

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Мишанькин Андрей Юрьевич

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО
ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА САХА-ЯКУТИЯ)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.21 – Геоэкология

Томск – 2023

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

Научный руководитель:

Язиков Егор Григорьевич

доктор геолого-минералогических наук,
профессор отделения геологии Инженерной
школы природных ресурсов

Официальные оппоненты:

Бортникова Светлана Борисовна

доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заведующая лабораторией
геоэлектрoхимии ФГБУН «Институт
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.
Трофимука Сибирского отделения Российской
академии наук» (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск

Московченко Дмитрий Валерьевич

доктор географических наук, главный научный
сотрудник ФГБУН «Федеральный
исследовательский центр Тюменский научный
центр Сибирского отделения Российской
академии наук» (ТюмНЦ СО РАН), г. Тюмень,

Защита состоится «11» октября 2023 года в 12 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

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

A stylized blue ink signature of Natalya Vladimirovna Baranovskaya.

Барановская Наталья Владимировна

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 года

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В целях обеспечения рационального недропользования и создания эффективной стратегии защиты окружающей среды необходимо проведение эколого-геохимических работ, позволяющих получить актуальную информацию о состоянии компонентов природной среды на территориях месторождений полезных ископаемых.

Арктика является полигоном золотодобычи, на которую приходится 36,9 % от российской добычи золота (Волков, 2019). Разработка месторождений полезных ископаемых ведёт к трансформации окружающей среды, которая особенно чувствительна в районах распространения многолетнемерзлых пород. Изучение геохимических процессов в условиях отрицательных температур имеет большое теоретическое и практическое значение в геохимии мерзлотных ландшафтов, поскольку интенсивное освоение районов с холодным климатом выдвинуло ряд актуальных научных и практических задач, касающихся решения вопросов защиты окружающей среды в зоне распространения многолетней мерзлоты. В работах ряда авторов (Втюрин, 1980; Иванов, 2013; Брюхань и др., 2018) показывается, что комплексный анализ эколого-геохимического состояния компонентов природной среды в условиях повсеместного распространения многолетнемерзлых пород необходим в связи с их особой чувствительностью к техногенным воздействиям.

Изучением геохимии территорий распространения многолетнемерзлых пород, начиная с 60-х гг. прошлого века, занимались О.П. Иванов (Иванов, 1969), А.М. Иванова (Иванова и др., 1974), С.Л. Шварцев (Шварцев, 1975), В.М. Питулько (1977), И.П. Винокуров (Винокуров и др., 1988), В.Н. Макаров (Макаров, 1998). Геохимические особенности миграции химических элементов в условиях многолетней мерзлоты освещены в трудах А.И. Перельмана и Н.С. Касимова (Перельман, Касимов, 1999). Первым исследователем, обосновавшим необходимость учёта криогенных процессов при изучении месторождений полезных ископаемых в криолитозоне, был известный мерзловед, член-корр. АН СССР П.Ф. Швецов (Швецов, 1961).

Отдельные работы исследователей охватывают золотоносные районы, среди которых можно выделить труды В.Н. Макарова, посвящённые рудным объектам Якутии (Верхнеиндигирский золотоносный район), в частности – геохимии почвенного покрова и донных отложений (Макаров, 2008; Макаров, 2016). Биогеохимические исследования на рудных площадях Северо-Востока России проводились Н.Г. Куимовой (Куимова и др., 2012), В.И. Радомской (Радомская и др., 2003), О.А. Сорокиной (Сорокина, 2009). Почвы районов распространения многолетней мерзлоты исследовались в работах (Тентюков, 2013; Васильчук и др., 2022), отдельно рассматривались территории месторождений полезных ископаемых (Дягилева и др., 2013; Гололобова и др., 2020). Водные объекты детально изучались Н.А. Харитоновой и Е.А. Вах (Харитоновой и др., 2015), М.И. Ксенофонотовой (Ксенофонтова, 2018).

Экогеохимией природной среды рудных объектов в криолитозоне занимаются некоторые иностранные учёные. S. Yang исследует почвенный покров медно-порфирового месторождения Кулонг в холодном регионе Тибета (Yang et al., 2014), Bronac de Vazelhes с соавторами изучает геохимию канадского месторождения золота Амарук (Bronac de Vazelhes et al., 2021).

Цель и задачи работы.

Целью представленной работы является оценка эколого-геохимического состояния компонентов природной среды на территории Выюнского золоторудного поля (Республика Саха (Якутия)) в условиях распространения многолетнемёрзлых пород по данным изучения особенностей поверхностных вод, донных отложений водотоков, почвы, коры лишвенницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*).

Основные задачи:

1. Установить средние содержания химических элементов в компонентах природной среды Выюнского золоторудного поля в условиях распространения многолетнемёрзлых пород;
2. Выявить воздействие природного и техногенного факторов на геохимическую специфику поверхностных вод и донных отложений водотоков, почвы, растительных объектов;
3. Определить минералого-геохимические особенности и проявленность оруденения в почве;
4. Установить взаимосвязь элементов в системе почва – растения на территории Выюнского золоторудного поля в условиях многолетнемёрзлых пород и выявить в растительных объектах (коре лишвенницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), лишайнике (*Cladonia rangiferina*)) специфичные индикаторные элементы.

Объект исследования: компоненты природной среды территории Выюнского золоторудного поля: поверхностные воды и донные отложения водотоков; почва; кора лишвенницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайник (*Cladonia rangiferina*).

Предмет исследования: химический и минеральный состав компонентов природной среды.

Фактический материал и методика исследования. Основу диссертационной работы составил фактический материал, полученный в рамках проведения договорных работ коллектива кафедры геоэкологии и геохимии (в н. в. отделения геологии) и последующей обработки результатов исследования при непосредственном участии автора в период с 2017 по 2022 гг.

В работе исследуются компоненты природной среды Выюнского золоторудного поля, территория которого сложена терригенными отложениями верхнетриасового возраста (231-237 млн. лет) – алевролитами, аргиллитами и песчаниками, относящимися к периферической части надинтрузивной зоны нескрытого Бурганджинского гранитоидного массива. На момент проведения эколого-геохимических работ добыча золота не осуществлялась.

Руды относятся к малосульфидному золотокварцевому типу. Промышленная золотоносность руд определяется Au-пирит-арсенопиритовым и Au-халькопирит-галенитовым парагенезисами.

На территории Вьюнского золоторудного поля были проведены немасштабные исследования на шести ключевых участках (КУ) и отобрано 174 пробы компонентов природной среды, включая 34 пробы поверхностных вод, 33 – донных отложений из водотоков, 37 – почв из верхнего почвенного горизонта, 35 – коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и 35 – лишайника (*Cladonia rangiferina*). Схема отбора проб почвы, коры лиственницы даурской и лишайника показана на рис. 1.

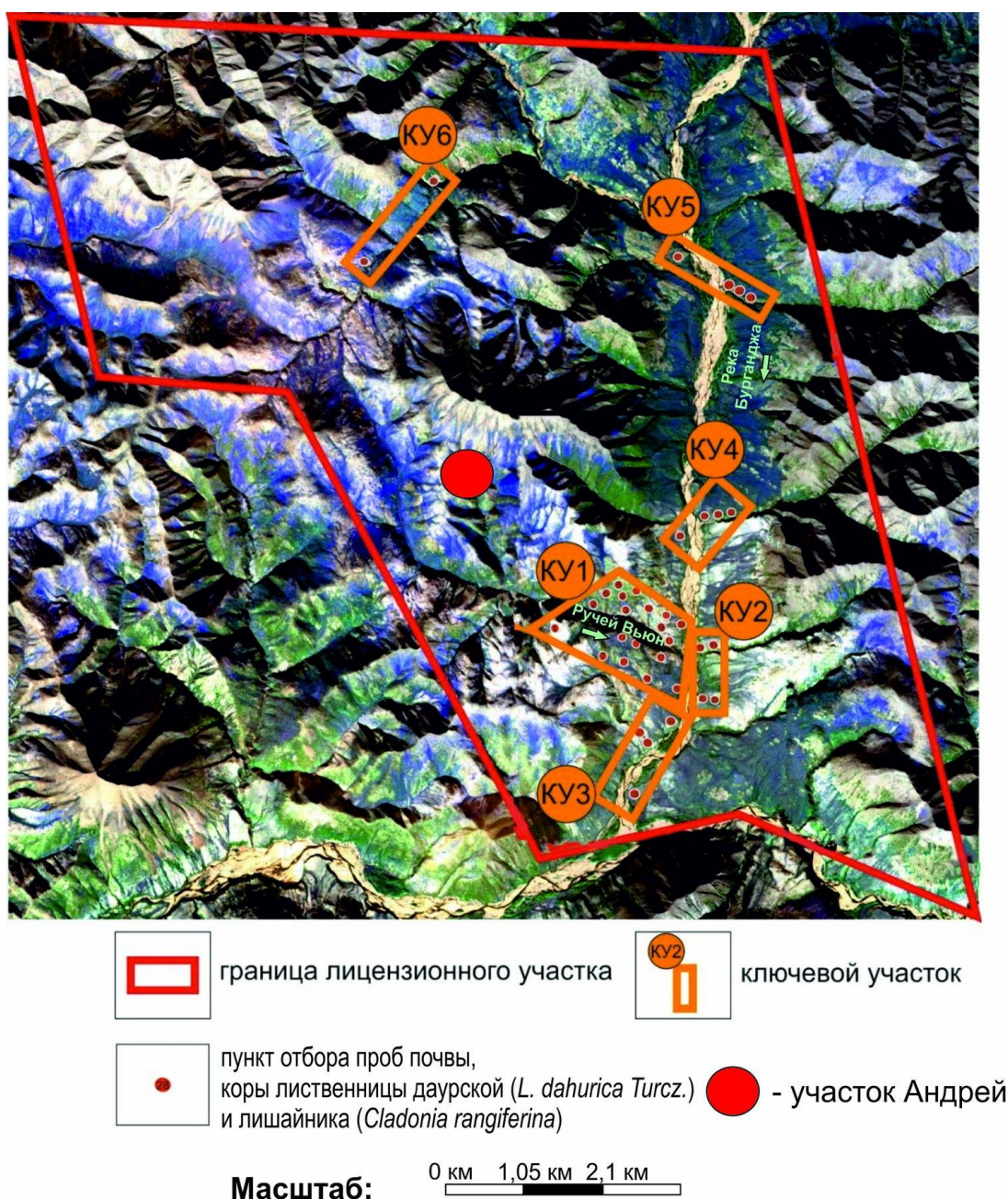


Рисунок 1 – Схема отбора проб почвы, коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля

Пробы поверхностных вод на территории Вьюнского золоторудного поля были отобраны из 10-ти водотоков: ручей Вьюн и его притоки (10 проб); река Бурганджа и ее притоки (20 проб); река Эльганджа (2 пробы). Отдельно были исследованы ручей над штольной (1 проба) и лёд из штольни (1 проба). Пункты отбора проб донных отложений были совмещены с пунктами отбора проб поверхностных вод.

Наибольшее количество проб компонентов природной среды (82) было отобрано на ключевом участке №1 (рис. 2).

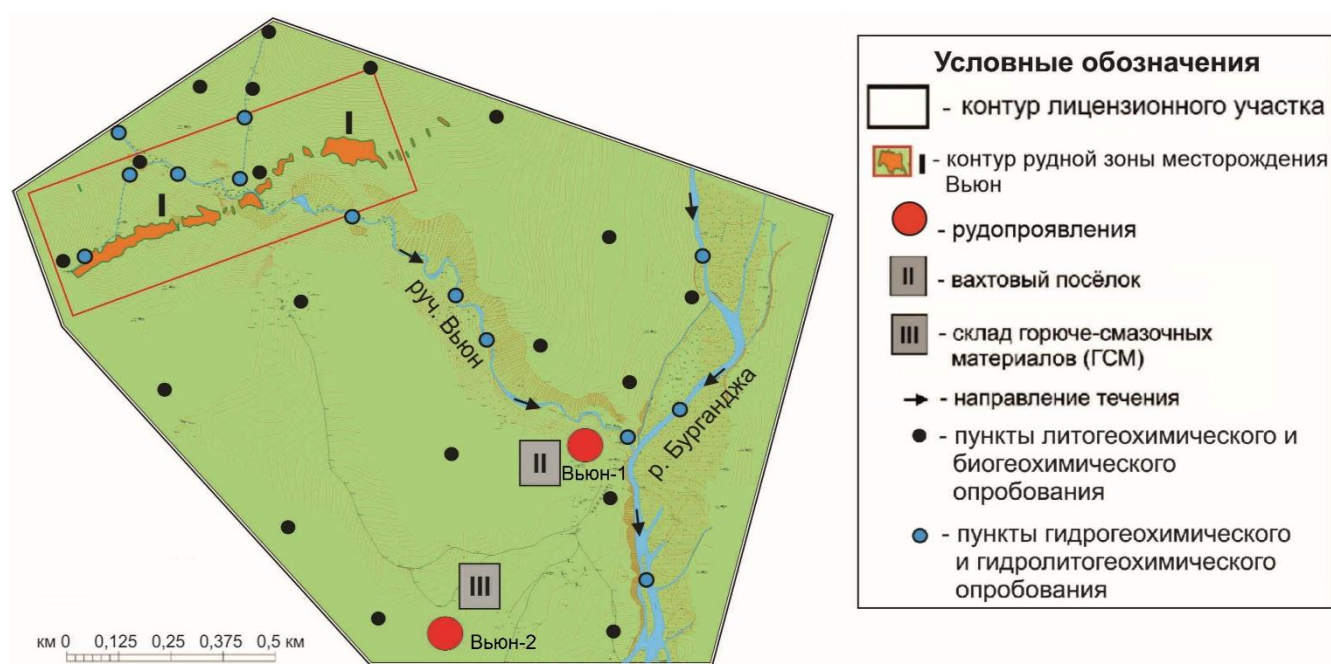


Рисунок 2 – Схема отбора проб компонентов природной среды на ключевом участке №1 (КУ-1) с контуром рудной зоны, вскрытой штольнями, и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2) золоторудного месторождения Вьюн

Пробы отбирались и обрабатывались по стандартным методикам («Методические рекомендации...», 1981; Саэт и др., 1990; Язиков и др., 2003) в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 17.1.5.01-80; ГОСТ 17.4.3.01-83; ГОСТ 17.4.4.02-84; ГОСТ 28168-89; ГОСТ 31861-2012; Р 52.24.353-2012; РД 52.24.609).

Отобранные пробы компонентов природной среды проанализированы по аттестованным методикам методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в аккредитованном химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (33 пробы донных отложений и 37 проб почв – на 55 элементов, 35 проб сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и 35 проб сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*) – на 67 элементов). В аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов проанализированы

методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой 34 пробы природных поверхностных вод на 71 элемент, а также комплексом методов – титриметрическим (CO_2 , CO_3 , HCO_3^- , Cl^- , общая жесткость, Ca^{2+} , ХПК), потенциметрическим (рН, F), кондуктометрическим (электропроводность), гравиметрическим (взвешенные вещества), фотоколориметрическим (NH_4 , NO_2 , PO_4), спектрофотометрическим (SO_4^{2-}), методом ионной хроматографии (NO_3) и по расчетным методикам (Mg^{2+} , минерализация).

Для 28 проб отдельных фракций почвы различной размерности проведён инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) на 28 элементов в ядерно-геохимической лаборатории НИ ТПУ по аттестованной методике НСАМ № 510-ЯФ.

Внешний лабораторный контроль содержания ртути проделан для 37 проб почв, 35 – коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и 35 – лишайника (*Cladonia rangiferina*) методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути «РА-915+» с использованием государственных стандартных образцов (ГСО). Минеральный состав компонентов природной среды изучен методом рентгеновской порошковой дифрактометрии в 3 пробах почв и 3 – донных отложений на дифрактометре D2 PHASER фирмы BRUKER. Методом сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектрометрией на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с приставкой для микроанализа Bruker XFlash 4010/5010 проведено 65 определений в 15 пробах почв и 80 определений в 15 пробах донных отложений. Исследования велись в лабораториях микроэлементного анализа и электронно-оптической диагностики на базе МИНОЦ «Урановая геология» имени Л.П. Рихванова ОГ ИШПР НИ ТПУ.

Математико-статистическая обработка аналитических данных проводилась с использованием программ Statistica 10.0 и Microsoft Excel, графическая интерпретация результатов исследований (построение карт-схем, графиков) – с применением программ CorelDRAW X7 и Surfer.

Степень достоверности полученных данных подтверждается представительными выборками проб компонентов природной среды, проанализированных современными высокочувствительными методами в аккредитованных лабораториях по аттестованным методикам. Результаты исследований обработаны математико-статистическими методами.

Научная новизна исследования.

1. Впервые установлены средние уровни содержаний широкого спектра химических элементов (тяжёлых металлов, редкоземельных и радиоактивных элементов) в компонентах природной среды (поверхностных водах, донных отложениях водотоков, почвах, коре лиственницы и лишайнике) на территории Вьюнского золоторудного поля в условиях распространения многолетнемёрзлых пород.

2. Выявлены минералого-геохимические особенности почв территории Вьюнского золоторудного поля и установлен геологический фактор воздействия на компонент природной среды.

3. Установлена взаимосвязь химических элементов в системе «почва – растения» на территории Вьюнского золоторудного поля в условиях распространения многолетнемёрзлых пород и выявлены специфичные индикаторные элементы, формирующие локальные биогеохимические ореолы в растительных объектах (кора лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), лишайник (*Cladonia rangiferina*)) в зонах воздействия оруденения.

4. Установлена индикаторная роль лишайника (*Cladonia rangiferina*) для выделения потенциально-перспективных структур золотого оруденения на заболоченных участках в условиях распространения многолетнемёрзлых пород.

Практическая значимость. Полученные в ходе исследований результаты использовались ООО «Дальзолото» в отчётных материалах, а в дальнейшем могут применяться при составлении проектов оценки воздействия на окружающую среду и раздела охраны окружающей среды.

Лишайник (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля не рекомендуется в качестве корма для животных (олений и др.) из-за выявленных высоких содержаний As – элемента 1 класса опасности (согласно ГОСТ Р 70281-2022).

Данные, полученные в ходе работ, используются при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Геохимический мониторинг» для бакалавров и «Геохимия, геохимический мониторинг окружающей среды» для магистров направления «Экология и природопользование».

Апробация работы и публикации. Результаты исследований были представлены на Всероссийских и Международных научных конференциях, симпозиумах и школах-семинарах: Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2018-2022 гг.); Школа-семинар для молодых исследователей «Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах» (г. Тюмень, 2018 г.); Всероссийская конференция молодых учёных «Современные проблемы геохимии» (г. Иркутск, 2018 г.); Международная экологическая студенческая конференция «Экология России и сопредельных территорий» (г. Новосибирск, 2018 г.); Научная конференция «Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных районах» (г. Пермь, 2019 г.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология и управление природопользованием» (г. Томск, 2020 г.); Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о

Земле» (г. Москва, 2021 г.); Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (г. Томск, 2021 г.).

Кроме того, результаты докладывались на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВУЗов и научных академических институтов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Шаг в науку» (г. Томск, 2021 г.).

Основные положения и научные результаты диссертации опубликованы в 19 статьях и тезисах докладов, из них 2 статьи опубликовано в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, и 2 статьи в российских изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, изложенных на 190 страницах машинописного текста. Включает 72 рисунка, 54 таблицы, 1 приложение. Список литературы содержит 229 источников, 76 из которых – зарубежные.

В первой главе приводится обзор работ в области воздействия на окружающую среду добычи полезных ископаемых с характеристикой видов, типов и степени оказываемого воздействия на различные компоненты природной среды. **Во второй главе** даётся физико-географическая, геологическая и геоэкологическая характеристика района исследований. **Третья глава** включает методы отбора проб компонентов природной среды и их подготовки к лабораторно-аналитическим исследованиям, виды и объёмы работ, описание математико-статистической обработки и эколого-геохимического анализа полученных данных. **Четвёртая глава** содержит результаты исследования природных вод и донных отложений из водотоков территории Вьюнского золоторудного поля, для которых установлены содержания химических элементов и величины гидрохимических показателей, определены геохимические особенности, обусловленные влиянием рудной минерализации. **В пятой главе** даётся характеристика геохимии и минерального состава почв территории золоторудного поля. **Шестая глава** содержит данные о концентрациях в коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайнике (*Cladonia rangiferina*) широкого спектра химических элементов, в том числе тяжёлых металлов, редкоземельных и радиоактивных элементов, а также информацию о площадном распределении ореолов рудных элементов. **В заключении** представлены основные выводы исследования.

Личный вклад автора заключается в участии в исследованиях, подготовке проб к лабораторно-аналитическим анализам, определении содержаний Hg в пробах почв, коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*), исследовании минерального состава почв и донных отложений водотоков методами рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии, математико-статистической обработке и эколого-геохимической оценке полученных аналитических данных, а также их графической интерпретации.

Благодарности. Автор искренне благодарит научного руководителя д.г.-м.н., профессора отделения геологии Язикова Егора Григорьевича, за всестороннюю помощь на всех стадиях выполнения диссертационной работы, к.г.-м.н., Филимоненко Е.А., за активное содействие научным исследованиям на начальном этапе, д.г.-м.н., профессора Рихванова Л.П. и своих первых научных руководителей д.б.н., профессора Барановскую Н.В. и к.х.н. Третьякова А.Н. за прививание интереса и мотивации к занятиям научной деятельностью. Отдельную благодарность автор выражает к.г.-м.н., доценту Соктоеву Б.Р. за помощь и консультации в ходе проведения рентгенофазового анализа, к.г.-м.н., старшему преподавателю Ильенку С.С. за полученные навыки работы с электронным сканирующим микроскопом, инженеру Судыко А.Ф. и лаборанту Богутской Л.В. за помощь в проведении инструментального нейтронно-активационного анализа. Автор признателен всем сотрудникам отделения геологии ИШПР НИ ТПУ за помощь и ценные советы, а также студентам за помощь в отборе и подготовке проб, в особенности Афанасьеву Е.С. Особые слова благодарности автор адресует своим родителям, всем родным и близким, за оказанную поддержку в ходе проведения исследований и написания диссертации.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

ПЕРВОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ. *Поверхностные воды в пределах влияния рудной зоны характеризуются повышенными содержаниями сульфат-иона, As и Hg, что отражает воздействие малосульфидного золотокварцевого оруденения на химический состав вод. Донные отложения водотоков наследуют особенности специфического элементного состава в зоне оруденения (Te, Se, As, Sb, Ag, Au).*

Поверхностные воды Вьюнского золоторудного поля в пределах влияния рудной зоны (месторождение Вьюн) характеризуются более высоким средним содержанием SO_4^{2-} по сравнению с водотоками вне месторождения, в которых преобладает HCO_3^- (табл. 1).

Таблица 1 – Средние значения содержаний ионов и величин гидрохимических показателей в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля

Вьюнское золоторудное поле (32 пробы)					
Показатель	Единица измерения	Значение	Показатель	Единица измерения	Значение
pH	единицы pH	7,3±0,1	SO_4^{2-}	мг/л	6,1±0,5
ОЖ	ммоль-экв./л.	0,63±0,03	Cl^-		0,27±0,02
Эл-ть	мСм/см	0,05±0,002	NO_2^-		<0,02
Ca^{2+}	мг/л	8,6±0,6	NO_3^-		0,71±0,05
Mg^{2+}		2,4±0,2	F^-		<0,15
NH_4^+		0,08±0,04	PO_4^{3-}		<0,05
CO_2		4,7±0,2	Мин.		42±3
CO_3^-		<3	ХПК		15±1
HCO_3^-		24±2	ВВ		5,9±2,0

Примечания: 1) ОЖ – общая жесткость; 2) Мин. – минерализация; 3) ХПК – химическое потребление кислорода; 4) Эл-ть – электропроводность; 5) ВВ – взвешенные вещества. Среднее значение $\pm$ стандартная ошибка. Аномальные величины концентраций и значений, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки.

Выраженная сульфатность водотоков месторождения (табл. 2) обусловлена тем, что они дренируют рудную зону.

Таблица 2 – Характеристики поверхностных вод Выюнского золоторудного поля по гидрохимическим показателям

Водоток	Число проб	Формула Курлова/Характеристика воды
Правый приток ручья Выюн (месторождение Выюн)	2	$M29 \frac{SO_4 80 \ HCO_3 20}{Ca 58 \ Mg 39} pH 6,4 \ T 2,7$
		Ультрапресная, сульфатная магниевое-кальциевая, слабо кислая, очень мягкая, весьма холодная
Ручей Выюн (месторождение Выюн)	6	$M30 \frac{HCO_3 57 \ SO_4 43}{Ca 56 \ Mg 38} pH 7,2 \ T 5,0$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевое-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная
Река Бурганджа (вне месторождения Выюн)	10	$M53 \frac{HCO_3 76 \ SO_4 23}{Ca 64 \ Mg 30} pH 7,5 \ T 8,2$
		Ультрапресная, гидрокарбонатная магниевое-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная

Примечания: М – минерализация (мг/л); pH – водородный показатель (ед.); Т – температура (°С). Содержание HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} приведены в мг-экв. %.

Вода из пробы льда, отобранной в штольне, характеризуется как сульфатно-гидрокарбонатная кальциево-магниевая и отличается повышенными содержаниями сульфат-иона по сравнению со средними по водотокам золоторудного поля и месторождения (22 мг/л против 6,1 и 7,7 мг/л соответственно). Повышение балансовой доли SO_4^{2-} в природных водах может быть обусловлено их контактом с участками сульфидной минерализации – рудной зоной, для которой характерна окислительная обстановка. Кроме того, увеличению доли сульфатов в солевом составе рек и ручьёв способствует разгрузка подмерзлотных вод в долинах водотоков (Макаров, 2008).

Превышение предельно-допустимой концентрации (ПДК) для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и рыбохозяйственного значения (СанПиН 1.2.3685-21) в поверхностных водах рудного поля и месторождения зафиксировано для взвешенных веществ.

При сопоставлении средних содержаний химических элементов в поверхностных водах месторождения и золоторудного поля с содержаниями элементов в пробе льда из штольни установлено более высокое содержание As в пробе льда (0,051 мг/л – лёд; 0,0012 мг/л – рудное поле; 0,0015 мг/л – месторождение) (рис. 3).

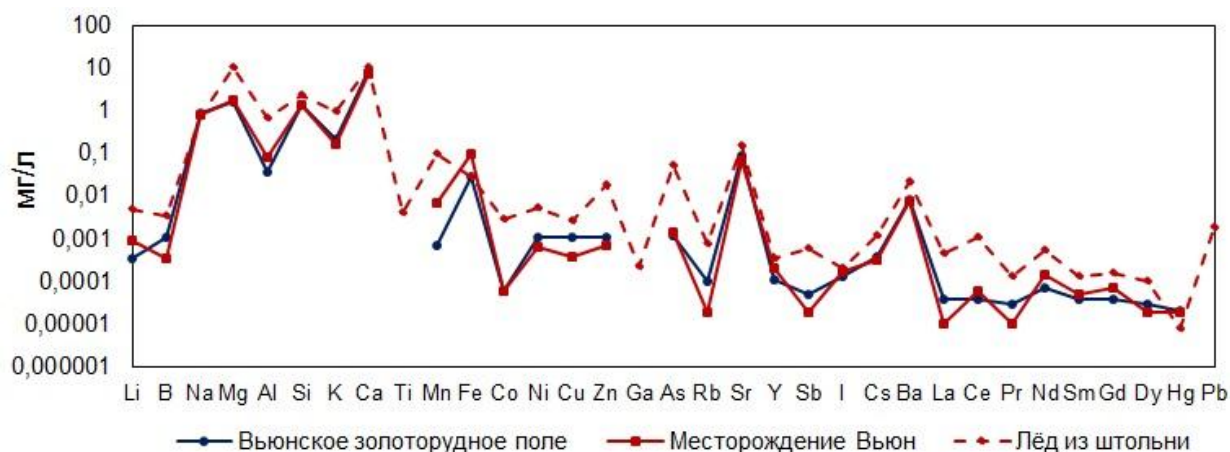


Рисунок 3 – Средние содержания химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля, месторождения Вьюн и в пробе льда из штольни, мг/л (шкала логарифмическая)

Кроме того, в пробе льда из штольни зафиксированы повышенные по сравнению со средними из водотоков золоторудного поля и месторождения концентрации Cu (0,0026 мг/л – лёд; 0,0011 мг/л – рудное поле; 0,00037 мг/л – месторождение), Sb (0,00062 мг/л – лёд; 0,00005 мг/л – рудное поле; 0,00002 мг/л – месторождение), Pb (0,0019 мг/л – лёд, в водотоках рудного поля и месторождения – ниже предела обнаружения), что свидетельствует о влиянии природного фактора рудной минерализации, представленной халькопиритом, арсенопиритом, галенитом и другими минералами, на формирование химического состава льда штольни.

Превышение ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{РИБ.-ХОЗ.}) (СанПиН 1.2.3685-21) зафиксировано по водотокам Вьюнского золоторудного поля для Cu (ПДК_{РИБ.-ХОЗ.} – 0,001 мг/л, установленное среднее содержание – 0,0011 мг/л), Hg (0,00001 мг/л, 0,0022 мг/л) и для средних по водотокам месторождения Вьюн содержаний Al (0,04 мг/л, 0,084 мг/л), Hg (0,00001 мг/л, 0,00002 мг/л). Кроме того, установлены локальные превышения ПДК_{РИБ.-ХОЗ.} в пробах воды из дренирующей рудную зону правого притока ручья Вьюн.

Особенностью вод ручья Вьюн являются повышенные концентрации As, B, Sb и Hg, правого притока ручья Вьюн – Co, Zn, Ni, Cu, Pb, Sb, Ba и некоторых РЗЭ (Dy, La, Eu, Pr), левого притока ручья Вьюн – Si. Кроме того, по результатам опробования водотоков установлен факт значительного увеличения концентраций типоморфных химических элементов в воде ручья Вьюн ниже по течению от рудной зоны. Концентрации As ниже рудной зоны возрастают в 4,7 раз (рис. 4 а), Hg – в 2 раза (рис. 4 б).

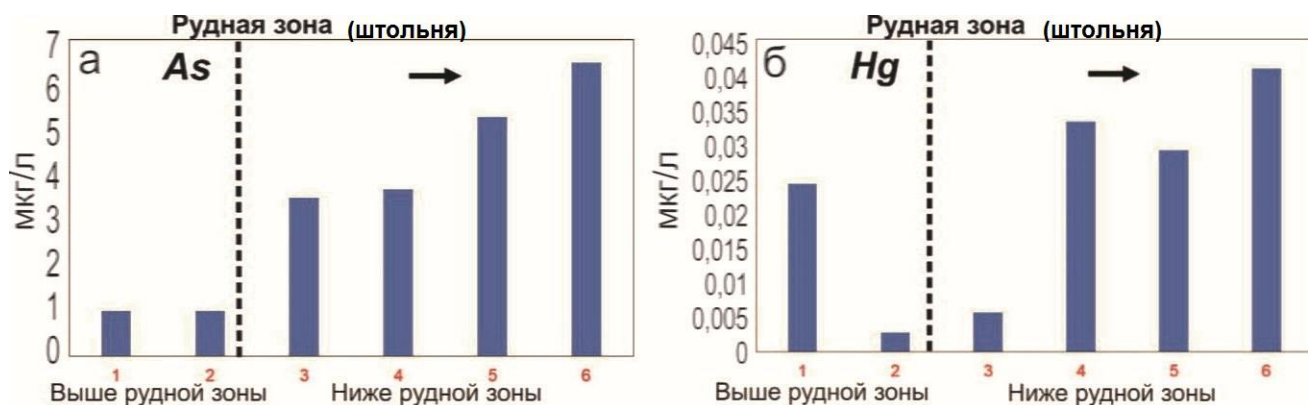


Рисунок 4 – Содержание As (а) и Hg (б) в воде ручья Вьюн относительно рудной зоны, вскрытой штольнями, мкг/л

Примечание: цифрами показаны пункты пробоотбора согласно направлению течения (обозначено стрелкой)

Полученные средние содержания изучаемых компонентов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля и в пробе льда из штольни были сопоставлены с литературными данными по речным водам (Виноградов, 1967; Livingstone, 1963; Turekian, 1969) и водам зоны гипергенеза (Шварцев, 1998) (рис. 5).

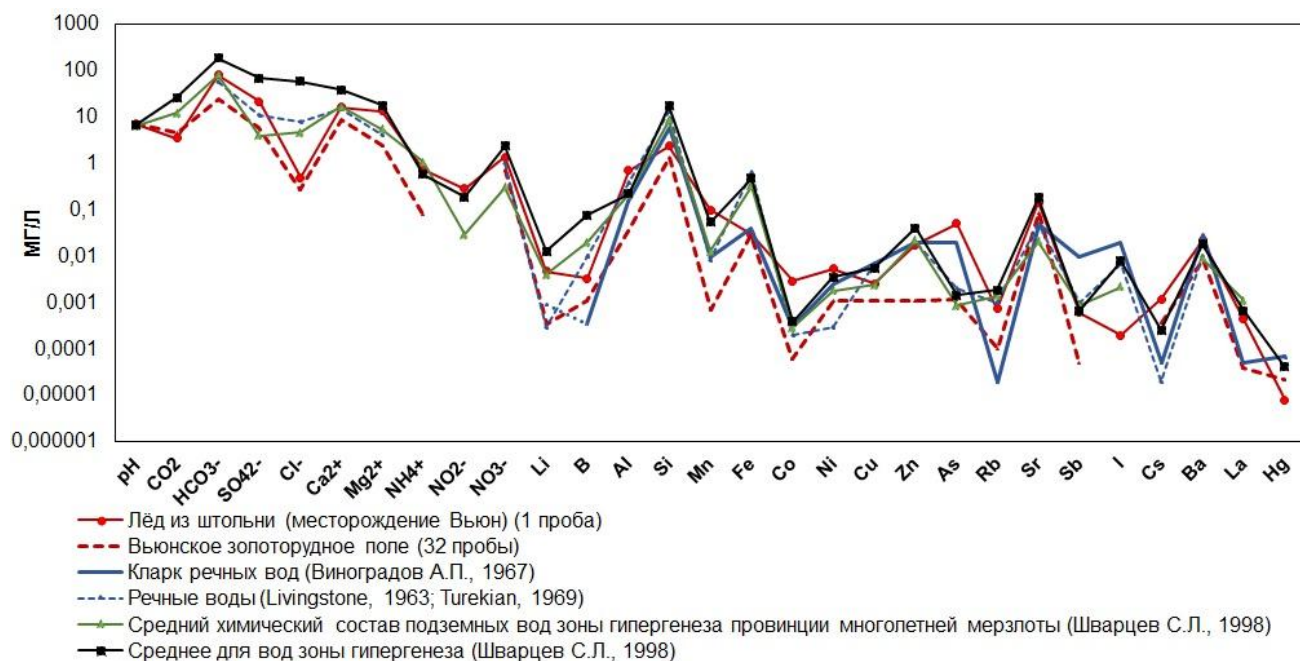


Рисунок 5 – График сопоставления средних содержаний изучаемых компонентов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля и пробе льда из штольни месторождения Вьюн с литературными данными о среднем химическом составе речных вод (Виноградов, 1967; Livingstone, 1963; Turekian, 1969) и вод зоны гипергенеза (Шварцев, 1998), мг/л (шкала логарифмическая)

Среднее содержание As, одного из спутников малосульфидного золот кварцевого оруденения, в водотоках Вьюнского золоторудного поля (0,0012 мг/л) превышает среднее значение для подземных вод зоны гипергенеза провинции многолетней мерзлоты (0,0009 мг/л)

(Шварцев, 1998), что отражает влияние природного фактора оруденения на химический состав водотоков. Среднее по водотокам рудного поля содержание сульфат-иона (6,1 мг/л) также превышает значение для провинции многолетней мерзлоты (4,06 мг/л) (Шварцев, 1998), что является индикатором интенсивного взаимодействия поверхностных вод с зоной сульфидизации.

В пробе льда из штольни установлены более высокие концентрации элементов (As, Mn, Co, Ni) относительно литературных данных. Особенно в пробе льда выделяется содержание As (0,051 мг/л), которое превышает как литературные значения (до 10 раз), так и среднее содержание в поверхностных водах рудного поля (в 43 раза), что также отражает природную геохимическую специфику месторождения.

В пробах донных отложений из водотоков установлены повышенные содержания 25 элементов относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003) (рис. 6), в том числе 4 элементов 1-2 классов опасности (ГОСТ Р 70281-2022). Основу общей геохимической специализации составляют специфичные для рудной зоны элементы: Те (средний кларк концентрации для донных отложений водотоков Вьюнского золоторудного поля составляет 81); Se (51); As (5); Au (3); Ag (2), причём для донных отложений водотоков месторождения Вьюн повышенные содержания As и Au проявлены более значительно (кларки концентраций 8 и 16 соответственно).

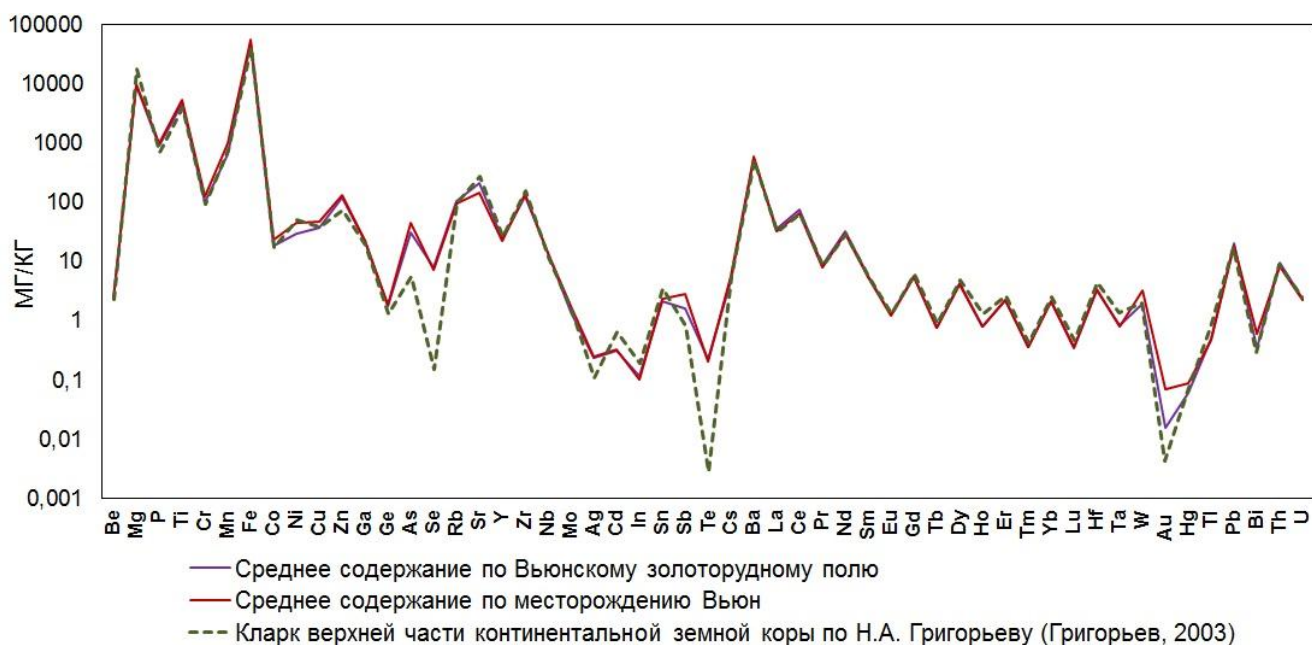


Рисунок 6 – Средние содержания химических элементов в пробах донных отложений из водотоков Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн, мг/кг (шкала логарифмическая)

Воды ручья Вьюн и его притоков дренируют рудную зону месторождения, вскрытую разведочными штольнями, что влияет на их химический состав. Этот природно-техногенный фактор влечёт за собой увеличение в водах и донных отложениях концентраций некоторых

элементов, в том числе рудных. Так, в донных отложениях ручья Вьюн повышены относительно средних по месторождению содержания Fe, Cr, Co, Cu, Zn, As, Se, Sb, Te, W, Au, Hg, Pb.

Средние содержания Ni, Cu и Zn в донных отложениях водотоков золоторудного поля и месторождения превышают нормативы ПДК для почв (СанПиН 1.2.3685-21). Также полученные данные были сопоставлены с «Нормами и критериями оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» («Нормы и критерии оценки загрязненности...», 1996) (табл. 3), согласно которым донные отложения ручья Вьюн и его притоков в различной степени загрязнены Cr, Ni, Cu, Zn, As (от «слабозагрязнённых» до «опасно загрязнённых»). Наиболее отчётливо проявлена опасная степень загрязнения донных отложений правого притока ручья Вьюн по As, кроме того «опасно загрязнёнными» являются и донные отложения ручья Вьюн с пункта опробования №3, который расположен сразу ниже по течению от рудной зоны. Ручей Вьюн и его притоки дренируют рудную зону, что, вероятнее всего, служит причиной их природного загрязнения Cr, Ni, Cu, Zn, As. Донные отложения реки Бурганджа, которая протекает за пределами прямого влияния оруденения, отвечают характеристике «чистых» относительно содержаний всех рассматриваемых химических элементов.

ВТОРОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ. *Геохимическая специализация почв Вьюнского золоторудного поля проявляется в повышенных относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву содержаниях Se, As, Au, Ag и Sb. Минералы-концентраторы специфичных элементов оруденения представлены сульфидными (сульфиды Fe, Cu, Sb) и редкоземельными (ксенотим, монацит) минеральными фазами.*

Для почв Вьюнского золоторудного поля установлены содержания 55 химических элементов, из которых 2 элемента имеют содержания ниже предела обнаружения (Ru, Re), 23 элемента характеризуются содержаниями выше кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003), 5 из которых 1-2 классов опасности (ГОСТ Р 70281-2022), 33 элемента имеют содержания, превышающие кларк почв континентов, в том числе индикаторы малосульфидного золото кварцевого оруденения (Te, Se, As, Au, Ag, Sb) (рис. 7).

При сопоставлении полученных содержаний с нормативными установлено, что средние по Вьюнскому золоторудному полю содержания Ni, Cu, Zn, As превышают валовые ПДК для почв (СанПиН 1.2.3685-21). Наиболее значительное среднее (15,9 долей ПДК) и локальное (201 доля ПДК, в рудной зоне) превышение выявлено для As.

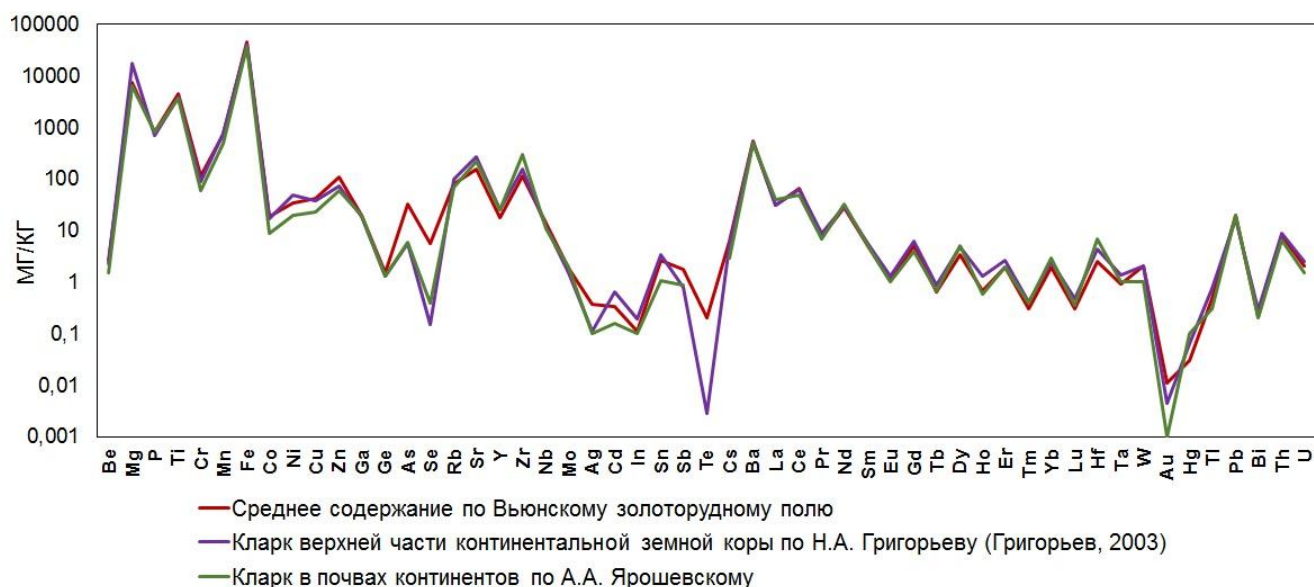


Рисунок 7 – Средние содержания химических элементов в почвах Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (шкала логарифмическая)

Геохимическая специализация почв Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн определялась относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003) и кларка химических элементов в почвах континентов по А.А. Ярошевскому (Ярошевский, 1990). На основе полученных кларков концентраций построены геохимические ряды элементов, в которых фиксируются общие халькофильные элементы (Se, As, Au, Ag, Sb), формирующие основу литогеохимической специализации территории месторождения и рудного поля, причём повышенные содержания Se, Au, Ag и Sb в большей мере проявлены на месторождении Вьюн. Кроме того, содержания, превышающие кларки, установлены для некоторых тяжёлых металлов (Cr, Cu, Zn, Co, Fe и др.) (табл. 3).

Таблица 3 – Средние кларки концентраций химических элементов в почве Вьюнского золоторудного поля

Вьюнское золоторудное поле (количество проб – 37)		
Кларк	Автор	Геохимический ряд
Кларк химических элементов верхней части континентальной земной коры	Н.А. Григорьев, (2003)	Te ₆₉ – Se ₃₈ – As _{5,9} – Ag _{3,5} – Au _{2,5} – Sb _{2,2} – Zn _{1,5} – Cr _{1,3} – Mo _{1,2} – Ti _{1,2} – Pb _{1,2} – Fe _{1,1} – Co _{1,1} – Cu _{1,1} – Ga _{1,1}
Кларк химических элементов в почвах континентов	А.А. Ярошевский, (1990)	Se ₁₄ – Au ₁₁ – As _{5,5} – Ag _{3,8} – Sn _{2,4} – Cs _{2,1} – Cd _{2,1} – Co _{2,1} – W _{2,1} – Sb _{2,0} – Cr _{2,0} – Cu _{1,9} – Zn _{1,9} – Be _{1,8} – Ni _{1,8} – Mn _{1,5} – Fe _{1,2}

Выявленная геохимическая специализация почв Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн, представленная высокими уровнями концентрирования халькофильных элементов, является типичной для компонентов природной среды в зоне гипергенеза

Верхнеиндигирского золотоносного района (Макаров, 2008). При этом средние содержания большинства лито- и сидерофильных элементов в почве месторождения находятся на окололарковом уровне, или значительно ниже него, что в целом характерно для почв месторождений золота Якутии (Макаров, 2016).

Согласно С.В. Григоряну (Григорян, 1974), для месторождений полезных ископаемых с рудными телами крутого падения, к числу которых относится месторождение Вьюн, наблюдается выраженная вертикальная зональность элементов-индикаторов оруденения, проявляющаяся в смене надрудных элементов подрудными в первичных ореолах рудных тел. Для золоторудных месторождений в качестве надрудных выделяются Sb, As и Ag, что показано в данной работе.

Типичными для исследуемой территории химическими элементами являются Au и As. Некоторыми авторами показатель отношения содержания Au к содержанию As применяется в ходе оценки золоторудных объектов. Так, например, для руд месторождения Майское (Россия, Чукотский АО) величина данного показателя достигает 14,6 (Волков, 2021). Для почвы Вьюнского золоторудного поля величина отношения Au/As составляет 0,0003, а для месторождения Вьюн 0,0006. При этом содержание Au для почвы рудного поля равно 0,011 мг/кг, As – 33 мг/кг, для месторождения Au – 0,02 мг/кг, As – 32 мг/кг.

По результатам корреляционного анализа наиболее сильная значимая положительная связь с коэффициентом 0,94 установлена между специфичными для малосульфидного золото кварцевого оруденения элементами: Au и As. Кроме того, значимые связи характерны для As и Sb (0,8), Au и Sb (0,62), Fe и Cu (0,52). Значимые связи между данными элементами в почве месторождения Вьюн отражают природный фактор рудной минерализации.

Для выявления особенностей концентрирования химических элементов в почве были изучены фракции различной размерности. Установлено, что наибольшие содержания специфичных индикаторных элементов малосульфидного золото кварцевого оруденения (As, Sb, Au) сосредоточены в тонкой фракции размером менее 0,1 мм (табл. 4).

Таблица 4 – Средние содержания As, Sb и Au в фракциях почвы различной размерности, мг/кг

Фракция почвы	Среднее содержание химического элемента, мг/кг		
	As	Sb	Au
Валовая (<1 мм)	91	2,7	0,017
–0,5 ÷ +0,25 мм	92	2,9	0,024
–0,25 ÷ +0,1 мм	104	2,9	0,019
<0,1 мм	112	3,1	0,033

Методом сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектроскопией в пробах почв, отобранных в пределах рудной зоны, найдены специфичные для руд месторождения сульфиды Sb (рис. 8 а) и Fe (рис. 8 б), а также частицы Cu (рис. 8 в).

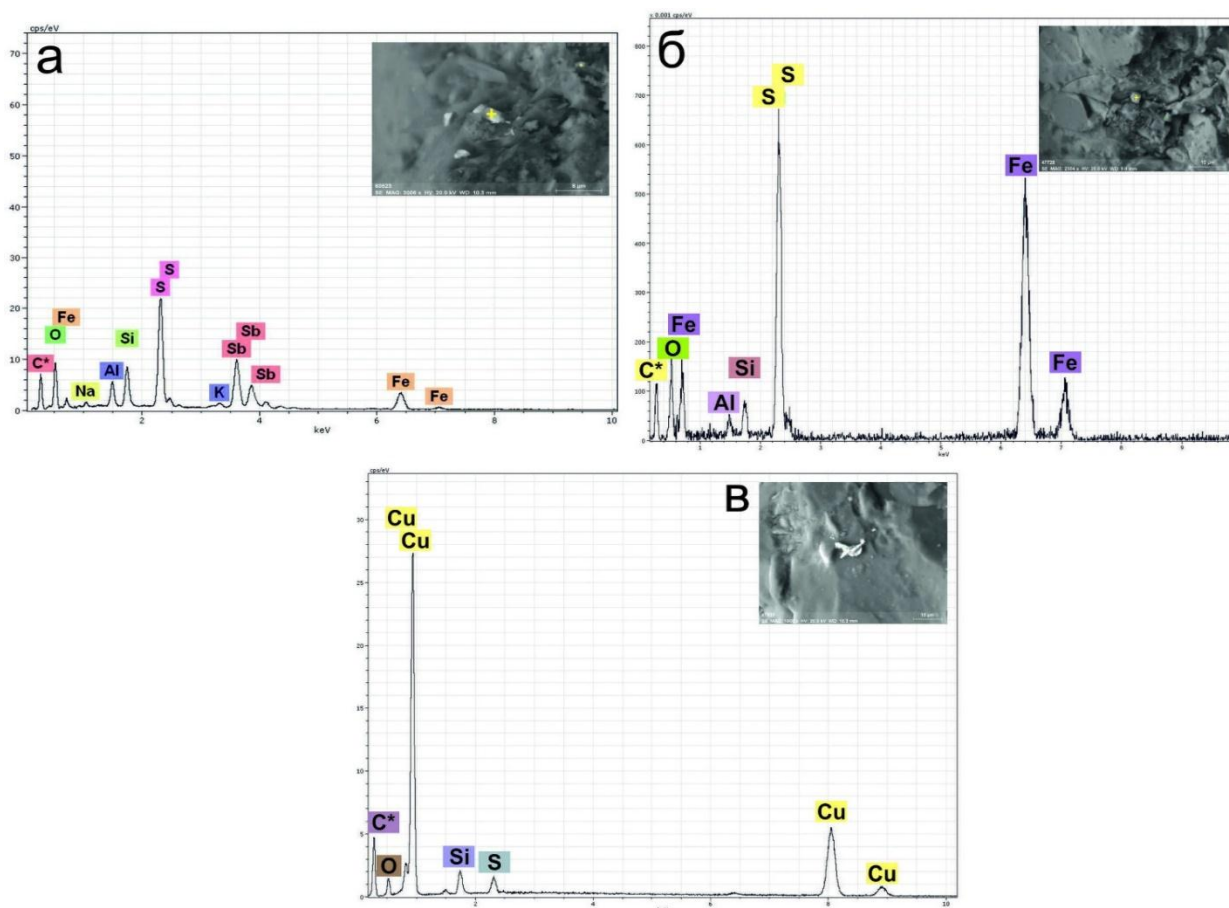


Рисунок 8 – Энергодисперсионные спектры и снимки в режиме обратно рассеянных электронов: *а*) сульфид Sb (% масс: Sb – 39; S – 18); *б*) сульфид Fe (% масс: Fe – 59; S – 26); *в*) частица Cu (% масс: Cu – 89; S – 3)

Вьюнское золоторудное поле расположено в границах Бурганджинского гранитоидного массива, что объясняет наличие в пробах почв редкоземельной минерализации в виде ксенотима (рис. 9 а) и монацита (рис. 9 б), которые попадают в почву в процессе выветривания горных пород (Анисимова и др., 2008; Протопопов и др., 2009).

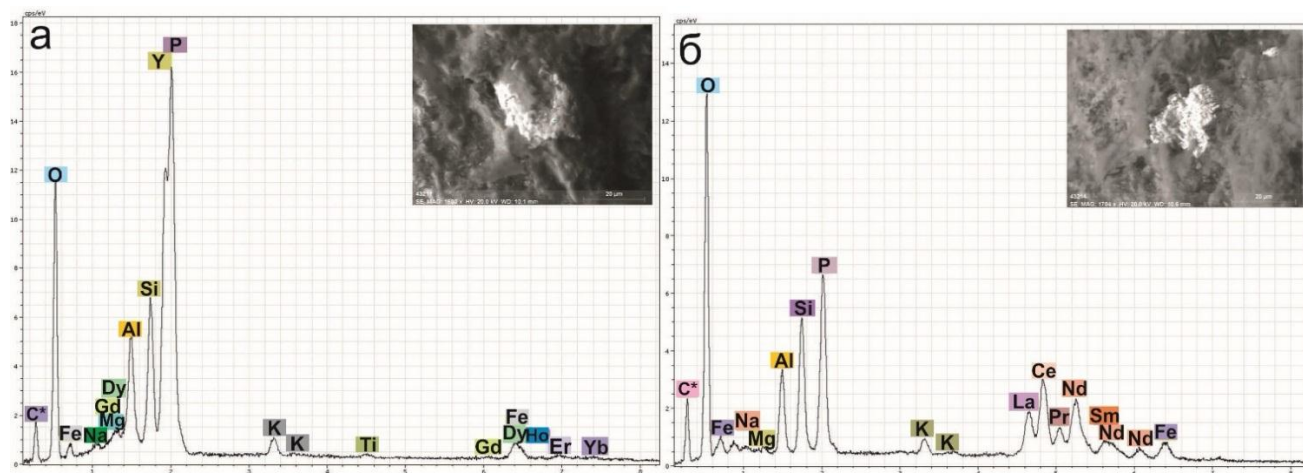


Рисунок 9 – Энергодисперсионные спектры и снимки в режиме обратно рассеянных электронов фосфатов РЗЭ: *а*) ксенотим YPO_4 (% масс: Y – 27; P – 12, O – 40); *б*) монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$ (% масс: Ce – 21; La – 11; Nd – 7; P – 11; O – 29)

ТРЕТЬЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ. Биогеохимическая индикация оруденения в растительных объектах (кора лиственницы даурской (*L. dahurica* Turcz. et Trautv.) и лишайник (*Cladonia rangiferina*)) проявляется в повышенных концентрациях золота и мышьяка. Уровни накопления Au и As в лишайнике (*Cladonia rangiferina*) являются индикаторами выделения потенциально-перспективных структур золотого оруденения на заболоченных участках в условиях многолетнемёрзлых пород.

Для сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica* Turcz. et Trautv.) установлены содержания широкого спектра химических элементов, из которых относительно среднего состава сухого вещества референтного растения (Markert, 1992) выделяются повышенные содержания тяжёлых металлов 1-го (Cd) и 3-го (Mn) классов опасности (ГОСТ Р 70281-2022), благородных металлов (Au, Ru, Rh, Pd) и других элементов (Sc, Be, Ba, Al, Ga, Cr, Sr, Co) (рис. 10).

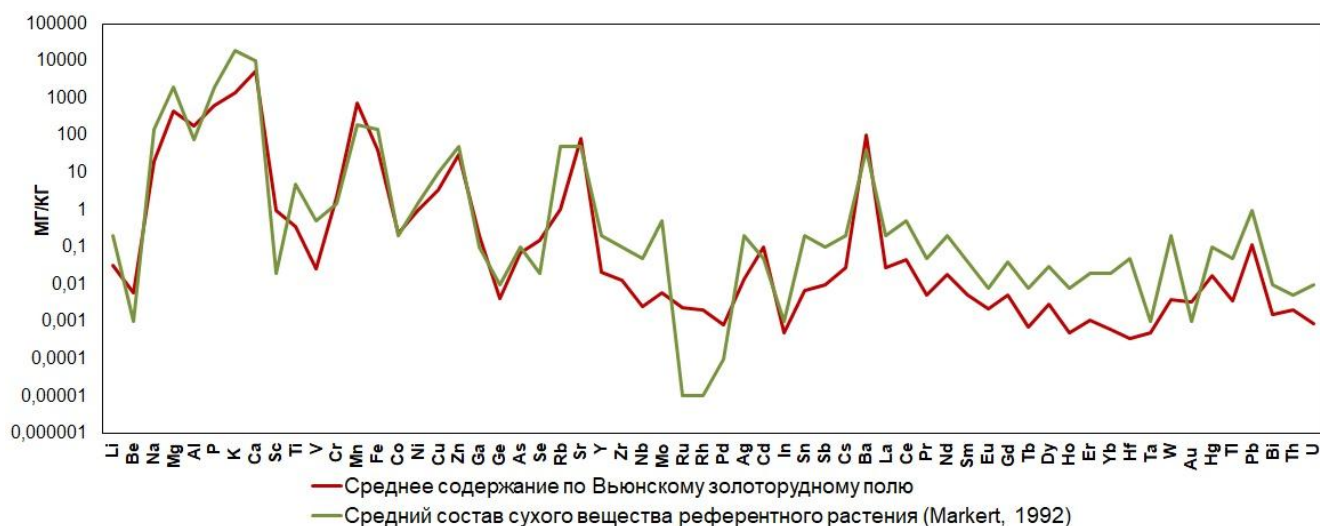


Рисунок 10 – Средние содержания химических элементов в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica* Turcz. et Trautv.) на территории Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (шкала логарифмическая)

Геохимический ряд ассоциаций в сухом веществе коры лиственницы формируют высокие содержания тяжёлых металлов (Mn, Ba, Ga, Cd, Cr, Co), а также Sc, Au и некоторых других элементов (табл. 5).

Таблица 5 – Средние кларки концентраций химических элементов в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica* Turcz. et Trautv.) на территории Вьюнского золоторудного поля

Кларк	Геохимический ряд ассоциаций
Вьюнское золоторудное поле (количество проб – 35)	
Средний состав сухого вещества референтного растения (Markert, 1992)	Sc ₄₈ – Be _{6,4} – Mn _{3,8} – Au _{3,3} – Ba _{2,6} – Al _{2,3} – Ga _{2,0} – Cd _{2,0} – Cr _{1,6} – Sr _{1,6} – Co _{1,2}

Содержания Au и As в сухом веществе коры лиственницы на исследуемой территории наиболее высоки в пределах месторождения (0,0055 мг/кг и 0,12 мг/кг соответственно), для которого величина отношения Au/As составляет 0,083. Для коры лиственницы характерны превышающие кларк содержания As, причиной чему служит безбарьерность лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) по отношению к высоким концентрациям данного элемента в почвах (Разин и др., 1966; Юсупов, 2009). Ореолы повышенных концентраций As (рис. 11 а) и Au (рис. 11 б) приурочены к рудной зоне месторождения Вьюн.

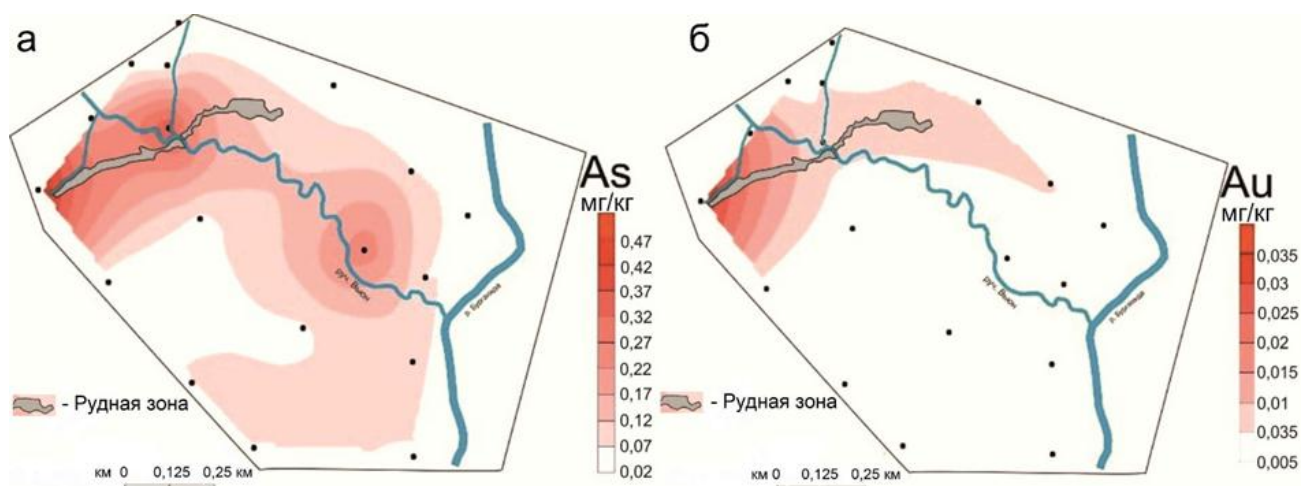


Рисунок 11 – Схемы распределения содержаний As (а) и Au (б) в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на территории месторождения Вьюн

Лишайник (*Cladonia rangiferina*) характеризуется повышенными содержаниями As (элемента 1 класса опасности согласно ГОСТ Р 70281-2022), благородных металлов (Au, Ru, Rh, Pd) и других элементов (Se, Sc, Be, Th, Cr) относительно среднего состава сухого вещества референтного растения (Markert, 1992) (рис. 12).



Рисунок 12 – Средние содержания химических элементов в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (шкала логарифмическая)

Геохимический ряд ассоциаций элементов в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории рудного поля приведён в табл. 6. Наибольшие кларки концентраций As и Au в сухом веществе лишайника фиксируются в пределах месторождения Вьюн, биогеохимические ореолы рассеяния повышенных содержаний приурочены к рудной зоне (рис. 13 а-б).

Таблица 6 – Средние кларки концентраций химических элементов в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля

Кларк	Геохимический ряд ассоциаций
Вьюнское золоторудное поле (количество проб – 35)	
Средний состав сухого вещества референтного растения (Markert, 1992)	Sc ₆₁ – Be _{5,9} – Se _{2,9} – Au _{2,8} – Th _{2,2} – As _{1,9} – Cr _{1,5}

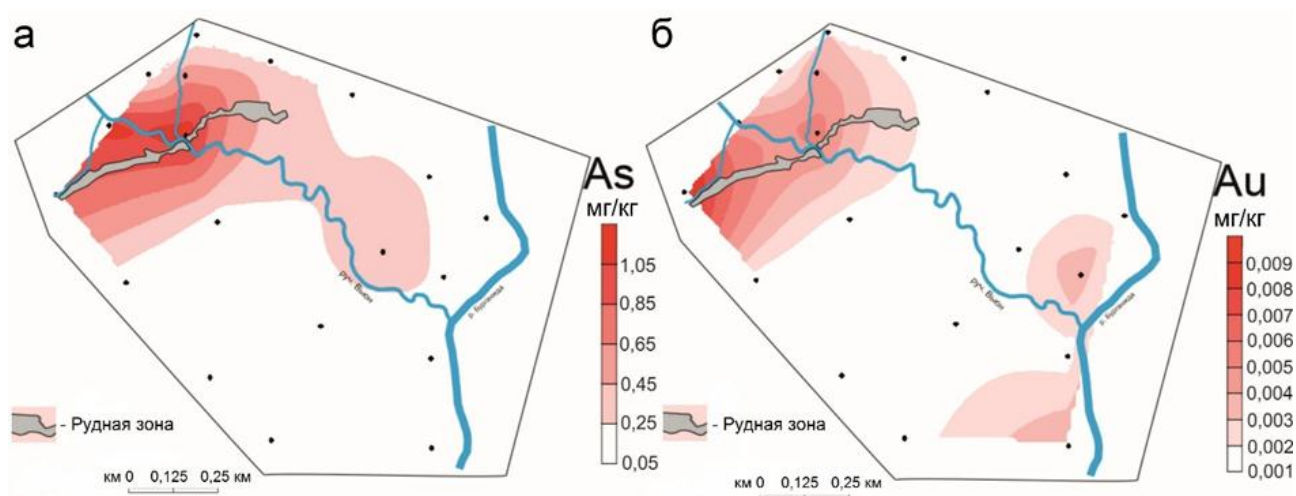


Рисунок 13 – Схемы распределения содержаний As (а) и Au (б) в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) на ключевом участке №1 (месторождение Вьюн)

Полученные результаты согласуются с известными данными о концентрировании золота растениями, произрастающими на рудных площадях (Минеев, 1976; Ковалевский и др., 1978).

По результатам корреляционного анализа выявлена значимая связь между Au и As с коэффициентом парной корреляции 0,7. Тесная ассоциация данных элементов является характерной особенностью для золоторудных объектов (Некрасов, 1991; Скобелева, 2011).

При проведении литогеохимической съёмки на территории участка Андрей Вьюнского золоторудного поля выделялись отдельные заболоченные места, на которых отсутствовали рыхлые отложения, что не позволяло выдержать равномерную сеть опробования сотрудниками ООО «Дальзолото». Нами были проведены детальные исследования по профилям на участке с отбором проб лишайника (*Cladonia rangiferina*), отдельный профиль показан на рис. 14 а-б. Были установлены повышенные концентрации As и Au в перспективных рудоконтролирующих структурах при отсутствии рыхлых отложений, что позволило использовать лишайник в качестве дополнительного поискового индикатора (Язиков и др., 2020).

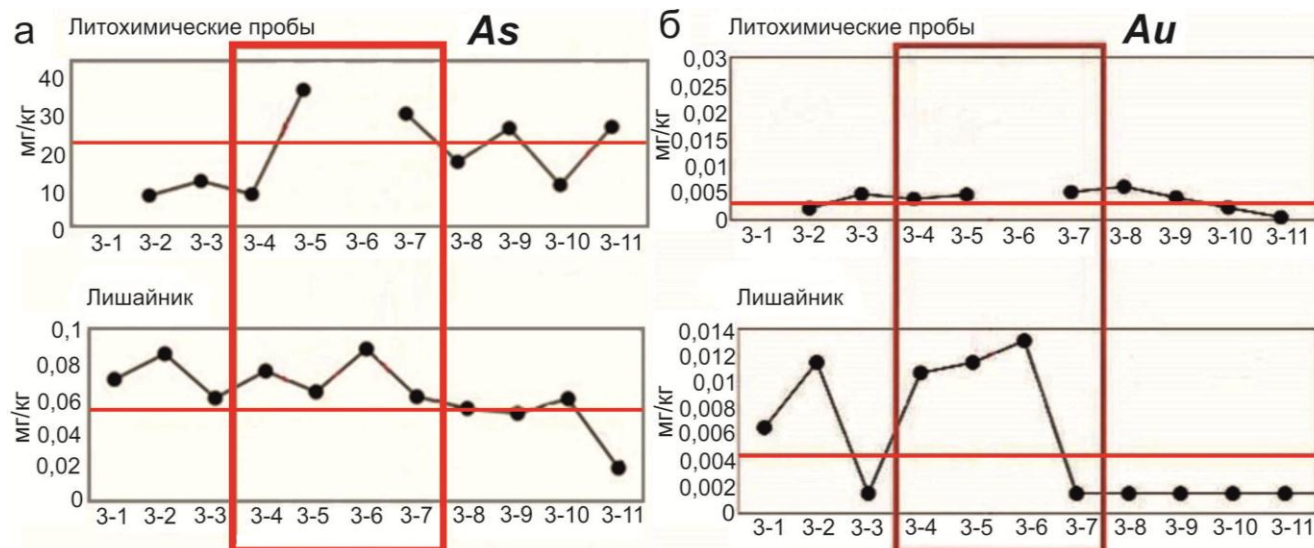


Рисунок 14 – Концентрации As (а) и Au (б) в литохимических пробах и пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории участка Андрей (Вьюнское золоторудное поле) (Язиков и др., 2020)

По данным Тайсаева Т.Т. (Тайсаев, 1988), в золоторудных зонах золото концентрирует большинство растений гольцовых ландшафтов, в том числе лишайники, которые развиваются на растительном субстрате и образуют сомкнутые сообщества и покровы (Андреев, 2013). Уровни содержания Au и его спутников в сухом веществе лишайника являются достаточными для выявления биогеохимических аномалий.

Использование лишайника (*Cladonia rangiferina*) в качестве биогеохимического индикатора оруденения золота особо актуально для участков, где нет рыхлых отложений для отбора литохимических проб.

Лишайник (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля не рекомендуется в качестве корма для животных (оленей и др.) из-за выявленных высоких содержаний As – элемента 1 класса опасности (согласно ГОСТ Р 70281-2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам опробования поверхностных вод установлено, что водотоки месторождения Вьюн отличаются повышенной сульфатностью по сравнению с водотоками вне месторождения, в которых преобладает гидрокарбонат-ион.
2. Установлен факт значительного увеличения концентраций As и Hg в водах ручья Вьюн ниже по течению от рудной зоны.
3. В пробах донных отложений водотоков фиксируются повышенные содержания типичных для малосульфидного золотокварцевого оруденения элементов (Te, Se, As, Sb, Ag, Au) относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003).

4. В почве Вьюнского золоторудного поля ряд химических элементов характеризуются содержаниями, превышающими кларк верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003), в том числе специфичные халькофильные элементы (Te, Se, As, Au, Ag, Sb). Повышенные содержания Se, Au, Ag и Sb в большей мере проявлены в пределах месторождения Вьюн. Минеральный состав почвы характеризуется наличием сульфидных (сульфиды Fe, Cu, Sb) и редкоземельных (ксенотим, монацит) минеральных фаз. При этом наибольшими содержаниями типоморфных элементов (As, Sb, Au) характеризуется тонкая фракция почвы, размерностью менее 0,1 мм.
5. В сухом веществе коры лишвенницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) максимальные содержания типоморфных элементов (As, Au) приурочены к рудной зоне месторождения, что подтверждается величинами кларков концентраций и биогеохимическими ореолами рассеяния.
6. При отсутствии рыхлых отложений для отбора литохимических проб лишайник (*Cladonia rangiferina*) является индикатором природной повышенной концентрации Au и As.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Язиков Е.Г., **Мишанькин А.Ю.**, Осипова Н.А., Филимоненко Е.А., Карпенко Ю.А., Собянин Ю.П. Геохимические особенности природных вод территории золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха-Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 2. С. 176-189.
2. **Мишанькин А.Ю.**, Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А., Собянин Ю.П. Минералогическо-геохимические особенности почвенного покрова золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха-(Якутия)) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 11. – С. 98-109.

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

3. Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А., **Мишанькин А.Ю.**, Собянин Ю.П., Карпенко Ю.А. Опытные работы по совершенствованию биогеохимического метода поисков золота в условиях криолитозоны (на примере территории Вьюнского рудного поля, Республика Саха (Якутия)) // Руды и металлы. – 2020. – № 4. – С. 22-31.
4. **Мишанькин А.Ю.**, Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А., Собянин Ю.П. Фоновая эколого-геохимическая оценка донных отложений водотоков для территории золоторудного месторождения Вьюн (Республика Саха-Якутия) // Вестник ЗабГУ. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 47-57.