые, обменные, сорбированные) обуславливают возможность выполнения почвой ее основных экологических функций и как естественно-исторического тела, и как источника плодородия и защиты от загрязнения природных сред. Именно с подвижными соединениями химических элементов связано влияние почв на сопредельные среды (Мотузова, 2009).

В районе исследования в подзолистом горизонте подавляющее большинство химических элементов содержатся в меньшем количестве во всех фракциях в абсолютных значениях, чем в иллювиальном горизонте, но при рассмотрении процентного соотношения в подзолистом горизонте оказывается больше подвижных форм. С этим фактом может быть связана более высокая степень токсического эффекта по результатам биотестирования на зеленых водорослях, обнаруженная для подзолистого горизонта почв. Влияние доли подвижных форм химических элементов на степень токсичности почв может быть косвенно подтверждена отсутствием значимых корреляционных связей между индексом токсичности и валовым содержанием химических элементов в почвах.

Формирование в подзолистых почвах горизонтов транзита (вымывания) и аккумуляции (вмывания) веществ как раз происходит за счет перераспределения химических элементов между прочносвязанными, подвижными и растворенными соединениями (Мотузова, 2009). Важными факторами, влияющими на содержание, распределение и формы химических элементов (в особенности тяжелых металлов) в бореальных почвах, является их переувлажненность, слабокислая и кислая реакция среды, легкий механический состав, а также явления, связанные с периодическим промерзанием и протаиванием почв. Эти факторы в целом увеличивают подвижность большинства тяжелых металлов и возможность их перераспределения между эффективными фазами почв (Пинский, 2004; Опекунова и др., 2006 а).

В целом организация системы соединений химических элементов в почвах – совместный результат влияния техногенных и природных факторов. Основным природным фактором выступают буферные свойства природной системы соединений химических элементов в почвах (Мотузова, 2009).

Техногенным фактором выступают выбросы промышленных предприятий в атмосферу и последующее осаждение первичных соединений поллютантов на почвенный покров (преимущественно в форме оксидов или солей) – рисунок 6.2 Такие соединения являются термодинамически неустойчивыми, в виду существенных отличий почвенных условий от условий их формирования. В результате эти соединения постепенно растворяются и тяжелые металлы переходят из твердой фазы в жидкую (Пинский, 2004).

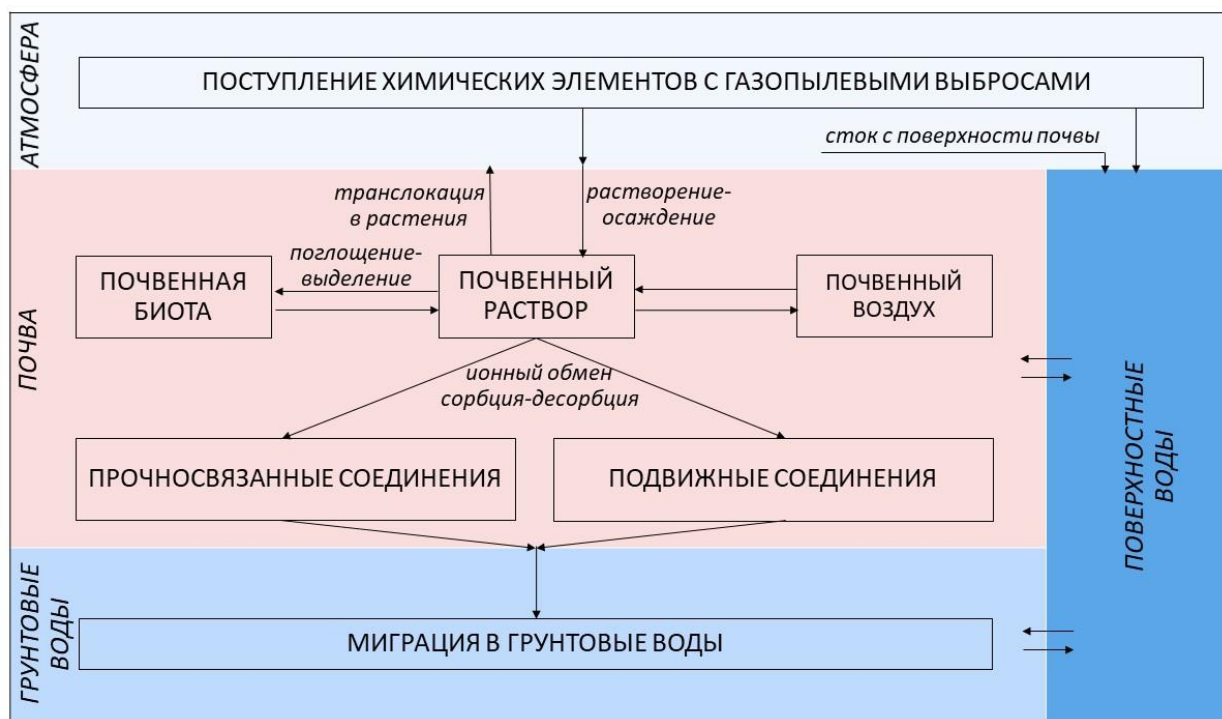


Рисунок 6.2 – Схема миграции химических элементов в системе атмосфера-почва-гидросфера (на основе Пинский, 2004; Мотузова, 2009 с дополнениями автора)

Далее свободные тяжелые металлы в почвенном растворе вступают в обратимые взаимодействия с неорганическими и органическими компонентами почвенного раствора за счет процессов гидролиза, гидратации и комплексообразования. Свободные и образовавшиеся ассоциированные формы металлов взаимодействуют с другими эффективными фазами почв, включая микроорганизмы и корневые системы растений, вступая, таким образом, в биогеохимический круговорот. Процессами, определяющими взаимодействие тяжелых металлов с эффективными фазами почв, прежде всего являются ионный обмен и сорбция-десорбция, осаждение-растворение. Значительно хуже изучены механизмы транслокации металлов из почвенного раствора в растения или микроорганизмы (Пинский, 2004).

Подвижные формы и их миграция вниз по почвенному профилю во многом и определяют химический состав и степень загрязнения грунтовых вод. Образование прочносвязанных соединений предотвращает загрязнение грунтовых вод, но способствует накоплению загрязнителей в самой почве. При превышении ее емкости по данным элементам может произойти обратный переход тяжелых металлов в почвенный раствор, т.е. почва будет являться источником вторичного загрязнения.

Так, на исследуемой территории влияние выбросов медно-никелевого комбината прослеживается в увеличении концентрации никеля и меди в иллювиальном (В) горизонте почв, превышающих ОДК. Важное значение имеет то, что в почвах зоны воздействия выбросов медно-никелевого производства, по сравнению с более удаленными от источника выбросов,

увеличивается содержание и доля подвижных форм основных поллютантов региона - Ni и Cu. Это и является основным следствием техногенного загрязнения – увеличение доли подвижных форм, определяющих высокую миграционную способность и биодоступность тяжелых металлов (Шафигуллина, Удачин, 2007).

При рассмотрении подзолистых почв как системы геохимических барьеров можно отметить, что длительная техногенная нагрузка и, как следствие, деградация верхнего органогенного слоя приводят к продвижению более подвижных форм химических элементов вниз по почвенному профилю и возрастанию нагрузки на иллювиальный горизонт как на хемосорбционный защитный барьер.

Взаимовлияние сопредельных природных сред определяется подвижностью и миграционной способностью химических элементов. Наиболее широко применяемым методом оценки подвижности химических элементов в водной среде является коэффициент водной миграции (Перельман, 1989), который рассчитывается как: $K_{вм} = (m_x * 100) / (a * n_x)$, где m_x – содержание элемента x в воде (г/л), a – минерализация воды (г/л), n_x - процентное содержание элемента x в литосфере (в данной работе - среднее содержание в верхней части континентальной коры по Григорьеву (2009)).

Весьма сильная интенсивность миграции в исследуемых водах характерна для Se, Cl, Pb, Br, I, Au, Hg. Сильной интенсивностью миграции характеризуются Na, Ca, Mo, Mg, Sr, K. Как малоподвижные элементы определяются Zr, Ti, Hf (таблица 6.1). Отмечается, что в поверхностных водах интенсивность миграции химических элементов выше, чем в подземных.

В водах территории холмисто-увалистой равнины отмечается более высокая интенсивность водной миграции, чем в районе Хибинского массива, за исключением K, Ga, Rb, Sr, Mo, Hf, W. Стоит отметить, что в пределах зоны воздействия выбросов медно-никелевого комбината на порядок повышается интенсивность водной миграции Ni и Cu.

Более полно связь водной среды и почвы в аспекте подвижности и миграционной способности химических элементов может проиллюстрировать коэффициент геохимической подвижности. Согласно Шварцеву (1998), коэффициент геохимической подвижности характеризует долю выноса химического элемента раствором относительно связываемой его вторичной фазой и определяется как: $K_{гп} = (m_x * 100) / (a * n_p)$, где n_p – содержание (%) элемента x в продуктах химического выветривания или их аналогах (почвах).

Согласно коэффициенту геохимической подвижности, интенсивность миграции Si оценивается как очень сильная ($K_{гп} > 100$), сопоставимая или даже превосходящая интенсивность миграции Ca, Na и K (таблица 6.2). Это доказывает, что на данной территории идут активные процессы перехода Si из горных пород в природные воды, что находит отражение в их химическом составе.

Таблица 6.1 – Группы элементов по интенсивности водной миграции и оценке подвижности химических элементов

Интенсивность миграции	Значение Квм	Ряды миграции элементов					Оценка подвижности химических элементов
		Холмисто-увалистая равнина		Район Хибинского массива		Озеро Имандра	
		поверхностные воды	подземные воды	поверхностные воды	подземные воды		
Очень сильная	n*(100-1000)	-	-	-	-	-	Весьма подвижные
Весьма сильная	n*(10-100)	Se Cl Pb Br I Au Hg Ni	Cl Pb Se I Br Au	Se Mo Au Hg Cl Pb Br	Cl Mo Br Se	Cl Mo Se B Na	
Сильная	n*(1-10)	Cu Ag Na Mo Ca Sr Mg B As	Hg Na Ca Mo Mg Sr Ni B	Sr Na I K Ca B	I Au Na Ca Sr Hg K	Au Pb Br Hg Sr K W Sb Ca Ni Cu I	Подвижные
Средняя	n*(0,1-1)	Ba Sb Zn Cd K Co P Si Sc U W Li Mn V Rb Cr Tl Sn La Nd Pr Ce Eu Ge Sm Ta	Sn K Ba Sb Ag U Cu Li Si Sc As Cd P Cr Rb	Ag Rb Sb W As Ba Ga P Si U Sc Cd Zn Mg Be Cu La	U B Pb Mg W Ag As Rb Sb Ba Si Sc	As Mg Ag Rb U P Mn Cd Li Zn La Ce Ga Eu Nd Pr	Среднеподвижные
Слабая и очень слабая	0,01-0,1	Gd Tb Y Dy Fe Er Tm Ga Be Ho Lu Th Al Yb Cs Nb Hf Ti	Mn Zn Be Eu Nd V La Pr Ge Sm Tl Y Gd Co Dy W Tb Tm Ta Lu Yb Ho Er Ce Ga Nb	Sn Ge Cs Eu Ni Nd Pr Ta Nb Sm Ce V Cr Y Dy Gd Tb Lu Tl Ho Tm Mn Li Zr Al Er Hf Yb Co Th Fe	Cd Cr Ge Li Cu V Ga Zn Eu Ta Tl Co Sn Lu Be Tm	Ba Sm Gd Tb V Ta Dy Be Nb Y Cs Si Ho Cr Sn Er Tl Tm Co Al Yb Th Sc Lu Fe Zr	Слабоподвижные
Очень слабая	0,001-0,01	Zr	Th Cs Fe Al Hf Zr	Ti	Nb Y Ni Mn Th Cs Fe Tb La Nd Hf Yb Ho Pr Sm Er Dy Gd Al Ce	Ti Ge Hf	Малоподвижные
Очень слабая (Инертная)	менее 0,001	-	Ti	-	Zr Ti	-	Малоподвижные (инертные)

Таблица 6.2 – Группы элементов по степени геохимической подвижности

Значение Кгп	Ряды миграции элементов							
	Холмисто-увалистая равнина						Район Хибинского массива	
	поверхностные воды			подземные воды			поверхностные воды	подземные воды
	Е	В	С	Е	В	С		
n*(100-1000)	Si Na Ca Sr Mo Cl Mg K W Sb Ba Cu	Na Sr Sb Ca	Na Sb Si Sr Mo Hg Ca Br Cl	Na Ca Si Sr Sb Cl Mg K	Si Na Sb Sr Ca Cl	Na Si Sb Se Ca	Si Hg Se Na	Si
n*(10-100)	Hg As Li Ni Ta Sc Zn U Mn Rb Y Be Cd Eu Er Pr Sn Nd Sm Dy La Lu Ho Gd Tm Tb Co Cr Ce Yb	Ta Br Cl Mo K W Hg As Mg Ba Ni Cu Sn	W As K Sn Mg Ag Ni Cd Ba Cu	Sn Ba Be Sc Mo Hg Mn U Li Ni W	Br Sn K Hg Mg Ba I U	Sr Cl Br Ta Hg K Mg Mo	Sb Br Ca K Cl Sr	Na Ca Cl K Mg
n*(1-10)	Tl Ag V Al Zr Th Fe Cs Pb	Ag Cd Rb U Tl Sc Zn Mn I Pb La Pr Co Nd V Li Sm Y	Sc Zn Rb U Mn Pb Tl Li V I Be Cr Co Y	Y Rb Pb Eu Lu Pr Nd La As Sm Dy Er Tm Yb Gd Cd Ag Zn Tl Cr Ho Cu Tb Ce V	Rb Mo Pb Ni Sc As Y W Ag Li Eu Cd Tm Nd Pr Lu Sm Tl La Gd Ho Tb Er Mn Dy Yb	Sn As Ba W Rb Sc U I Cd Ni Ag	W Sc Rb Mg Cd Sn Ba As	Br I Sb Hg Se Sr Sc U W Rb As Cd
n*(0,1-1)	Nb Ga Ti	Gd Eu Lu Ho Er Ce Tb Dy Tm Be Cr Zr Yb Cs Nb Th Ga Fe Al	Nb Ho Er Pr Gd Eu Zr Sm Nd Dy La Lu Tm Tb Ce Fe Ga Yb Al Cs Th Ti	Co Zr Nb Cs Fe Al Ga	Cu Zn Cr Be V Ce Co Cs Nb Zr Hf	Lu Li Tl Zn Y Cr Tm Eu Ho Yb Cu Nd Sm Pr Nb Dy Tb Gd Pb V La Er Be Zr Mn	Ag Ta V Tl Ge U Zn Cr Cu Ga Ni Cs Li Be Pb Lu Y Ho	Cr Tl Ag V Sn Ga

Значение Кгп	Ряды миграции элементов												
	Холмисто-увалистая равнина						Район Хибинского массива						
	поверхностные воды			подземные воды			поверхностные воды					подземные воды	
	Е	В	С	Е	В	С							
0,01-0,1		Ti		Th Ti	Th Ga Fe Al Ti	Co Cs Hf Ce Ga Th Al Fe Ti	Tm Mn Co Dy Sm Er Eu Yb La Nb Al Nd Gd Tb Pr Ti Th Hf Fe Zr Ce						Cu Li Zn Ta Co Lu P Cs Fe Ge Ni Nb Pb Ba Hf Tm Th Ti Be Al
0,001-0,01												Ho Mn Tb Y Yb Er Eu Nd Dy	
менее 0,001												Gd Pr Sm Ce Zr La	

Представленные результаты позволяют оценить влияние медно-никелевого комбината на природные среды через загрязненную атмосферу. Так загрязненные атмосферные осадки попадают в поверхностные водные объекты, либо на поверхность почв, где формируется поверхностный сток, также в конечном итоге попадающий в поверхностные водные объекты. При инфильтрации атмосферных осадков через почву, большая часть тяжелых металлов связывается в почвенных горизонтах. В зоне воздействия на территории с сохранившейся растительностью поверхностные воды и почва отличаются значительным накоплением никеля и меди (СП-12), тогда как подземные воды остаются не загрязненными (S-23). Значения Кгп здесь составляют 0,13-0,24 (таблица 6.3), что говорит о том, что поллютанты связываются во вторичной фазе, за счет чего подземные воды остаются защищены от загрязнения.

Таблица 6.3 – Коэффициенты водной миграции и геохимической подвижности никеля и меди

Зона	Водный объект	Квм		Почвы	Кгп					
		Ni	Cu		E		B		C	
					Ni	Cu	Ni	Cu	Ni	Cu
Зона воздействия	W-2	38,0	13,4	СП-6	35,2	15,8	21,6	16,3	30,7	15,8
	S-18	3,5	0,7		3,2	0,82	2,0	0,85	2,8	0,82
	S-17	2,16	0,13	СП-8	14,0	0,2	1,8	0,09	-	-
	W-13	25,6	12,8	СП-9	-	-	16,9/18,1	15,4/22,5	27,9	16,4
	S-23	0,14	0,09	СП-12	0,22	0,17	0,20	0,13	0,24	0,13
	W-8	6,3	6,8	СП-10	25,5	27,2	13,0/8,5	18,7/8,9	10,2	8,4
	W-10	4,1	4,9	СП-2	-	-	5,13	6,4	-	-
СП-18				63,5	33,2	6,7	5,9	-	-	
Условно-фоновая	W-12	1,21	1,7	СП-11	49,2	53,5	6,3/6,5	8,4/7,3	13,1	11,1
	W-14	3,17	3,9	СП-13	162,8	399,2	20,7/14,6	15,8/13,6	15,0	10,4
	S-19	0,15	0,2	СП-15	4,44	3,8	1,48	2,1	-	-
	S-30	1,52	0,12	СП-17	60,8	4,0	13,6	1,2	-	-
Хибины	W-11	0,05	0,05	СП-1	-	-	0,22	1,8	-	-
	W-9	0,08	0,15	СП-3	-	-	0,33	0,23	-	-
	W-5	0,06	0,26	СП-4	-	-	0,88	1,47	-	-
	W-7	0,06	0,1	СП-16	0,47	0,39	0,35	0,25	-	-
	S-28	0,003	0,03		0,02	0,11	0,02	0,07	-	-

Почва является естественным буфером (геохимическим барьером) на пути проникновения аэротехногенных никеля и меди в подземные воды и играет значительную роль в формировании химического состава всех компонентов окружающей среды, включая сами почвы, растения и подземные воды.

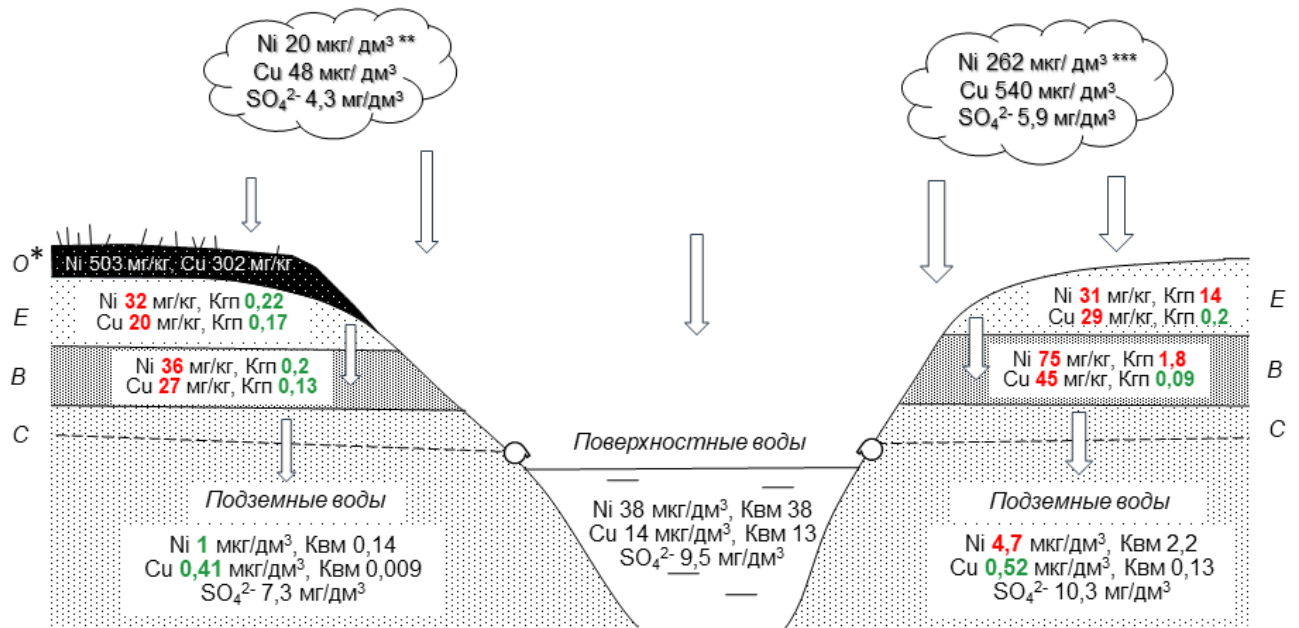


Рисунок 6.3 – Схема трансформации химического состава природных сред в зоне воздействия выбросов медно-никелевого комбината (*Лянгузова, Баркан, 2019; ** Кашулина, Салтан, 2008; ***Евтюгина, Асминг, 2013)

Однако, многолетнее аэротехногенное воздействие приводит к деградации лесного ландшафта и эрозии почв, что свидетельствует о наличии предела сорбционной способности почвенных горизонтов, поскольку способность поверхности почвенных частиц удерживать металлы зависит не только от свойств иона металла и средних показателей свойств поверхности, но и от степени заполнения поверхности этими металлами (уровня загрязнения почв) (Пинский, 2004). В условиях техногенно-нарушенного ландшафта там, где эродирован растительный слой поведение никеля и меди различается. Наблюдается значительное концентрирование никеля и меди в почвенных горизонтах (СП-6, СП-8), тогда как в подземной воде только никеля, а концентрации меди остаются на уровне фона. Значения Кгп для никеля колеблются в пределах 1,8-14,0, для меди 0,09-0,85. Это говорит о том, что здесь происходит вынос Ni водным раствором, но связывание Cu во вторичной фазе. Отмечено, что именно здесь обнаружены собственные минеральные фазы меди. Это может происходить за счет превышения почвы сорбционной способности по никелю, в следствии более высокого его поступления с выбросами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование химического состава природных сред в центральной части Кольского региона происходит под действием природных и техногенных факторов.

Водосборная территория озера Имандра характеризуется распространением преимущественно ультрапресных нейтральных и слабощелочных вод гидрокарбонатного кальциевого состава. Специфика вод проявлена в ионном составе, но в большей мере в микрокомпонентном: повышенные концентрации никеля и меди в поверхностных водах западной части территории свидетельствует во многом о техногенном влиянии комбината «Североникель».

Все рассматриваемые воды являются неравновесными с первичными алюмосиликатными минералами и находятся в состоянии насыщения гидроксидами и оксидами железа и алюминия, в меньшей степени меди, каолинитом и в отдельных точках иллитом, Са- и Mg-монтмориллонитом. С позиций эволюционного развития система вода-порода в пределах рассматриваемой территории находится на начальных стадиях, что обусловлено в большей степени влиянием природных факторов, а именно высокой интенсивностью водообмена. Однако наличие околоравновесной минеральной фазы оксидов и гидроксидов меди свидетельствует о значительном влиянии на процессы взаимодействия в системе вода-порода и техногенных факторов.

В пределах рассматриваемой территории складываются различные эколого-геохимические условия: в пределах ландшафта с сохранившимся почвенно-растительным слоем содержание никеля и меди в поверхностных водах в зоне влияния пыле-газовых выбросов медно-никелевого комбината существенно выше, чем в подземных водах. Это свидетельствует о наличии источника антропогенного воздействия на природные воды, однако его влияние прослеживается только по состоянию поверхностных вод, тогда как подземные воды в этих условиях защищены от негативного воздействия выбросов медно-никелевого комбината. В условиях техногенно-нарушенного ландшафта там, где разрушен почвенно-растительный слой, влияние деятельности медно-никелевого комбината прослеживается в состоянии и подземных вод. В данном случае почва является естественным буфером, связывающим химические элементы, поступающих из загрязненной атмосферы. Так этап инфильтрации атмосферных осадков через почву приобретает значительную роль в формировании химического состава подземных вод.

Для почв влияние выбросов медно-никелевого комбината прослеживается в увеличении концентрации никеля и меди в иллювиальном (В) горизонте, превышающих ОДК.

Загрязненные атмосферные осадки попадают в поверхностные водные объекты, либо на поверхность почв, где формируется поверхностный сток, также в конечном итоге попадающий в поверхностные водные объекты. При инфильтрации атмосферных осадков через почву, большая часть тяжелых металлов связывается в разных почвенных горизонтах. Следовательно, почва является естественным буфером на пути проникновения аэротехногенных никеля и меди в подземные воды и играет значительную роль в формировании химического состава всех компонентов окружающей среды, включая сами почвы, растения и подземные воды. Однако, многолетнее аэротехногенное воздействие привело к деградации лесного ландшафта и эрозии почв, что свидетельствует о наличии предела сорбционной способности почвенных горизонтов.

По результатам оценки токсичности природных компонентов методом биотестирования природные воды района водосбора озера Имандра Кольского полуострова характеризуются допустимой степенью токсичности, что может говорить о том, что экосистема способна поглощать и перерабатывать токсиканты в определенных пределах. Рассматриваемые почвы характеризуются допустимой степенью токсичности. Более высокая степень токсического эффекта по результатам биотестирования на зеленых водорослях характерна для подзолистого горизонта. Это может быть связано с наличием большей доли подвижных форм химических элементов в данном почвенном горизонте, выявленной для этого типа почв.

Для рассмотренных почв Кольского региона в подзолистом горизонте отмечены самые низкие концентрации меди и никеля и, соответственно, самые низкие показатели токсического воздействия. Однако, игнорирование результатов анализа нижележащих горизонтов В и С или не рассмотрение их в качестве потенциального источника загрязнения может привести к недооценке негативного влияния на здоровье населения, т.к. часто верхние горизонты почв могут быть разрушены в результате промышленной и хозяйственной деятельности. Но в целом в зоне влияния комбината уровень значений показателя токсического воздействия никеля и меди для поверхностных вод выше, чем для почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова, В.В. Применение метода биотестирования в анализе токсичности природных и сточных вод (на примере Нижневартовского района Тюменской области): Монография / В.В. Александрова. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2009. — 94 с.
2. Алексеев, В.А. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 1: Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие и моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев, В.П. Зверев, М.Б. Букаты, М.В. Мироненко, М.В. Чарыкова, О.В. Чудаев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005 — 244 с.
3. Алексеенко, В.А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов : монография / В.А. Алексеенко, А.В. Алексеенко. — Ростов н/Д : Издательство Южного федерального университета, 2013. — 380 с.
4. Ананьев, В.Н. Родники Мурманской области: справочник / В.Н. Ананьев. — Мурманск: Книжное изд-во, 2010. — 88 с.
5. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Кол. науч. центр РАН, Ин-т проблем пром. экологии Севера; отв. ред. Т.И. Моисеенко. — Москва: Наука, 2002. — С. 24 — 32.
6. Бородина, Н.А. Содержание различных форм Cu, Zn и Mn в почвах города Благовещенск (Амурская область) / Н.А. Бородина, В.И. Голов // Вестник ДВО РАН. — 2013. — № 5. — С. 69–76.
7. Будников, Г.К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем / Г.К. Будников // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — №5. — С. 23–29.
8. Водяницкий, Ю.Н. Изучение тяжелых металлов в почвах / Ю.Н. Водяницкий. — М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2005. — 109 с.
9. Воробьева, Д.А. Формы миграции химических элементов в природных водах района озера Имандра (Мурманская область) / Д.А. Воробьева // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4-8 Апреля 2016. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016 — Т. 1 — С. 636-638.
10. Гаррелс, Р.М. Растворы, минералы, равновесия / Р.М. Гаррелс, Ч.Л. Крайст. — М.: Мир, 1968. — 368 с.
11. Геологическая карта Кольского региона. / Редактор Ф.П. Митрофанов. — Апатиты. — 2001

12. Геология СССР. Том 27. Геологическое описание. Мурманская область - Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр. - Москва. - 1958 г.
13. Гидрогеология СССР. Том XXVII. Мурманская область и Карельская АССР — Недр, Москва, 1971 г. - 295 с.
14. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества. - М.: Издательство стандартов, 1991. - 8 с.
15. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. - М.: Стандартинформ, 2011. - 6 с.
16. Григорьев, Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры / Н.А. Григорьев. - Екатеринбург: УрО РАН, 2009. - 383 с.
17. Гусева, Н.В. Механизмы формирования химического состава природных вод в различных ландшафтно-климатических зонах горно-складчатых областей центральной Евразии: дис. ... д-ра геол.- минерал. наук: 25.00.07 / Гусева Наталья Владимировна. - Томск, 2018. - 300 с.
18. Гусева, Н.В. Особенности взаимодействия в системе вода-порода на территории водосбора озера Имандра (Кольский полуостров) / Н.В. Гусева, Д.А. Воробьева, З.А. Евтюгина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331. - № 8. - С. 177-188. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2779>
19. Давыдова, О.А. Влияние физико-химических факторов на содержание тяжелых металлов в водных экосистемах / О.А. Давыдова, Е.С. Климов, Е.С. Ваганова, А.С. Ваганов; под науч. ред. Е. С. Климова. - Ульяновск : УлГТУ, 2014. - 167 с.
20. Даувальтер, В.А. Состояние подземных вод Мончегорского района / В.А. Даувальтер, М.В. Даувальтер // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2010. - № 3. - С. 26-33.
21. Даувальтер, В.А. Химический состав поверхностных вод в зоне влияния комбината «Североникель» / В.А. Даувальтер, М.В. Даувальтер, Н.В. Салтан, Е.Н. Семенов // Геохимия. - 2009. - № 6. - С. 628-646.
22. Добровольский, Г.В. Функции почв в биосфере и экосистемах (экологическое значение почв) / Г.В. Добровольский, Е.Д. Никитин. - М.: Наука, 1990. - 261 с.
23. Добровольский, Г.В. Экология почв. Учение об экологических функциях почв / Г.В. Добровольский, Е.Д. Никитин. - 2-е изд., уточн. и доп. - М.: Изд-во МГУ, 2012. - 412 с.
24. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2019 году. — Мурманск: Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области, 2020. - 177 с.

25. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2008 году. – Мурманск; Кн. изд-во, 2009. — 152 с
26. Дудкин, О.Б. Геохимические процессы взаимодействия минерального вещества и водной среды в области Хибинского щелочного массива / О.Б. Дудкин, С.С. Сандимиров // Геохимия. – 2007. – №11. – С. 1195–1202.
27. Евдокимова, Г.А. Содержание и токсичность тяжелых металлов в почвах зоны воздействия воздушных выбросов комбината «Североникель» / Г.А. Евдокимова, Г.В. Калабин, Н.П. Мозгова // Почвоведение. – 2011. – № 2. – С. 261–268.
28. Евдокимова, Г.А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера / Г.А. Евдокимова, отв. ред. В. Н. Переверзев. – Апатиты : КНЦ РАН, 1995. – 268 с.
29. Евтюгина, З.А. О формировании потоков веществ в аэротехногенно трансформированном лесном ландшафте / З. А. Евтюгина, Ю. Г. Копылова, Н. В. Гусева // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 185-198. – DOI 10.21443/1560-9278-2018-21-2-185-198.
30. Евтюгина, З.А. О формировании потоков веществ в аэротехногенно трансформированном лесном ландшафте / З. А. Евтюгина, Ю. Г. Копылова, Н. В. Гусева // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 185-198. – DOI 10.21443/1560-9278-2018-21-2-185-198.
31. Евтюгина, З.А. Минералогический состав почв техногенных пустошей и редколесья / З.А. Евтюгина, Ю.Г. Копылова, Е.А. Солдатова // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения : Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова. – 2019. – С. 19-20.
32. Евтюгина, З.А. Особенности формирования состава инфильтрационных вод в условиях аэротехногенного загрязнения / З.А. Евтюгина, В. Э.Асминг // Вестник МГТУ : труды Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 73-80.
33. Евтюгина, З.А. Химический состав природных вод окрестностей озера Имандра (Мурманская область) / З.А. Евтюгина, Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, И.С. Мазурова, Т.А. Русинова (Мехович), Д.А. Воробьёва // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: материалы Всероссийской конференции с международным участием с элементами научной школы, Томск, 23-27 ноября 2015. – Томск: ТПУ. – 2015. – С. 699-704.
34. Елсукова, Е.Ю. Техногенная трансформация потоков тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия медно-никелевого производства / Е.Ю. Елсукова, М.Г. Опекунова, А.Ю.

Опекунов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 12-1 (90). – С. 118-124. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.024>

35. Зверев, В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов / В.П. Зверев. – М.: Недра, 1982. – 182 с.

36. Интерактивная электронная карта недропользования Российской Федерации (открытая версия) - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://openmap.mineral.ru> . – Загл. с экрана (дата обращения 25.06.2021).

37. Калабин Г.В. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в зоне влияния комбината «Североникель» в процессе снижения нагрузки на окружающую среду / Г.В. Калабин, Г.А. Евдокимова, В.И. Горный // Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 74–77

38. Кашулина, Г.М. Аэротехногенная трансформация почв европейского субарктического региона. Ч.1. / Г.М. Кашулина. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. – 158 с.

39. Кашулина, Г.М. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове / Г.М. Кашулина // Почвоведение. – 2018. – № 4. – С. 493-505. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804010X>

40. Кашулина, Г.М. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель» / Г.М. Кашулина, Н.В. Салтан. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2008. – 239 с.

41. Кашулина, Г.М. Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове / Г.М. Кашулина // Почвоведение. – 2017. – № 7. – С. 860-873. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17070036>

42. Кирюхин, В.А. Гидрогеохимия: Учеб. для вузов / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, С.Л. Шварцев. – М.: Недра, 1993. – 384с.

43. Крайнов, С.Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец; отв. ред. академик Н.П. Лаверов. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.

44. Кривошеин, Д.А. Экология и безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие для вузов/ Д.А. Кривошеин, Л.А.Муравей, Н.Н. Роева и др.; под ред. Л.А. Муравья. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 447 с.

45. Кузнецов, В.А. Метод постадийных вытяжек при геохимических исследованиях / В.А. Кузнецов, Г.А. Шимко. – Минск: Наука и техника, 1990. – 65 с.

46. Ладонин, Д.В. Методы определения фракционного состава соединений тяжёлых металлов в почвах / В кн. Теория и практика химического анализа почв. Под ред. Л. А. Воробьёвой. М., ГЕОС, 2006. – С. 293-309.

47. Линник, П.Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах / П.Н.

Линник, Б.И. Набиванец. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 273 с.

48. Лукина, Н.В. Почвенные воды / Н.В. Лукина, Т.Т. Горбачева, В.В. Никонов, Е. Стайнес // В кн.: Рассеянные элементы в бореальных лесах. – М.: Наука, 2004. – С.113-150

49. Лянгузова, И.В. Сравнительный анализ уровня загрязнения органогенного горизонта Al-Fe-подзолов и болотных почв в локальной зоне воздействия медно-никелевого комбината / И.В. Лянгузова, В.Ш. Баркан // Принципы экологии. – 2019. – № 4. – С. 57–68.

50. Моисеенко, Т.И. Закисление вод и его влияние на содержание элементов в природных водах Кольского Севера. / Т.И. Моисеенко, М.М. Базова // Геохимия. – 2016 – № 1. – С. 126. DOI:10.7868/S0016752516010106

51. Моисеенко, Т.И. Формирование химического состава вод Мурманской области в условиях функционирования горнорудных и металлургических производств / Т.И. Моисеенко, Н.А. Гашкина // Арктика: экология и экономика. – 2015. – №4(20). – С. 4-13.

52. Мониторинг окружающей среды в зоне влияния АО "Кольская ГМК" и рекультивация нарушенных земель - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.kolagmk.ru/ecology/monitoring> . – Загл. с экрана (дата обращения 25.06.2021).

53. Мотузова, Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг/ Г.В. Мотузова. – 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 168 с.

54. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.

55. Никонов, В.В. Рассеянные элементы в Al-Fe-гумусовых подзолах / В.В.Никонов, Н.В. Лукина // В кн.: Рассеянные элементы в бореальных лесах М.: Наука, 2004. – С.85-112

56. Опекунова, М.Г. Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». I. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвогрунтах г. Мончегорска / М.Г. Опекунова, Е.Ю. Елсукова, В.А. Чекушин, О.В. Томилина, Р. Салминен, К. Рейманн // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2006. – № 2. – С. 96-103. (а)

57. Опекунова, М.Г. Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». II. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвах / М.Г. Опекунова, Е.Ю. Елсукова, В.А. Чекушин, О.В. Томилина, Р. Салминен, К. Рейманн // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2006. – № 3. – С. 39-49. (б)

58. Переверзев, В.Н. Зональные особенности гумусообразования в альфегумусовых подзолах Кольского полуострова / В.Н. Переверзев // Почвоведение. – 2011. – № 11. – С. 1288–1294.

59. Переломов, Л.В. Взаимодействие редкоземельных элементов с биотическими и абиотическими компонентами почв / Л.В. Переломов // *Агрохимия*. – 2007. – № 11. – С. 85–96.
60. Пинский, Д.Л. Концентрации и формы рассеянных элементов в почвах / Д.Л. Пинский // В кн.: *Рассеянные элементы в бореальных лесах* М.: Наука, 2004. – С.77-85
61. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. Москва, 2014
62. Почвоведение. Учеб. для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 2. Типы почв, их география и использование / Л.Г. Богатырев, В.Д. Васильевская, А.С. Владыченский и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 368 с.
63. Ревич, Б.А. Риски здоровью населения в «горячих точках» от химического загрязнения Арктического макрорегиона / Б.А. Ревич // *Проблемы прогнозирования*. – 2020. – № 2 (179). – С. 148-157.
64. Ресурсы поверхностных вод СССР, Том 1 Кольский полуостров / под ред. Ю. А. Елкшина, В. В. Куприянова. — Л.: Гидрометеиздат, 1970.
65. Роде, А.А. Водный режим почв и его регулирование / А.А. Роде. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. – 122 с.
66. Сандимиров, С.С. Влияние технического водоснабжения Кольской АЭС на содержание тяжелых металлов в озере Имандра / С.С. Сандимиров // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2020. – №2(86). – С. 93–103. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.2.93-103>
67. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: –2021. – 496 с.
68. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2001. – 51 с.
69. Соловов, А.П. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / А.П. Соловов, А.Я. Архипов, В.А. Бугров, С.А. Воробьев, Д.М. Гершман, С.В. Григорян, Е.М. Киятовский, А.А. Матвеев, С.А. Миляев, В.А. Николаев, А.И. Перельман, А.П. Соловов, Ю.В. Шваров, Б.Я. Юфа, А.А. Ярошевский. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
70. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99
71. ФР 1.39.2015.19242 (ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.2-98 (ред. 2015г.)) Токсикологические методы контроля. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-

питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», Санкт-Петербург, 2015

72. ФР 1.39.2015.19243 (ПНД Ф Т 16.2:2.2-98 (ред. 2015 г.)) Токсикологические методы контроля. Методика определения токсичности проб почв, донных отложений и осадков сточных вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», Санкт-Петербург, 2015

73. Шафигуллина, Г.Т. О формах нахождения элементов в техногенных и фоновых почвах Учалинской геотехнической системы / Г.Т. Шафигуллина, В.Н. Удачин // Башкирский Химический Журнал. – 2007. – №14(4). – С. 70-74.

74. Шварцев, С.Л. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007 – 389 с.

75. Шварцев, С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Недра, 1998. – 366 с.

76. Экологический атлас Мурманской области / Ин-т проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН ; Географический факультет МГУ ; Госкомитет по охране окружающей среды Мурманской обл. – М.: Апатиты, 1999. – 48 с.

77. Экология России. Т.1. Европейская часть / Гл. ред. Г.С. Вартанян. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 300 с.

78. Яковлев, Б.А. Климат Мурманской области / Б.А. Яковлев. — Мурманск: Кн. изд-во, 1961.

79. Ярошевский, А.А. Кларки геосфер / А.А. Ярошевский // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – С. 7–14.

80. Alquezar, C. Heavy metals contaminating the environment of a progressive supranuclear palsy cluster induce tau accumulation and cell death in cultured neurons / C. Alquezar, J.B. Felix, E. McCandlish, B.T. Buckley, D. Caparros-Lefebvre, C.M. Karch, L.I. Golbe, A.W. Kao // Scientific Reports – 2020. – V. 10. – Article 569. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56930-w>

81. Amalfitano, S. Groundwater geochemistry and microbial community structure in the aquifer transition from volcanic to alluvial areas / S. Amalfitano, A.D. Bon, A. Zoppini, S. Ghergo, S. Fazi, D. Parrone, P. Casella, F. Stano, E. Preziosi // Water Resources. – 2014. – V. 65. – P. 384–394.

82. Äyräs, M. Comparison of sulphur and heavy metal contents and their regional distribution in humus and moss samples from the vicinity of Nikel and Zapoljarnij, Kola Peninsula, Russia / M. Äyräs, V. Pavlov, C. Reimann // Water, Air and Soil Pollution. – 1997. – V. 98. – P. 361-380.

83. Barsova, N. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation — A review / N. Barsova, O. Yakimenko, I. Tolpeshta, G. Motuzova // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 249. – P. 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020>
84. Bazova, M.M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North. / M.M. Bazova // *Geochemistry International*. – 2017. – V. 55(1). – P.131-143. DOI: 10.1134/S0016702917010025
85. Bratec, T. Towards integrating toxicity characterization into environmental studies: case study of bromine in soils / T. Bratec, N. Kirchhübel, N. Baranovskaya, B. Laratte, O. Jolliet, L. Rikhvanov, P. Fantke // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – V. 26. P. 19814–19827. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05244-5>
86. Chin-Chan, M. Environmental pollutants as risk factors for neurodegenerative disorders: Alzheimer and Parkinson diseases / M. Chin-Chan, J. Navarro-Yepes, B. Quintanilla-Vega // *Frontiers in Cellular Neuroscience*. – 2015. – V. 9. – Article 124. <https://doi.org/10.3389/fncel.2015.00124>
87. Chudaev, O. 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference) / O. Chudaev, Y. Kharaka, R. Harmon, R. Millot, O. Shouakar-Stash // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – V. 98. – 1320 p.
88. DeFu, H. Toxicity bioassays for water from black-odor rivers in Wenzhou, China / H. DeFu, C. RuiRui, Z. EnHui, C. Na, Y. Bo, S. HuaHong, H. MinSheng // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – V. 22. – P.1731-1741. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2484-1>
89. Ettler, V. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: A review / V. Ettler // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 64. – P. 56–74. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.020>
90. Evseev, A.V. Toxic metals in soils of the Russian North / A.V. Evseev, T.M. Krasovskaya // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 174. – P. 128-131. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.05.018>
91. Evtyugina, Z.A. Chemical composition of natural waters of contaminated area: The case for the Imandra Lake catchment (the Kola Peninsula) / Z.A. Evtyugina, N.V. Guseva, J.G. Kopylova, D.A. Vorobeva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 33. – №1. – Article: 012004.
92. Fantke, P. USEtox® 2.0. Documentation (Version 1) / P. Fantke, M. Bijster, C. Guignard, M. Hauschild, M. Huijbregts, O. Jolliet, A. Kounina, V. Magaud, M. Margni, T. McKone, L. Posthuma, R.K. Rosenbaum, D. van de Meent, R. van Zelm. – 2017. – 208 p. <https://doi.org/10.11581/DTU:00000011>
93. Fernandez, M.D. Ecological risk assessment of contaminated soils through direct toxicity assessment / M.D. Fernandez, E. Cagigal, M.M. Vega, A. Urzelai, M. Babin, J. Pro, J.V. Tarazona //

Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2005. – V. 62. – P. 174–184.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.11.013>

94. Ghayoraneh, M. Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran / M. Ghayoraneh, A. Qishlaqi // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 180. – P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.05.007>

95. Gromet, L.P. The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, L.A. Haskin, R.L. Korolev, R.F. Dymek // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1984. – V.18. – Is. 12. – P.2469-2482. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)

96. Hei, L. Characteristic of speciation of heavy metals in municipal sewage sludge of Guangzhou as fertilizer / L. Hei, P. Jin, X. Zhu, W. Ye, Y. Yan // Procedia Environmental Sciences. – 2016 – V. 31. – P. 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.031>

97. Kashulina, G. Snow and rainchemistry around the «Severonikel» industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis. / G. Kashulina, P. de Caritat, C. Reimann // Atmospheric Environment. – 2014. V. – 89. P. – 672-682. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.008>

98. Kashulina, G.M.. Transformation of the soil organic matter under the extreme pollution by emissions of the Severonikel smelter / G.M. Kashulina, V.N. Pereverzev, T.I. Litvinova // Eurasian Soil Science. – 2010. – V. 43. – P. 1174–1183. <https://doi.org/10.1134/S1064229310100108>

99. Khadhar, S. Integration of sequential extraction, chemical analysis and statistical tools for the availability risk assessment of heavy metals in sludge amended soils / S. Khadhar, A. Sdiri, A. Chekirben, R. Azouzi, A. Charef // Environmental Pollution. – 2020. – V. 263. – Article 114543. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114543>

100. Khorasanipour, M. Geochemical fractionation pattern and environmental behaviour of rare earth elements (REEs) in mine wastes and mining contaminated sediments; Sarcheshmeh mine, SE of Iran. / M. Khorasanipour, S. Rashidi // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 210. – Article 106450. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106450>

101. Kyllönen, K. Trends and source apportionment of atmospheric heavy metals at a subarctic site during 1996–2018 / K. Kyllönen, M. Vestenius, P. Anttila, U. Makkonen, M. Aurela, I. Wängberg, M. Nerentorp Mastromonaco, H. Hakola // Atmospheric Environment. – 2020. – V. 236. – Article 117644. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117644>

102. Li, P.Y. Groundwater environmental problems and their countermeasures / P.Y. Li, J.H. Wu // Journal of Environmental Science and Management. – 2010. – V.35. – №4. – P. 60-62.

103. Li, Z. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities / Z. Li, Q. Yang, Y. Yang, H. Ma, H. Wange, J. Luo, J. Bian, J. D. Martin // *Journal of Hydrology*. – 2019. – V. 576. – P. 685-697.
104. Lorenzo, T.Di. Ammonium threshold values for groundwater quality in the EU may not protect groundwater fauna: evidence from an alluvial aquifer in Italy / T. Di Lorenzo, M. Cifoni, P. Lombardo, B. Fiasca, D.M.P. Galassi // *Hydrobiologia*. – 2015. – V. 743. – P.139–150.
105. Marques, J.M. 15th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15 / J.M. Marques, A. Chambel // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2017. – № 17. – 980 p.
106. McLaren, R.G. Studies on soil copper. 1. The fractionation of copper in soils / R.G. McLaren, D.W. Crawford // *Journal of Soil Science*. – 1973. – V. 24. – Iss. 2. – P. 172-181.
107. McLennan, S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust / S.M. McLennan // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2001. – V. 2. – Iss. 4. – 2000GC000109. <https://doi.org/10.1029/2000GC000109>
108. Moiseenko, T.I. Aquatic geochemistry of small lakes: Effects of environment changes / T.I. Moiseenko, N.A. Gashkina, M.I. Dinu, T.A. Kremleva, V.Yu. Khoroshavin // *Geochemistry International* volume. – 2013. – V. 51. – P. 1031–1148. <https://doi.org/10.1134/S0016702913130028>
109. Moiseenko, T.I. Ecosystem and human health assessment to define environmental management strategies: The case of long-term human impacts on an Arctic lake. / T.I. Moiseenko, A.A. Voinov, V.V. Megorsky, N.A. Gashkina, L.P. Kudriavtseva, O.I. Vandish, A.N. Sharov, Y. Sharova, I.N. Koroleva // *Science of the Total Environment*. – 2003. – V. 369. – P. 1-20.
110. Nystrand, M.I. Metal species in a Boreal river system affected by acid sulfate soils / M.I. Nystrand P. Österholm // *Applied Geochemistry*. – 2013. – V. 31. – P. 133-141.
111. Pirrone, N. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. / N. Pirrone, S. Cinnirella, X. Feng, R.B. Finkelman, H.R. Friedli, J. Leaner, R. Mason, A.B. Mukherjee, G.B. Stracher, D.G. Streets, K. Telmer // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2010. – V.10. – P. 5951-5964. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-10-5951-2010>
112. Poznyakov, V.Ya. The «Severonikel» smelter complex: History of development // *Aerial pollution in the Kola Peninsula : Proceedings of the international workshop* / Eds. Kozlov M.V., Haukioja E., Yarmishko V.T. April 14–16, 1992, St. Petersburg. Apatity : KSC, 1993. – P. 16–19.
113. Qureshi, A.A. Exposure of heavy metals in coal gangue soil, in and outside the mining area using BCR conventional and vortex assisted and single step extraction methods. Impact on orchard grass / A.A. Qureshi, T.G. Kazi, J.A. Baig, M.B. Arain, H.I. Afridi // *Chemosphere*. – 2020. – V. 255. – Article 126960. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126960>
114. Ren, H. The influence of colloids on the geochemical behavior of metals in polluted water using as an example Yongdingxin River, Tianjin, China / H. Ren, H. Liu, J. Qu, M. Berg, W. Qi, W. Xu

- // Chemosphere. – 2010. – V. 78. – P. 360–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.018>
115. Rinklebe, J. Redox chemistry of nickel in soils and sediments. A review. / J. Rinklebe, S.M. Shaheen, // Chemosphere. – 2017. – V. 179. – P. 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.153>
116. Shabbir, Z. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. / Z. Shabbir, A. Sardar, A. Shabbir, G. Abbas, S. Shamshad, S. Khalid, Natasha, G.Murtaza, C. Dumat, M. Shahid // Chemosphere. – 2020. – V. 259. – Article 127436. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>
117. Shahzad, B. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment - A review. / B. Shahzad, M. Tanveer, A. Rehman, S.A. Cheema, S. Fahad, S. Rehman, A. Sharma // Plant Physiology and Biochemistry. – 2018. – V. 132. – P. 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014>
118. Souza, E.S. de. Assessment of risk to human health from simultaneous exposure to multiple contaminants in an artisanal gold mine in Serra Pelada, Pará, Brazil. / E.S. de Souza, R.A. Texeira, H.S.C. da Costa, F.J. Oliveira, L.C.A. Melo, K. do Carmo Freitas Faial, A.R. Fernandes // Science of The Total Environment. – 2017 – V. 576. – P. 683-695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.133>
119. Spurgeon, D.J. Outdoor and indoor cadmium distributions near an abandoned smelting works and their relations to human exposure / D.J. Spurgeon, A. Lawlor, H.L. Hooper, R. Wadsworth, C. Svendsen, L.D.K. Thomas, J.K. Ellis, J.G. Bundy, H.C. Keun, L. Jarup // Environmental Pollution. 2011. V. 159, P. 3425–3432. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.028>
120. Taylor, S.R. The Continental Crust: Its Composition and Evolution / S.R. Taylor, S.M. McLennan. – Oxford: Blackwell, 1985. – 315 p.
121. Wilkin, R.T. Groundwater co-contaminant behavior of arsenic and selenium at a lead and zinc smelting facility / R.T. Wilkin, T.R. Lee, D.G. Beak, R. Anderson, B. Burns // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 89. – P. 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.12.011>
122. Wolfram, G. Assessing the impact of chemical pollution on benthic invertebrates from three different European rivers using a weight-of-evidence approach / G. Wolfram, S. Hoss, C. Orendt, C. Schmitt, Z. Adámek, N. Bandow, M. Großschartner, J.V.K. Kukkonen, V. Leloup, J.C. López Doval, I. Muñoz, W. Traunspurger, A. Tuikka, C. Van Liefferinge, P.C. von der Ohe, E. de Deckere // Science of The Total Environment. – 2012. – V. 438. – P. 498–509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.065>
123. Wu, Z. Spatial distribution of the impact of surface mining on the landscape ecological health of semi-arid grasslands / Z. Wu, S. Lei, Q. Lu, Z. Bian, S. Ge // Ecological Indicators. – 2020. – V. 111. – Article 105996. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105996>

124. Yu, H. Analysis of the spatial relationship between heavy metals in soil and human activities based on landscape geochemical interpretation / H. Yu, S.J. Ni, Z.W. He, C.J. Zhang, X. Nan, B. Kong, Z.Y. Weng // Journal of Geochemical Exploration – 2014. – V. 146. – P. 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.010>

125. Zhang, H. bin. Assessment of selective sequential extraction procedure for determining arsenic partitioning in copper slag / H. bin Zhang, Y. zheng He, J. jing Hu, Y. nan Wang, H. zhen Cao, J. Zhou, G. qu. Zheng // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). –2020. – V.30 – Is.10. – P.2823–2835. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65424-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65424-3)

126. Zhang, X. Estimation of lead and zinc emissions from mineral exploitation based on characteristics of lead/zinc deposits in China / X. Zhang, L. Yang, Y. Li, H. Li, W. Wang, Q. Ge // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011– V. 21. – Is.11. – P. 2513-2519. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61044-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61044-3)