



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Воробьева Дарья Андреевна**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.21. Геоэкология

Томск – 2022

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

**Научный руководитель:**

**Гусева Наталья Владимировна**

доктор геолого-минералогических наук,  
доцент, ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет»,  
заведующий кафедрой-руководитель  
отделения геологии на правах кафедры  
Инженерной школы природных ресурсов

**Официальные оппоненты:**

**Гаськова Ольга Лукинична**

доктор геолого-минералогических наук,  
ФГБУН Институт геологии и минералогии  
им. В.С. Соболева Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
рудообразующих систем

**Плюснин Алексей Максимович**

доктор геолого-минералогических наук,  
ФГБУН Геологический институт им. Н.Л.  
Добрецова Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Улан-Удэ,  
заведующий лабораторией гидрогеологии и  
геоэкологии

Защита состоится «6» июня 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5 (корпус 20, ауд. 504).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru).

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.29  
доктор биологических наук, доцент

Барановская Наталья Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 Кореи, 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.

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).

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.

**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 международной базой данных Scopus. Также полученные результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях: Всероссийская конференция 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» (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, Россия, 2019 г.).

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

**В главе 1** представлены результаты анализа литературных источников по теме работы, сформулирована научная проблема и охарактеризована степень изученности района исследования. **Глава 2** содержит характеристику района исследования, включая административное положение, природные условия и характеристику техногенного комплекса. **В главе 3** описаны полевые, лабораторные методы исследования, а также камеральная обработка данных. **В главе 4** приведена характеристика природных вод, включающая химический состав исследуемых вод, формы миграции химических элементов в воде, равновесие вод с минералами горных пород, а также оценку токсичности. **В главе 5** приведена характеристика почв, в том числе минералогический и элементный состав почв и формы нахождения химических элементов в почвах, а также оценка токсичности. **В главе 6** описаны механизмы трансформации химического состава компонентов природной среды района исследования, в том числе для обоснования гидросферной экофункции почв.

**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.

**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. Хвощевской 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.

## **ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**Первое защищаемое положение.** *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 органомогенным слоем почв. Степень токсичности вод по результатам биотестирования – допустимая, при этом значения показателя токсического воздействия в поверхностных водах для меди выше, чем для никеля.*

В геоморфологическом отношении район исследования приурочен к предгорьям Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра) и холмисто-увалистой равнине (западная часть водосбора озера Имандра), на которой в свою очередь выделены зона воздействия выбросов медно-никелевого комбината (г. Мончегорск) - территория 2-35 км от комбината в большей степени подвергшаяся влиянию пылегазовых выбросов, что привело к формированию участка техногенной пустоши, и условно-фоновая зона (на расстоянии 35-60 км от комбината) (рис. 1).

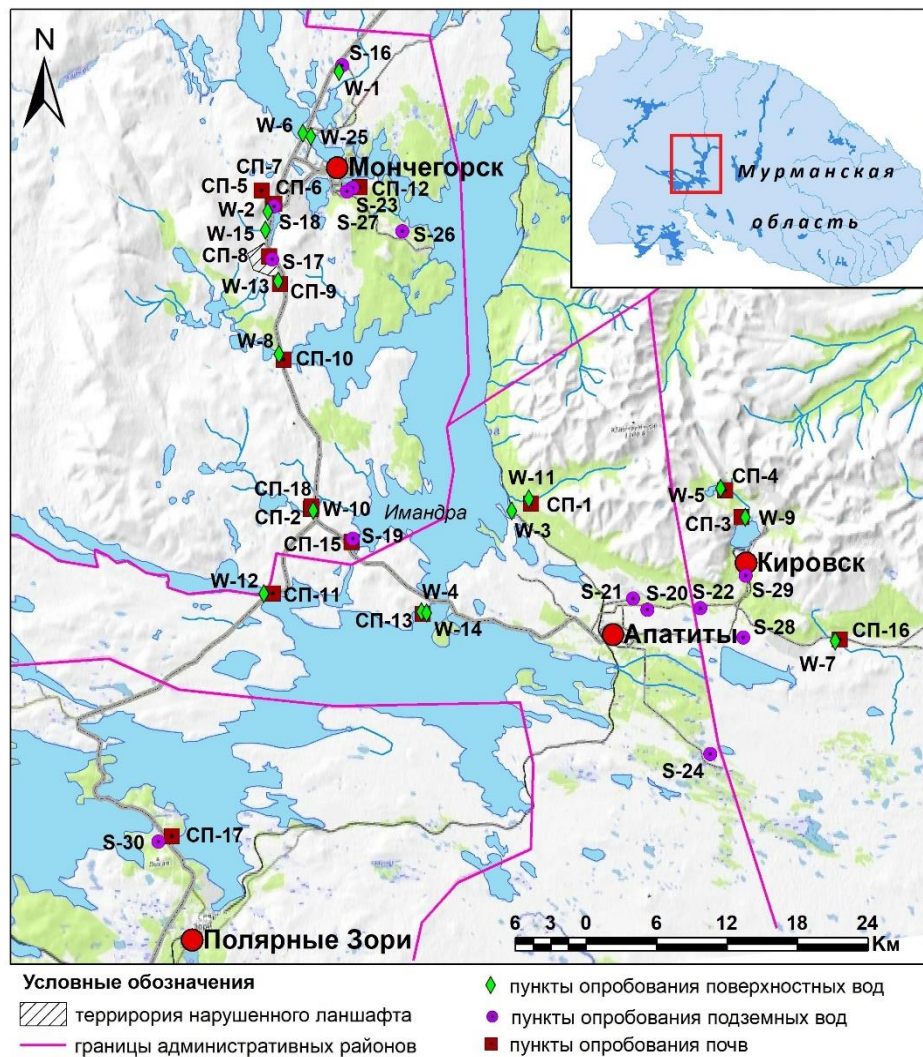


Рисунок 1 - Карта-схема пунктов гидрогеохимического и почвенного опробования

Восточную часть водосбора озера Имандра занимает Хибинский массив, сложенный щелочными ультрамафитами, нефелиновыми сиенитами, карбонатитами девонского периода. Здесь расположены крупные апатит-нефелиновые, редкометалльные и другие месторождения. На юге рассматриваемой территории распространены биотитовые, амфибол-пироксеновые гнейсы, мигматиты, тоналито-гнейсы, гранодиорито-гнейсы, амфиболиты. В западной части верхний архей представлен metavулканидами кислого и основного состава. Горные породы раннего протерозоя представлены перидотитами, пироксенами, габброноритами, базальтовыми порфиридами, норитами, диоритами, пероксенами. Кроме того, локально встречаются отложения венда, сложенные аркозитовыми и полимиктовыми

В геологическом отношении район исследования располагается в пределах восточной части Балтийского щита, сложенного породами кристаллического фундамента, перекрытыми рыхлыми четвертичными отложениями. На севере и северо-востоке территории водосбора озера Имандра распространены породы архейской эры: гранодиориты, тоналиты, плагиограниты, локально присутствуют гнейсы и амфиболиты с железистыми кварцитами.

песчаниками, алевролитами, аргиллитами. На прилегающей к г. Мончегорску территории располагаются месторождения хрома, медно-никелевых руд, проявления металлов платиновой группы.

На территории преимущественно распространены трещинно-жильные воды кристаллических пород архея и протерозоя, а также порово-пластовые воды четвертичных флювиогляциальных и озерно-ледниковых отложений. Встреченные подземные воды имеют как напорный, так и безнапорный характер. Основное питание подземных вод как четвертичных отложений, так и коренных пород осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Особенностью природных вод рассматриваемого района является весьма низкая минерализация, при этом ее величина варьирует в весьма широких пределах от 20 до 216 мг/дм<sup>3</sup>. Исследуемые воды слабокислые, нейтральные реже слабощелочные, величина рН изменяется от 5,82 до 7,58 (табл. 1).

Подземные воды района Хибинского массива (восточная часть водосбора озера Имандра) являются гидрокарбонатными, по катионному составу кальциевые и натриево-кальциевые. В поверхностных водах района Хибин прослеживается преобладание натрия и калия над кальцием и особенно магнием при минерализации в среднем 26 мг/дм<sup>3</sup>, что обусловлено влиянием распространенных здесь щелочных пород богатых калием и натрием (Evyugina et al. 2016; Дудкин, Сандимиров, 2007).

Природные воды, приуроченные к холмисто-увалистой равнине (западная части водосбора озера Имандра), по соотношению анионов преимущественно гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные, катионный состав кальциевый и магниевый-кальциевый. В родниках, расположенных в местах значительной техногенной трансформации ландшафта («Болотный» S-16, «Горный» S-17, «Дорожный» S-18), происходит увеличение содержания сульфат-иона до 8-13 мг/дм<sup>3</sup>.

Для природных вод исследуемого района концентрации кремния сопоставимы с содержанием кальция и превышают концентрации натрия, магния и калия, что не характерно для столь маломинерализованных вод.

В маломинерализованных слабокислых водах складываются благоприятные условия для накопления элементов-гидролизатов. В рассматриваемых водах происходит накопление алюминия, концентрации которого варьируются от 0,2 до 171,2 мкг/дм<sup>3</sup>. При этом концентрации железа и марганца не высоки и в среднем составляют 31,8 и 4,3 мкг/дм<sup>3</sup> соответственно.

В силу особенностей влияния природных и техногенных факторов в пределах рассмотренного района концентрации никеля и меди изменяется от 0,02 до 66,3 мкг/дм<sup>3</sup> и от 0,01 до 20,3 мкг/дм<sup>3</sup> соответственно. При этом содержание указанных элементов в подземных водах значительно ниже, чем в поверхностных, лишь в отдельных точках в зоне интенсивного воздействия выбросов комбината отмечаются относительно высокие концентрации.

В роднике «Дорожный» (S-18), расположенном в 2 км на ЗЮЗ от источника пылегазовых выбросов, концентрации Cu и Ni составляют 1 мкг/дм<sup>3</sup> и 6,4 мкг/дм<sup>3</sup> соответственно.



Таблица 1 – Основные показатели химического состава природных вод исследуемого района

| Значение   | pH   | CO <sub>2</sub>    | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Мин. | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Si  | C <sub>орг</sub>    | Fe    | Mn    | Al    | Ni    | Cu   |
|--|------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------|------------------------------|-----|---------------------|-------|-------|-------|-------|------|
|  |      | мг/дм <sup>3</sup> |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     | мкг/дм <sup>3</sup> |       |       |       |       |      |
| Подземные воды района Хибинского массива   |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Минимальное  | 6,58 | 3,3                | 45,8                          | 7,1                           | 1,3             | 12,7             | 1,0              | 2,5             | 1,2            | 74   | <0,1                         | 4,0 | н.д.                | 0,3   | 0,03  | 0,8   | <0,05 | 0,01 |
| Максимальное   | 7,58 | 7,0                | 101,3                         | 35,7                          | 10,3            | 38,6             | 4,2              | 27,0            | 9,4            | 201  | 32,8                         | 6,2 | н.д.                | 37,6  | 2,8   | 17,5  | <0,05 | 0,34 |
| Среднее  | 7,23 | 5,0                | 70,5                          | 17,9                          | 4,1             | 19,1             | 2,0              | 12,5            | 3,9            | 134  | 11,34                        | 5,2 | н.д.                | 16,4  | 0,6   | 8,9   | <0,05 | 0,08 |
| Химический тип вод: HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> , Na-Ca, Ca   |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Подземные воды холмисто-увалистой равнины  |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Минимальное  | 5,82 | 3,5                | 11,6                          | 3,5                           | 0,6             | 5,1              | 0,9              | 1,0             | 0,1            | 30   | 0,1                          | 3,4 | 1,67                | 0,2   | 0,1   | 0,2   | 0,08  | 0,05 |
| Максимальное   | 7,07 | 17,4               | 88,5                          | 60,0                          | 85,0            | 42,0             | 5,3              | 49,4            | 2,6            | 216  | 1,51                         | 9,6 | 2,02                | 94,3  | 102,9 | 39,8  | 16,4  | 1,7  |
| Среднее  | 6,40 | 9,1                | 37,3                          | 15,2                          | 12,3            | 13,6             | 2,8              | 8,7             | 1,3            | 91   | 0,63                         | 6,1 | 1,85                | 21,6  | 13,0  | 14,5  | 3,4   | 0,5  |
| Химический тип вод: HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> -Cl Mg-Ca, Ca  |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Поверхностные воды района Хибинского массива   |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Минимальное  | 6,91 | 3,0                | 13,9                          | 1,5                           | 0,5             | 0,9              | 0,1              | 3,8             | 0,9            | 23   | 0,10                         | 2,2 | 1,85                | 1,7   | 0,2   | 24,9  | 0,05  | 0,01 |
| Максимальное   | 7,29 | 4,4                | 17,1                          | 2,5                           | 0,7             | 2,7              | 0,4              | 5,8             | 1,5            | 28   | 0,17                         | 2,9 | 2,17                | 13,7  | 0,7   | 80,1  | 0,15  | 0,29 |
| Среднее  | 7,16 | 3,5                | 16,1                          | 1,8                           | 0,6             | 1,6              | 0,2              | 5,0             | 1,2            | 26   | 0,14                         | 2,6 | 2,04                | 6,0   | 0,5   | 43,1  | 0,08  | 0,14 |
| Химический тип вод: HCO <sub>3</sub> , Ca-Na, Na   |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Поверхностные воды холмисто-увалистой равнины  |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Минимальное  | 5,99 | 2,6                | 7,9                           | 2,4                           | 0,5             | 2,6              | 0,6              | 1,0             | 0,1            | 16   | <0,1                         | 1,8 | 3,82                | 0,2   | 1,3   | 17,9  | 0,96  | 1,05 |
| Максимальное   | 7,05 | 15,7               | 33,0                          | 9,5                           | 53,5            | 9,6              | 1,8              | 35,0            | 1,5            | 140  | 0,1                          | 7,0 | 12                  | 460,2 | 10,0  | 134,0 | 66,3  | 20,3 |
| Среднее  | 6,70 | 6,9                | 14,2                          | 4,5                           | 6,9             | 4,4              | 1,1              | 5,4             | 0,5            | 37   | <0,1                         | 3,5 | 6,67                | 96,5  | 4,6   | 61,6  | 26,2  | 10,5 |
| Химический тип вод: HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> -Cl, Mg-Ca, Ca |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Озеро Имандра  |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |
| Минимальное  | 7,05 | 2,6                | 21,0                          | 15,0                          | 4,0             | 3,0              | 0,6              | 12,2            | 2,3            | 58   | <0,1                         | 0,2 | 3,61                | 27,9  | 12,2  | 32,6  | 3,5   | 2,4  |
| Максимальное   | 7,10 | 5,3                | 23,7                          | 19,6                          | 5,4             | 4,5              | 0,6              | 15,4            | 2,6            | 72   | <0,1                         | 1,1 | 4,04                | 38,6  | 13,4  | 171,2 | 4,1   | 3,0  |
| Среднее  | 7,08 | 4,0                | 22,4                          | 17,3                          | 4,7             | 3,8              | 0,6              | 13,8            | 2,5            | 65   | <0,1                         | 0,6 | 3,83                | 33,3  | 12,8  | 101,9 | 3,8   | 2,7  |
| Химический тип вод: SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> , Na   |      |                    |                               |                               |                 |                  |                  |                 |                |      |                              |     |                     |       |       |       |       |      |

Повышенное содержание никеля отмечается и в роднике «Горный» (S-17) – 3,44 мкг/дм<sup>3</sup>, а содержание меди здесь – 0,19 мкг/дм<sup>3</sup>. 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 инфильтрации атмосферных вод лес разрушен, лесная подстилка отсутствует и формируется техногенная пустошь (Ананьев, 2010).

При сравнении микрокомпонентного состава исследуемых вод с кларком речных вод по В.В. Гордееву и А.П. Лисицину (Соловов, 1990) 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.

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

При сравнении химического состава исследуемых вод с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ питьевых вод (СанПиН 1.2.3685-21) наблюдаются превышения нормативов по Ni от 1,3 до 2,9 ПДК для поверхностных водных объектов в зоне воздействия.

Отличие микрокомпонентного состава вод различных частей исследуемой территории может быть обусловлено не только металлогеническими особенностями, но и 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 (рис. 2).

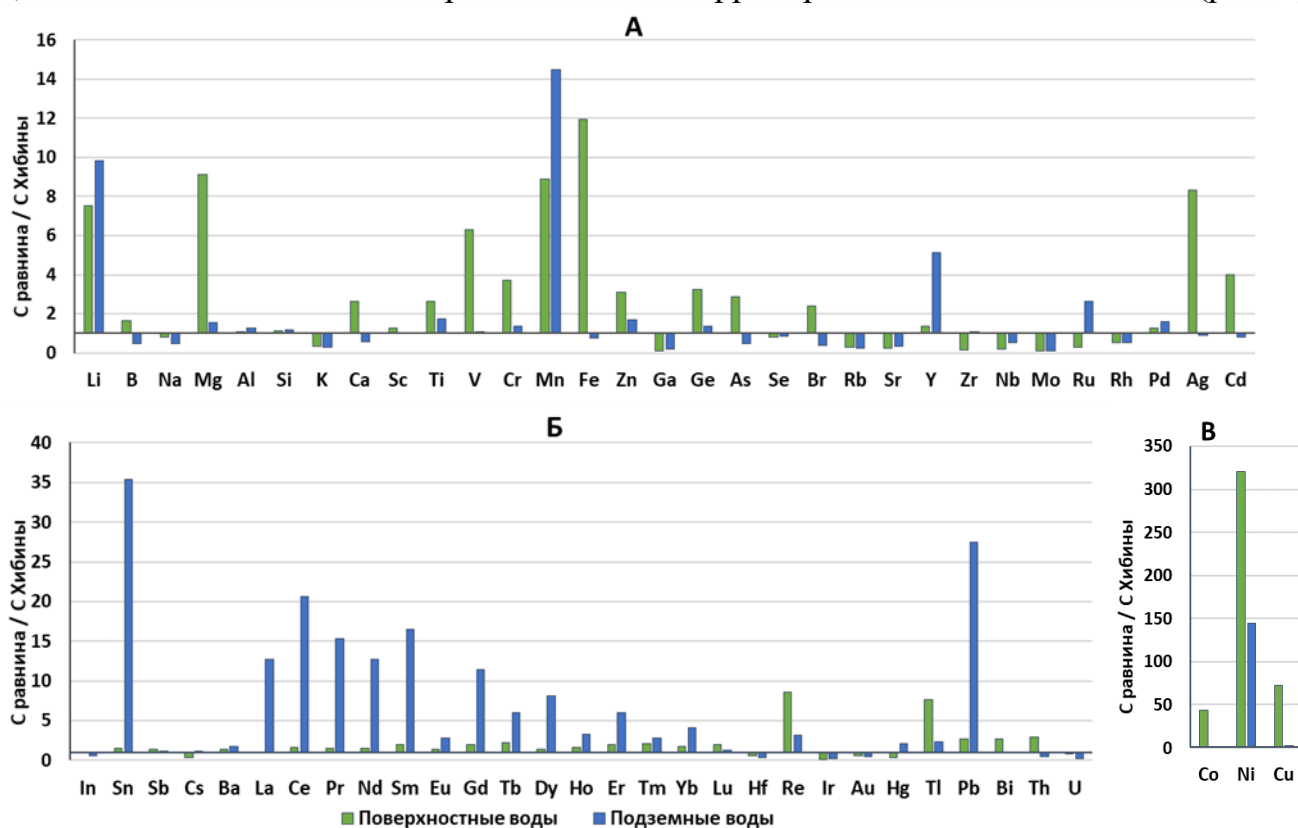


Рисунок 2 – Отношение содержания химических элементов в поверхностных и подземных водах территории холмисто-увалистой равнины (C<sub>равнина</sub>) относительно территории Хибинского массива (C<sub>Хибины</sub>)

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.

Основным природным источником химических элементов в водах являются горные породы, а степень обогащения во многом зависит от характера водообмена. Рассматриваемая территория характеризуется активным водообменом: среднегодовое количество осадков довольно значительно и для большей части территории составляет 550-600 мм, достигая 1000 мм и более в горных районах, средний многолетний подземный сток составляет 3-5 л/(сек\*км<sup>2</sup>) (Ресурсы поверхностных..., 1970). Изученные воды находятся на начальных стадиях взаимодействия вод с горными породами, они насыщены бемитом, диаспором, гиббситом. Не смотря на низкие концентрации железа в рассматриваемых водах, наблюдается их насыщенность соединениями железа: гетитом, гематитом, лепидокрокитом, а также ферригидритом. Стоит отметить, что изучаемые воды близки к насыщению оксидами меди (куприт, тенортит, гидроксид двухвалентной меди), что свидетельствует о наличии дополнительного источника поступления меди вследствие техногенного воздействия.

Все рассматриваемые воды насыщены каолинитом и лишь в отдельных точках отмечается равновесие с Са- и Mg-монтмориллонитами и иллитом. Насыщенность вод вторичными оксидами и гидроксидами алюминия и железа также, как и каолинитом, является типичным для рассматриваемых природно-климатических условий.

Таким образом современное эколого-геохимическое состояние природных вод на рассматриваемой территории является отражением влияния как техногенных факторов (главным образом выбросы медно-никелевого комбината), так и природных региональных (интенсивность водообмена, наличие месторождений полезных ископаемых).

Эколого-геохимическая характеристика вод на основе количественного определения отдельных химических элементов и сравнение их с нормативами, из-за различного характера их воздействия, не дает возможности в полной мере дать оценку биологической опасности объекта. В то время как система биологического тестирования дает возможность с большой достоверностью определять степень общей токсичности объекта исследований.

Результаты оценки токсичности природных вод методом биотестирования с тест-объектом *Paramecium Caudatum* – инфузория-туфелька показывают, что значение индекса токсичности изменяется в пределах от 3 до 43 % (рис. 3).

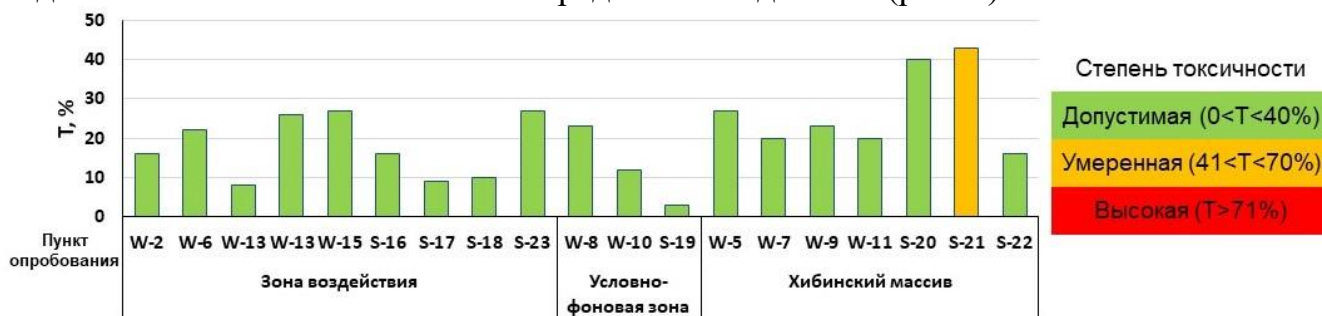


Рисунок 3 – Значения индекса токсичности (Т, %) для природных вод исследуемого района по результатам биотестирования с тест-объектом *Paramecium Caudatum*

Рассматриваемые воды в основном характеризуются допустимой степенью токсичности ( $0 < T < 40\%$ ), соответственно, экосистема еще способна поглощать и перерабатывать токсикант в определенных пределах.

Только воды родника «Поддорожный» (S-21) отличаются умеренной степенью токсичности, где индекс токсичности составляет 43 % (рис. 3). Данный родник расположен в придорожной низине, на промплощадке апатит-нефелиновой обогатительной фабрики (Ананьев, 2010). В целом, 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.

Накопление поллютантов в компонентах природной среды в зоне техногенного воздействия представляет потенциальную угрозу для здоровья человека. В связи с этим, была проведена оценка токсичности никеля и меди для здоровья человека с использованием экологической модели USEtox, согласно которой расчет показателя токсического воздействия химических элементов на здоровье человека проводится согласно формуле:  $IS = \sum CF_{x,i} * M_{x,i}$ , где: IS – общий показатель токсического воздействия химического элемента на здоровье человека (для здоровья человека измеряется в  $STU_{hum}$  – относительная единица токсичности для здоровья человека);  $CF_{x,i}$  – характеристический коэффициент токсичности химического элемента x в компоненте природной среды i (для здоровья человека измеряется в Дали/кг);  $M_{x,i}$  – масса химического элемента x в компоненте природной среды i (в кг) (Fantke et al., 2017).

В общем значения показателя токсического воздействия никеля и меди на здоровье человека в поверхностных водах района зависят от расстояния от источника загрязнения. Наибольшие значения показателя токсического воздействия отмечаются для озера Монче, расположенного в 4 км от комбината (табл. 2), наименьшие – для водных объектов условно-фоновой зоны и района Хибинского массива.

Таблица 2 – Содержание ( $C_{вода}$ ,  $мкг/дм^3$ ) 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         |      |
|--------------------------|-----------------------------------|---|------------|------|------------|------|
|                          |                                   |   | $C_{вода}$ | IS   | $C_{вода}$ | 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    |

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

**Второе защищаемое положение.** *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.*

Для подзолистых почв Кольского региона, формирующихся в холодных местностях с хорошим промывным режимом, характерен элювиально-иллювиально-дифференцированный профиль: органогенный горизонт (О); подзолистый или элювиальный горизонт (Е) обедненный химическими элементами относительно других минеральных горизонтов; иллювиальный горизонт (В), образовавшийся в результате иллювиального накопления алюминиево-железисто-гумусовых комплексных соединений, постепенно переходящий в материнскую породу (С).

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). В верхнем органогенном горизонте почвы зафиксированы чрезвычайно высокие концентрации Ni и Cu (Кашулина, 2017; Елсукова и др., 2019). Концентрации Ni, Cu, Co, Cd и Pb в органогенном 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).

Для минеральных горизонтов (Е, В, С) рассматриваемых почв наблюдается пониженное содержание большинства элементов в сравнении с кларками верхней части земной коры (Григорьев, 2009; Ярошевский, 2009). Исключения составляют Br, I и Cl, что объясняется близостью моря, а также Te, Se, повышенное содержание которых связано с металло-генетическими особенностями территории. Кроме этого в 2-7 км от комбината (точки СП-5, 6, 8, 9) в горизонте В концентрация никеля в 1,5 раза превышает кларковые значения. В почвах Хибинского массива также наблюдаются превышения по Pd, Ag, Zr, Hf, As, Sr и РЗЭ, что является отражением его геохимических особенностей.

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

В горизонте Е наблюдается пониженное содержание большинства химических элементов относительно других горизонтов (рис. 4). Исключения составляют Ta, Pb и Bi для зоны воздействия, Mo, Ag и Sn для условно-фоновой зоны.

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

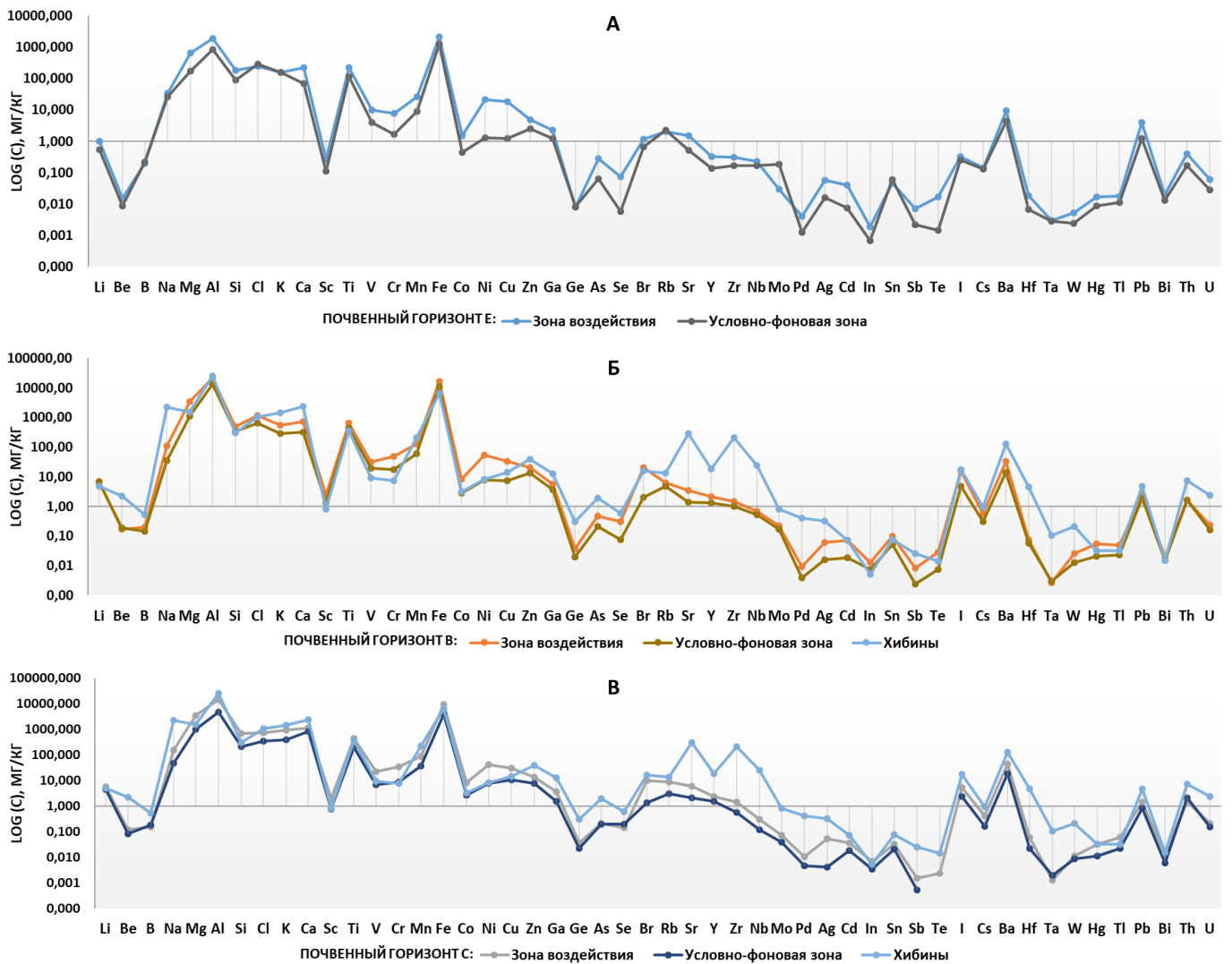


Рисунок 4 – Содержание химических элементов в различных зонах и почвенных горизонтах исследуемого района

Концентрации большинства химических элементов в почвенных горизонтах в зоне воздействия выше, чем в условно-фоновой. Особенно значительные превышения ( $C_{\text{зона воздействия}}/C_{\text{условно-фоновая зона}}$ ) в горизонте E наблюдаются по Ni - 17, Cu - 15,4, Se - 12,7; в горизонте B для Br - 9,7; в горизонте C для Ag - 12,7. Для таких элементов как Se, Ta и Th отмечается увеличение концентраций в горизонте C в условно-фоновой зоне относительно зоны воздействия.

Никель и медь как приоритетные компоненты выбросов комбинатов медно-никелевого производства признаны основными элементами-загрязнителями на Северо-Западе России (Barsova et al., 2019; Kyllönen et al., 2017). Их значительное концентрирование наблюдается в зоне интенсивного воздействия источника пылегазовых медно-никелевого комбината, особенно в органогенном горизонте: Ni 20-2500 мг/кг, Cu 12-1635 мг/кг (Лянгузова, Баркан, 2019). В иллювиальном горизонте (рис. 5) содержания меди и никеля превышают некоторые кларковые значения, в том числе ОДК содержания химических веществ в почвах.

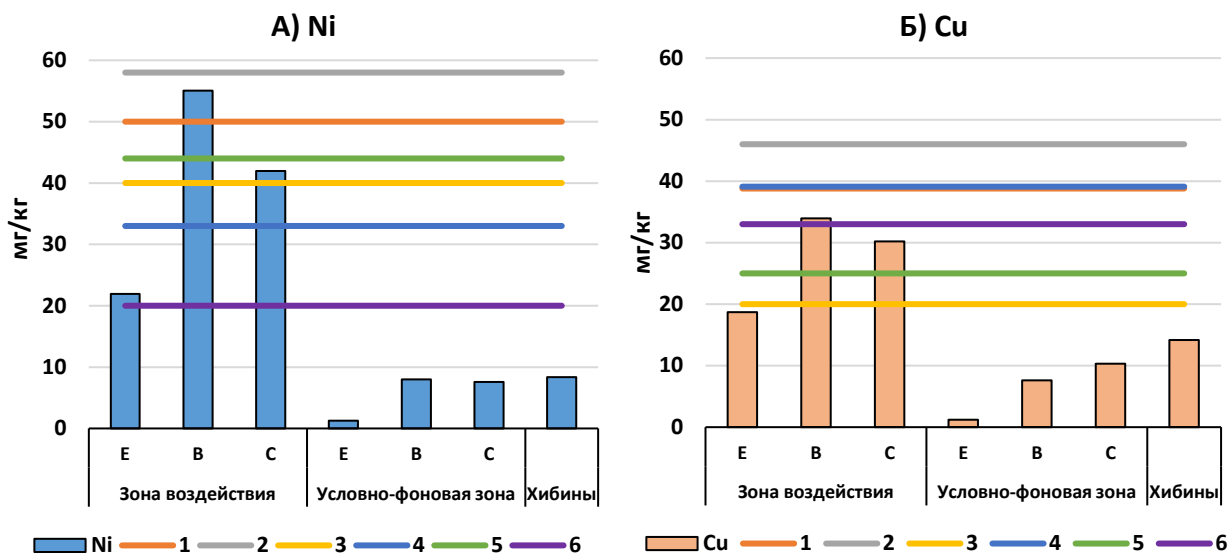


Рисунок 5 – Сопоставление концентраций никеля (А) и меди (Б) в исследуемых почвах с: 1 - средним содержанием в верхней части континентальной коры (Григорьев, 2009); 2 - кларком верхней части Земной коры (Ярошевский, 1990); 3 - кларком почв Земли (Алексеев, 2013); 4 - кларком городских почв (Алексеев,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

Представление о геохимической подвижности и потенциальном токсическом воздействии химических элементов в почвах дает определение форм и характера их закрепления минеральными и органическими носителями (Водяницкий, 2005; Мотузова, 2009). Формы нахождения химических элементов в почвах определялись методом последовательных селективных вытяжек с выделением следующих фракций: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с (гидр)оксидами Fe и Mn, VI – остаточная.

На долю прочносвязанных соединений приходится основная часть общего содержания микроэлементов в почвах (до 90% и более). В спектре постадийных вытяжек они соответствуют остаточной фракции (VI), а также фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (V). В остаточной фракции в рассматриваемых почвах остается связано большинство химических элементов, в среднем на нее приходится от 60 до 99% от общего содержания химических элементов. Фракция, связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (V) для таких элементов как B, Si, Mo, Sn, Sb, Hf, Ta составляет до 40%, для РЗЭ в горизонте В отмечается повышение доли этой фракции в зоне воздействия выбросов комбината относительно условного фона.

Химические элементы, связанные в составе органических остатков и продуктов их трансформации (в том числе гумусовых веществ) (IV), также составляют значительную долю в общем уровне содержания микроэлементов в почве. На рассматриваемой территории в почвах с органическим веществом связана основная доля РЗЭ, B, Na, K, 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 именно с ними связано влияние почв на сопредельные среды (Мотузова, 2009).

В водорастворимой фракции (I) на рассматриваемой территории в значительной доле находится только бром – в среднем 14%.

Обменная фракция (II) является ведущей или значительной по содержанию для Mg, Ca, Mn, Ni, Sr, Cd, Ba. Причем высокая доля обменной фракции во всех почвенных горизонтах подзолистых почв холмисто-увалистой равнины отмечается для Ca, Sr и Cd. Тогда как для Mg, Mn, Ni и Ba наблюдается увеличение процентной доли рассматриваемой фракции только в подзолистом горизонте (E). 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 по содержанию для Be, Cu, Ni, Cd, Ba и часто является ведущей для Si, доля которого в данной фракции составляет до 29,4%. Увеличение процентной доли рассматриваемой фракции в подзолистом горизонте наблюдается для следующих элементов: Al, Si, Cr, Mn, Fe, Ca, Ni, Cu, Zn, Ba, тогда как в иллювиальном горизонте для Be, Ge, Cd. Стоит отметить, что для всех РЗЭ происходит 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%.

Формы нахождения никеля и меди в почвенных горизонтах в зоне воздействия и условно-фоновой зоне представлен на рис. 6.

Как уже отмечалось ранее, наиболее интенсивное накопление никеля и меди отмечается в иллювиальном горизонте (B) в зоне воздействия выбросов комбината. В целом же для горизонта B характерно преобладание остаточной фракции – 42-98% как для никеля, так и для меди. В зоне воздействия отмечается повышение доли подвижных форм никеля и меди (фракции I, II, III) в рассматриваемом горизонте относительно условного фона.

Для подзолистого горизонта (E), по сравнению с иллювиальным (B), свойственен более дифференцированный фракционный состав: никель здесь характеризуется уменьшением доли остаточной фракции и заметным преобладанием обменной формы (25-60% от суммы всех фракций). 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. В зоне воздействия для данного горизонта также отмечается повышение долей никеля во фракциях I, II, III и меди во фракциях II, III, IV.



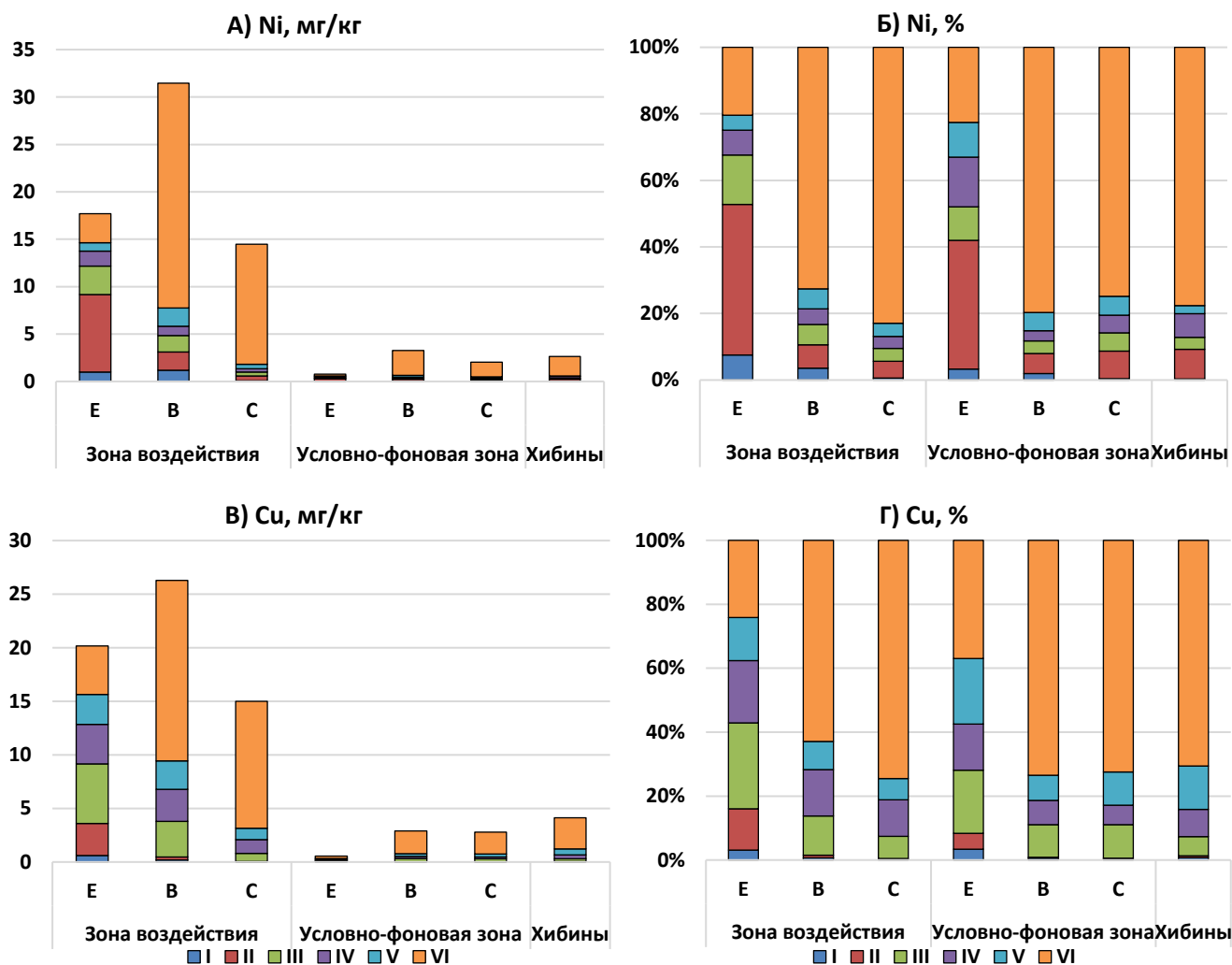


Рисунок 6 – Формы нахождения никеля и меди в почвенных горизонтах (в мг/кг и % от суммы всех фракций) района исследования. Фракции: I - водорастворимая, II - обменная, III - специфически сорбированная, IV - связанная с органическим веществом, V - связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, VI - остаточная

Согласно результатам биотестирования с использованием тест-объекта инфузория-туфелька (*Paramecium Caudatum*), рассматриваемые почвы в основном характеризуются допустимой степенью токсичности. Индекс токсичности (Т) изменяется в пределах от 0,21 до 97,5%. Минимум отмечен для подзолистого горизонта, в почвенном разрезе СП-13 на условно-фоновой территории. 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. Также почвы территории Хибинского массива обладают достаточно высокими показателями индекса токсичности СП-4 - 44,5% и СП-3 – 47,5%. 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%).

В эксперименте по определению токсического действия на водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*) отмечается, что более высокая степень токсического эффекта (и соответственно максимальная кратность токсического разведения – степень разбавления пробы, приводящая к устранению токсического эффекта) характерна для подзолистого горизонта, при чем как для зоны воздействия (СП-12, СП-10), так и для условного фона (СП-11) (рис.7). Это может быть связано с наличием большей доли

подвижных форм химических элементов в данном почвенном горизонте, выявленной для данного типа почв.

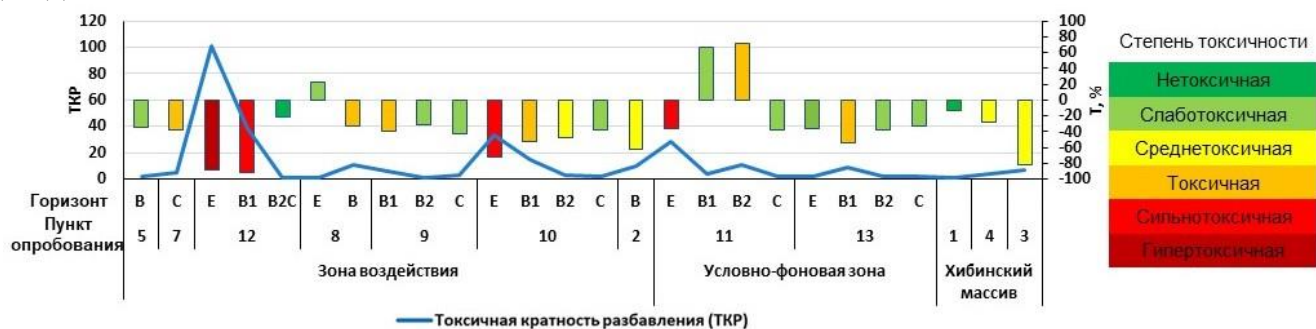


Рисунок 7 – Значения индекса токсичности (Т, %) и токсичной кратности разбавления (ТКР) для почв исследуемого района по результатам биотестирования с тест-объектом *Chlorella vulgaris* Beijer

Для иллювиального горизонта, который аккумулирует химические элементы, также характерна довольно высокая степень токсического эффекта – в большинстве своем это токсичные почвы.

При оценке токсического воздействия химических элементов в почвах расчет проводился не только с использованием «активной» высоты 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 – разрушения верхних почвенных горизонтов, что позволяет избежать завышения или занижения результатов оценки воздействия.

Наибольшие значения показателя токсического воздействия Ni и Cu в почвах наблюдаются для точек отбора проб в зоне воздействия, на расстоянии 2-7 км от источника загрязнения (рис. 8).

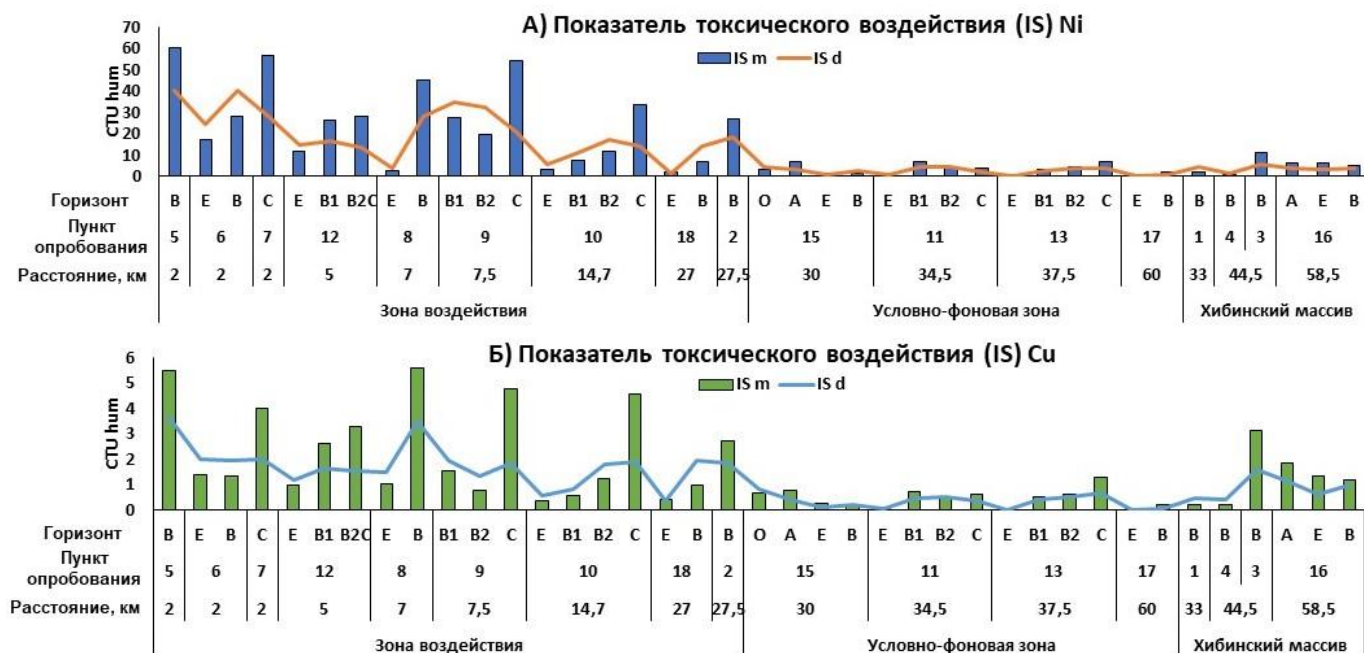


Рисунок 8 – Распределение показателя токсического воздействия (IS) никеля (А) и меди (Б) по почвенным горизонтам и расстоянию от источника загрязнения

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

**Третье защищаемое положение.** 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.

В центральной части Кольского региона, в зоне влияния воздушных выбросов медно-никелевого комбината атмосферные осадки содержат значительное количество поллютантов – Ni, Cu, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Кашулина, Салтан, 2008; Евтюгина, Асминг, 2013; Лянгузова, Баркан, 2019), которые, проникая в почву, вступают в обратимые взаимодействия с их неорганическими и органическими компонентами. В подзолистых почвах формирование горизонтов транзита (вымывания) и аккумуляции (вмывания) веществ происходит за счет перераспределения химических элементов между прочносвязанными, подвижными и растворенными соединениями. Часть элементов связывается в разных почвенных горизонтах, а часть мигрирует ниже по разрезу, в конечном итоге попадая в подземные воды.

В зоне воздействия на территории с сохранившейся растительностью поверхностные воды и почва отличаются значительным накоплением никеля и меди, тогда как подземные воды остаются незагрязненными. В почвенных горизонтах территории нарушенного ландшафта также наблюдается значительное концентрирование никеля и меди, тогда как в подземной воде повышены только концентрации никеля, а концентрации меди остаются здесь на уровне фона (рис. 9).

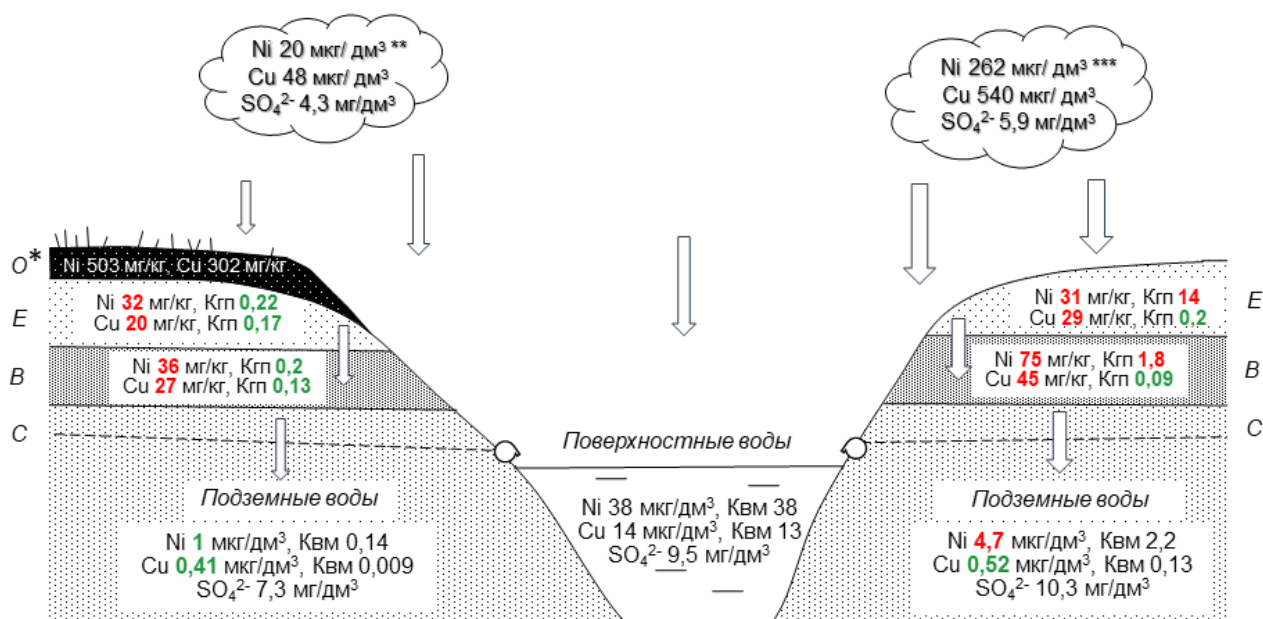


Рисунок 9 – Схема трансформации химического состава природных сред в зоне интенсивного воздействия выбросов медно-никелевого комбината (\*Лянгузова, Баркан, 2019; \*\* Кашулина, Салтан, 2008; \*\*\*Евтюгина, Асминг, 2013). Кгп- коэффициент геохимической подвижности, Квм – коэффициент водной миграции

Связь водной среды и почвы в аспекте подвижности и перераспределения химических элементов можно проиллюстрировать коэффициентом геохимической подвижности, который, согласно Шварцеву (1998), характеризует долю выноса химического элемента раствором относительно связываемой его вторичной фазой и

определяется как:  $K_{гп} = (m_x * 100) / (a * n_{п})$ , где  $n_{п}$  – содержание (%) элемента x в продуктах химического выветривания или их аналогах (почвах).

Значения  $K_{гп}$  в зоне воздействия на территории с сохраненной растительностью составляют 0,13-0,24, что говорит о том, что поллютанты связываются во вторичной фазе, за счет чего подземные воды остаются защищены от загрязнения (табл. 3).

Таблица 3 – Коэффициенты геохимической подвижности никеля и меди

| Зона                 | Водный объект | Почвы | $K_{гп}$ |      |      |      |      |      |
|----------------------|---------------|-------|----------|------|------|------|------|------|
|                      |               |       | Е        |      | В    |      | С    |      |
|                      |               |       | Ni       | Cu   | Ni   | Cu   | Ni   | Cu   |
| Зона воздействия     | S-18          | СП-6  | 3,2      | 0,82 | 2,0  | 0,85 | 2,8  | 0,82 |
|                      | S-17          | СП-8  | 14,0     | 0,2  | 1,8  | 0,09 | -    | -    |
|                      | S-23          | СП-12 | 0,22     | 0,17 | 0,20 | 0,13 | 0,24 | 0,13 |
| Условно-фоновая зона | S-19          | СП-15 | 4,44     | 3,8  | 1,48 | 2,1  | -    | -    |
| Хибинский массив     | S-28          | СП-16 | 0,02     | 0,11 | 0,02 | 0,07 | -    | -    |

На территории с разрушенным органомным слоем значения  $K_{гп}$  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. Это может происходить за счет превышения сорбционной способности почвы по никелю, в следствии более высокого его поступления с выбросами, 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 тоже время в почвах зоны воздействия выбросов медно-никелевого производства, по сравнению с более удаленными от источника выбросов территориями, увеличивается содержание и доля подвижных форм этих элементов: отношения содержаний никеля и меди в зоне воздействия к условно-фоновой зоне во фракциях I, II, III имеют значения больше 1 (табл. 4).

Таблица 4 – Отношения содержаний никеля и меди по фракциям в зоне воздействия к условно-фоновой зоне ( $C_{зона\ воздействия} / C_{условно-фоновая\ зона}$ )

| 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)

Кроме этого, в местах, где длительная техногенная нагрузка привела к деградации верхнего органомного слоя, происходит продвижение более подвижных форм химических элементов вниз по почвенному профилю и возрастание нагрузки на иллювиальный горизонт как на хемосорбционный защитный барьер. Отношения содержаний никеля и меди на участке с разрушенным растительным слоем к территории с сохраненным растительным слоем во фракциях I, II, III больше для горизонта В, чем для горизонта Е (табл. 5).

Таблица 5 – Отношения содержаний никеля и меди по фракциям на участке с разрушенным растительным слоем к территории с сохраненным растительным слоем в зоне воздействия ( $C_{\text{разрушен}} / C_{\text{сохранен}}$ )

| Элемент | Горизонт | Фракции |     |     |     |     |     |
|---------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
|         |          | I       | II  | III | IV  | V   | VI  |
| Ni      | Е        | 2,5     | 1,2 | 0,9 | 0,8 | 1,1 | 0,7 |
|         | В        | 7,4     | 1,3 | 1,4 | 0,8 | 1,8 | 0,8 |
| Cu      | Е        | 0,8     | 2,1 | 1,1 | 0,7 | 1,9 | 0,7 |
|         | В        | 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)

В свою очередь, это определяет химический состав и степень загрязнения грунтовых вод, ведь подвижные формы химических веществ обуславливают возможность выполнения почвой ее основных экологических функций и влияния на сопредельные среды (Мотузова, 2009).

Таким образом на территории исследования почва выступает естественным буфером (геохимическим барьером) на пути проникновения аэротехногенных никеля и меди в подземные воды. За счет образования в почвах прочносвязанных соединений происходит накопление никеля и меди в иллювиальном горизонте почв. Это предотвращает загрязнение грунтовых вод, но способствует накоплению загрязнителей в самой почве. Однако, при превышении ее емкости по данным элементам может происходить обратный переход тяжелых металлов в почвенный раствор, т.е. почва будет являться источником вторичного загрязнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Загрязненные атмосферные осадки попадают в поверхностные водные объекты, либо на поверхность почв, где формируется поверхностный сток, в конечном итоге попадающий в поверхностные водные объекты. Однако повышенные концентрации никеля и меди в поверхностных водах западной части территории и наличие околоравновесной минеральной фазы оксидов и гидроксидов меди свидетельствует о значительном влиянии на процессы формирования химического состава природных вод и взаимодействия их с породами техногенных факторов.

Почвы на рассматриваемой территории характеризуются более низким содержанием химических элементов (за исключением Br, I, Cl, Te, Se) в сравнении с кларками и нормативными показателями. При инфильтрации атмосферных осадков через почву, большая часть тяжелых металлов связывается в разных почвенных горизонтах. Поэтому в зоне техногенного влияния прослеживается увеличение содержания никеля и меди в почвенных горизонтах и доли их подвижных форм.

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 приводит к деградации лесного ландшафта и эрозии почв, что свидетельствует о наличии предела сорбционной способности почвенных горизонтов. В условиях техногенно-нарушенного ландшафта там, где разрушен растительный слой, прослеживается загрязнение и подземных вод.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК*

1. **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

### *Публикации в журналах, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science*

1. 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

2. **Воробьева Д.А.** Геохимическая характеристика почв территории с высокой аэротехногенной нагрузкой / **Д.А. Воробьева**, Н.В. Гусева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – №6. – С. 149-159

### *Публикации в журналах и материалах конференций*

1. Guseva N.V. Silicon in ultrafresh groundwater: a case study of the Imandra Lake catchment, The Kola Peninsula / N.V. Guseva, Y.G. Kopylova, **D.A. Vorobeva**, A.A. Khvashchevskaya, Z.A. Evtyugina // E3S Web Conf. - 2019 - Vol. 98. – Article number 01018

2. 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. – Vol. 33(1) – Article number 012004

3. **Воробьева Д.А.** Формы нахождения тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного, 120 – летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 5-9 апреля 2021. - Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – Т. 1 – С.238-240

4. **Воробьева Д.А.** Распределение химических элементов в системе «вода-почва» в условиях многолетней аэротехногенной нагрузки // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Томск, 6-10 апреля 2020. - Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – Т. 1 – С.344-345

5. **Воробьева Д.А.** Кремний в ультрапресных подземных водах района с высокой антропогенной нагрузкой (Кольский полуостров) // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина, Томск, 8-12 апреля 2019. - Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – Т. 1 – С.412-413

6. **Воробьева Д.А.** Формирование химического состава подземных вод района с высокой антропогенной нагрузкой (Кольский полуостров) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященном 155 - летию со дня рождения академика В. А. Обручева, 135 - летию со дня рождения академика М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы и 110 – летию первого выпуска горных

инженеров в Сибири., Томск, 2-7 апреля 2018. - Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Т. 1 – С.550-552

7. **Vorobeva D.A.** Formation of the groundwater chemical composition under aerotechnogenic impact (The Kola Peninsula) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященном 155 - летию со дня рождения академика В. А. Обручева, 135 - летию со дня рождения академика М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы и 110 – летию первого выпуска горных инженеров в Сибири, Томск, 2-7 апреля 2018. - Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – Т. 2 – С.884-886

8. **Воробьева Д.А.** Равновесие вод района озера Имандра (Кольский полуостров) с вторичными минералами // Вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси [Электронный ресурс]: сборник научных статей: в 2 ч. Ч.2 / редкол.: А.И. Павловский (гл. ред.) [и др.]; М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им Ф. Скорины. – Электрон. текст. дан. (10,6 Мб). – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – С.139-144

9. **Воробьева Д.А.** Исследование насыщенности ультрапресных вод района озера Имандра (Кольский полуостров) вторичными минералами // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения М.И. Кучина, Томск, 3-7 апреля 2017. - Томск: Изд-во ТПУ, 2017 – Т. 1 – С. 528-530

10. **Воробьева Д.А.** Оценка эколого-геохимического состояния природных вод района озера Имандра (Кольский полуостров) // Экология России и сопредельных территорий: материалы XXI Международной экологической студенческой конференции / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2016. – С. 174

11. **Воробьева Д.А.** Формы миграции химических элементов в природных водах района озера Имандра (Мурманская область) // 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

12. 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. Воробьева** // 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

13. **Воробьева Д.А.** Особенности химического состава природных вод района озера Имандра (Кольский полуостров) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 70-летию юбилею Победы советского народа над фашистской Германией, Томск, 6-10 Апреля 2015. - Томск: Изд-во ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 411-413

14. **Воробьева Д.А.** Изучение токсичности природных вод Кольского полуострова (район озера Имандра) / **Д.А. Воробьева**, В.И. Нефёдова // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 70-летию юбилею Победы советского народа над фашистской Германией, Томск, 6-10 Апреля 2015. - Томск: Изд-во ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 409-411