

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

На правах рукописи

МИШАНЬКИН АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

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

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
профессор Язиков Е.Г.

Томск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1: ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	15
ГЛАВА 2: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ	27
2.1 Физико-географическая характеристика	27
2.2 Геологическая характеристика	31
2.3 Геоэкологическая характеристика.....	38
ГЛАВА 3: МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	43
3.1 Методика отбора проб компонентов природной среды.....	44
3.1.1 Методика отбора проб поверхностных вод.....	44
3.1.2 Методика отбора проб донных отложений из водотоков	47
3.1.3 Методика отбора проб почв	50
3.1.4 Методика отбора проб коры лиственницы даурской (<i>L. dahurica Turcz. et Trautv.</i>).....	53
3.1.5 Методика отбора проб лишайника (<i>Cladonia rangiferina</i>).....	57
3.1.6 Методика проведения полевых измерений содержаний загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.....	60
3.1.7 Методика проведения гамма-радиометрических измерений	62
3.2 Методика подготовки проб компонентов природной среды к лабораторно-аналитическим исследованиям	63
3.2.1 Методика подготовки проб поверхностных вод.....	63
3.2.2 Методика подготовки проб донных отложений и почв	64
3.2.3 Методика подготовки проб коры лиственницы даурской (<i>L. dahurica Turcz. et Trautv.</i>) и лишайника (<i>Cladonia rangiferina</i>)	67
3.3 Аналитическое обеспечение эколого-геохимических исследований.....	68
3.4 Методика обработки результатов лабораторно-аналитических исследований	74
3.4.1 Математико-статистическая обработка результатов исследований	74
3.4.2 Эколого-геохимическая обработка результатов исследований	76
3.4.2.1 Обработка результатов гидрогеохимических исследований поверхностных вод.....	76
3.4.2.2 Обработка результатов гидролитогеохимических исследований донных отложений	78
3.4.2.3 Обработка результатов литогеохимических исследований почв.....	80

3.4.2.4 Обработка результатов биогеохимических исследований коры лиственницы даурской (<i>L. dahurica Turcz. et Trautv.</i>) и лишайника (<i>Cladonia rangiferina</i>)	81
ГЛАВА 4: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИЗ ВОДОТОКОВ.....	82
4.1 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения поверхностных вод	82
4.2 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения донных отложений из водотоков	102
4.2.1 Характеристика минерального состава донных отложений водотоков территории Вьюнского золоторудного поля.....	116
ГЛАВА 5: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ПОЧВ	119
5.1 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения почв	119
5.2 Характеристика минерального состава почв территории Вьюнского золоторудного поля.....	133
5.3 Содержания химических элементов во фракциях почвы	138
ГЛАВА 6: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ	142
6.1 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения коры лиственницы даурской (<i>L. dahurica Turcz. et Trautv.</i>).....	142
6.2 Характеристика территории золоторудного месторождения Вьюн по данным изучения лишайника (<i>Cladonia rangiferina</i>).....	151
6.3 Индикаторные свойства лишайника (<i>Cladonia rangiferina</i>) в условиях криолитозоны.....	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	190

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.

Значительные перспективы горнодобывающей промышленности в последнее время связываются с Арктической зоной Российской Федерации (АЗР), которую слагают металлогенические структуры глобального значения. К настоящему времени на территории АЗР открыто более 8 тыс. рудных и россыпных месторождений, рудопроявлений, точек минерализации (Волков, 2019). Размещение месторождений твердых полезных ископаемых в российском секторе Арктики показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Размещение месторождений твердых полезных ископаемых в российском секторе Арктики (по данным ГИС-анализа) (Волков, 2019)

Условные обозначения месторождений твердых полезных ископаемых:

1 – алмазы; 2 – благородные металлы (Pt, Pd, Au, Ag); 3–5 – цветные металлы: 3 – Cu-Mo; 4 – Zn-Pb; 5 – Sn-W; 6 – редкие металлы (редкоземельные металлы, Nb, Ta и др.); 7 – уран; 8 – черные металлы (железные и хромовые руды); 9 – уголь.

Арктика является полигоном золотодобычи, на которую приходится 36,9 % от российской добычи золота (Волков, 2019) (рисунок 2).

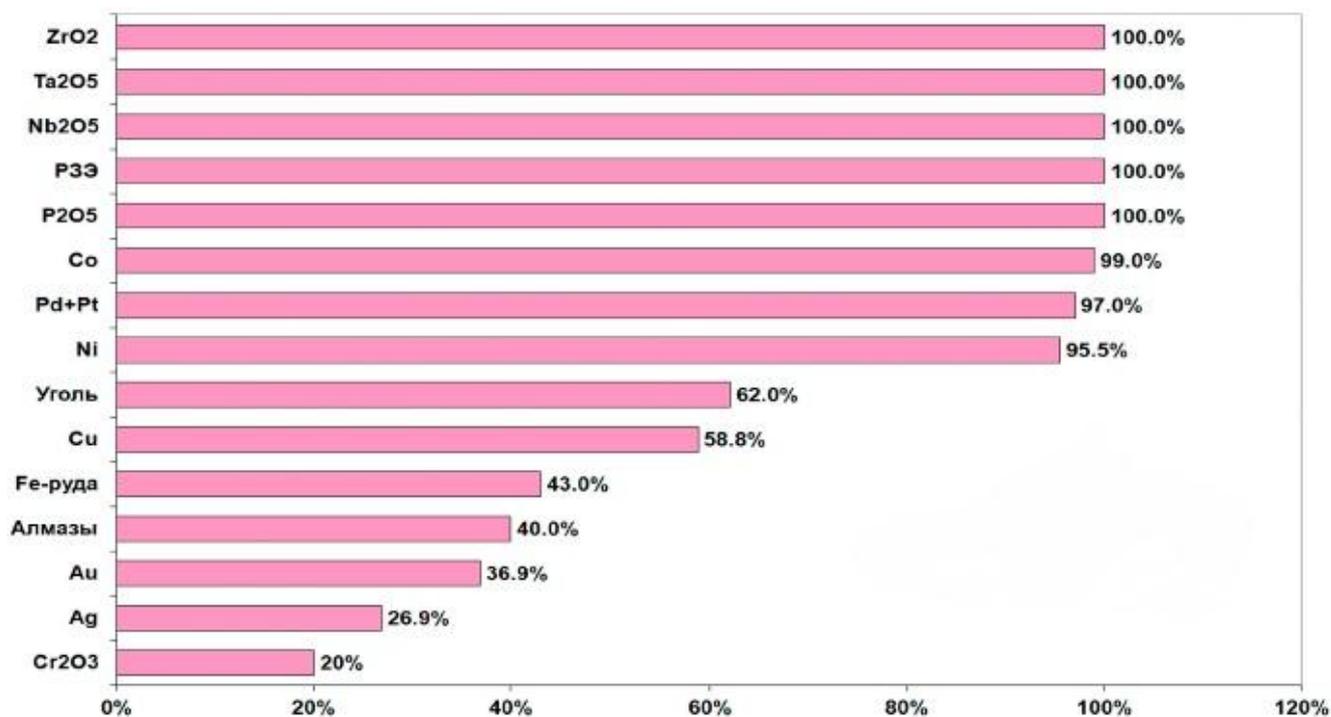


Рисунок 2 – Добыча минеральных ресурсов в российском секторе Арктики по состоянию на 2017 г (% от общероссийской добычи) (Волков, 2019)

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 (Горбатюк, 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 многолетней мерзлоты, 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 и др., 1999). Первым исследователем, обосновавшим необходимость учёта криогенных процессов при изучении месторождений полезных ископаемых в криолитозоне, был известный мерзлотовед, 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 (Харитонова и др., 2015), М.И. Ксенофонтовой (Ксенофонтова, 2018). Экогеохимией природной среды рудных объектов в криолитозоне занимаются некоторые иностранные учёные. S. Yang исследует почвенный покров медно-порфирирового 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 Вьюнского золоторудного поля (Республика Саха-(Якутия)) в условиях распространения многолетнемёрзлых пород по данным изучения особенностей поверхностных вод, донных отложений водотоков, почвы, коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*).

Основные задачи:

1. Установить средние содержания химических элементов в компонентах природной среды Вьюнского 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 Вьюнского золоторудного поля в условиях многолетнемёрзлых пород и выявить в растительных объектах (коре лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), лишайнике (*Cladonia rangiferina*)) специфичные индикаторные элементы,

Объект исследования: компоненты природной среды территории Вьюнского золоторудного поля: поверхностные воды и донные отложения водотоков; почва; кора лиственницы 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 Вьюнского золоторудного поля, территория которого сложена терригенными отложениями верхнетриасового возраста (231–237 млн. лет) – алевролитами, аргиллитами и песчаниками, относящимися к периферической части надинтрузивной зоны невоскрытого Бурганджинского гранитоидного массива. На момент проведения эколого-геохимических работ добыча золота не осуществлялась.

Руды относятся к малосульфидному золото кварцевому 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 лишайницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и 35 – лишайника (*Cladonia rangiferina*). 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 штольней (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. Пробы отбирались и обрабатывались по стандартным методикам в соответствии с нормативными документами.

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 почвы – на 55 элементов, 35 проб сухого вещества коры лишайницы 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 НИ ТПУ 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 почвы, 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 из-за выявленных высоких содержаний As – элемента 1 класса опасности (согласно ГОСТ Р 70281-2022).

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

Основные защищаемые положения.

1 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).

2 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 специфических элементов оруденения представлены сульфидными (сульфиды Fe, Cu, Sb) и редкоземельными (ксенотим, монацит) минеральными фазами.

3 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 многолетнемерзлых пород.

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 лишайницы 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 лишайницы 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 подготовки диссертации.

ГЛАВА 1: ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Горнопромышленный комплекс представляет собой опасный источник разрушения и загрязнения окружающей среды, что привлекает большое внимание различных исследователей (Глазовская, 1988; Елпатьевский, 1993; Поддубный, 2002; Рафикова и др., 2010; Водяницкий, 2013; Siegel, 2002; Baron et al., 2006; Toth et al., 2016).

Степень воздействия горнопромышленного комплекса на окружающую среду в масштабе Российской Федерации отражают данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат). Так, за 2020 год предприятиями по добыче полезных ископаемых на территории России в атмосферный воздух выброшено 6 754,8 тыс. т загрязняющих веществ от стационарных источников, в поверхностные водные объекты сброшено 500,1 млн. м³ загрязнённых сточных вод, образовано 6 367 335,6 тыс. т отходов (Росстат, 2022).

Добыче полезных ископаемых предшествуют их поиск и разведка, в ходе проведения которых нарушается природное равновесие экосистем. Основными видами воздействия геологоразведочных работ (ГРР) на площади месторождения являются механические нарушения ландшафта и загрязнение компонентов природной среды техногенными источниками.

Разрабатываемое месторождение полезного ископаемого и другие связанные с его разработкой объекты хозяйственной деятельности представляют собой сложную природно-техногенную систему, содержащую, как правило, ряд источников антропогенного воздействия на окружающую (в т.ч. – геологическую) среду.

К источникам антропогенного воздействия, связанным с добычей полезного ископаемого, т.е. непосредственно с недропользованием, относятся открытые (карьеры, разрезы, разрезные траншеи, расчистки, канавы, шурфы) и подземные горные выработки (шахты, штольни и др.).

Указанные виды источников антропогенного воздействия оказывают влияние в первую очередь на состояние недр (геологическую среду), но могут приводить также к изменению других компонентов окружающей среды (поверхностных вод, атмосферы, состояния земной поверхности и растительности).

К источникам антропогенного воздействия на окружающую (в том числе – геологическую) среду, не связанным непосредственно с процессом добычи твердых полезных ископаемых, относятся отвалы горных пород, гидроотвалы, склады полезных ископаемых, шламо- и хвостохранилища горнообогатительных комбинатов и фабрик, пруды-отстойники, накопители сточных вод, каналы и трубопроводы отвода рек и ручьев, технических вод и стоков, сбросы дренажных и сточных вод в поверхностные водотоки и водоемы, технологические и бытовые коммуникации, участки рекультивации земель, опасные инженерно-геологические процессы, сформировавшиеся под воздействием антропогенной деятельности, сооружения по инженерной защите объектов инфраструктуры от негативного воздействия опасных геологических процессов.

Эти источники антропогенного воздействия оказывают влияние как на геологическую среду, благодаря, главным образом, утечкам из водонесущих коммуникаций, а также из гидроотвалов, шламо- и хвостохранилищ, с площадок промышленных предприятий, так и на другие компоненты окружающей среды (Экология ..., 1991; Перельман и др., 1994; Язиков и др., 2003).

Для оценки влияния добычи полезных ископаемых применяется подход к классификации характера воздействия горного производства на компоненты природной среды, заключающийся в характеристике видов и результатов воздействия на отдельные элементы биосферы, такие как подземные и поверхностные воды, воздушный бассейн, природный ландшафт, недра, флора и фауна (Певзнер, 2003). Данный подход показан в таблице 1.

Таблица 1 – Основные виды и результаты воздействия горного производства на биосферу (Певзнер, 2003)

Элементы биосферы	Воздействие на элементы биосферы	Результат воздействия
Воды подземные	Осушение месторождения, сброс сточных и дренажных вод	Уменьшение запасов подземных, грунтовых и поверхностных вод. Нарушение гидрогеологического и гидрологического режимов
Воды поверхностные	Осушение и перенос поверхностных водоёмов и водотоков, сброс сточных и дренажных вод, водозабор для технических и бытовых нужд предприятий	Загрязнение водного бассейна сточными и дренажными водами. Ухудшение качества вод в результате неблагоприятных изменений гидрохимических и биологических режимов поверхностных и подземных вод
Воздушный бассейн	Организованные и неорганизованные выбросы в атмосферу пыли и газов	Загрязнение (запыление и загазовывание) атмосферы
Природный ландшафт	Проведение горных выработок, сооружение отвалов, гидроотвалов, хвосто- и водохранилищ. Строительство промышленных и гражданских зданий и сооружений. Прокладка дорог и других видов коммуникаций	Деформация земной поверхности. Нарушение почвенного покрова. Сокращение площадей продуктивных угодий различного назначения. Ухудшение качества почв. Изменение облика территории. Изменение состояния грунтовых и поверхностных вод. Осаждение пыли и химических соединений. Эрозионные процессы
Недра	Проведение горных выработок. Извлечение полезных ископаемых, вмещающих и вскрышных пород. Осушение месторождения. Обводнение участков месторождения. Возгорание полезных ископаемых и пустых пород. Захоронение вредных веществ и отходов производства. Сброс сточных вод	Изменение напряжённо-деформированного состояния массива горных пород. Снижение качества полезных ископаемых и промышленной ценности месторождений. Загрязнение недр. Развитие карстовых процессов. Потери полезных ископаемых
Флора и фауна	Промышленное и гражданское строительство. Вырубка лесов. Нарушение почвенного покрова. Изменение состояния грунтовых и поверхностных вод. Запыление и загазовывание атмосферы. Производственные и бытовые шумы	Ухудшение условий обитания лесной, степной и водной флоры и фауны. Миграция и сокращение численности диких животных. Угнетение и сокращение видов дикорастущих растений. Снижение урожайности культур

Также проводятся работы по типизации воздействий, оказываемых горнодобычным комплексом на окружающую среду. Пример показан на рисунке 3.

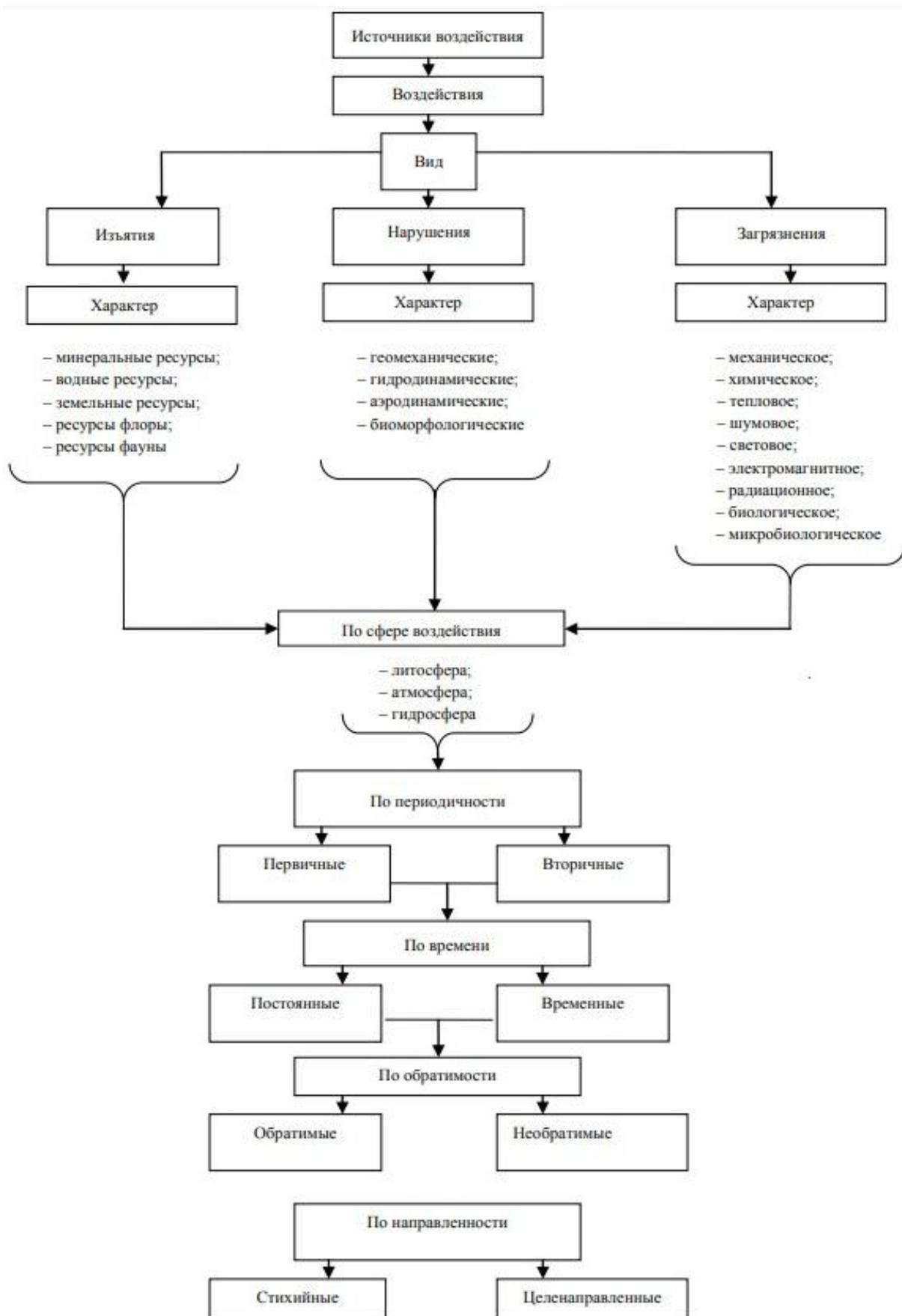


Рисунок 3 – Типы воздействий горнодобычного комплекса на окружающую среду
(Косолапов, 2014)

На сегодняшний день месторождения твёрдых полезных ископаемых разрабатываются в основном открытым (физико-техническая открытая геотехнология) и подземным (физико-техническая подземная геотехнология) способами (Певзнер, 2003). Сравнительная оценка воздействия открытого и подземного способов добычи полезных ископаемых на окружающую среду приведена в таблице 2, из которой следует, что наиболее сильное воздействие оказывают открытые горные работы.

Таблица 2 – Оценка воздействия открытого и подземного способов добычи полезных ископаемых на окружающую среду (Певзнер, 2003)

Способ добычи полезных ископаемых	Уровень воздействия горного производства на элементы биосферы				
	Водный бассейн	Воздушный бассейн	Флора, фауна	Земля, почвы	Недра
Открытый	Си	Си	Си	Си	Си
Подземный	Ср	О	Н	Ср	Си

Примечание: О – отсутствие воздействий; Н – незначительное воздействие; Ср – воздействие средней силы; Си – сильное воздействие.

Открытым способом добывается около 80 % всех твёрдых полезных ископаемых. Данный способ считается наиболее экономичным по сравнению с подземным, но в то же время он обладает высокой землеёмкостью и влечёт за собой коренные преобразования окружающей среды (Трофимов и др., 2005; Белошейкина и др., 2020).

Золотодобывающая промышленность вносит существенный вклад в отчуждение и нарушение земельного фонда. Так, по состоянию на 2004 г. в Иркутской области общая площадь нарушенных земель предприятиями золотодобычи в Бодайбинском районе достигла 10,7 тыс. га, в Нижнеудинском – около 1,0 тыс. га (Парфёнов и др., 2004).

При разработке месторождений открытым способом происходит эмиссия различных химических элементов в окружающую среду, в том числе тяжелых металлов, содержащихся в рудах и вмещающих породах, при этом элементы могут

накапливаться в компонентах природной среды вплоть до токсичных уровней (Корнеева и др., 2018).

Для районов добычи полезных ископаемых характерно существенное механическое разрушение и химическое загрязнение почвенного слоя, особенно для объектов ведения открытых горных работ (Басова и др., 2012; Ghazban et al., 2018; Yang et al., 2018; Martin, 2019).

Наибольшую опасность представляет загрязнение почв тяжелыми металлами, которые могут нести токсический эффект даже при низких концентрациях (Поддубный, 2002).

Известно, что металлы сравнительно быстро накапливаются в почве и крайне медленно из нее удаляются (Angelovičová et al., 2015).

Добыча золота также ведёт к загрязнению почв. По данным (Белозерцева и др., 2015), гумусово-органогенные горизонты аллювиальных почв вблизи объектов золотодобычи Восточного Саяна обогащены Fe, Ni, Cu, Cr, Ba, Pb и Mn, причём содержание Ni, Cu и Pb превышает предельно-допустимую (ПДК) и ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) в 2–2,5 раза.

Для почв долины р. Джалинда (Амурская область), где ведётся интенсивная добыча золота, характерно устойчивое загрязнение такими химическими элементами, как As, Cu, Mo, Cr, Ni, Pb (Сорокина, 2007).

Значительные нагрузки от горнопромышленного производства испытывают водные объекты. Поверхностные воды в границах отрабатываемых месторождений подвергаются засорению и загрязнению. Кроме того, нарушается гидрологический режим водоёмов и водотоков (Ляпунов, 2015; Pérez-Sirvent et al., 2016).

Влияние горных работ на гидросферу происходит в основном при отработке карьеров за счёт карьерного водоотлива, создания отвалов пустых пород, при фильтрационных потерях сточных вод из отстойников накопителей и при сбросах загрязняющих веществ. Основными источниками негативного воздействия обогатительного комплекса на окружающую среду являются водопотребление, сброс сточных вод, отвалы хвостов обогащения и загрязнение поверхностного стока (Макаров, 2020).

Как показывают исследования, наиболее загрязненными являются участки, расположенные в зоне влияния действующих объектов горнорудной промышленности. При этом элементный состав загрязнения, как правило, отвечает рудной специализации разрабатываемого месторождения (Бактыбаева и др., 2016).

Большой вклад в загрязнение поверхностных водных объектов вносят промышленные стоки горнодобывающих предприятий (Верхотуров, 2014). По данным (Юргенсон и др., 1999), минерализация промстоков в хвостохранилищах достигает 20–22 г/дм³, содержание в них сульфатов составляет 14–17 г/дм³. Опасным фактором является также высокая кислотность промстоков, попадающих в водные объекты. Это влечёт за собой снижение рН воды и, как следствие, приводит к увеличению подвижности металлов, усиливает поток их поступления из донных отложений в придонный слой воды (Бактыбаева и др., 2016).

Поверхностный и подземный сток с хвостохранилищ, а также с отвалов горных пород, является мощным источником формирования контрастных гидрогеохимических аномалий токсичных элементов. В Республике Саха-Якутия примером тому являются высокие концентрации Zn (до 50 ПДК_{рх}) в водах р. Яна в районе посёлка Батагай, который испытывает техногенную нагрузку от отработки оловорудных месторождений Эге-Хая и Кестер (Макаров, 2020).

Помимо загрязнения, горнодобычные работы влекут за собой изменения гидрологического режима водных объектов. Забор воды в ходе технологических процессов и связанное с ним понижение уровня подземных вод приводят к уменьшению подземного стока в реки и водоёмы. При значительных водопонижениях в пределах депрессионных зон во всех поверхностных источниках истощаются запасы воды, снижается водность рек, падает уровень озёр и водохранилищ, высыхают болота, исчезают родники, ручьи и мелкие реки.

Сброс шахтных и технических вод в поверхностные воды зачастую приводит к значительному увеличению водности небольших водотоков. В результате увеличение расходов воды в некоторых реках приводит к повышению на отдельных участках уровней грунтовых вод, подтоплению и затоплению земель (Станис, 2004).

Особенно остро стоит проблема загрязнения водных объектов, расположенных на территориях формирования бассейнов питьевого водоснабжения, как в случае с центрами горнорудного техногенеза Карачаево-Черкесской Республики (Ураскулов и др., 2018). Данные центры, представленные медноколчеданными, полиметаллическими, золоторудными и вольфрамовыми месторождениями, охватывают истоки рек Кубани, Большой Лабы, Урупа и др. и негативно влияют на качество вод, идущих на питьевые и прочие нужды населения региона.

В целом, негативное влияние на гидросферу в районах разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом проявляется в заборе воды из водоёмов, сбросом в них сточных вод, выпадением загрязнённых осадков и пыли из атмосферы, изменением уровня подземных вод в результате осушения горных выработок (Информационно-технический справочник..., 2017).

Поступление поллютантов в водные объекты ведёт к последующему загрязнению донных осадков, которые являются депонирующей средой по отношению к загрязняющим веществам (Роева и др., 2007; Rimondi et al., 2012; Santos et al., 2020) и исследуются в целях оценки качества и экологического состояния водных объектов (Брукс, 1982; Денисова и др., 1987; Нормы и критерии оценки..., 1996; Коломийцев и др., 2020).

В работе (Опекунов и др., 2018) приводятся сведения о концентрациях химических элементов в донных осадках р. Карагайлы (Южный Урал), протекающей по территории Сибайского рудного района, где производится добыча медно-цинковых руд. Показано, что содержания Cu, Zn, Cd в среднем на 2 порядка превышают фоновые. Высокими кларками концентраций характеризуются такие сидерофильные элементы, как Fe, Mn, Ni, Co. Места аккумуляции металлов в донных осадках сопряжены с техногенными физико-химическими барьерами, находящимися ниже по течению от выхода подотвальных вод.

Чувствительными к внешним воздействиям биообъектами являются растения, которые отражают геохимическую специализацию окружающей среды

(в том числе особенности техногенного влияния) и свидетельствуют о её состоянии.

Применение растений в качестве индикатора состояния окружающей среды началось с работ В.В. Ковальского (Ковальский, 1974), А.И. Перельмана (Перельман, 1979), М.А. Глазовской (Глазовская, 1988), получило дальнейшее развитие в трудах В.А. Алексеенко (Алексеенко, 2000) и В.В. Добровольского (Добровольский, 2003) и актуально в наше время как для российских учёных (Баргалы, 2005; Ермаков, 2011; Горбатюк и др., 2019), в том числе представителей Национального исследовательского Томского политехнического университета (Юсупов и др., 2016; Рихванов и др., 2017; Барановская и др., 2020), так и для зарубежных исследователей (Degens et al., 1991; Kabata-Pendias et al., 1999; Bech, 2001; Adriano, 2001; Violante et al., 2010).

Отдельно стоит выделить основоположника биогеохимии, великого русского учёного-естествоиспытателя, академика Владимира Ивановича Вернадского (1863-1945 гг.), который в своих трудах отмечал, что начал интересоваться проблемами в этой области с конца XIX века (Вернадский, 1940; Вернадский, 1980).

Зачастую оценка влияния техногенеза на растительный мир базируется на явлении концентрирования химических элементов растениями (Добровольский, 2003), однако немаловажную роль в мониторинге загрязнения окружающей среды с помощью растительности играет и биоиндикация (фитоиндикация), которая подразумевает оценку качества окружающей среды по состоянию растительных организмов

Например, при попадании избыточного количества отдельных химических элементов в почвенный покров, листья растений могут приобретать неестественную окраску, что будет служить признаком изменения геохимической обстановки и поводом к изучению элементного состава растения (Рассади́на, 2015).

К другим фитоиндикационным признакам можно отнести некрозы (гибель ткани), снижение роста, усыхание, уменьшение площади листьев, изменение анатомического строения растений и сроков вегетации, суховершинность у деревьев и др. (Неверова, 2009).

В фитомониторинг вовлекается большое количество различных растений. Например, хвойные деревья (сосна, ель, пихта и др.), у которых основными биоиндикационными признаками являются количество хвои, её внешний вид, скорость опадения по годам и сухой вес годичного побега (Николаевский, 1999). В условиях крайнего севера в целях мониторинга загрязнений часто используются лишайники (Крючков и др., 1990), составляющие отдельное направление в области фитоиндикации – лишайноиндикацию. Также исследуются подорожники, мхи и различные травянистые виды растений, которые активно накапливают из почв тяжёлые металлы (Контурская, 2001).

Нередко для характеристики конкретных показателей используются строго определённые виды растений. Например, для оценки солевого загрязнения почвенного покрова применяются листья липы, для установления количественного уровня диоксида серы в атмосферном воздухе – лишайники и клён американский, для определения содержания фтористого водорода в атмосфере – пихта и т.д. (Белюченко и др., 2014).

Необходимо отметить, что выделяются необходимые для жизнедеятельности растений микроэлементы, участвующие практически во всех процессах, происходящих в растительной клетке (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni и Zn), элементы, функциональная роль которых в настоящее время неизвестна (Clemens et al., 2003; Титов и др., 2014), и важнейшие загрязнители окружающей среды – Cd, Hg и Pb, которые негативно влияют на растения даже в относительно невысоких концентрациях (Башкин и др., 2004; Hassan et al., 2011).

В районах с развитой горнорудной промышленностью растения интенсивно поглощают химические элементы-поллютанты, при этом реакция растительного сообщества на содержание рудных металлов в среде, как правило, меняется вдоль градиента загрязнения, а изменение значений их концентраций в растениях зеркально отражает изменение концентраций элементов в почве.

В районе обрабатываемого открытым способом медно-цинкового месторождения (Сибайский и Камаганский карьеры, Республика Башкортостан) отмечено значительное накопление Cu и Zn в надземной биомассе растений

Artemisia austriaca, *Veronica incana*, *Thymus marschallianus*, что является отчётливым индикатором загрязнения окружающей среды. В побегах полыни австрийской (*Artemisia austriaca*) концентрации данных элементов плавно увеличиваются согласно градиенту загрязнения (Опекунова и др., 2021).

Тростник (*Phragmites australis*), приуроченный к водным объектам, согласно данным (Бактыбаева и др., 2011), активно аккумулирует Cu, Zn Fe и Mn. Также среди макрофитов, изучаемых при эколого-геохимических работах, можно выделить ряску малую (*Lemna minor L.*) (Барановская и др., 2020) и многокоренник обыкновенный (*Spirodela polyrrhiza L.*) (Белюченко и др., 2014).

При ведении открытых горнодобычных работ растительность не только угнетается и аккумулирует загрязняющие вещества, а зачастую почвенно-растительный слой полностью уничтожается за счёт механического воздействия (Информационно-технический справочник..., 2017). В целом, степень воздействия открытой добычи полезных ископаемых на фитоценозы тесно связана с этапами освоения месторождений (Озарян, 2014).

Горнопромышленный комплекс является мощным источником загрязнения атмосферного воздуха, в результате которого происходят выбросы различных химических элементов (тяжёлые металлы и пр.), газов (оксиды и диоксиды углерода, азота, серы, метан, ароматические углеводороды и пр.), взвешенных веществ и пр. (Ананичев, 1974; Csavina et al., 2012; Fugiel et al., 2017; Søndergaard et al., 2022). При этом опасны не только токсичные составляющие выбросов, но и мелкодисперсная пыль, размером 2,5–10 мкм, представляющая серьёзную угрозу для биосферы, в том числе и человека (Стась и др., 2019; Xipeng et al., 2020).

Под пылью в данном случае понимаются мельчайшие минеральные частицы в свободном состоянии или в виде аэрозолей (Стась и др., 2019).

Проблема поступления огромных количеств пыли в окружающую среду (Труфанов и др., 2008) характерна практически для всех основных стадий горнодобычного производства. Пыление возникает в результате бурения и подрывов горной массы, проведения погрузочно-разгрузочных, транспортных и

землеройных работ, дробления и складирования руды и пустой породы (рудные дворы, отвалы, хвостохранилища).

Доказано, что карьер, в котором производится открытая добыча полезных ископаемых, является источником поступления в окружающую среду пыли размером 2,5 мкм и менее (Xing et al., 2016).

Пыление происходит не только при добычных работах. Отвалы и хвостохранилища также являются поставщиком пыли в окружающую среду. К примеру, от хвостохранилища горно-обогатительного комбината «Апатит» (Мурманская область) ежегодно в течение июля–сентября в атмосферу выносятся 140...170 тыс. т пыли нефелиновых пород. Запылённость атмосферы в рабочих зонах при ветреной погоде достигает 23 мг/м (Rybin et al., 2017).

Обустройство и разработка месторождений полезных ископаемых неизбежно приводят к изменению естественных местообитаний зверей и птиц. Популяции животных оказываются под воздействием изменений компонентов природной среды – растительного покрова, почв и вод. Эти изменения трансформируют привычные места обитания, кормовую базу, места размножения, пути миграции, повышают уязвимость по отношению к хищникам. В результате шумового воздействия и систематического беспокойства от присутствия людей, техники и проведения технологических работ территория месторождения становится непригодной для обитания крупных млекопитающих, таких как волк и лисица, а также для большинства видов ночных хищных птиц (Яковлев, 2005).

Подземный (шахтный) способ добычи полезных ископаемых применяется реже и, как показывает горнорудная практика, влечёт за собой на порядок меньшее негативное воздействие на природную среду по сравнению с открытым способом (Sahu et al., 2015; Moreau et al., 2021; Славиковская, 2011).

ГЛАВА 2: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Физико-географическая характеристика

Вьюнское золоторудное поле расположено на территории Верхоянского района (улуса) Республики Саха (Якутия) в 300 км юго-восточнее административного центра – пос. Батагай и в 550 км к северо-востоку от республиканского центра – г. Якутска (рисунок 4).



Рисунок 4 – Карта-схема расположения района работ (Протопопов и др., 2009)

Ближайшими населенными пунктами являются посёлок рудника Сентачан и посёлок Лазо, расположенные в 80 и 110 км северо-западнее от Вьюнского золоторудного поля.

Месторождение Вьюн открыто в 1974 г. геологом Янской геологоразведочной экспедиции Л.П. Комаровой (Протопопов и др., 2009).

Район исследований относится к субарктическому природному географическому поясу с суровым резко-континентальным климатом (Анисимова и др., 2008). Средняя температура самого холодного месяца (январь) принимает значение $-43,5$ °С, в самом тёплом месяце (июле) достигает $+15,1$ °С при среднегодовой температуре $-13,9$ °С. Годовое количество осадков за последние годы составляет в среднем 224 мм, большая их часть выпадает в летне-осенний период. Зимой преобладают ветры южных и юго-западных направлений, нередко наблюдается вторжение холодных арктических воздушных масс с севера. Летом в районе рудного поля дуют ветры северного и северо-восточного направления.

Территория Вьюнского золоторудного поля характеризуется среднегорным рельефом, который местами доходит до высокогорного (рисунок 5).



Рисунок 5 – Рельеф Вьюнского золоторудного поля (Протопопов и др., 2009)

Для исследуемой территории характерно сплошное развитие многолетнемерзлых пород (ММП) (рисунок 6).



Рисунок 6 – Карта-схема распространения многолетнемёрзлых пород на территории Российской Федерации (Крамаренко, 2013)

Мощность ММП в пределах Вьонского золоторудного поля не изучена, но с учётом закономерной связи с абсолютными отметками, лежащими в диапазоне 700–1000 м, ориентировочно она равна 400–500 м. Закономерность между мощностью ММП и абсолютными высотами местности подтверждается специализированными работами, проведенными в этой области в различных районах Якутии (Романовский, 1993; Некрасов и др., 1974). Согласно данным работам, минимальные мощности ММП (200–300 м) обычно характерны для долин крупных рек. В пределах зон предгорий и небольших водораздельных поверхностей с абсолютными отметками, не превышающими 500 м, мощность ММП увеличивается до 400 м, ближе к водоразделам с абсолютными высотами 500–900 м она достигает значений 500 м, а за пределами этих высот – более 500 метров.

Глубина сезонного протаивания в зависимости от экспозиции склонов, характера растительного покрова, высотного положения рельефа и литолого-

генетических типов рыхлых отложений в период максимальной оттайки (конец июля – август) изменяется от 0,2 до 0,8 м. Причем, минимальные ее значения (0,2–0,3 м) отмечаются на склонах северной экспозиции и залесённых участках, максимальные (0,3–0,8 м) – на открытых поверхностях, лишённых растительного покрова и склонах южной экспозиции. Согласно классификации В.А. Кудрявцева (Достовалов и др., 1967) для рудного поля характерен мелкий до среднего, устойчивый до арктического, от умеренно и повышенно континентального до резко континентального тип протаивания.

Согласно почвенно-географическому районированию исследуемая площадь принадлежит к Верхоянской провинции очень холодных мерзлотных почв подзоны глеевых мерзлотных таёжных почв северной тайги, а в более широком смысле относится к Восточносибирской мерзлотно-таёжной области бореального пояса (Протопопов и др., 2009). Данный тип почв формируется под предтундровыми редколесьями на суглинистых и щебнистосуглинистых отложениях различного состава в условиях холодного резко континентального климата («Национальный атлас почв...», 2011»).

Центральные районы Республики Саха (Якутия) в целом отличаются весьма специфическими условиями образования почвенного покрова, характеристиками строения почвенно-растительного слоя, а также различными особенностями состава и свойств зональных типов почв, что отмечено в некоторых работах (Оконешникова, 2019; Якутин и др., 2019).

Поверхностные воды Вьюнского золоторудного поля представлены ручьём Вьюн и двумя его притоками, рекой Бурганджа и четырьмя её притоками, а также рекой Эльганджа и ручьём, дренирующим центральную часть золоторудного поля. Данные водотоки в совокупности являются частью правобережного бассейна реки Адычи – правого притока реки Яны. Рудная зона расположена в долине правого притока р. Бурганджа – ручья Вьюн, в 1,5 км от устья последнего.

Водотоки характеризуются быстрым течением, незначительной глубиной и не судоходны. Ледостав происходит в конце сентября, вскрытие – в конце мая. Режим водотоков крайне непостоянен, подвержен сезонным колебаниям, вплоть до

полного промерзания в зимний период. Питание водотоков осуществляется, в основном, в тёплое время года за счет атмосферных осадков (Анисимова и др., 2008).

Растительность исследуемой территории соответствует зоне лесотундры. Преобладающим древесным видом является лиственница даурская (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*). Из кустарников встречаются кедровый стланик, карликовая береза (ерник), тальник. Широко распространены лишайники и мхи.

Животный мир достаточно многообразен, но ограничен в количественном отношении. В районе обитают лоси, северные олени, волки, медведи, россомахи, лисы, белки, горностаи. Из пернатых встречаются рябчики, дятлы, кедровки, глухари. В реках района распространены такие виды рыб, как хариус, ленок, щука, таймень, сиг.

Транспортная инфраструктура неразвита.

Сейсмичность района оценивается в 6,5 баллов (Протопопов и др., 2009).

2.2 Геологическая характеристика

В геологическом плане Вьюнское золоторудное поле входит в состав Эльгенджинского рудно-россыпного узла Адычанской золотоносной зоны, металлогеническая специализация которой определяется развитием золоторудных (Вьюн, Учуй, Джайба, Дайковое, Андрей, Шумный и др.), золото-сурьмяных (Ган-Андреевский), золото-висмутовых и серебро-полиметаллических месторождений, рудопроявлений и пунктов минерализации, а также золотоносных россыпей.

Адычанская золотоносная зона протягивается в северо-западном направлении на 300 км при ширине до 50 км и занимает междуречье рек Адыча, Джолакаг, Эльганджа, Бурдганджа. В строении зоны основное место занимают фаунистически охарактеризованные терригенные отложения верхнетриасового возраста (Някуньинская и др. свиты), испытавшие напряженную складчатость и осложненные многочисленными нарушениями взбросо-надвигового и сбросового типов (Протопопов и др., 2009).

В более широком смысле Вьюнское золоторудное поле является частью Яно-Колымского золотоносного пояса, в пределах которого локализованы наиболее крупные объекты (Наталка, Дегдекан) (Анисимова и др., 2009). Схема Яно-Колымского золотоносного пояса показана на рисунке 7.

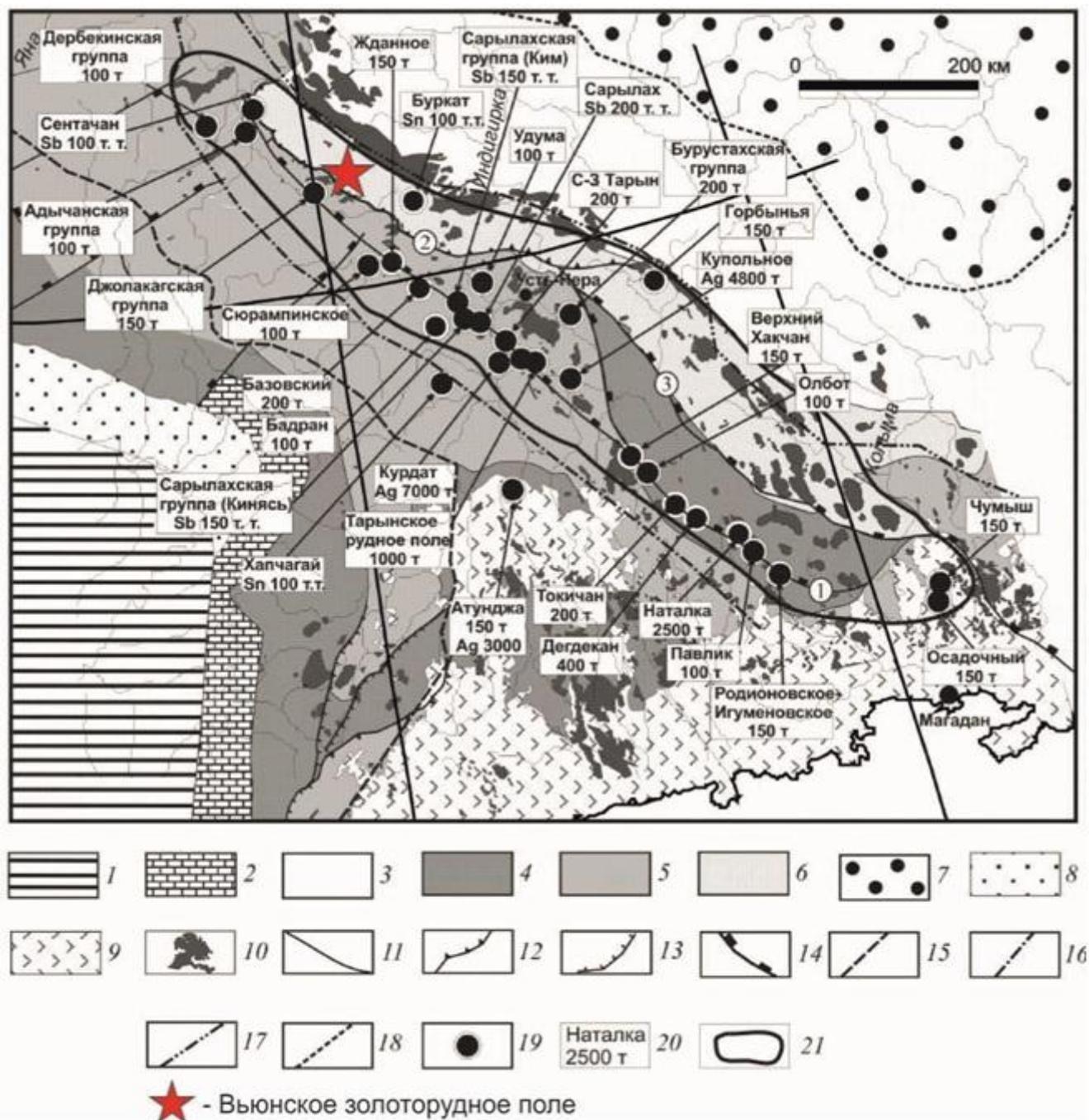


Рисунок 7 – Вьюнское золоторудное поле в составе Яно-Колымского золотоносного пояса (Некрасов, 2017)

Условные обозначения:

1 – чехольные отложения Сибирской платформы; 2 – рифейские позднепалеозойские терригенно-карбонатные отложения Сете-Дабанского пояса; 3 – докембрийские-раннемезозойские породы Черско-Полоусненского пояса; 4 – позднепалеозойские терригенные отложения Верхоянского, Яно-Охотского и Яно-Колымского поясов; 5 – триасовые-раннеюрские отложения Верхоянского, Яно-Охотского и Яно-Колымского поясов; 6 – позднеюрские терригенные породы Иньяли-Дебинского сегмента Яно-Колымского пояса; 7 – средне-позднеюрские терригенные отложения Илин-Тасского пояса; 8 – позднеюрские-меловые отложения Предверхоянского пояса; 9 – меловые вулканогенные отложения Охотско-Чукотского вулканического пояса; 10 – коллизионные гранитоидные массивы Главного пояса гранитоидов пояса Черского; 11 – региональные разломы; 12 – надвиги; 13 – прочие разломы; 14 – восточная граница Верхоянского пояса; 15 – восточная граница Яно-Охотского пояса; 16 – восточная граница Яно-Колымского пояса; 17 – восточная граница Черско-Полоусненского пояса; 18 – восточная граница Яно-Охотского пояса; 19 – наиболее крупные месторождения, рудопроявления, рудные поля и узлы; 20 – запасы и прогнозные ресурсы месторождений, в некоторых случаях, суммарно с потенциалом конкретных рудных полей или узлов; 21 – условный контур Яно-Колымской золотоносной провинции; цифры в кружках: 1 – Адыча-Тарынская система взбросов, 2 – Чаркы-Индибирский надвиг, 3 – Чай-Юрьинский взброс.

Территория Вьюнского золоторудного поля сложена терригенными отложениями верхнетриасового возраста (231–237 млн. лет), которые представлены алевролитами, аргиллитами и песчаниками, относящимися к периферической части надинтрузивной зоны нескрытого Бурганджинского гранитоидного массива с предполагаемой глубиной залегания кровли гранитоидов до 2 км. Интрузивные образования ограниченно развиты в виде раннемеловых даек пород умеренно кислого состава (Анисимова и др., 2008).

Фрагмент обзорной геологической карты Адычанской золотоносной зоны с выделенным контуром золоторудного поля по данным геологоразведочного предприятия «Янгеология» (Протопопов, 2009) представлен на рисунке 8. Целиком обзорная карта приведена в приложении 1.

Рудоносная структура представлена кварцево-жильной зоной, которая контролируется экзоконтактами дайки риодацитов.

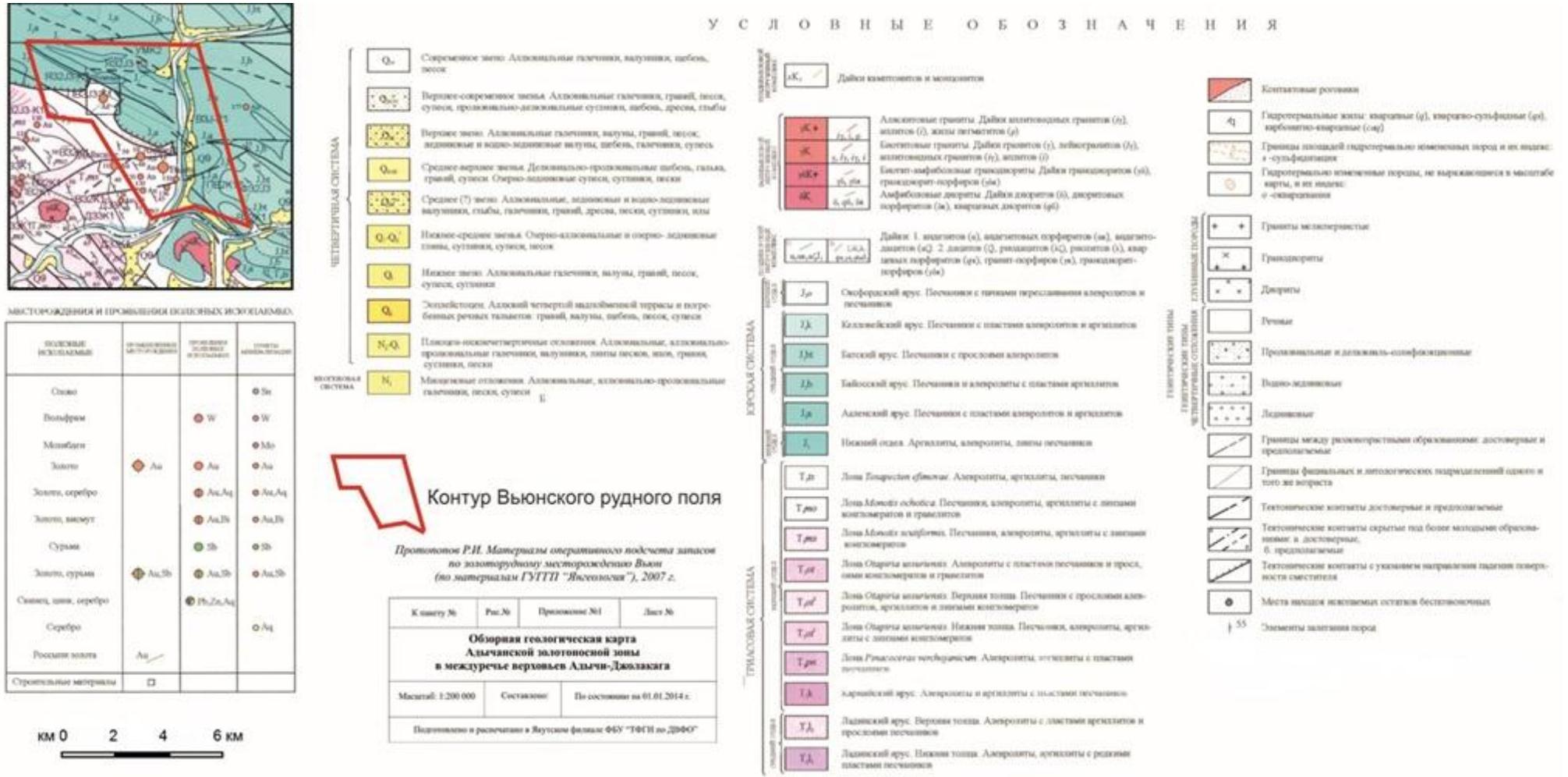


Рисунок 8 – Фрагмент обзорной геологической карты Адычанской золотоносной зоны в междуречье верховьев Адычи-Джолакага (по материалам ГУГПП «Янгеология», 2007 г.)

Вмещающие терригенные породы, наряду с интенсивным рассланцеванием, характеризуются региональным зеленосланцевым метаморфизмом хлорит-серицит-карбонатной субфации. На них наложены более поздние гидротермально-метасоматические преобразования, сопровождающие кварцевые жилы: окварцевание, хлоритизация, серицитизация, карбонатизация и сульфидизация (Протопопов и др., 2009).

Оруденение месторождения Вьюн связано с золото-кварцевыми жилами и брекчиями (Анисимова и др., 2009). Залегание рудной зоны в целом крутое, от 60–80° до вертикального, с переменным направлением падения: от северо-западного или близвертикального в центральной части месторождения до юго-восточного на флангах. Кварцевые жилы в пределах рудной зоны имеют извилистую, волнистую форму при высокой изменчивости по мощности (0,3–3,0 м, в единичных раздувах до 5,0–7,8 м). Отмечается зависимость мощности жил от литологического состава вмещающих пород: в песчаниках жилы более мощные, а в глинистых отложениях они сужаются, иногда до полного выклинивания.

В основном жилы достаточно уверенно прослеживаются по простиранию и падению, но часто расщепляются на 2–3 составляющие и затем вновь сливаются, или включают линзы (ксенолиты) прожилково-окварцованных вмещающих пород, иногда образуют апофизы. Включения вмещающих пород в жильной зоне имеют максимальную мощность до 2,0 м и составляют не более 10% от объема рудного тела (Протопопов и др., 2009).

Руды относятся к малосульфидному золото-кварцевому типу, имеют довольно простой минеральный состав (таблица 3) (Анисимова и др., 2008).

Главным компонентом золото-кварцевых жил является кремнезем (массовая доля составляет 87,4%). Массовая доля рудообразующих компонентов, таких как Fe и As составляет 1,42 и 0,26% соответственно. Содержание серы находится на уровне около 0,1%, цветные металлы присутствуют в тысячных долях процента (Протопопов и др., 2009). Химический состав руд месторождения Вьюн приведён в таблице 4.

Таблица 3 – Минеральный состав руд месторождения Вьюн (Анисимова и др., 2008)

Минералы и их группы	Массовая доля, %
Породообразующие:	
Кварц (SiO_2)	85,9
Полевые шпаты (плаггиоклаз) $K[AlSi_3O_8] - Na[AlSi_3O_8] - Ca[Al_2Si_2O_8]$	4,0
Слюдисто-гидрослюдистые минералы $(K, Na, NH_4)^+(Mg, Fe, Al, Ba, Mn, Ca, Ti, Zn, V)_2+[AlSi_3O_{10}](OH, F)_2$	2,0
Карбонаты $(Mg, Fe)CO_3$	1,5
Углеродистое вещество (C)	1,5
Хлорит $MgAl[AlSi_3O_{10}](OH)_8$	1,0
Рудные:	
Гидрооксиды железа $Fe(OH)_2 - FeO(OH) - Fe(OH)_3$	3,5
Арсенопирит $FeAsS$	0,5
Гематит Fe_2O_3	0,1
Пирит FeS_2	Редкие зёрна
Галенит PbS	
Ковеллин CuS	
Сфалерит ZnS	Единичные зёрна
Халькопирит $CuFeS_2$	
Пирротин $Fe_{1-x}S$	
Акцессорные:	
Барит $BaSO_4$	Редкие зёрна
Гранат $(Mg, Fe, Mn, Ca)_3 (Al, Fe, Cr)_2 [SiO_4]_3$	Единичные зёрна
Сфен $CaTiO[SiO_4]$	
Рутил TiO_2	
Итого:	100,0

Таблица 4 – Химический состав руд месторождения Вьюн (Протопопов и др., 2009)

Компоненты	Массовая доля, %	Компоненты	Массовая доля, %	Компоненты	Массовая доля, %
SiO ₂	87,4	As	0,26	P ₂ O ₅	0,1
Au (г/т)	25,5	TiO ₂	0,25	S _{общ.}	0,096
Al ₂ O ₃	4,9	K ₂ O	0,2	Cu	0,008
Fe _{общ.}	1,42	Fe _{сульфид.}	0,19	Sb	0,008
Fe _{оксид.}	1,23	CO ₂ карб.	0,16	Pb	0,003
CaO	0,6	MnO	0,11	Zn	0,002

Промышленная золотоносность руд определяется Au-пирит-арсенопиритовым и Au-халькопирит-галенитовым парагенезисами. Главным минералом выполнения руд является жильный кварц с включениями прожилково-окварцованных алевролитов, аргиллитов и березитизированных гранодиорит-порфиров. Из других жильных минералов присутствует карбонат.

Рудная минерализация в жильном кварце и прожилково-окварцованных вмещающих породах представлена сульфидами (обычно 1–3%, редко до 5%), преимущественно в виде вкрапленности, прожилково-гнездовых выделений и просечек арсенопирита и пирита, в меньшей мере – халькопирита, галенита, сфалерита, халькозина, ковеллина, реже – блеклых руд и сульфосолей серебра. В составе рудных минералов 95–99% занимают арсенопирит и пирит. Нередко наблюдается видимое золото с размерами зерен 0,05–2,0 мм. Изредка встречается самородная медь (Протопопов и др., 2009).

Золото и сульфиды в рудных телах отличаются довольно неравномерным характером распределения и в количественном отношении не превышают 1–3%. Среди текстур руд выделяются полосчатые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные и гнездово-вкрапленные, реже – массивные и брекчиевидные.

Разведанные запасы золота месторождения Вьюн по категориям C₁+C₂ составляют 2 586,5 кг золота в 249,09 тыс. т руды при среднем содержании в 10,38 г/т. Из них балансовым отвечают запасы: золота – 2 251,8 кг, руды – 184,58 тыс. т при среднем содержании 12,2 г/т (Анисимова и др., 2008; Анисимова и др., 2009).

2.3 Геоэкологическая характеристика

Геоэкологические особенности Вьюнского золоторудного поля являются типичными для горнопромышленных районов Республики Саха (Якутия) и определяются совокупностью природных (геологических, геоморфологических, геохимических, мерзлотно-гидрогеологических, инженерно-криogeологических) и техногенных факторов. Памятники археологии, особо охраняемые территории и другие объекты, ограничивающие ведение горнодобычных работ (заповедники, заказники, земли историко-культурного назначения и др.), отсутствуют.

На рисунке 9 приведена схема экологического районирования территории Российской Федерации (Кочуров, 2003), согласно которой исследуемая территория по степени остроты экологических ситуаций (экологической напряжённости) относится ко II (низкому) рангу экологической напряжённости и находится в Верхояно-Колымском экорегионе, для которого доминирующим природным фактором, требующим особого внимания, является распространённость ММП.



Рисунок 9 – Схема экологического районирования территории Российской Федерации (Кочуров, 2003)

Номера экорегионов:

1 – Западно-Кольский; 2 – Восточно-Кольский; 3 – Карельский; 4 – Приладожский; 5 – Онего-Валдайский; 6 – Северо-Двинский; 7 – Мезенско-Печорский; 8 – Новоземельский; 9 – Полярно-Уральский; 10 – Среднерусский; 11 – Центрально-Европейский; 12 – Унженский; 13 – Пинежский; 14 – Вычегодский; 15 – Северо-Уральский; 16 – Окско-Донской; 17 – Поволжский; 18 – Приуральский; 19 – Центрально-Уральский; 20 – Южно-Уральский; 21 – Южно-Русский; 22 – Прикаспийский; 23 – Северо-Кавказский; 24 – Зауральский; 25 – Ямало-Тазовский; 26 – Западно-Сибирский; 27 – Приенисейский; 28 – Прииртышский; 29 – Предалтайский; 30 – Предсаянский; 31 – Горноалтайский; 32 – Горносаянский; 33 – Тувинский; 34 – Таймырский; 35 – Норильский; 36 – Северо-Сибирский; 37 – Среднесибирский; 38 – Ангарский; 39 – Северо-Байкальский; 40 – Южно-Байкальский; 41 – Центральнаякутский; 42 – Витимский; 43 – Забайкальский; 44 – Яно-Индибирский; 45 – Верхояно-Колымский; 46 – Магаданский; 47 – Джугджурский; 48 – Приамурский; 49 – Амуро-Уссурийский; 50 – Сихотэ-Алинский; 51 – Сахалинский; 52 – Чукотский; 53 – Анадырский; 54 – Колымо-Корякский; 55 – Курило-Камчатский; 56 – Калининградский.

Для каждой стадии жизненного цикла месторождения характерен свой перечень геоэкологических проблем. В настоящее время для территории Вьюнского рудного поля наиболее характерны геоэкологические проблемы, вызванные ранее проведёнными геологоразведочными работами, а именно:

- Нарушение естественного ландшафта (организация отвалов, отсыпка дорог, постройка зданий и сооружений);
- Разрушение почвенного покрова;
- Изменение биологического круговорота рудных элементов;
- Изменение миграционных путей диких животных, обусловленное проходкой канав, организацией отвалов.

К источникам нарушений относятся: устройство промышленных площадок под буровые работы, строительство дорог, коммуникаций, зданий и сооружений, проходка горных выработок, складирование пород и отходов производства (Иванова, 2004).

В пределах территории исследований выделяются следующие неблагоприятные в экологическом плане техногенные объекты: геологоразведочные штольни; рудный двор, с выложенными на нём отвалами горных пород; эродированные участки санно-тракторных путей; дороги (основная горно-транспортная, внутренняя автодорога, пешеходные тропы); вахтовый

посёлок с локализованными вокруг него котельной, гаражами, дизельной электростанцией, складом горюче-смазочных материалов и вертолётной площадкой.

Отдельно стоит выделить штольни, которые были пройдены в пределах рудной зоны месторождения Вьюн в ходе геологоразведочных работ в 2005 г. В результате проходки штолен образовались отвалы горных пород, материал из которых подвергался воздействию водотоков и оказывал влияние на химический состав поверхностных вод и донных отложений. Донные отложения являлись депонирующей средой, которые накапливали вещества, поступающие в течение длительного времени.

Проведёнными исследованиями установлено, что содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на территории Вьюнского золоторудного поля значительно ниже нормативов ПДК и в большинстве случаев принимают значения ниже методического предела обнаружения, согласно используемым методикам анализа (таблица 5).

Таблица 5 – Концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на территории Вьюнского золоторудного поля в сравнении с нормативами ПДК, согласно СанПин 1.2.3685-21, мг/м³

№	Шифр	ВВ	СО	СО ₂	SO ₂	NO ₂	NH ₃	CH ₄
		Взвешенные вещества	Оксид углерода (угарный газ)	Диоксид углерода (углекислый газ)	Диоксид серы	Диоксид азота	Аммиак	Метан
1	п-Вьюн-1	–	н.п.о. ⁶	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
2	п-Вьюн-2	0,03	н.п.о.	275	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
3	п-Вьюн-3	0,02	н.п.о.	365	н.п.о.	0,05	н.п.о.	н.п.о.
4	п-Вьюн-4	–	н.п.о.	275	н.п.о.	0,02	н.п.о.	н.п.о.
5	п-Вьюн-5	–	н.п.о.	1460	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
6	п-Вьюн-5/10	–	н.п.о.	1460	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
7	п-Вьюн-6	–	н.п.о.	913	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
8	п-Вьюн-7	–	н.п.о.	2008	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
9	п-Вьюн-8.1	0,02	н.п.о.	2372	н.п.о.	0,03	н.п.о.	н.п.о.
10	п-Вьюн-9	–	н.п.о.	2190	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.

Продолжение таблицы 5

11	п-Вьюн-10	–	н.п.о.	1460	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
12	п-Вьюн-10/14	0,01	н.п.о.	1643	н.п.о.	0,03	н.п.о.	н.п.о.
13	п-Вьюн-11	0,01	н.п.о.	2739	н.п.о.	0,02	н.п.о.	н.п.о.
14	п-Вьюн-12	–	н.п.о.	3286	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
15	п-Вьюн-13	–	н.п.о.	3469	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
16	п-Вьюн-14	–	н.п.о.	4017	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
17	п-Вьюн-15	–	н.п.о.	2556	н.п.о.	0,02	н.п.о.	н.п.о.
18	п-Вьюн-16	–	н.п.о.	3469	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
19	п-Вьюн-17	0,02	н.п.о.	4199	н.п.о.	0,04	н.п.о.	н.п.о.
20	п-Вьюн-18	–	н.п.о.	4380	н.п.о.	0,04	н.п.о.	н.п.о.
21	п-Вьюн-19	0,01	н.п.о.	3469	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
22	п-Вьюн-20	–	н.п.о.	4380	н.п.о.	0,04	н.п.о.	н.п.о.
23	п-Вьюн-26	–	н.п.о.	2008	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
24	п-Вьюн-27	–	н.п.о.	913	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
25	п-Вьюн-28	–	н.п.о.	913	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
26	п-Вьюн-29	–	н.п.о.	3470	н.п.о.	0,02	н.п.о.	н.п.о.
27	п-Вьюн-30	–	н.п.о.	2190	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
28	п-Вьюн-22	–	н.п.о.	1460	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
29	п-Вьюн-23	–	н.п.о.	1460	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
30	п-Вьюн-24	–	н.п.о.	1460	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
31	п-Вьюн-25	–	н.п.о.	1278	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
32	п-Вьюн-21	–	н.п.о.	913	н.п.о.	0,01	н.п.о.	н.п.о.
33	п-Вьюн-31	–	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
34	п-Вьюн-32	–	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
35	п-Вьюн-33	–	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
ПДК _{МР} ¹ , мг/м ³		0,5	5	–	0,5	–	0,2	50*
ПДК _{СС} ² , мг/м ³		0,15	3	–	0,05	–	0,1	–
ПДК _{СГ} ³ , мг/м ³		0,075	3	–	–	–	0,04	–
ПДК _{РЗ} ⁴ , мг/м ³		–	20	27000	10	2	20	7000

Примечания: 1) ПДК_{МР} – максимальная разовая предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе городских и сельских поселений; 2) ПДК_{СС} – среднесуточная предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе городских и сельских поселений; 3) ПДК_{СГ} – среднегодовая предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе городских и сельских поселений; 4) ПДК_{РЗ} – предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны; б) н.п.о. – ниже методического предела обнаружения, согласно используемой методике анализа; * - ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) загрязняющего вещества в атмосферном воздухе городских и сельских поселений

Оценки числовых характеристик мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения по различным маршрутам, полученные в ходе проведения гамма-радиометрических измерений на территории Вьюнского золоторудного поля, представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Оценки числовых характеристик мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (мкР/ч) на территории Вьюнского золоторудного поля

Участок Вьюнского золоторудного поля / маршрут	N	X _{CP}	X _{ГЕОМ}	X _{МЕД}	Мода	Min	Max	S	δm	V, %	A	δA	E	δE
Ключевой участок №1 – Вьюн	474	12,3	11,9	13,0	14,0	4,0	19,0	2,9	0,1	23,7	-0,6	0,1	-0,4	0,2
Р. Бурганджа	185	16,1	16,0	16,0	16,0	12,0	19,0	1,3	0,1	7,9	-0,2	0,2	0,1	0,4
Левый приток №1 р. Бурганджа	42	17,5	17,4	17,5	17,0	10,0	21,0	2,0	0,3	11,6	-1,0	0,4	3,3	0,7
Левый приток №2 р. Бурганджа	33	17,2	17,1	17,0	17,0	15,0	19,0	1,1	0,2	6,4	0,0	0,4	-0,5	0,8
Левый приток №3 р. Бурганджа	21	15,4	15,4	15,0	15,0	14,0	17,0	1,0	0,2	6,7	0,2	0,5	-1,0	1,0

Примечания: N – количество проб; X_{CP} – арифметическое среднее; X_{ГЕОМ} – геометрическое среднее; X_{МЕД} – медиана; Min – минимум; Max – максимум; S – стандартное отклонение; δm – стандартная ошибка стандартного отклонения; V – коэффициент вариации; A – асимметрия; δA – стандартная ошибка асимметрии; E – эксцесс; δE – стандартная ошибка эксцесса.

Характер распределения МЭД гамма-излучения является равномерным, согласно полученным значениям коэффициента вариации для отдельных рассматриваемых маршрутов проведения съемки.

В качестве оценок средних значений МЭД для маршрутов, проходящих вдоль русел р. Бурганджа и ее левых притоков №2 и №3, приняты средние арифметические значения по соответствующим выборкам, для маршрута, проходящего вдоль русла левого притока №1 р. Бурганджа, и территории ключевого участка №1 – средние геометрические значения (таблица 7).

Таблица 7 – Средние значения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на различных участках территории Вьюнского золоторудного поля

Участок Вьюнского золоторудного поля / маршрут	Среднее значение МЭД гамма-излучения, мкР/ч
Ключевой участок №1	11,9±0,1
Р. Бурганджа	16,1±0,1
Левый приток р. Бурганджа (№1)	17,4±0,3
Левый приток р. Бурганджа (№2)	17,2±0,2
Левый приток р. Бурганджа (№3)	15,4±0,2

Среднее значение МЭД гамма-излучения для территории Вьюнского золоторудного поля определено как средневзвешенное и составляет 13,6 мкР/ч.

ГЛАВА 3: МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На территории Вьюнского золоторудного поля в июле–августе 2017 г сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии (ныне отделения геологии) Национального исследовательского Томского политехнического университета были проведены эколого-геохимические исследования, организованные в соответствии с требованиями нормативных документов (ГОСТ 17.4.3.01-83; ГОСТ 17.4.4.02-84; РД 52.24.609) и методических рекомендаций («Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований...», 1981; Язиков и др., 2003) для подобного рода работ.

Комплексные эколого-геохимические работы на территории Вьюнского золоторудного поля включали в себя:

- Гидрогеохимическое опробование водотоков;
- Гидролитогеохимическое опробование донных отложений из водотоков;
- Литогеохимическое опробование почв;
- Биогеохимическое опробование растений;
- Измерения содержаний взвешенных и газообразных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;
- Маршрутные гамма-радиометрические измерения.

Отбор проб компонентов природной среды осуществлялся в строгом соответствии с нормативными документами (ГОСТ 17.1.5.01-80; ГОСТ 28168-89; ГОСТ 31861-2012; Р 52.24.353-2012), регламентирующими порядок пробоотбора, а также согласно актуальным методикам и рекомендациям (Сает и др., 1990; Язиков и др., 2003). При отборе проб производилась фиксация координат расположения точек опробования.

Лабораторно-аналитические исследования отобранных проб компонентов природной среды производились в аккредитованных лабораториях г. Томска по аттестованным методикам.

3.1 Методика отбора проб компонентов природной среды

3.1.1 Методика отбора проб поверхностных вод

Отбор проб поверхностных вод на территории Вьюнского золоторудного поля осуществлялся согласно ГОСТ 31861-2012 и Р 52.24.353-2012.

Емкости, используемые для отбора проб воды, предварительно промывались дистиллированной водой в лабораторных условиях и ополаскивались исследуемой водой в ходе пробоотбора. Отбор проб воды на каждом пункте опробования осуществлялся в несколько емкостей с учетом различий требуемых условий к консервации образцов.

Измерения быстро меняющихся показателей качества природных поверхностных вод производились непосредственно на месте отбора проб с использованием портативных приборов – ОВМ-метра ORP-200 (измерения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и температуры воды) и РН-метра РН-009(І)А (измерения водородного показателя (рН) воды). Отбор гидрогеохимических проб обязательно сопровождался записями в журнале опробования.

Пробы поверхностных вод на территории Вьюнского золоторудного поля были отобраны из 10-ти водотоков: ручей Вьюн (5 проб); правый приток ручья Вьюн (2 пробы); левый приток ручья Вьюн (2 пробы); ручей, протекающей над штольней (1 проба); правый приток реки Бурганджа (2 пробы); левый приток №1 реки Бурганджа (3 пробы); левый приток №2 реки Бурганджа (3 пробы); левый приток №3 реки Бурганджа (2 пробы); река Бурганджа (10 проб); река Эльганджа (2 пробы). Также была исследована вода из штольни. Всего было отобрано и изучено 34 пробы поверхностных вод. Координаты и месторасположение пунктов отбора проб поверхностных вод приведены в таблице 8 и на рисунке 10.

Таблица 8 – Перечень отобранных проб поверхностных вод на территории
Вьюнского золоторудного поля

№	Шифр	Шифр на схеме	Водоток	Координаты	
1	Вьюн-5	5	Ручей Вьюн	65.58.505	138.14.561
2	Вьюн-6	6		65.58.452	138.14.997
3	Вьюн-7	7		65.58.452	138.15.594
4	Вьюн-8	8		65.58.394	138.15.808
5	Вьюн-9	9		65.58.302	138.16.139
6	Вьюн-11	11		65.58.206	138.16.502
7	Вьюн-1	1	Правый приток ручья Вьюн	65.58.319	138.14.159
8	Вьюн-2	2		65.58.480	138.14.771
9	Вьюн-3	3	Левый приток ручья Вьюн	65.58.535	138.15.140
10	Вьюн-4	4		65.58.462	138.15.158
11	Вьюн-16	16	Река Бурганджа	66.01.546	138.16.328
12	Вьюн-17	17		66.00.932	138.17.328
13	Вьюн-14	14		65.58.916	138.17.030
14	Вьюн-18	18		65.58.970	138.16.947
15	Вьюн-12	12		65.58.517	138.16.778
16	Вьюн-13	13		65.58.405	138.16.944
17	Вьюн-15	15		65.57.685	138.16.944
18	Вьюн-30	30		65.57.577	138.16.791
19	Вьюн-19	19		65.57.322	138.16.078
20	Вьюн-20	20		65.56.749	138.16.014
21	Вьюн-21	21		Левый приток №1 реки Бурганджа	66.00.984
22	Вьюн-22	22	66.01.047		138.17.627
23	Вьюн-23	23	66.01.078		138.17.342
24	Вьюн-25	25	Левый приток №2 реки Бурганджа	65.59.257	138.17.636
25	Вьюн-26	26		65.59.218	138.17.006
26	Вьюн-24	24		65.59.055	138.16.854
27	Вьюн-27/1	27/1	Левый приток №3 реки Бурганджа	65.58.166	138.17.140
28	Вьюн-27/29	27/29		65.58.160	138.17.664
29	Вьюн-28	28	Правый приток реки Бурганджа	65.57.420	138.16.170
30	Вьюн-29	29		65.57.382	138.16.209
31	Вьюн-20.1	20.1	Река Эльганджа	65.56.726	138.16.140
32	Вьюн-20.2	20.2		65.56.660	138.15.862
33	Штольня-вода	шт-2	Ручей над штольной	65.58.450	138.14.358
34	Штольня-лёд	шт-3	Вода (лёд) из штольни	65.58.433	138.15.157



Рисунок 10 – Схема расположения пунктов отбора проб поверхностных вод на территории Вьюнского золоторудного поля

В центральной части Вьюнского золоторудного поля, к которой приурочена территория месторождения Вьюн, было отобрано 13 проб поверхностных вод из 4-х водотоков: ручей Вьюн (6 проб); правый приток ручья Вьюн (2 пробы); левый приток ручья Вьюн (2 пробы); река Бурганджа (3 пробы) (рисунок 11).

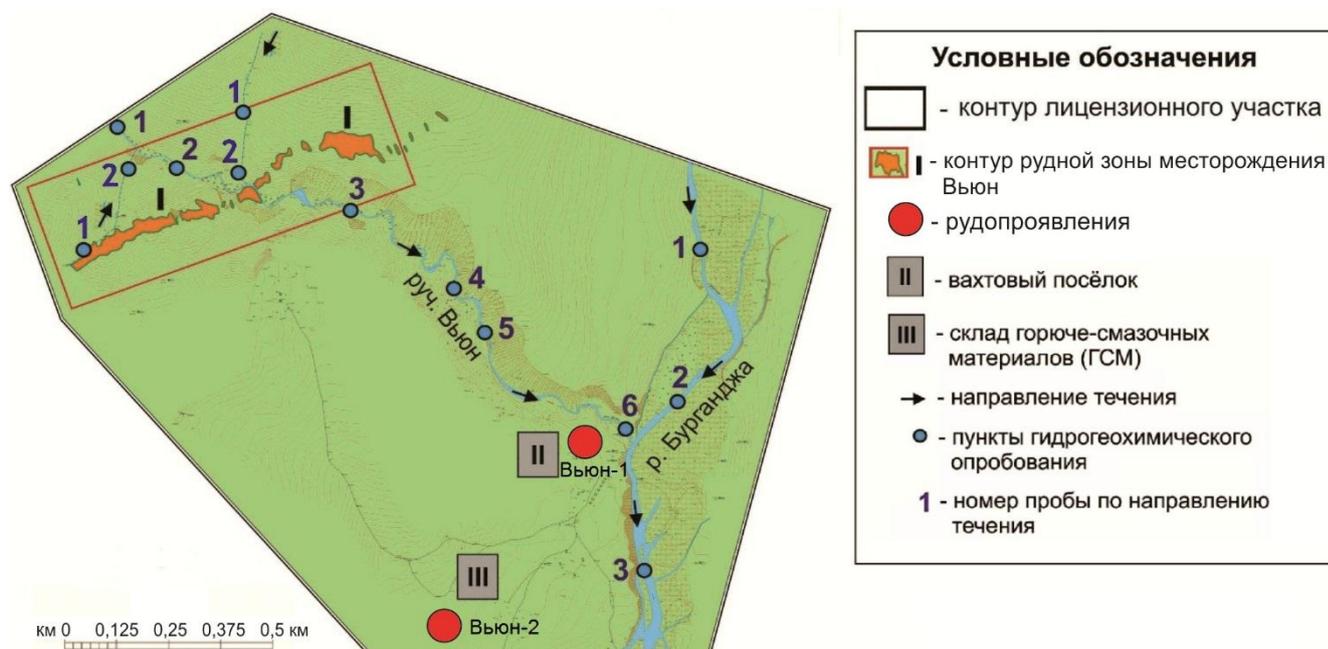


Рисунок 11 – Схема расположения пунктов отбора проб поверхностных вод в центральной части Вьюнского золоторудного поля (месторождение Вьюн) с контуром рудной зоны, вскрытой штольнями, и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2)

3.1.2 Методика отбора проб донных отложений из водотоков

Отбор проб донных отложений из водотоков на территории Вьюнского золоторудного поля проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80, РД 52.24.609. Пробоотбор фиксировался в журнале опробования согласно ГОСТ 17.1.5.01-80. Пробы донных отложений отбирались без стратификации из приводного слоя на участках водотоков с установившимся динамическим равновесием между взвешенными частицами и донными отложениями, при отсутствии смыва последних.

Пробы донных отложений отбирались при помощи лопатки из нержавеющей стали, упаковывались в чистые полиэтиленовые пакеты с указанием шифра пробы, даты и места отбора. Масса каждой отобранной пробы составляла не менее 1 кг.

Пункты отбора проб донных отложений были совмещены с пунктами отбора проб поверхностных вод из водотоков. Всего было отобрано и изучено 33 пробы донных отложений. Координаты и месторасположение пунктов отбора

проб донных отложений из водотоков на территории Вьюнского золоторудного поля представлены в таблице 9 и на рисунке 12.

Таблица 9 – Перечень отобранных проб донных отложений на территории Вьюнского золоторудного поля

№	Шифр	Шифр на схеме	Водоток	Координаты	
1	Вьюн-5	5	Ручей Вьюн	65.58.505	138.14.561
2	Вьюн-6	6		65.58.452	138.14.997
3	Вьюн-7	7		65.58.452	138.15.594
4	Вьюн-8	8		65.58.394	138.15.808
5	Вьюн-9	9		65.58.302	138.16.139
6	Вьюн-11	11		65.58.206	138.16.502
7	Вьюн-1	1	Правый приток ручья Вьюн	65.58.319	138.14.159
8	Вьюн-2	2		65.58.480	138.14.771
9	Вьюн-3	3	Левый приток Ручья Вьюн	65.58.535	138.15.140
10	Вьюн-4	4		65.58.462	138.15.158
11	Вьюн-16	16	Река Бурганджа	66.01.546	138.16.328
12	Вьюн-17	17		66.00.932	138.17.328
13	Вьюн-14	14		65.58.916	138.17.030
14	Вьюн-18	18		65.58.970	138.16.947
15	Вьюн-12	12		65.58.517	138.16.778
16	Вьюн-13	13		65.58.405	138.16.944
17	Вьюн-15	15		65.57.685	138.16.944
18	Вьюн-30	30		65.57.577	138.16.791
19	Вьюн-19	19		65.57.322	138.16.078
20	Вьюн-20	20		65.56.749	138.16.014
21	Вьюн-21	21	Левый приток №1 реки Бурганджа	66.00.984	138.17.917
22	Вьюн-22	22		66.01.047	138.17.627
23	Вьюн-23	23		66.01.078	138.17.342
24	Вьюн-25	25	Левый приток №2 реки Бурганджа	65.59.257	138.17.636
25	Вьюн-26	26		65.59.218	138.17.006
26	Вьюн-24	24		65.59.055	138.16.854
27	Вьюн-27/1	27/1	Левый приток №3 реки Бурганджа	65.58.166	138.17.140
28	Вьюн-27/29	27/29		65.58.160	138.17.664
29	Вьюн-28	28	Правый приток реки Бурганджа	65.57.420	138.16.170
30	Вьюн-29	29		65.57.382	138.16.209
31	Вьюн-20.1	20.1	Река Эльганджа	65.56.726	138.16.140
32	Вьюн-20.2	20.2		65.56.660	138.15.862
33	Штольня-вода	шт-2	Ручей над штольней	65.58.450	138.14.358

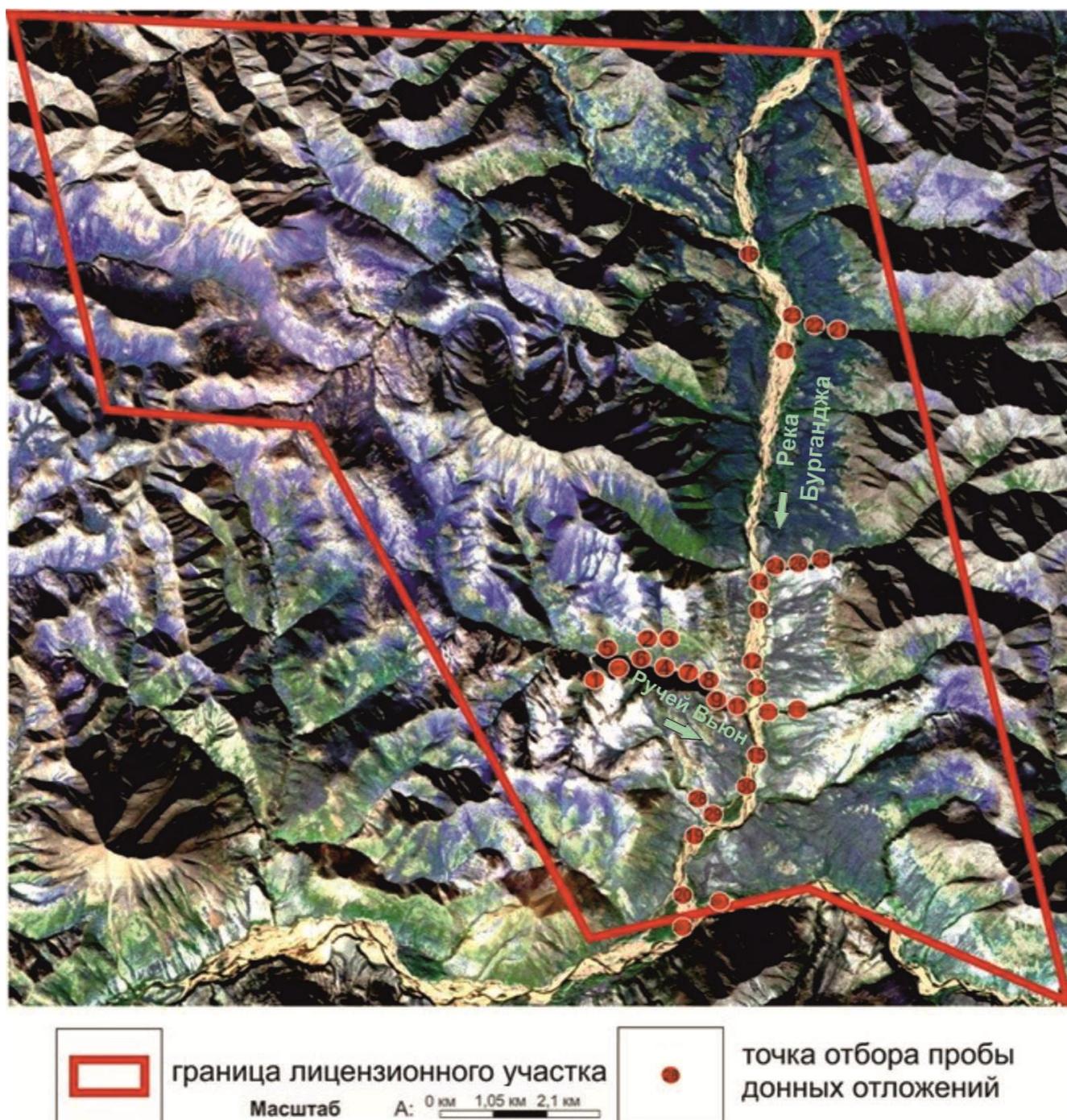


Рисунок 12 – Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений из водотоков на территории Выюнского золоторудного поля

В центральной части Выюнского золоторудного поля, к которой приурочена территория месторождения Выюн, было отобрано 13 проб донных отложений из 4-х водотоков. Пункты отбора проб донных отложений были совмещены с пунктами отбора проб поверхностных вод (рисунок 13).

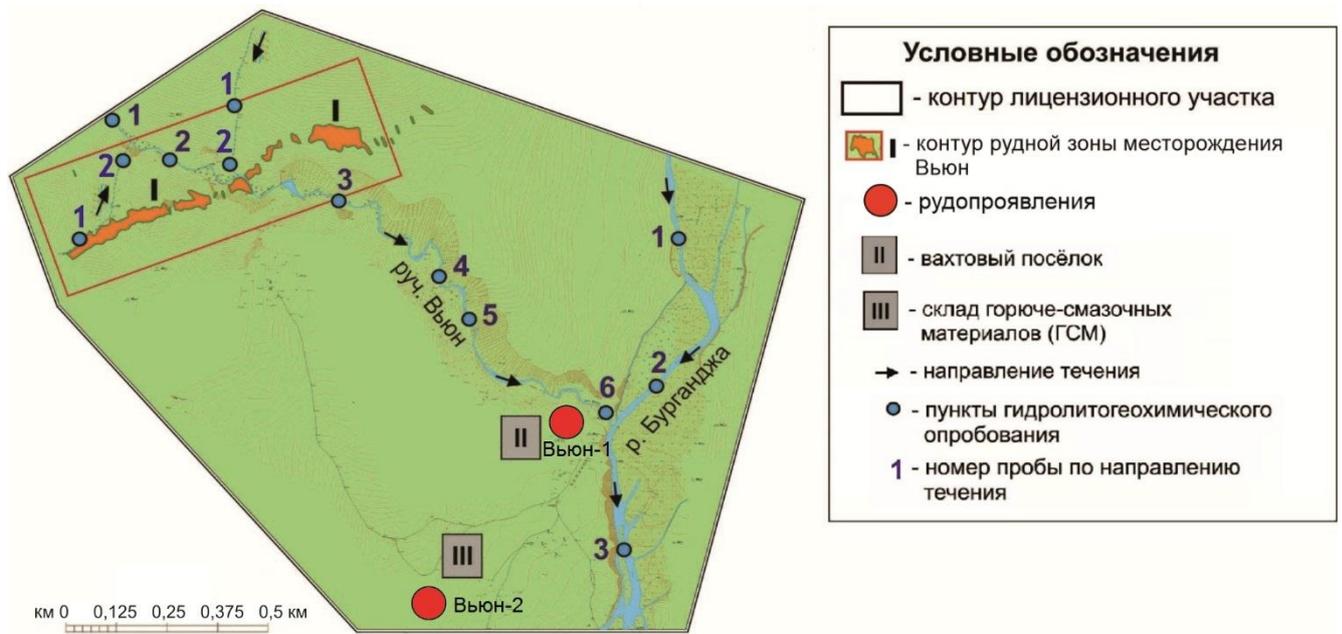


Рисунок 13 – Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений из водотоков в центральной части Выюнского золоторудного поля (месторождение Выюн) с контуром рудной зоны, вскрытой штольнями, и рудопроявлений (Выюн-1, Выюн-2)

3.1.3 Методика отбора проб почв

Отбор проб почв на территории Выюнского золоторудного поля проводился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 28168-89 и Методическими рекомендациями по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами («Методические рекомендации...», 1981). Перед отбором почв осуществлялось очищение поверхности от растений. Пробоотбор производился при помощи лопатки из нержавеющей стали с верхнего горизонта на глубину до 10 см «методом конверта» (4 пробы отбирались из углов площадки опробования и одна из центра, затем объединялись в единую индивидуальную пробу массой не менее 1 кг). Отобранные пробы упаковывались в чистые полиэтиленовые пакеты, маркированные записками с шифром пробы, датой и местом отбора.

Отбор проб почв с территории Выюнского золоторудного поля производился на 37 пунктах опробования, распределённых между 6-ю ключевыми

участками (КУ). 51% от общего количества проб были отобраны на ключевом участке №1 (КУ-1), к которому приурочено месторождение Вьюн. Ключевые участки выделены по ландшафтному признаку. Координаты и месторасположение пунктов отбора проб почв представлены в таблице 10 и на рисунке 14.

Таблица 10 – Перечень отобранных проб почв на территории Вьюнского золоторудного поля

№	Шифр	Шифр на схеме	Ключевой участок	Координаты	
1	п-Вьюн-1	1	Ключевой участок №1 (КУ-1)	65.58.319	138.14.159
2	п-Вьюн-2	2		65.58.452	138.14.997
3	п-Вьюн-3	3		65.58.452	138.15.594
4	п-Вьюн-4	4		65.58.510	138.15.473
5	п-Вьюн-5	5		65.58.571	138.15.356
6	п-Вьюн-5/10	5/10		65.58.560	138.15.522
7	п-Вьюн-6	6		65.58.530	138.15.191
8	п-Вьюн-7	7		65.58.072	138.15.200
9	п-Вьюн-8.1	8.1		65.58.200	138.15.877
10	п-Вьюн-9	9		65.58.400	138.16.157
11	п-Вьюн-10	10		65.58.556	138.15.916
12	п-Вьюн-10/14	10/14		65.58.517	138.15.284
13	п-Вьюн-11	11		65.58.042	138.15.651
14	п-Вьюн-12	12		65.58.235	138.15.721
15	п-Вьюн-13	13		65.58.303	138.16.535
16	п-Вьюн-14	14		65.58.556	138.16.916
17	п-Вьюн-16	16		65.57.922	138.16.059
18	п-Вьюн-17	17		65.58.160	138.16.342
19	п-Вьюн-19	19		65.57.903	138.16.976
20	п-Вьюн-15	15	Ключевой участок №2 (КУ-2)	65.58.190	138.17.345
21	п-Вьюн-18	18		65.58.166	138.17.140
22	п-Вьюн-20	20		65.57.920	138.17.151
23	п-Вьюн-29	29		65.57.685	138.17.667
24	п-Вьюн-26	26	Ключевой участок №3 (КУ-3)	65.57.382	138.16.209
25	п-Вьюн-27	27		65.57.420	138.16.170
26	п-Вьюн-28	28		65.57.003	138.15.731
27	п-Вьюн-30	30	65.57.577	138.16.791	
28	п-Вьюн-22	22	Ключевой участок №4 (КУ-4)	65.59.257	138.17.636
29	п-Вьюн-23	23		65.59.245	138.17.368
30	п-Вьюн-24	24		65.59.218	138.17.006
31	п-Вьюн-25	25		65.59.055	138.16.854
32	п-Вьюн-21	21	Ключевой участок №5 (КУ-5)	66.01.367	138.16.610
33	п-Вьюн-31	31		66.00.984	138.17.917
34	п-Вьюн-32	32		66.01.047	138.17.627
35	п-Вьюн-33	33	66.01.078	138.17.342	
36	п-Вьюн-34	34	Ключевой участок №6 (КУ-6)	66.01.09,4	138.09.48,8
37	п-Вьюн-35	35		66.01.48,2	138.11.09,8

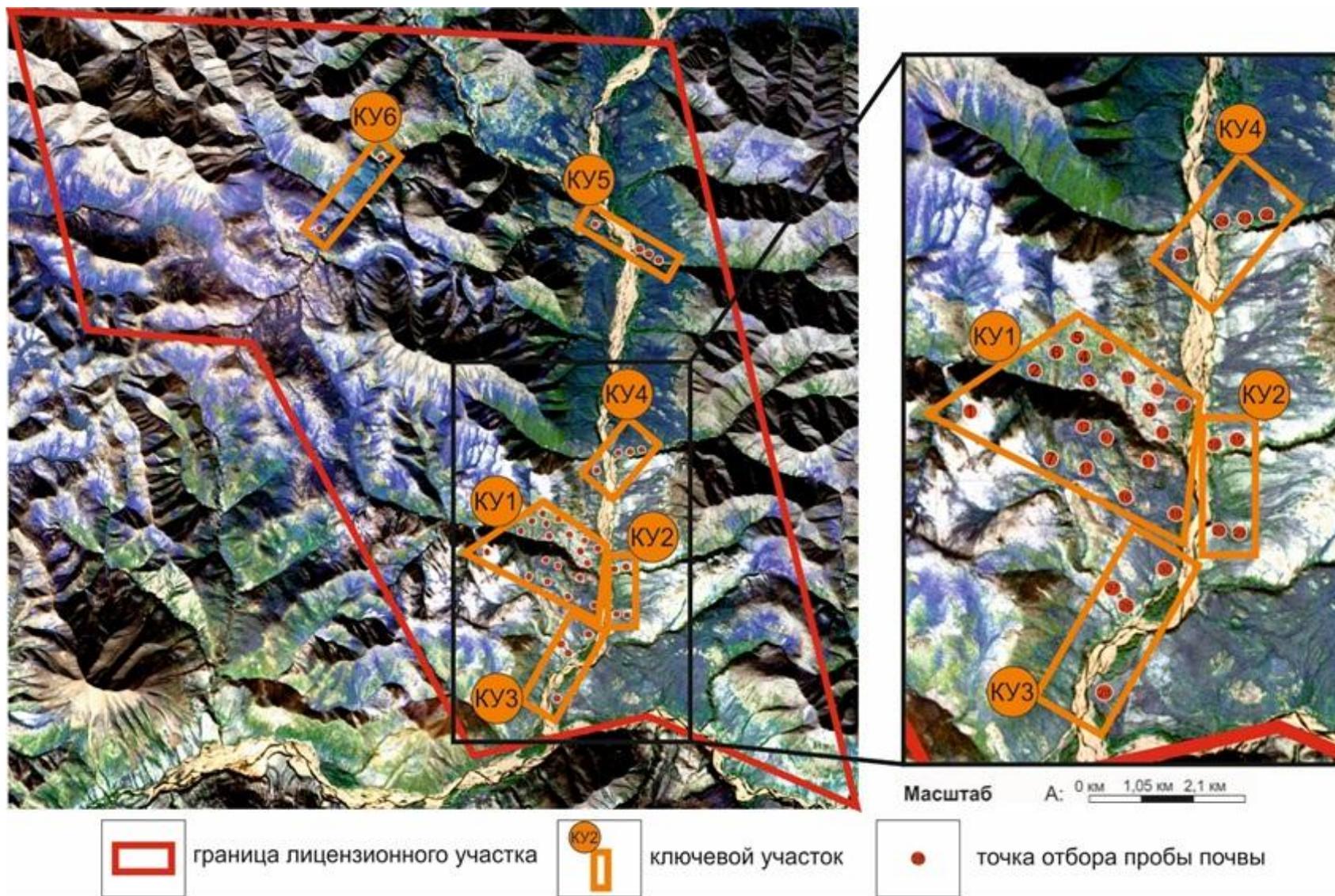


Рисунок 14 – Схема расположения пунктов отбора проб почв на территории Вьюнского золоторудного поля

Расположение пунктов отбора проб почв на территории ключевого участка №1 (КУ-1) показано на рисунке 15.

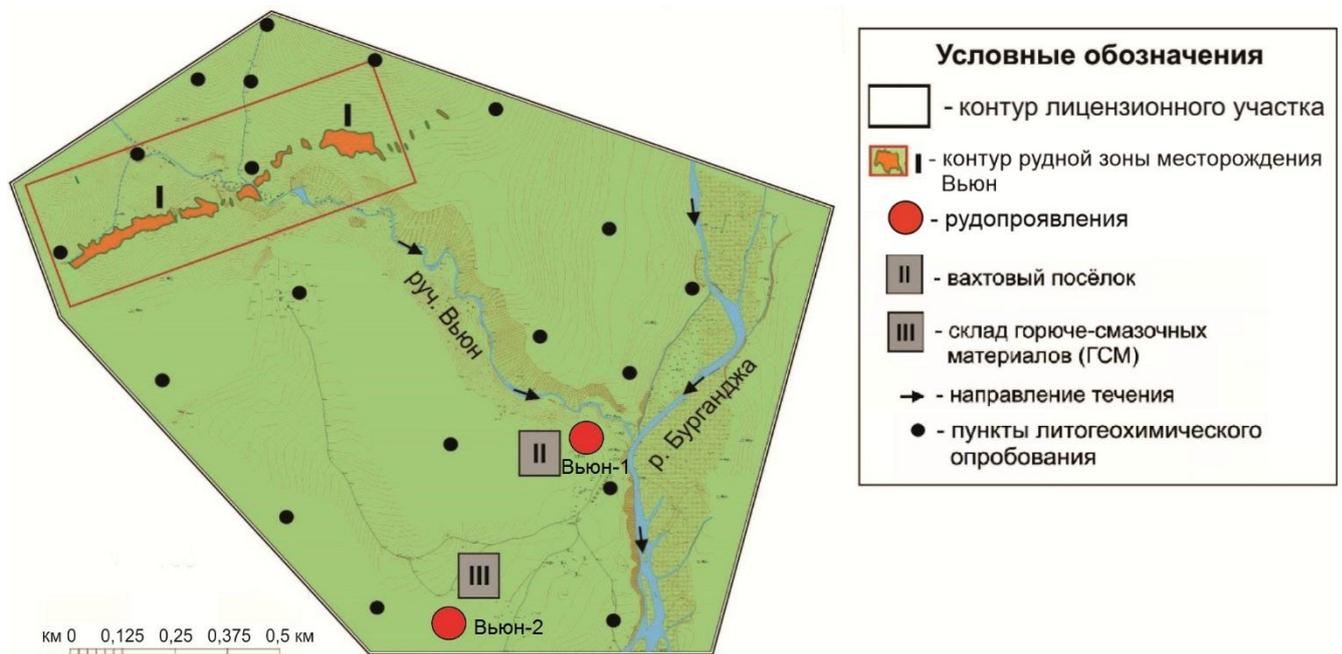


Рисунок 15 – Схема расположения пунктов отбора проб почв на территории ключевого участка №1 (КУ-1) с контуром рудной зоны месторождения Вьюн и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2)

3.1.4 Методика отбора проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*)

Отбор проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на территории Вьюнского золоторудного поля произведен согласно Методическим рекомендациям по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами («Методические рекомендации...», 1981).

Пробы коры лиственницы даурской на каждом пункте опробования отбирались с помощью легкого топорика с нескольких (3–5) взрослых деревьев, с 2-х (в случае, если диаметр ствола менее 15 см) или 4-х сторон ствола, на высоте 1,5 м от поверхности земли. При стесывании коры не допускалось попадания в пробу расположенного под корой луба (флоэмы и камбия), т.к. живые ткани дерева

малоинформативны по отношению к большинству элементов-индикаторов техногенного воздействия (Юсупов, 2009). Пункты пробоотбора совмещались с пунктами опробования почв. Всего было отобрано 35 проб коры лиственницы на 6-ти ключевых участках (таблица 11, рисунок 16).

Таблица 11 – Перечень отобранных проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на территории Вьюнского золоторудного поля

№	Шифр	Шифр на карте-схеме	Ключевой участок	Координаты	
1	п-Вьюн-1	1	Ключевой участок №1 (КУ-1)	65.58.319	138.14.159
2	п-Вьюн-2	2		65.58.452	138.14.997
3	п-Вьюн-3	3		65.58.452	138.15.594
4	п-Вьюн-4	4		65.58.510	138.15.473
5	п-Вьюн-5	5		65.58.571	138.15.356
6	п-Вьюн-7	7		65.58.072	138.15.200
7	п-Вьюн-6	6		65.58.530	138.15.191
8	п-Вьюн-8	8		65.58.244	138.15.193
9	п-Вьюн-9	9		65.58.400	138.16.157
10	п-Вьюн-10	10		65.58.556	138.15.916
11	п-Вьюн-10/14	10/14		65.58.517	138.15.284
12	п-Вьюн-11	11		65.58.042	138.15.651
13	п-Вьюн-12	12		65.58.235	138.15.721
14	п-Вьюн-13	13		65.58.303	138.16.535
15	п-Вьюн-14	14		65.58.556	138.16.916
16	п-Вьюн-16	16		65.57.922	138.16.059
17	п-Вьюн-17	17		65.58.160	138.16.342
18	п-Вьюн-19	19		65.57.903	138.16.976
19	п-Вьюн-15	15	Ключевой участок №2 (КУ-2)	65.58.190	138.17.345
20	п-Вьюн-18	18		65.58.166	138.17.140
21	п-Вьюн-20	20		65.57.920	138.17.151
22	п-Вьюн-29	29	Ключевой участок №3 (КУ-3)	65.57.685	138.17.667
23	п-Вьюн-26	26		65.57.382	138.16.209
24	п-Вьюн-27	27		65.57.420	138.16.170
25	п-Вьюн-28	28	Ключевой участок №4 (КУ-4)	65.57.003	138.15.731
26	п-Вьюн-30	30		65.57.577	138.16.791
27	п-Вьюн-22	22		65.59.257	138.17.636
28	п-Вьюн-23	23	Ключевой участок №5 (КУ-5)	65.59.245	138.17.368
29	п-Вьюн-24	24		65.59.218	138.17.006
30	п-Вьюн-21	21		66.01.367	138.16.610
31	п-Вьюн-31	31	Ключевой участок №6 (КУ-6)	66.00.984	138.17.917
32	п-Вьюн-32	32		66.01.047	138.17.627
33	п-Вьюн-33	33		66.01.078	138.17.342
34	п-Вьюн-34	34	Ключевой участок №6 (КУ-6)	66.01.09,4	138.09.48,8
35	п-Вьюн-35	35		66.01.48,2	138.11.09,8

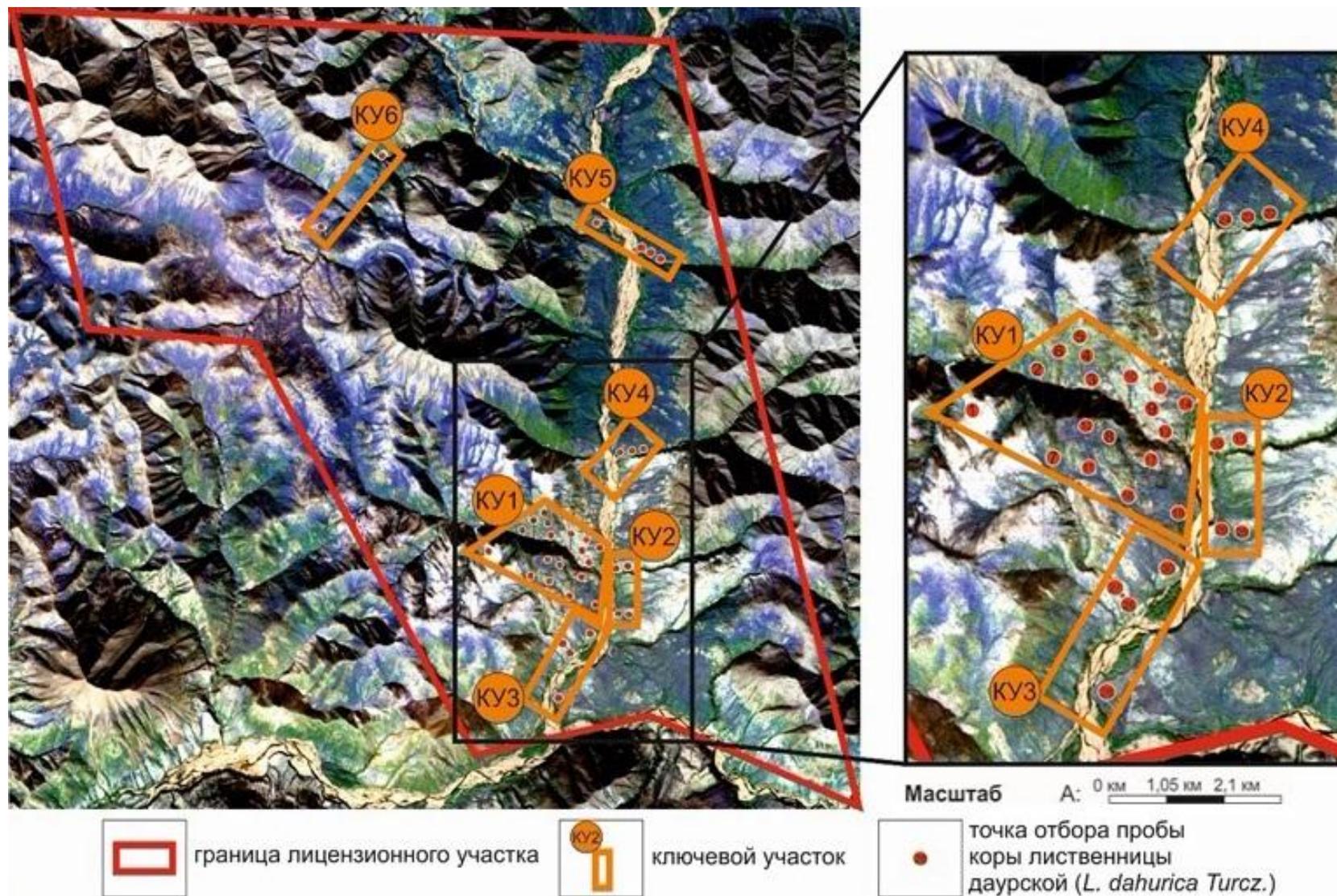


Рисунок 16 – Схема расположения пунктов отбора проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на территории Вьюнского золоторудного поля

18 проб коры лиственницы даурской, что составляет 51 % от общего числа исследованных проб, были отобраны на территории ключевого участка №1 (КУ-1), к которому приурочено золоторудное месторождение Вьюн (рисунок 17).

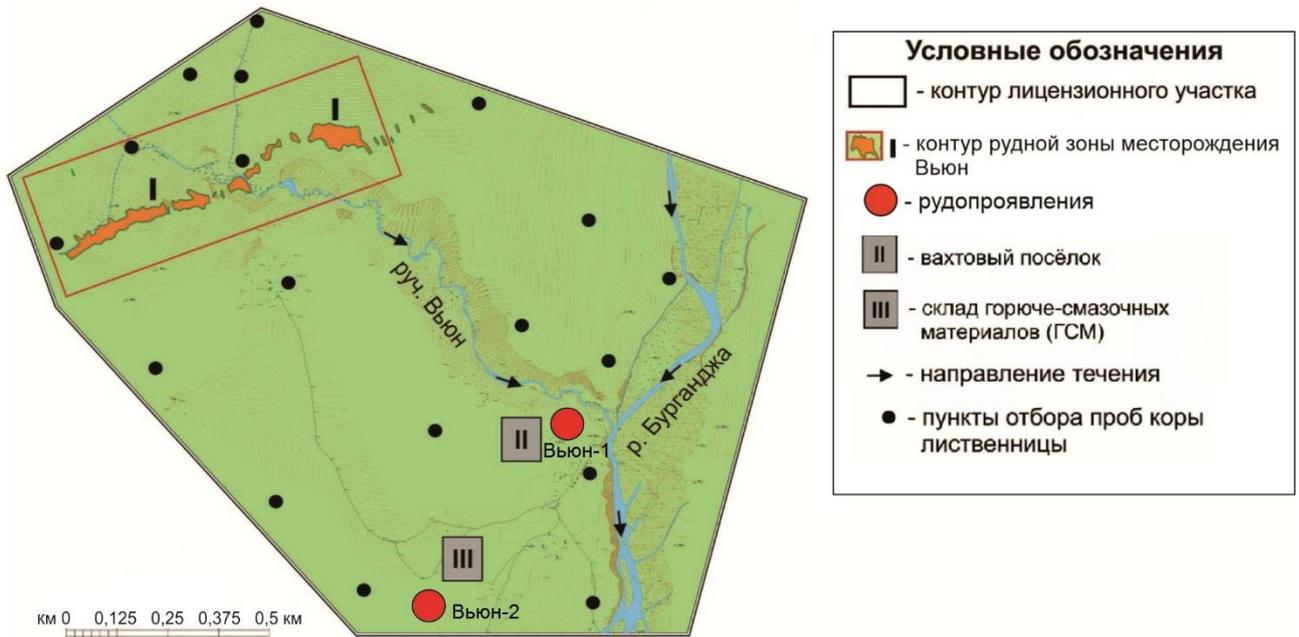


Рисунок 17 – Схема расположения пунктов отбора проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на территории ключевого участка №1 (КУ-1) с контуром рудной зоны месторождения Вьюн и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2)

Выбор лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) в качестве одного из объектов исследования обусловлен широкой распространённостью данного вида в границах рудного поля и активным её вовлечением в биогеохимические исследования при проведении эколого-геохимических оценок территорий золотодобычи Дальнего Востока России (Сорокина, 2009; Юсупов, 2009; Юсупов, 2013).

На каменистых почвах лиственница даурская формирует поверхностную корневую систему, при близком залегании ММП – стержневой корень, на моховых болотах – придаточную корневую систему. Кора лиственницы даурской толстая и глубоко бороздчатая (Сорокина, 2009).

3.1.5 Методика отбора проб лишайника (*Cladonia rangiferina*)

Прогноз экологических последствий промышленного освоения территорий невозможен без изучения особенностей растительного покрова – важнейшего компонента экосистем, поддерживающего термический режим многолетнемерзлых пород и обеспечивающего их стабильность.

Лишайник (*Cladonia rangiferina*) отличается морозостойкостью и хорошей приспособленностью к резко континентальному климату, имеет небольшое ветвистое слоевище и многочисленные разветвленные веточки, в высоту достигает 10–15 см. Широкое распространение лишайников в Якутии позволяет использовать их в роли индикатора техногенного воздействия на окружающую среду (Аньшакова и др., 2013).

Отбор проб лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля произведен согласно Методическим рекомендациям по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами («Методические рекомендации...», 1981). Пробы отбирались не менее чем с 4-х пробных площадок на каждом пункте опробования. Пункты отбора проб лишайника территориально совпадали с пунктами опробования почвы и коры лиственницы. Всего было отобрано 35 проб лишайника. Аналогично характеру распределения пунктов опробования почвы и коры лиственницы по территории золоторудного поля, пункты отбора проб лишайника были распределены между 6-ю ключевыми участками проведения эколого-геохимических работ (таблица 12, рисунок 18).

19 проб лишайника, что составляет 54% от общего числа исследованных проб, были отобраны на территории ключевого участка №1 (КУ-1), к которому приурочено золоторудное месторождение Вьюн (рисунок 19).

Таблица 12 – Перечень отобранных проб лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля

№	Шифр	Шифр на схеме	Ключевой участок	Координаты	
1	п-Вьюн-1	1	Ключевой участок №1 (КУ-1)	65.58.319	138.14.159
2	п-Вьюн-2	2		65.58.452	138.14.997
3	п-Вьюн-3	3		65.58.452	138.15.594
4	п-Вьюн-4	4		65.58.510	138.15.473
5	п-Вьюн-5	5		65.58.571	138.15.356
6	п-Вьюн-5/10	5/10		65.58.580	138.15.322
7	п-Вьюн-6	6		65.58.530	138.15.191
8	п-Вьюн-7	7		65.58.072	138.15.200
9	п-Вьюн-8	8		65.58.244	138.15.193
10	п-Вьюн-9	9		65.58.400	138.16.157
11	п-Вьюн-10	10		65.58.556	138.15.916
12	п-Вьюн-10/14	10/14		65.58.517	138.15.284
13	п-Вьюн-11	11		65.58.042	138.15.651
14	п-Вьюн-12	12		65.58.235	138.15.721
15	п-Вьюн-13	13		65.58.303	138.16.535
16	п-Вьюн-14	14		65.58.556	138.16.916
17	п-Вьюн-16	16		65.57.922	138.16.059
18	п-Вьюн-17	17		65.58.160	138.16.342
19	п-Вьюн-19	19		65.57.903	138.16.976
20	п-Вьюн-15	15	Ключевой участок №2 (КУ-2)	65.58.190	138.17.345
21	п-Вьюн-18	18		65.58.166	138.17.140
22	п-Вьюн-20	20		65.57.920	138.17.151
23	п-Вьюн-26	26	Ключевой участок №3 (КУ-3)	65.57.382	138.16.209
24	п-Вьюн-27	27		65.57.420	138.16.170
25	п-Вьюн-28	28		65.57.003	138.15.731
26	п-Вьюн-30	30		65.57.577	138.16.791
27	п-Вьюн-22	22	Ключевой участок №4 (КУ-4)	65.59.257	138.17.636
28	п-Вьюн-23	23		65.59.245	138.17.368
29	п-Вьюн-24	24		65.59.218	138.17.006
30	п-Вьюн-21	21	Ключевой участок №5 (КУ-5)	66.01.367	138.16.610
31	п-Вьюн-31	31		66.00.984	138.17.917
32	п-Вьюн-32	32		66.01.047	138.17.627
33	п-Вьюн-33	33		66.01.078	138.17.342
34	п-Вьюн-34	34	Ключевой участок №6 (КУ-6)	66.01.09,4	138.09.48,8
35	п-Вьюн-35	35		66.01.48,2	138.11.09,8

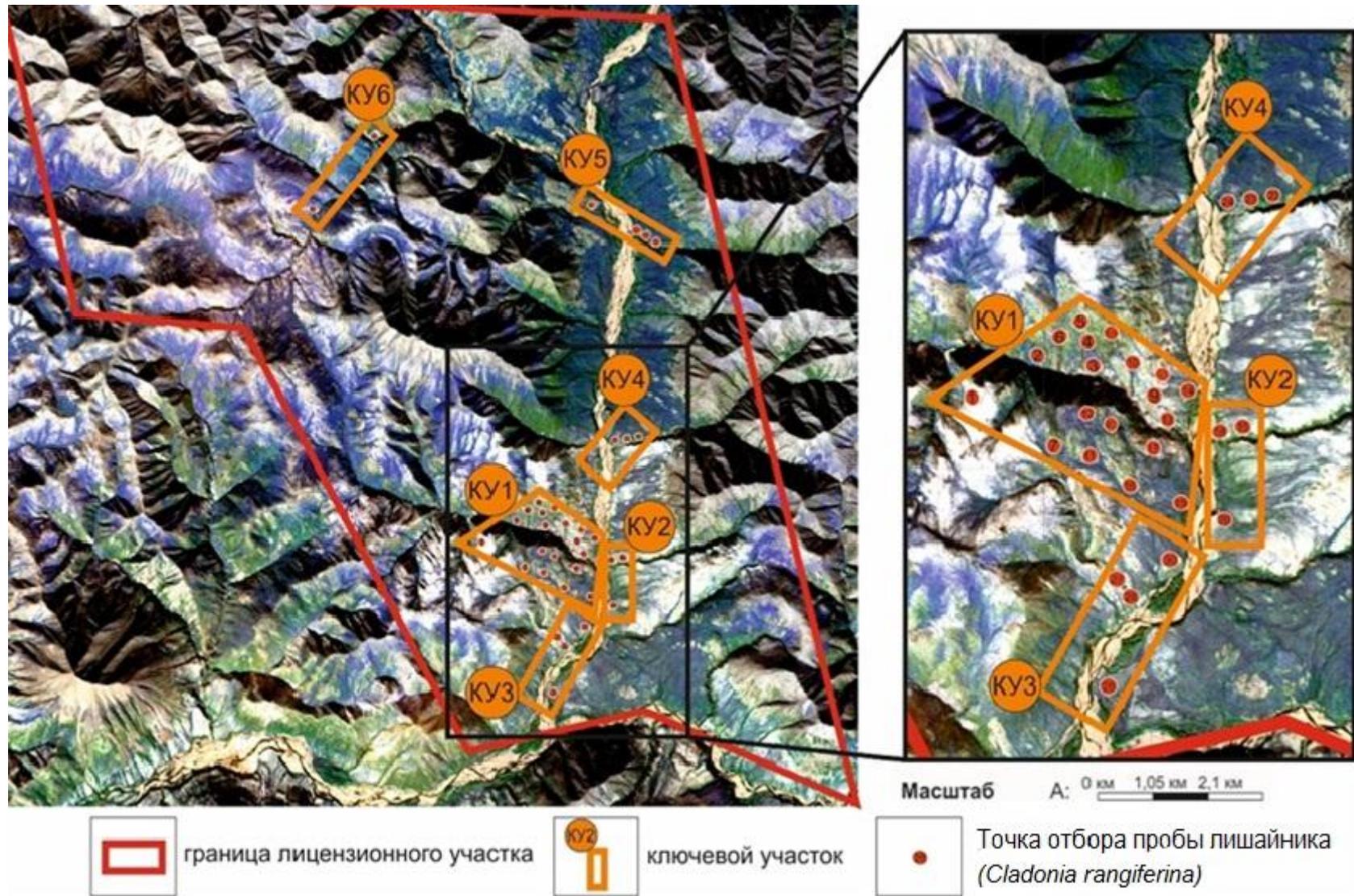


Рисунок 18 – Схема расположения пунктов отбора проб лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля

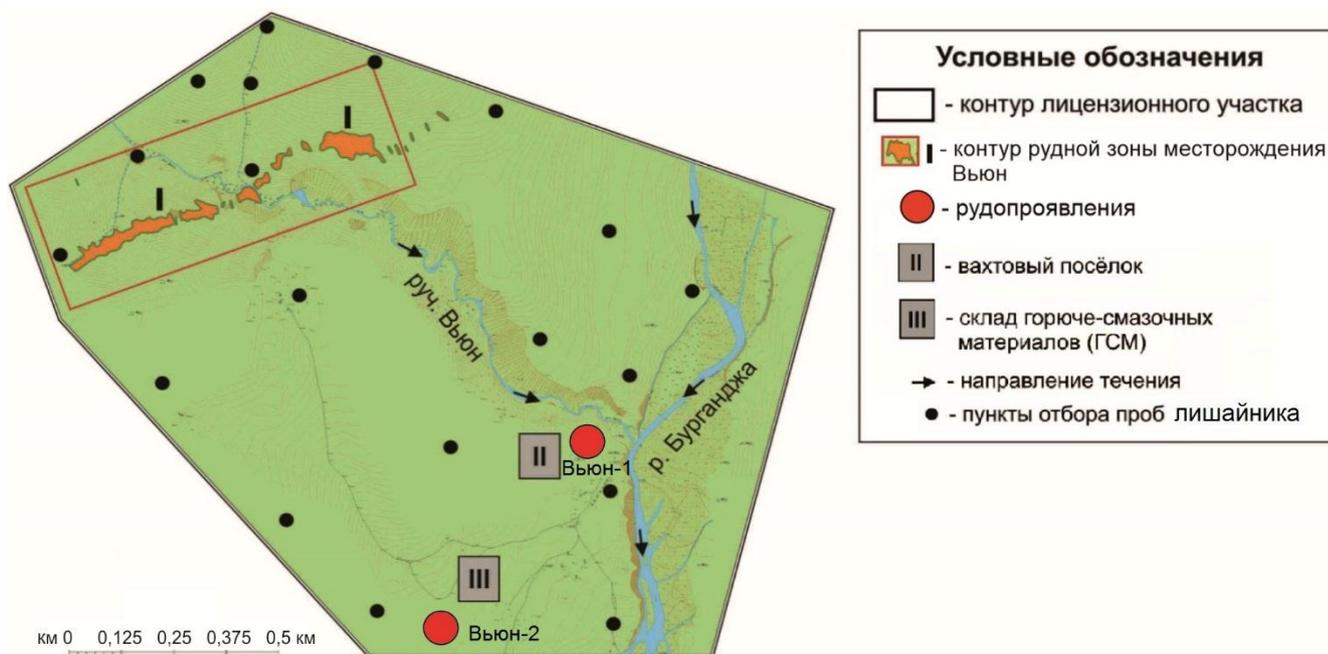


Рисунок 19 – Схема расположения пунктов отбора проб лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории ключевого участка №1 (КУ-1) с контуром рудной зоны месторождения Вьюн и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2)

3.1.6 Методика проведения полевых измерений содержаний загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

Измерения содержаний взвешенных и газообразных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на территории Вьюнского золоторудного поля производились с использованием современного аналитического оборудования.

Для измерения содержаний взвешенных веществ в атмосферном воздухе (общее количество проведенных замеров – 7) использовался аспиратор АВА-3-240/180-01 с фильтрами АФА-ВП-20-1, предварительно взвешенными на электронных весах GR-120 AND. После прокачки атмосферного воздуха фильтры были свернуты стороной с уловленными взвешенными веществами вовнутрь и упакованы в индивидуальные полиэтиленовые конверты. Разница между исходной массой фильтра и массой фильтра после прокачки атмосферного воздуха, а также параметры прокачки (время, давление), были основой для расчета содержаний взвешенных веществ в атмосферном воздухе.

Измерения концентраций NO_2 в атмосферном воздухе проводили при помощи газоанализатора АНКАТ-7631Микро- NO_2 (электрохимический метод), измерения концентраций CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 и CO_2 – с использованием газоанализатора ОКА-МТ- CH_4 - CO - SO_2 - NH_3 - CO_2 (термокаталитический (для CH_4), электрохимический (для CO , SO_2 , NH_3) и оптический (для CO_2) метод). Концентрации загрязняющих веществ измерялись на высоте 1,5 м от поверхности земли. В качестве результирующей концентрации газообразных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе принималась средняя концентрация за период проведения измерений – 20 мин на каждом пункте проведения замеров.

Пункты проведения измерений содержаний загрязняющих веществ в атмосферном воздухе были совмещены с пунктами отбора проб почв. Координаты пунктов проведения замеров и перечни анализируемых взвешенных и газообразных загрязняющих веществ для каждого пункта указаны в таблице 13.

Таблица 13 – Координаты пунктов проведения замеров содержаний загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на территории Вьюнского золоторудного поля и перечни измеряемых загрязняющих веществ

№	Шифр	Координаты		Измеряемые загрязняющие вещества
1	п-Вьюн-1	65.58.319	138.14.159	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
2	п-Вьюн-2	65.58.452	138.14.997	ВВ, CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
3	п-Вьюн-3	65.58.452	138.15.594	ВВ, CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
4	п-Вьюн-4	65.58.510	138.15.473	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
5	п-Вьюн-5	65.58.571	138.15.356	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
6	п-Вьюн-5/10	65.58.560	138.15.522	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
7	п-Вьюн-6	65.58.530	138.15.191	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
8	п-Вьюн-7	65.58.072	138.15.200	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
9	п-Вьюн-8.1	65.58.200	138.15.877	ВВ, CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
10	п-Вьюн-9	65.58.400	138.16.157	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
11	п-Вьюн-10	65.58.556	138.15.916	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
12	п-Вьюн-10/14	65.58.517	138.15.284	ВВ, CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
13	п-Вьюн-11	65.58.042	138.15.651	ВВ, CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
14	п-Вьюн-12	65.58.235	138.15.721	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
15	п-Вьюн-13	65.58.303	138.16.535	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
16	п-Вьюн-14	65.58.556	138.16.916	ВВ, CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
17	п-Вьюн-15	65.58.190	138.17.345	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2
18	п-Вьюн-16	65.57.922	138.16.059	CH_4 , CO , SO_2 , NH_3 , CO_2 , NO_2

19	п-Вьюн-17	65.58.160	138.16.342	BB, CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
20	п-Вьюн-18	65.58.166	138.17.140	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
21	п-Вьюн-19	65.57.903	138.16.976	BB, CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
22	п-Вьюн-20	65.57.920	138.17.151	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
23	п-Вьюн-26	65.57.382	138.16.209	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
24	п-Вьюн-27	65.57.420	138.16.170	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
25	п-Вьюн-28	65.57.003	138.15.731	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
26	п-Вьюн-29	65.57.685	138.17.667	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
27	п-Вьюн-30	65.57.577	138.16.791	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
28	п-Вьюн-22	65.59.257	138.17.636	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
29	п-Вьюн-23	65.59.245	138.17.368	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
30	п-Вьюн-24	65.59.218	138.17.006	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
31	п-Вьюн-25	65.59.055	138.16.854	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
32	п-Вьюн-21	66.01.367	138.16.610	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
33	п-Вьюн-31	66.00.984	138.17.917	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
34	п-Вьюн-32	66.01.047	138.17.627	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂
35	п-Вьюн-33	66.01.078	138.17.342	CH ₄ , CO, SO ₂ , NH ₃ , CO ₂ , NO ₂

3.1.7 Методика проведения гамма-радиометрических измерений

Маршрутные гамма-радиометрические измерения на территории Вьюнского золоторудного поля производились с использованием сцинтилляционного радиометра поискового СРП-68-01 (заводской номер 2695, сертификат о калибровке №05-16 от 29.02.2016 г.). Контроль работоспособности СРП-68-01 производился 3–5 раз на протяжении каждого маршрута путём измерения разницы сигналов между фоновым измерением и измерением сигнала от источника радиоактивного излучения. За весь период проведения маршрутных гамма-радиометрических измерений разница сигналов между фоном и источником гамма-излучения находилась в диапазоне от 15 до 18 мкР/ч.

Гамма-радиометрические измерения были проведены по системе профилей на территории ключевого участка №1 (КУ-1) (один из профилей проходил вдоль русла ручья Вьюн), а также по маршрутам вдоль русла реки Бурганджа (на отрезке в границах Вьюнского золоторудного поля) и вдоль русел 3-х левых притоков реки Бурганджа. Всего на территории рудного поля было пройдено 6 маршрутов гамма-радиометрических измерений, проведено 755 индивидуальных замеров МЭД гамма-излучения (таблица 14).

Измерения проводились с непрерывной звуковой индикацией импульсов и наблюдением показаний прибора по шкале, запись значений измерений осуществлялась в зависимости от маршрута проведения измерений с шагами 10 м или 30 м. Замер МЭД производился при плотном приложении гильзы СРП-68-01 к поверхности земли, время измерения составляло не менее 5 секунд. Фиксация координат пунктов измерений проводилась каждые 100 м.

Таблица 14 – Перечень маршрутов проведения гамма-радиометрических измерений на территории Вьюнского золоторудного поля

№ маршрута	Место проведения маршрута	Координаты начальной точки	Координаты конечной точки	Шаг	Количество измерений
1	Ключевой участок №1	–	–	10 м	474
2	Река Бурганджа	63.54.687; 143.05.822	63.53.877; 143.05.980	30 м	185
3	Левый приток реки Бурганджа (№1)	63.55.303; 143.08.357	63.53.864; 143.07.634	10 м	42
4	Левый приток реки Бурганджа (№2)	63.56.703; 143.01.699	63.53.431; 143.07.263	10 м	33
5	Левый приток реки Бурганджа (№3)	63.53.367; 143.13.093	63.52.826; 143.13.092	10 м	21

3.2 Методика подготовки проб компонентов природной среды к лабораторно-аналитическим исследованиям

3.2.1 Методика подготовки проб поверхностных вод

Подготовка проб поверхностных вод к лабораторно-аналитическим исследованиям заключалась в их консервации после пробоотбора. Пробы отбирались в несколько емкостей с учетом различия требований к их консервации. Объемы отбираемых проб воды, вид материала ёмкостей для пробоотбора и использованные реагенты-консерванты представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Емкости и реагенты-консерванты, использованные при отборе проб поверхностных вод на территории Вьюнского золоторудного поля

№	Емкость для отбора пробы воды		Использованный консервант (объем, см ³)	Анализируемые компоненты
	Материал	Объем, см ³		
1	Полиэтилен	1000	Без консервации	Гидрохимические показатели
2	Пластик	50 (2 шт.)	Без консервации	Химические элементы
3	Стекло прозрачное	50	Серная кислота (1:4), 1 см ³	ХПК
4	Стекло прозрачное	200	Хлороформ, 1 см ³	Нитрат-ион, нитрит-ион, аммоний, фосфат-ион

3.2.2 Методика подготовки проб донных отложений и почв

Подготовка проб донных отложений и почв к лабораторно-аналитическим исследованиям элементного состава заключалась в их высушивании до воздушно-сухой массы при комнатной температуре, ручном измельчении и просеивании через сито с размером ячейки 1 мм. Выделенная фракция, размером менее 1 мм, измельчалась на микровиброистирателе, после чего упаковывалась в пакеты из крафт-бумаги для хранения. Наглядно схема подготовки проб донных отложений и почв к элементному анализу показана на рисунке 20.

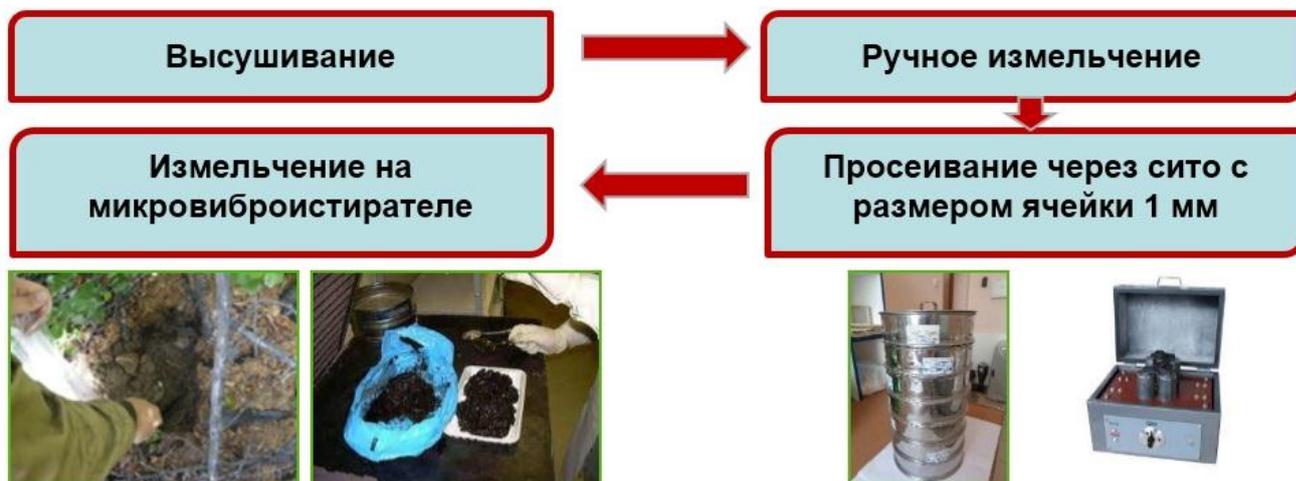


Рисунок 20 – Схема подготовки проб донных отложений и почв к лабораторно-аналитическим исследованиям элементного состава

Отдельно исследовался элементный состав фракций почвы, размерностью менее 1 мм (валовая), 0,5–0,25 мм, 0,25–0,1 мм, менее 0,1 мм. Для этого предварительно было выделено 7 проб почвы, отобранных в районе рудной зоны месторождения Вьюн. Каждая из этих проб ситовым методом была разделена на 4 фракции с вышеуказанными размерностями. В итоге для каждой из 7 проб было получено по 4 навески фракций почвы для элементного анализа.

Для элементного анализа отдельных фракций почв использовался метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА). Методика ИНАА заключается в облучении исследуемых проб потоком тепловых нейтронов в среднепоточном исследовательском тепловом ядерном реакторе и последующем измерении наведенной активности на гаммаспектрометре с полупроводниковыми детекторами. Метод является неразрушающим и не требует химической подготовки проб, что исключает погрешность за счёт привноса или удаления элементов вместе с реактивами, при этом обладает высокой чувствительностью и точностью в диапазоне содержаний от $n \cdot 1\%$ до $n \cdot 10^{-6}\%$ (Волостнов, 2010).

Перед проведением анализа в конверты из алюминиевой фольги высокой чистоты марки А-995 помещали навески почвы массой 100 ± 1 мг (при этом точно фиксировалась масса конверта, навески и всей пробы), после чего упакованные навески отправлялись на облучение. Применение алюминиевой фольги обусловлено тем фактом, что алюминий образует продукты активации с очень малым периодом полураспада.

В рамках определения минерального состава проб донных отложений водотоков и почв проводились исследования методами порошковой рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектрометрией, а также с помощью бинокулярного оптического микроскопа.

Подготовка проб донных отложений и почв к исследованию под бинокулярным оптическим микроскопом включала в себя промывку

дистиллированной водой для удаления компонентов, мешающих диагностике минералов (рисунок 21), и высушивание полученного минерального вещества.



Рисунок 21 – Процесс промывки пробы

Подготовка минерального вещества к исследованию методом рентгеновской дифрактометрии заключалась в истирании в специальной ступке при помощи пестика до пылевидного состояния (рисунок 22) и заполнении полученным содержимым кюветы из органического стекла (рисунок 23 а–б).



Рисунок 22 – Ступка и пестик для истирания минерального вещества

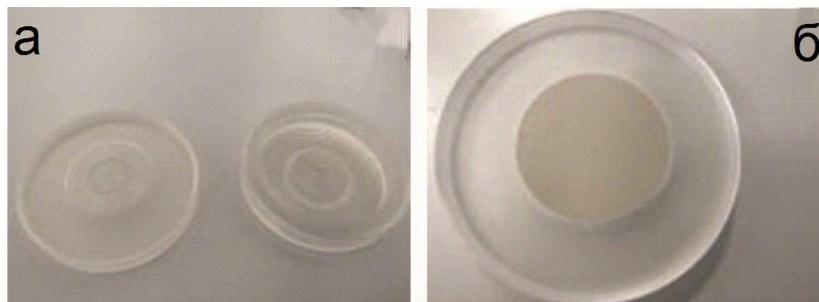


Рисунок 23 – Кюветы для проведения рентгенофазового анализа:

а) пустые кюветы; *б)* заполненная кювета

В ходе изучения минерального вещества проб донных отложений и почв под бинокулярным оптическим микроскопом отдельные минеральные зёрна

отбирались для дальнейшей диагностики методом сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектроскопией. Исследованию данным методом предшествовала подготовка отобранного материала, схема которой представлена на рисунке 24.

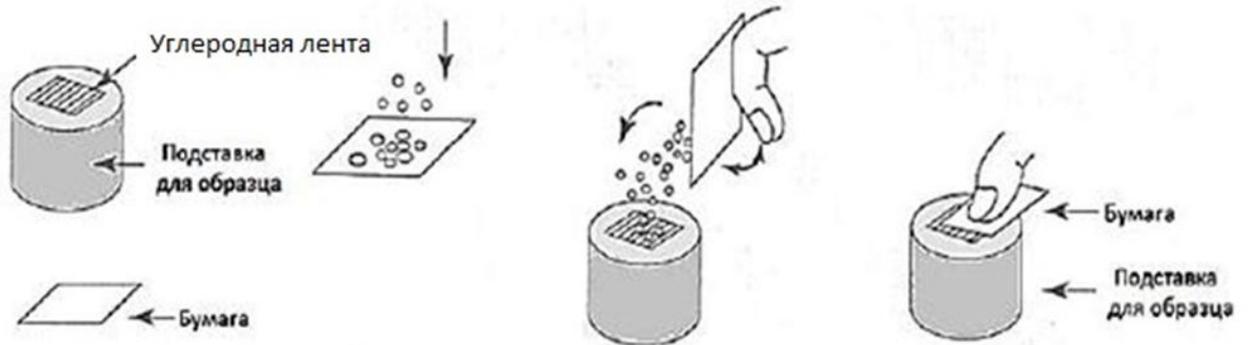


Рисунок 24 – Схема подготовки минеральных зёрен из проб донных отложений и почв к исследованию методом сканирующей электронной микроскопии

3.2.3 Методика подготовки проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*)

Подготовка проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) к лабораторно-аналитическим исследованиям элементного состава заключалась в их высушивании до состояния воздушно-сухого вещества при комнатной температуре в пакетах из крафт-бумаги и дальнейшем измельчении (рисунок 25).

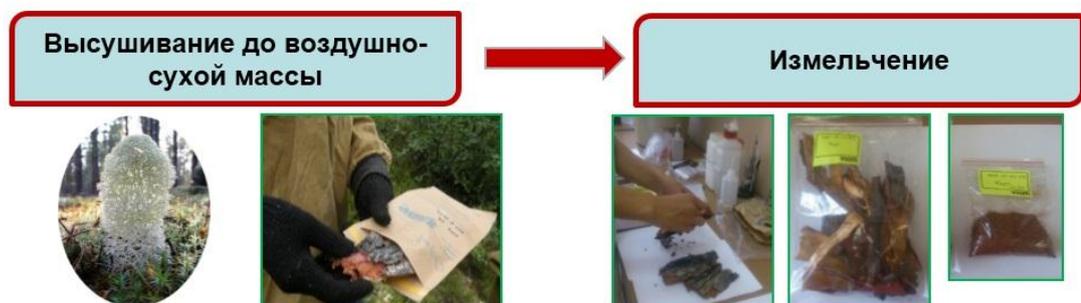


Рисунок 25 – Схема подготовки проб коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) к лабораторно-аналитическим исследованиям элементного состава

3.3 Аналитическое обеспечение эколого-геохимических исследований

Аналитические работы по определению содержаний химических веществ, элементов и значений иных показателей в отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля пробах компонентов природной среды проводились в аккредитованных лабораториях г. Томска по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения.

Для проб донных отложений и почв проводился количественный химический анализ на 55 химических элементов (Be, Mg, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U), для проб коры лишайницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) – на 67 химических элементов (Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск) (аттестат аккредитации № RA.RU. 516895).

Элементный состав проб поверхностных вод устанавливался с помощью количественного химического анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» (ОГ ИШПР НИ ТПУ) (аттестат аккредитации № RU.0001.511901). Определялось содержание 71 химического элемента (Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U).

Для установления гидрохимических характеристик поверхностных вод образцы были проанализированы комплексом методов – титриметрическим (CO₂, CO₃, HCO₃⁻, Cl⁻, общая жесткость, Ca²⁺, ХПК), потенциометрическим (рН, F),

кондуктометрическим (электропроводность), гравиметрическим (взвешенные вещества), фотоколориметрическим (NH_4 , NO_2 , PO_4), спектрофотометрическим (SO_4^{2-}), методом ионной хроматографии (NO_3), по расчетным методикам (Mg^{2+} , минерализация) в НОЦ «Вода».

Анализ валовых проб и отдельных фракций почвы проводился методом ИНАА на 28 химических элементов (Sm, Ce, Ca, Lu, U, Th, Cr, Yb, Au, Hf, Ba, Sr, Nd, As, Br, Cs, Ag, Tb, Sc, Rb, Fe, Zn, Ta, Co, Na, Eu, La, Sb) в ядерно-геохимической лаборатории (аттестат аккредитации № RA.RU.21АБ27) на исследовательском тепловом ядерном реакторе ИРТ-Т в НИ ТПУ по аттестованной методике (аналитики Богутская Л.В, Судыко А.Ф.). По результатам анализа было проведено сопоставление средних концентраций химических элементов в валовых пробах почв (размерностью менее 1 мм), полученных методами ICP-MS и ИНАА (таблица 16, рисунок 26а–б).

Таблица 16 – Средние концентрации химических элементов в валовых пробах почвы с территории месторождения Вьюн, мг/кг (количество проб – 7)

Химический элемент	Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS)	Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА)
Fe, %	4,7±0,4	4,9±0,5
Ba, %	0,045±0,002	0,049±0,004
Cr	145±13	98±7
Co	22±4	25±5
Zn	128±13	88±7
As	98±35	91±33
Rb	88±5	105±9
Sb	3,3±0,9	2,7±0,9
Cs	8,9±1,4	11±2
La	31±1	32±1
Ce	65±2	66±3
Nd	26±1	24±2
Sm	5,0±0,4	6,0±0,5
Eu	1,1±0,1	1,4±0,2
Tb	0,67±0,07	1,0±0,1
Yb	1,9±0,1	3,0±0,2
Lu	0,28±0,02	0,49±0,03
Hf	2,7±0,1	5,7±0,3

Ta	0,91±0,03	0,89±0,16
Au	0,043±0,011	0,017±0,005
Th	6,9±0,3	8,3±0,3
U	1,9±0,1	2,4±0,2

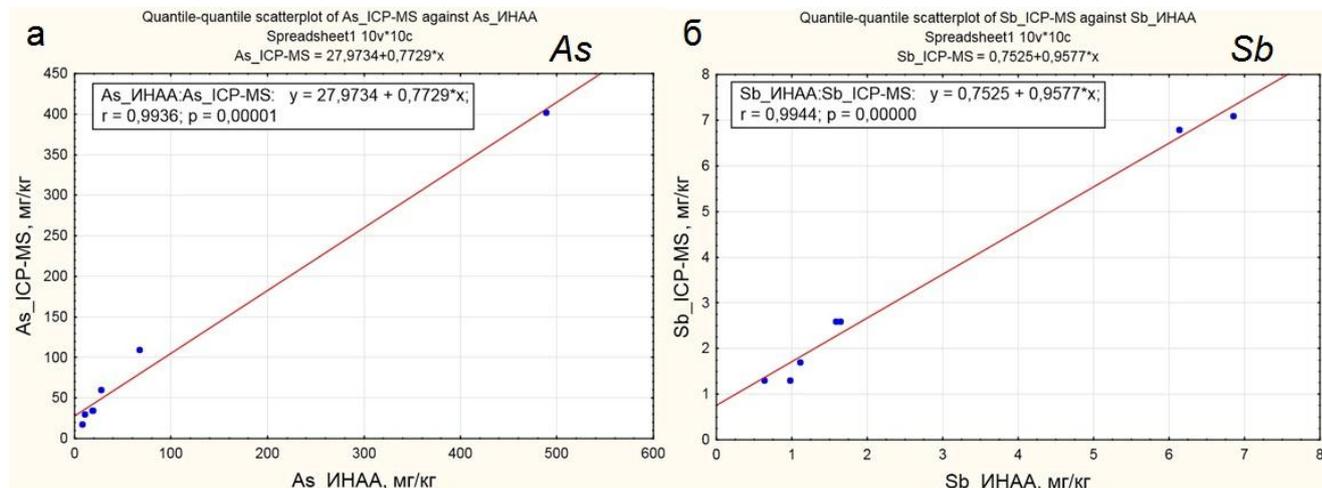


Рисунок 26 – Сравнение результатов аналитического определения As (а) и Sb (б) методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в валовых пробах почвы, размерностью менее 1 мм

В целях внешнего лабораторного контроля было проведено аналитическое определение валового содержания ртути в пробах почв (37 проб), коры листовницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) (35 проб) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) (35 проб), т.к. Hg – один из самых аналитически трудно определяемых химических элементов в пробах любого состава. Измерения содержаний Hg проводились в лаборатории микроэлементного анализа МИНОЦ «Урановая геология» имени профессора, д.г.-м.н. Рихванова Л.П. (ОГ ИШПР НИ ТПУ) (консультант Осипова Н.А.).

Определение валового содержания Hg проводилось методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути «РА-915+» с зеемановской коррекцией и пиролитическим разложением проб (приставка ПИРО-915+ с режимом работы «Mode 1») согласно методике ПНД Ф 16.1:2.23. Для анализа проб почв использован

ГСО 2500-83 (СДПС-3), для проб лишайника (*Cladonia rangiferina*) и коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) – ГСО 8923-2007 (ЛБ-1).

Сравнение содержаний Hg, установленных методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-абсорбционной спектрометрии (AAS) (рисунок 27 а–в), показало высокую сходимость результатов.

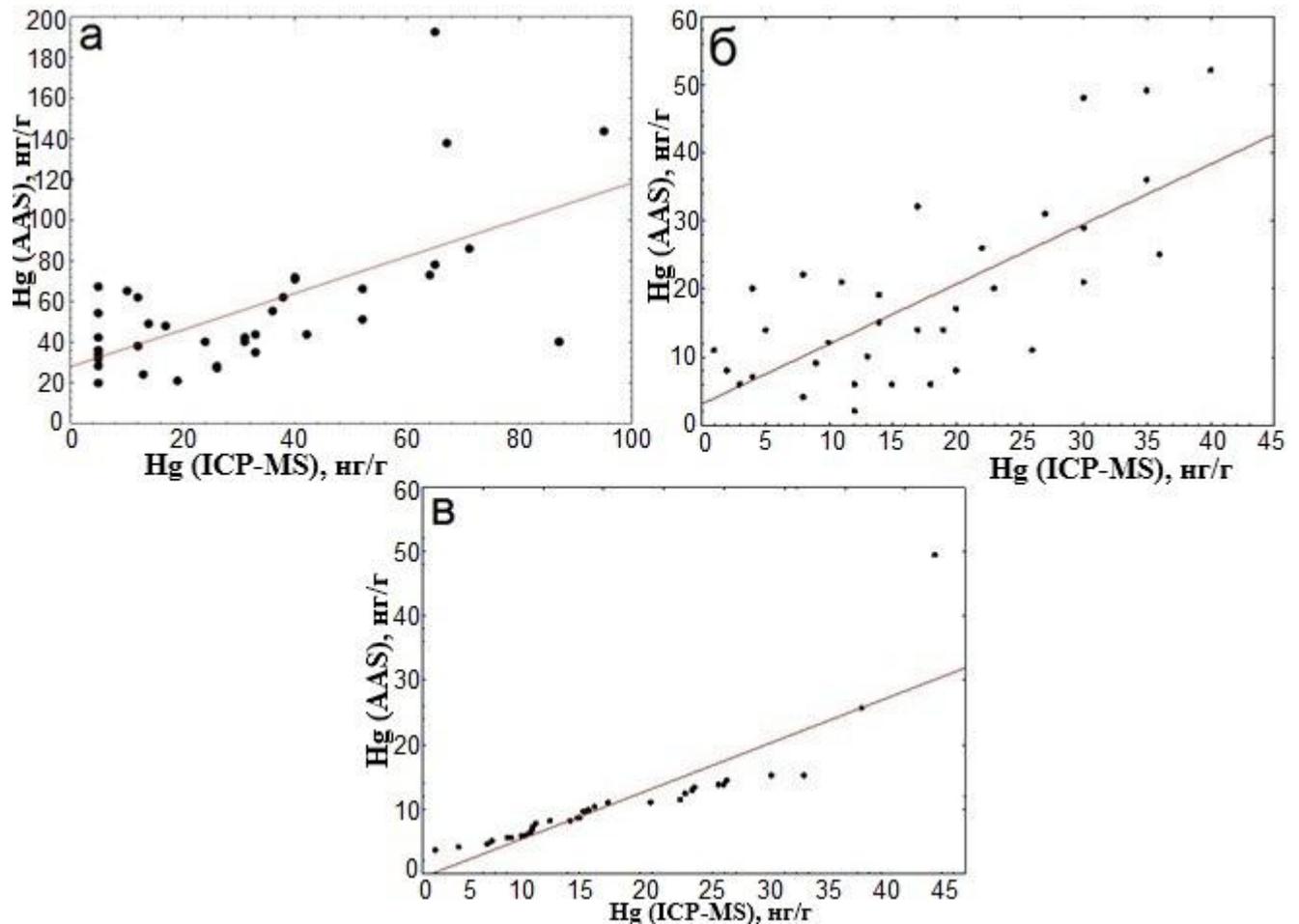


Рисунок 27 – Сравнение результатов аналитического определения Hg методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и атомно-абсорбционной спектрометрии (AAS) в пробах почв (а), коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) (б) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) (в)

Коэффициент парной корреляции составил 0,64 для проб почв, 0,73 для проб коры лиственницы даурской и 0,58 для проб лишайника.

Минеральный состав донных отложений из водотоков и почв определялся методами порошковой рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной

микроскопии с энерго-дисперсионной спектрометрией, а также с помощью бинокулярного оптического микроскопа на базе лаборатории электронно-оптической диагностики МИНОЦ «Урановая геология» имени профессора, д.г.-м.н. Рихванова Л.П. (Отделение геологии ИШПР НИ ТПУ).

Рентгенофазовый анализ минерального вещества исследуемых проб проводился с помощью дифрактометра D2 PHASER фирмы BRUKER (консультант Соктоев Б.Р.). Анализ методом сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектрометрией осуществлялся на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с приставкой для микроанализа Bruker XFlash 4010/5010 (консультант Ильенок С.С.). Также применялся бинокулярный оптический микроскоп Leica EZ4D.

Всего в рамках исследования минерального состава донных отложений из водотоков и почв под бинокулярным оптическим микроскопом изучено 15 проб минерального вещества почв и 15 проб минерального вещества донных отложений, методом порошковой рентгеновской дифрактометрии проанализировано 3 пробы минерального вещества почв и 3 пробы минерального вещества донных отложений, методом сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектрометрией в общей сложности проведено 65 определений минерального вещества проб почв и 80 определений минерального вещества проб донных отложений. Всего данным методом изучено около 30 минеральных фаз. Ввиду большого объёма данных, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, в диссертационную работу вошло около 15% наиболее показательных результатов исследований.

Объемы выполненных лабораторно-аналитических работ в рамках эколого-геохимических исследований представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Виды и объемы лабораторно-аналитических работ, проведенных в рамках эколого-геохимических исследований территории Вьюнского золоторудного поля

№	Аналитический метод	Лаборатория	Анализируемый компонент природной среды	Количество проб	Количество определений
Определение величин содержаний химических веществ, элементов и значений иных показателей					
1	Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS)	Химико-аналитический центр «Плазма»	Почва	37	2035
			Донные отложения	33	1815
			Кора листовенницы даурской	35	2345
			Лишайник	35	2345
		Проблемная научно-исследовательская лаборатория гидрогеохимии НОЦ «Вода» (ОГ ИШПР НИ ТПУ)	Поверхностные воды	34	2414
2	Титриметрический		Поверхностные воды	34	238
3	Потенциометрический			34	68
4	Кондуктометрический			34	34
5	Гравиметрический			34	34
6	Фотоколориметрический			34	102
7	Ионно-хроматографический			34	34
8	Спектрофотометрический			34	34
9	Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА)	Ядерно-геохимическая лаборатория НИ ТПУ. Ядерный реактор ИРТ-Т НИ ТПУ		Почва	28
10	Каппаметрия		19		19
11	Атомно-абсорбционная спектрометрия (метод пиролиза)	Лаборатория микроэлементного анализа МИНОЦ «Урановая геология» (ОГ ИШПР НИ ТПУ)	Почва	37	37
			Кора листовенницы даурской	35	35
			Лишайник	35	35

Исследование минерального состава почв и донных отложений из водотоков					
12	Исследование минерального вещества под бинокулярным оптическим микроскопом	Лаборатория электронно-оптической диагностики МИНОЦ «Урановая геология» (ОГ ИШПР НИ ТПУ)	Почва	15	-
			Донные отложения	15	-
13	Порошковая рентгеновская дифрактометрия		Почва	3	3
			Донные отложения	3	3
14	Сканирующая электронная микроскопия с энерго-дисперсионной спектрометрией		Почва	5	65
			Донные отложения	5	80
Общее количество определений					12559

3.4 Методика обработки результатов лабораторно-аналитических исследований

Обработка результатов лабораторно-аналитических исследований проб компонентов природной среды, отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля, заключалась в проведении математико-статистического и эколого-геохимического анализа.

Математико-статистическая обработка данных проводилась с применением программного обеспечения (ПО) Statistica 10.0 и Microsoft Excel.

Для графической интерпретации результатов эколого-геохимических исследований (построение карт-схем, графиков) использовалось ПО CorelDRAW X7 и Surfer.

3.4.1 Математико-статистическая обработка результатов исследований

На начальном этапе математико-статистической обработки результатов гидрогеохимических, гидролитогеохимических, литогеохимических, биогеохимических исследований содержания химических элементов (а также содержания анионов, катионов, величины гидрохимических показателей для проб воды и значения МЭД гамма-излучения), которые по данным лабораторно-

аналитических измерений характеризуются значениями меньшими, чем методический предел их обнаружения, были заменены на $\frac{1}{2}$ соответствующего предела.

Для выборок по каждому рассматриваемому параметру была проведена проверка принадлежности его максимальной величины к анализируемой выборке согласно методическим указаниям (Поцелуев и др., 1994). Аномально высокие значения заменялись на отвечающие требованиям их принадлежности к анализируемой выборке.

Оценка числовых характеристик содержаний химических элементов в пробах поверхностных вод, донных отложений, почв, коры лиственницы и лишайника (а также содержаний катионов, анионов, величин гидрогеохимических показателей для проб воды и значений МЭД гамма-излучения), к которым относятся арифметическое среднее, геометрическое среднее, медиана, мода, максимум, минимум, стандартное отклонение, стандартная ошибка, коэффициент вариации, асимметрия, стандартная ошибка асимметрии, эксцесс, стандартная ошибка эксцесса, выполнялась с помощью ПО Statistica 10.0 и Microsoft Excel. В качестве критерия соответствия эмпирического распределения оцениваемых показателей нормальному закону распределения использовано отношение показателей асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (Михальчук и др., 2014).

В качестве средних значений рассматриваемых параметров принимались средние арифметические значения (в случае, если для исследуемой выборки устанавливался нормальный закон распределения). Если для выборки устанавливался отличный от нормального закон распределения, в качестве средних значений использовались средние геометрические.

Также в рамках многомерного статистического анализа проводился расчет коэффициентов парной корреляции химических элементов и кластерный анализ для проб изучаемых компонентов природной среды.

3.4.2 Эколого-геохимическая обработка результатов исследований

3.4.2.1 Обработка результатов гидрогеохимических исследований поверхностных вод

Показателем уровня аномальности содержаний химических элементов в компонентах природной среды является кларк концентрации (Сагет и др., 1990). Для установления геохимических особенностей поверхностных вод рассчитывались кларки концентраций химических элементов по формуле 1:

$$КК_{\text{ВОДА}} = C_{\text{ВОДА}} / K_{\text{РЕЧ.ВОДА}} \quad (1)$$

где $C_{\text{ВОДА}}$ – средняя концентрация химического элемента в поверхностных водах из водотоков Вьюнского золоторудного поля, мг/л; $K_{\text{РЕЧ.ВОДА}}$ – кларк речных вод по А.П. Виноградову (Виноградов, 1967), мг/л.

Расчет $КК_{\text{ВОДА}}$ производился для 30 химических элементов (Li, B, Na, Mg, K, Al, Si, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Hg).

Наряду с анализом содержаний в поверхностных водах химических элементов проводился анализ распределения их ассоциаций на основе построения геохимического ряда элементов по убыванию кларков концентраций в водах.

Полученные средние содержания изучаемых компонентов в поверхностных водах водотоков сопоставлялись с литературными данными о среднем химическом составе речных вод (Livingstone, 1963; Turekian, 1969) и вод зоны гипергенеза (Шварцев, 1998).

Для исследованных водотоков на территории Вьюнского золоторудного поля была составлена формула М.Г. Курлова, которая учитывает анионный и катионный состав воды, а также некоторые гидрохимические показатели, и является стандартным видом записи информации о природной воде (Шварцев, 1996):

$$M \frac{A}{C} pH T \quad (2)$$

где М – минерализация, мг/л; А – анионы, содержащиеся в воде, расположенные в убывающем порядке по значению процент-эквивалента, мг-экв. % (процент-эквивалент вычислялся путём деления грамм-эквивалента вещества на сумму всех грамм-эквивалентов веществ смеси и умножением на 100%); С – катионы, содержащиеся в воде, расположенные в убывающем порядке по значению процент-эквивалента, мг-экв. % (процент-эквивалент вычислялся путём деления грамм-эквивалента вещества на сумму всех грамм-эквивалентов веществ смеси и умножением на 100%); рН – водородный показатель, ед.; Т – температура воды, °С.

Оценка эколого-гигиенических параметров поверхностных вод производилась на основе сравнения содержаний химических элементов в пробах воды со значениями ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, согласно СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (утверждён Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 28 января 2021 г.), а также с нормативами предельно допустимых концентраций для водных объектов рыбохозяйственного значения («Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016...»). Оценка производилась на основе формул 3–4:

$$K_{\text{хоз.-пит.}} = C_{\text{вода}} / \text{ПДК}_{\text{хоз.-пит.}} \quad (3)$$

где $C_{\text{вода}}$ – концентрация химического элемента в воде водотока, мг/л; $\text{ПДК}_{\text{хоз.-пит.}}$ – предельно-допустимая концентрация химического элемента в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, мг/л.

$$K_{\text{рыбхоз.}} = C_{\text{вода}} / \text{ПДК}_{\text{рыбхоз.}} \quad (4)$$

где $C_{\text{вода}}$ – концентрация химического элемента в воде водотока, мг/л; $\text{ПДК}_{\text{рыбхоз.}}$ – предельно-допустимая концентрация химического элемента в воде водных объектов рыбохозяйственного значения, мг/л.

Расчет $K_{\text{ХОЗ.-ПИТ.}}$ производился для Li, B, Na, Mg, Al, Si, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Sb, I, Ba, Hg. Также соответствие поверхностных вод нормативам качества, установленным для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, оценивалось по таким параметрам, как водородный показатель (рН), химическое потребление кислорода (ХПК), концентрация сульфат-иона (SO_4^{2-}), взвешенных веществ (ВВ) и нитрат-иона (NO_3^-).

Расчет $K_{\text{РЫБХОЗ.}}$ производился для Li, B, Na, Al, K, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, I, Cs, Ba, Hg. Кроме того, соответствие поверхностных вод нормативам качества водных объектов рыбохозяйственного значения оценивалось по концентрациям сульфат-иона (SO_4^{2-}), катионов кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}), взвешенных веществ (ВВ), иона аммония (NH_4^+) и нитрат-иона (NO_3^-).

Графическая интерпретация данных гидрогеохимических исследований поверхностных вод (построение карт-схем, графиков) проводилась с использованием ПО CorelDRAW X7.

3.4.2.2 Обработка результатов гидролитогеохимических исследований донных отложений

В рамках проведения гидролитогеохимических исследований территории Вьюнского золоторудного поля рассчитывались кларки концентраций химических элементов относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003) по формуле 5:

$$KK_{\text{ДО}} = C_{\text{ДО}} / K_{\text{ЗК}} \quad (5)$$

где $C_{\text{ДО}}$ – средняя концентрация химического элемента в донных отложениях из водотоков Вьюнского золоторудного поля, мг/кг; $K_{\text{ЗК}}$ – кларк верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003), мг/кг.

Расчет $KK_{\text{ДО}}$ производился для 53 химических элементов (Be, Mg, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Au, Hg, Tl,

Pb, Bi, Th, U). На основе рассчитанных кларков концентраций химических элементов строились геохимические ряды.

На данный момент в России не установлены нормативы ПДК химических элементов для донных отложений. В связи с этим в практике проведения эколого-геохимических исследований количественные характеристики качества донных отложений проводят с использованием ПДК либо для вод, либо для почв. При этом чаще используются ПДК для почв, как более схожих по генезису с донными отложениями.

Сравнение содержаний химических элементов в пробах донных отложений из водотоков территории Выюнского золоторудного поля с нормативами предельно допустимых концентраций химических элементов в почвах согласно СанПиН 1.2.3685-21 проводилось на основе расчета коэффициента $K_{\text{до_пдк}}$. Сравнение проводилось по формуле 6:

$$K_{\text{до_пдк}} = C_{\text{до}} / C_{\text{пдк почва}} \quad (6)$$

где $C_{\text{до}}$ – концентрация химического элемента в донных отложениях, мг/кг;
 $C_{\text{пдк почва}}$ – валовая предельно допустимая концентрация химического элемента в почвах, мг/кг.

Для Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb было проведено сравнение полученных концентраций с региональным нормативом оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах г. Санкт-Петербурга («Нормы и критерии оценки загрязнённости...», 1996).

Коэффициент донной аккумуляции (КДА) химических элементов рассчитывался по формуле 7:

$$\text{КДА} = C_{\text{до}} / C_{\text{вода}} \quad (7)$$

где $C_{\text{до}}$ – концентрация химического элемента в донных отложениях, мг/кг;
 $C_{\text{вода}}$ – концентрация химического элемента в воде водотока, мг/дм³.

Расчет КДА проведен для Mg, Mn, Fe, Sr, Y, Cs, Ba, Ce, Nd, Gd и Hg.

Графическая интерпретация данных гидролитогеохимических исследований донных отложений водотоков (построение карт-схем, графиков) проводилась с использованием ПО CorelDRAW X7 и Surfer.

3.4.2.3 Обработка результатов литогеохимических исследований почв

В целях выявления аномальности содержаний химических элементов в пробах почв с территории Вьюнского золоторудного поля, рассчитывались кларки концентраций относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003) (формула 8):

$$КК_{\text{ПОЧВА}} = C_{\text{ПОЧВА}} / K_{\text{ЗК}} \quad (8)$$

где $C_{\text{ПОЧВА}}$ – средняя концентрация химического элемента в почвах Вьюнского золоторудного поля, мг/кг; $K_{\text{ЗК}}$ – кларк верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003), мг/кг.

Расчет $КК_{\text{ПОЧВА}}$ производился для 53 химических элементов (Be, Mg, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U). На основе рассчитанных кларков концентраций химических элементов строились геохимические ряды.

Оценка эколого-гигиенических параметров производилась на основе сравнения содержаний химических элементов в пробах почв со значениями ПДК для почв согласно СанПиН 1.2.3685-21. Сравнение проводилось по формуле 9:

$$K_{\text{ПОЧВА ПДК}} = C_{\text{ПОЧВА}} / C_{\text{ПДК ПОЧВА}} \quad (9)$$

где $C_{\text{ПОЧВА}}$ – концентрация химического элемента в почвах, мг/кг; $C_{\text{ПДК ПОЧВ}}$ – валовая предельно допустимая концентрация химического элемента в почвах, мг/кг.

Графическая интерпретация данных литогеохимических исследований почв (построение карт-схем, графиков) проводилась с использованием ПО CorelDRAW X7 и Surfer.

3.4.2.4 Обработка результатов биогеохимических исследований коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*)

Геохимическая специализация коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) выявлялась путём расчёта кларков концентраций относительно среднего состава референтного растения (Markert, 1992). Расчёт производился по формулам 10–11:

$$KK_{PP_КОРА} = C_{КОРА} / K_{PP} \quad (10)$$

$$KK_{PP_ЛИШАЙНИК} = C_{ЛИШАЙНИК} / K_{PP} \quad (11)$$

где $C_{КОРА}$, $C_{ЛИШАЙНИК}$ – средняя концентрация химического элемента в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) и лишайника (*Cladonia rangiferina*), мг/кг; K_{PP} – средняя концентрация химического элемента в сухом веществе референтного растения (Markert, 1992), мг/кг.

Расчет $KK_{PP_КОРА}$ и $KK_{PP_ЛИШАЙНИК}$ производился для 63 химических элементов (Li, Be, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U). На основе рассчитанных кларков концентраций химических элементов строились геохимические ряды.

Для графической интерпретации данных биогеохимических исследований (построение карт-схем, графиков) использовалось ПО CorelDRAW X7 и Surfer.

ГЛАВА 4: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИЗ ВОДОТОКОВ

4.1 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения поверхностных вод

Средние значения величин гидрохимических показателей в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн приведены в таблице 18. Поверхностные воды рудного поля в пределах влияния оруденения (территория месторождения Вьюн) характеризуются более высоким средним содержанием сульфат-иона по сравнению с водотоками вне месторождения, в которых преобладает гидрокарбонат-ион.

Таблица 18 – Средние значения величин гидрохимических показателей в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн

Вьюнское золоторудное поле (32 пробы)						
Показатели	Единицы измерения	Значение	Показатели	Единицы 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	
Месторождение Вьюн (13 проб)						
Показатели		Единицы измерения	Значение	Показатели	Единицы измерения	Значение
pH	единицы pH	7,1±0,1	SO ₄ ²⁻	мг/л	7,7±1,1	
ОЖ	ммоль-экв./л.	0,57±0,06	Cl ⁻		0,56±0,06	
Эл-ть	мСм/см	0,05±0,003	NO ₂ ⁻		<0,02	
Ca ²⁺	мг/л	6,9±0,7	NO ₃ ⁻		0,65±0,06	
Mg ²⁺		2,7±0,3	F ⁻		<0,15	
NH ₄ ⁺		0,36±0,08	PO ₄ ³⁻		<0,05	
CO ₂		4,9±0,3	Мин.		32±4	
CO ₃ ⁻		<3	ХПК		16±2	
HCO ₃ ⁻		15±3	ВВ		2,0±0,4	

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.

Оценки числовых характеристик гидрохимических показателей в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Оценки числовых характеристик гидрохимических показателей в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 32)

Показатель	Единицы измерения	Среднее содержание	Мин.	Макс.	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
рН	единицы рН	7,3	6,2	7,9	0,15	5
ОЖ	ммоль-экв./л.	0,63	0,18	0,9	0,04	31
Эл-ть	мСм/см	0,05	0,027	0,072	0,0001	24
Ca ²⁺	мг/л	8,6	2,0	15	6,9	38
Mg ²⁺		2,4	0,7	4,4	1,1	40
NH ₄ ⁺		0,08	0,03	0,92	0,07	127
CO ₂		4,7	3,5	7,0	1,1	21
HCO ₃ ⁻		24	3,5	42	122	49
SO ₄ ²⁻		6,1	1,0	15,7	16	41
Cl ⁻		0,27	0,2	0,75	0,05	40
NO ₃ ⁻		0,71	0,26	1,3	0,04	39
Мин.		42	11	63	215	36
ХПК		15	3,5	30	46	46
ВВ		5,9	0,3	51	2,5	190

Примечания: 1) ОЖ – общая жесткость; 2) Мин. – минерализация; 3) ХПК – химическое потребление кислорода; 4) Эл-ть – электропроводность; 5) ВВ – взвешенные вещества.

Оценка средних значений изучаемых показателей и компонентов проведена с учетом соответствия характера распределения эмпирических величин концентраций и значений законам нормального математического распределения. Для показателей и компонентов, для которых нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном характере распределения их величин (отношения асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам не превышают $|3,0|$ единиц (Михальчук и др.,

2014), в качестве оценки средних значений приняты средние арифметические значения по выборке. В случае выявления отличного от нормального характера распределения, за средние принимались средние геометрические значения.

В ходе статистической обработки данных выявлено, что наименьшей вариативностью в поверхностных водах месторождения Вьюн характеризуются показатели рН и электропроводность, а также величины содержаний Si, Ba, CO₂. Повышенные значения коэффициента вариации (36–49%) в пробах воды из водотоков характерны для ХПК, минерализации и концентраций некоторых ионов (Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺). Наиболее неравномерно распределены содержания Li, Mn, Fe, Co, Ni, Hg. Разброс содержаний изучаемых компонентов иллюстрирует диаграмма размаха, представленная на рисунке 28.

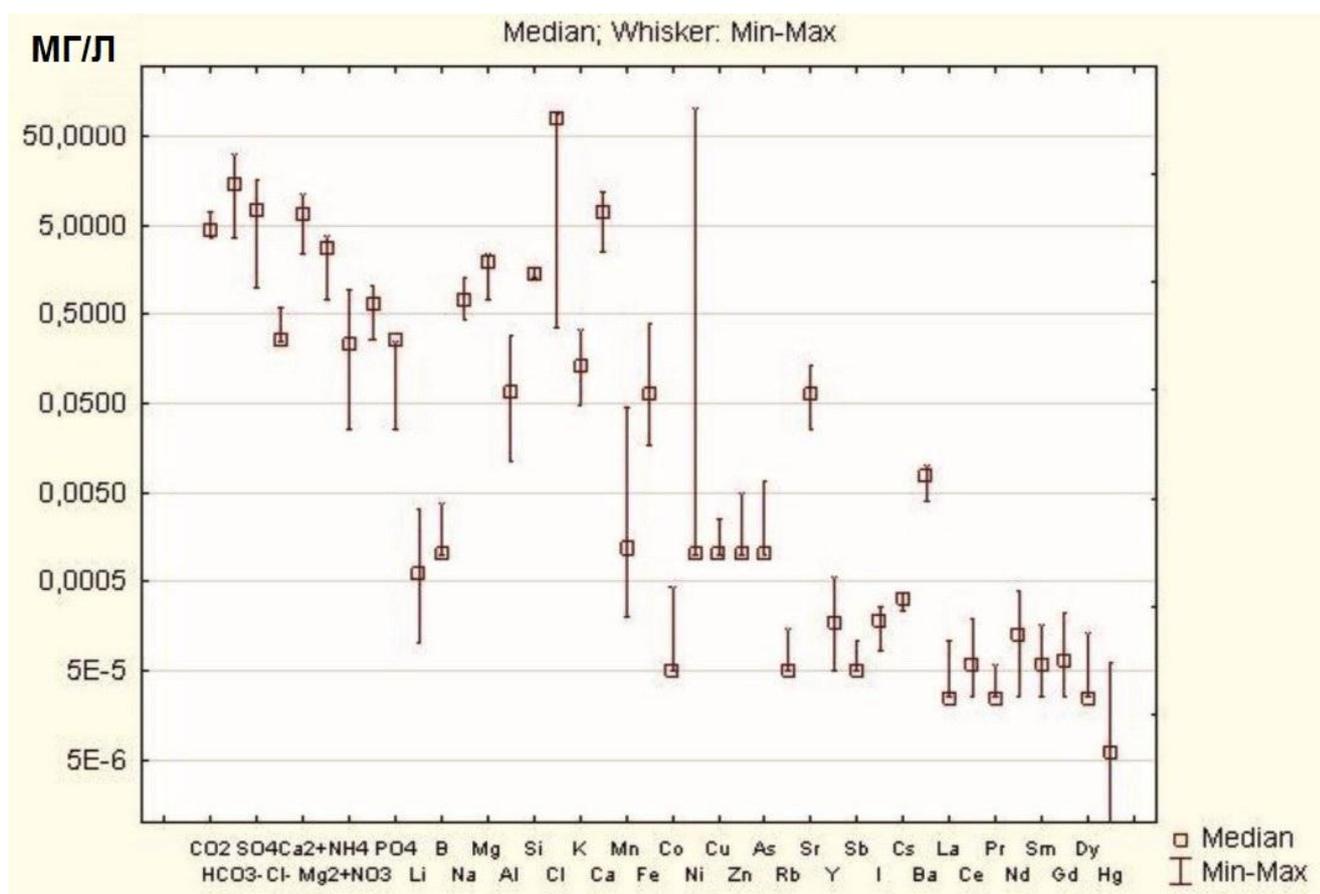


Рисунок 28 – Диаграмма размаха содержаний изучаемых компонентов в поверхностных водах месторождения Вьюн (количество проб – 13)

Водотоком, в водах которого установлено наибольшее количество превышений средних значений гидрохимических характеристик для поверхностных вод месторождения, является правый приток ручья Вьюн (повышено ХПК, содержания SO_4^{2-} и NH_4^+). Для поверхностных вод месторождения установлено, что величины ХПК меняются согласованно с изменением содержаний нитритов и ионов аммония, что обусловлено расходом кислорода на процессы трансформации NO_2^- – наименее стойкой формы нахождения азота в природных водах.

По значению водородного показателя поверхностные воды рудного поля являются преимущественно нейтральными со значением рН около 7,0 (исключение составляют слабокислые воды правого притока ручья Вьюн с рН 6,4, правого притока реки Бурганджа с рН 6,5 и ручья над штольней с рН 6,1), характеризуются как ультрапресные и очень мягкие.

Воды в исследованных водотоках относятся к нескольким химическим типам: сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (ручей Вьюн), сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые-магниевые (правый приток реки Бурганджа, ручей над штольней) сульфатные магниевые-кальциевые (правый приток ручья Вьюн), гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (левый приток ручья Вьюн, река Бурганджа), гидрокарбонатные кальциевые (левый приток №3 реки Бурганджа). Вода из пробы льда штольни характеризуется как сульфатно-гидрокарбонатная кальциевая-магниевая. Различие выявленных типов вод заключается в небольшой разнице во взаимозамещении анионов HCO_3^- и SO_4^{2-} , а также в вариабельности соотношений катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} . В таблице 20 представлены характеристики поверхностных вод Вьюнского золоторудного поля, выраженные с помощью формулы Курлова, которая учитывает анионный и катионный состав, некоторые гидрохимические показатели и является стандартным видом записи информации о природной воде (Шварцев, 1996).

Таблица 20 – Характеристики поверхностных вод Вьюнского золоторудного поля по гидрохимическим показателям

Водоток	Кол-во проб	Формула Курлова/Характеристика воды
Река Бурганджа (вне месторождения Вьюн)	10	$M53 \frac{HCO_3 76 SO_4 23}{Ca 64 Mg 30} pH 7,5 T 8,2$
		Ультрапресная, гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная
Правый приток реки Бурганджа (вне месторождения Вьюн)	2	$M21 \frac{HCO_3 63 SO_4 35}{Mg 50 Ca 41} pH 6,5 T 5,3$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная кальциевно-магниевая, слабо кислая, очень мягкая, умеренно холодная
Левый приток №3 реки Бурганджа (вне месторождения Вьюн)	2	$M48 \frac{HCO_3 76 SO_4 24}{Ca 71 Mg 24} pH 7,1 T 6,3$
		Ультрапресная, гидрокарбонатная кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная
Ручей Вьюн (месторождение Вьюн)	6	$M30 \frac{HCO_3 57 SO_4 43}{Ca 56 Mg 38} pH 7,2 T 5,0$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная
Правый приток ручья Вьюн (месторождение Вьюн)	2	$M29 \frac{SO_4 80 HCO_3 20}{Ca 58 Mg 39} pH 6,4 T 2,7$
		Ультрапресная, сульфатная магниевно-кальциевая, слабо кислая, очень мягкая, весьма холодная
Левый приток ручья Вьюн (месторождение Вьюн)	2	$M12 \frac{HCO_3 77 SO_4 23}{Ca 59 Mg 29 (Na+K) 12} pH 7,0 T 4,0$
		Ультрапресная, гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная
Ручей над штольней (месторождение Вьюн)	1	$M15 \frac{HCO_3 64 SO_4 33}{Mg 49 Ca 49} pH 6,1 T 3,0$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная кальциевно-магниевая, слабо кислая, очень мягкая, весьма холодная
Лёд из штольни (месторождение Вьюн)	1	$M135 \frac{HCO_3 74 SO_4 25}{Mg 56 Ca 41} pH 7,3 T < 0,0$
		Пресная, сульфатно-гидрокарбонатная кальциевно-магниевая, нейтральная, мягкая, весьма/исключительно холодная
Общее для Вьюнского золоторудного поля	34	$M44 \frac{HCO_3 69 SO_4 30}{Ca 62 Mg 32} pH 7,2 T 6,3$
		Ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная магниевно-кальциевая, нейтральная, очень мягкая, умеренно холодная

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

Повышение балансовой доли SO_4^{2-} в поверхностных водах обусловлено их контактом с участками сульфидной минерализации (зона локализации оруденения, штольни), для которых характерна окислительная обстановка. Кроме того, увеличению доли сульфатов в солевом составе рек и ручьёв способствует разгрузка подмерзлотных вод в долинах водотоков (Макаров, 2008).

Также химический состав поверхностных вод зависит от поступления растворимых веществ из атмосферы. Для Верхнеиндигирского золотоносного района Якутии характерна средняя минерализация осадков 15 мг/л. Их вклад в привнос солей в поверхностные воды достигает 50% (Макаров, 2008).

Полученные средние содержания ионов и значений гидрохимических показателей были сопоставлены с данными М.И. Ксенофоновой (Ксенофопова, 2018) о региональных фоновых гидрохимических параметрах бассейна реки Яна, к которому относится речная сеть района исследований. Фоновые данные были получены сотрудниками Северо-Восточного федерального университета в ходе комплексных экологических исследований 2015–2017 гг. Выявлено, что величина минерализации, а также рН и общая жёсткость имеют близкие к полученным значения. Содержания Ca^{2+} (6,93 мг/л), Mg^{2+} (2,68 мг/л), HCO_3^- (15,4 мг/л) для опробованных водотоков выше, чем региональные фоновые (4,0, 1,7 и 6,7 мг/л соответственно), в то время как фоновые содержания взвешенных веществ (42,2 мг/л), а также SO_4^{2-} (15,5 мг/л) существенно превышают полученные средние содержания данных компонентов в исследованных водотоках (1,99 и 7,69 мг/л соответственно). Причиной этому может служить интенсивное поступление минерального вещества в реку Яна и её притоки в ходе горнодобычных работ.

Средние содержания химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля приведены в таблице 21. Оценки числовых характеристик содержаний элементов приведены в таблице 22.

Таблица 21 – Средние содержания химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 32)

Элемент	Единицы измерения	Содержание	Элемент	Единицы измерения	Содержание
Na	мг/л	0,87±0,05	Rb	мкг/л	0,1±0,01
Mg		1,6±0,1	Sr		87±6
Si		1,4±0,04	Y		0,11±0,02
K		0,22±0,02	Sb		0,05±0,003
Ca		8,9±0,6	I		0,14±0,02
Li	мкг/л	0,34±0,12	Cs		0,37±0,03
B		1,1±0,1	Ba		8,7±0,5
Al		36±13	La		0,04±0,01
Mn		0,7±0,4	Ce		0,04±0,03
Fe		30±20	Pr		0,03±0,003
Co		0,06±0,02	Nd		0,07±0,02
Ni		1,1±0,1	Sm		0,04±0,01
Cu		1,1±0,1	Gd		0,04±0,01
Zn		1,1±0,2	Dy		0,03±0,004
As		1,2±0,2	Hg		0,022±0,004
Количество проб					32

Примечания: содержания Be, P, Sc, Ti, V, Cr, Ga, Ge, Se, Br, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Eu, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U ниже аналитического предела обнаружения. Среднее значение ± стандартная ошибка. Аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов, превышающие кларк речных вод по А.П. Виноградову (Виноградов, 1967).

Таблица 22 – Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 32)

Элемент	Единицы измерения	Среднее содержание	Мин.	Макс.	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
Na	мг/л	0,87	0,44	1,3	0,1	32
Mg		1,6	0,74	2,8	0,3	29
Si		1,4	0,86	1,9	0,01	16
K		0,22	0,05	0,45	9638	44
Ca		8,9	2,5	14	8,9	37
Fe	мкг/л	30	0,4	500	14693	167
As		1,2	1,0	6,5	5,7	91
Rb		0,1	0,05	0,4	0,003	70
Sr		87	24	150	991	39
Sb		0,05	0,03	0,11	0,002	30

Продолжение таблицы 22

Cs		0,37	0,23	1,1	0,002	45
Pr		0,03	0,01	0,11	0,0005	56
Nd		0,07	0,03	0,41	0,01	98
Sm		0,04	0,02	0,16	0,003	78
Gd		0,04	0,02	0,22	0,005	86
Dy		0,03	0,01	0,13	0,002	76
Hg		0,022	0,003	0,062	0,0005	81

Средние содержания химических элементов в поверхностных водах месторождения Вьюн приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Средние содержания химических элементов в поверхностных водах месторождения Вьюн (количество проб – 13)

Элемент	Единицы измерения	Содержание	Элемент	Единицы измерения	Содержание
Na	мг/л	0,79±0,09	Rb	мкг/л	0,02±0,005
Mg		1,75±0,15	Sr		72±9
Si		1,4±0,03	Y		0,2±0,05
K		0,17±0,04	Sb		0,02±0,007
Ca		7,3±0,8	I		0,18±0,01
Li	мкг/л	0,89±0,27	Cs		0,31±0,01
B		0,35±0,08	Ba		7,6±0,5
Al		84±22	La		0,01±0,004
Mn		6,9±4,1	Ce		0,06±0,01
Fe		96±34	Pr		0,01±0,006
Co		0,06±0,01	Nd	0,15±0,03	
Ni		0,64±0,13	Sm	0,05±0,01	
Cu		0,37±0,08	Gd	0,07±0,01	
Zn		0,69±0,11	Dy	0,02±0,006	
As		1,5±0,7	Hg	0,02±0,006	
Количество проб					13

Примечания: содержания Be, P, Sc, Ti, V, Cr, Ga, Ge, Se, Br, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Eu, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U ниже аналитического предела обнаружения. Среднее значение ± стандартная ошибка. Аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов, превышающие кларк речных вод по А.П. Виноградову (Виноградов, 1967).

Графически средние содержания химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн, а также содержания элементов в пробе льда из штольни показаны на рисунке 29.

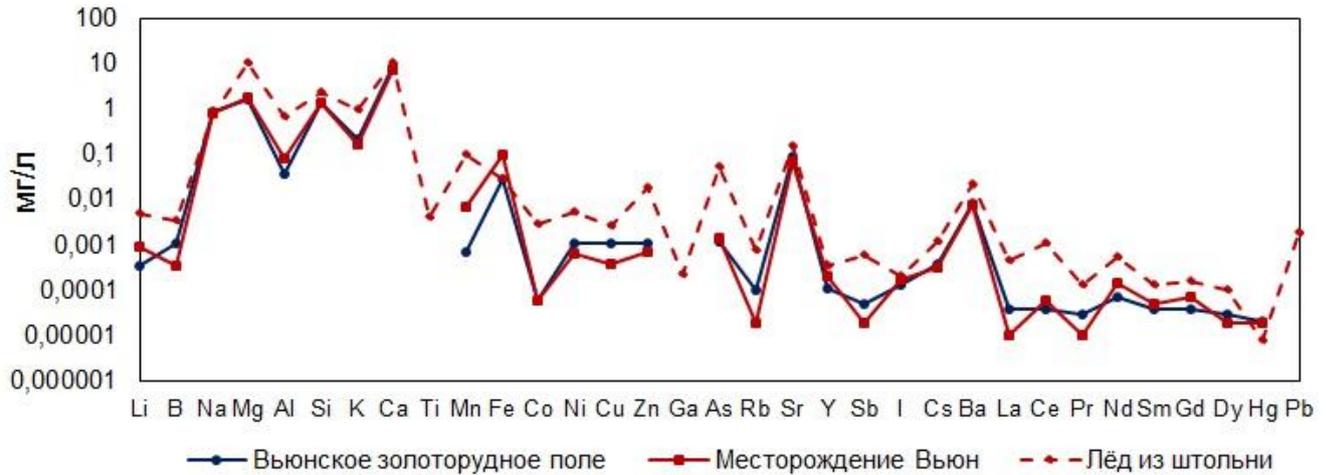


Рисунок 29 – Средние содержания химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля, месторождения Вьюн и пробе льда из штольни, мг/л (шкала логарифмическая)

Проба льда из штольни характеризуется большими в сравнении со средними по водотокам рудного поля и месторождения содержаниями сульфат-иона (21,8 мг/л против 6,11 и 7,69 мг/л соответственно), что может быть обусловлено влиянием сульфидной минерализации. Также в пробе льда установлено присутствие фосфат-иона в концентрации 0,85 мг/л, тогда как в пробах из водотоков данный компонент не обнаружен. Выделяются высокая минерализация (134,8 мг/л) и содержание взвешенных веществ (35 мг/л). Кроме того, в пробе льда из штольни зафиксированы повышенные по сравнению со средними из водотоков рудного поля содержания Cu (0,0026 и 0,00037 мг/л) As (0,051 и 0,0012 мг/л), Sb (0,00062 и 0,00005 мг/л), Pb (0,0019 мг/л, а в водотоках рудного поля – ниже предела обнаружения), что свидетельствует о влиянии фактора рудной минерализации, представленной халькопиритом, арсенопиритом, галенитом и другими минералами, на формирование химического состава воды из штольни.

Химический состав поверхностных вод исследуемой территории находится в прямой зависимости от вещественного состава дренируемых пород, характера атмосферных осадков, особенностей оттаивающих льдов, а в тёплый период года – от надмерзлотных вод сезонно-талого слоя (СТС) (Протопопов и др., 2009). Другим важным природным фактором формирования химического состава природных вод на исследуемой территории является оруденение, в связи с чем актуально проведение детальных гидрогеохимических работ, направленных на поиски золоторудной минерализации, ореолов и потоков рассеяния рудных тел для данной территории. Такого рода работам уделяли и уделяют большое внимание как в России (Савичев, 2019), так и за рубежом (Robertson, 2001; Noble et al., 2010).

Схема расположения пунктов отбора проб поверхностных вод из водотоков месторождения Вьюн с указанием их номеров согласно направлению течения показана на рисунке 30. Особенностью вод ручья Вьюн являются повышенные концентрации As, В, Sb и Hg, правого притока ручья Вьюн – Co, Zn, Ni, Cu, Pb, Sb, Ва и некоторых РЗЭ (Dy, La, Eu, Pr), левого притока ручья Вьюн – Si. Кроме того, по результатам опробования водотоков установлен факт значительного увеличения концентраций специфичных для рудной минерализации месторождения химических элементов в воде ручья Вьюн ниже по течению от рудной зоны, вскрытой штольнями. Так, концентрации As ниже рудной зоны возрастают в 4,7 раз (рисунок 31 а), Hg – в 4 раза (рисунок 31 б). Увеличение содержаний As, Hg и других элементов в водах ручья Вьюн (ниже рудной зоны) и его притоков обусловлено влиянием проведённых в пределах рудной зоны геологоразведочных работ (проходка штолен и организация отвалов горных пород на водосборных территориях ручья Вьюн и его притоков).

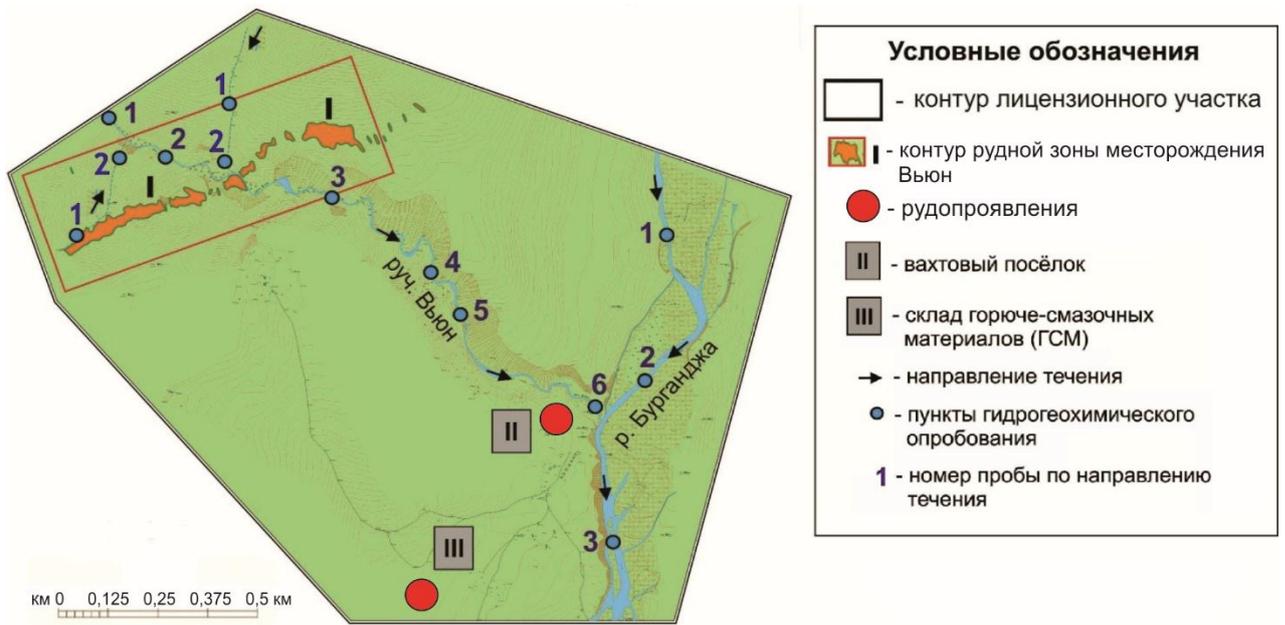


Рисунок 30 – Схема расположения пунктов отбора проб поверхностных вод в центральной части Вьюнского золоторудного поля (месторождение Вьюн) с контуром рудной зоны, вскрытой штольнями, и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2)

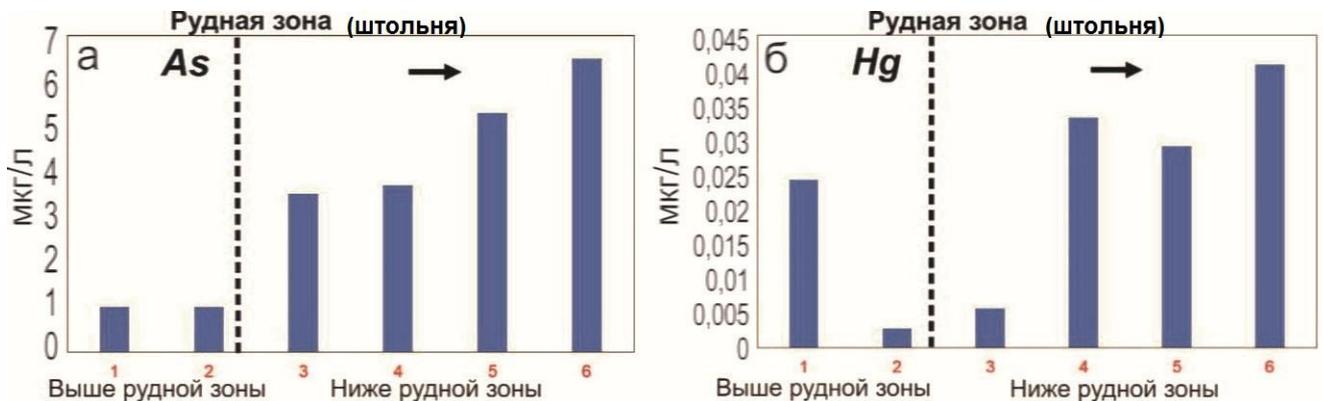


Рисунок 31 – Содержание As (а) и Hg (б) в воде ручья Вьюн относительно рудной зоны, вскрытой штольнями (мкг/л)

Примечания: цифрами показаны пункты пробоотбора согласно направлению течения. Направление течения обозначено стрелкой.

Концентрации Hg увеличиваются и в воде реки Бургаджа ниже устья ручья Вьюн (рисунок 32), что может свидетельствовать о влиянии геохимической специфики вод ручья Вьюн на химический состав вод реки Бургаджа.

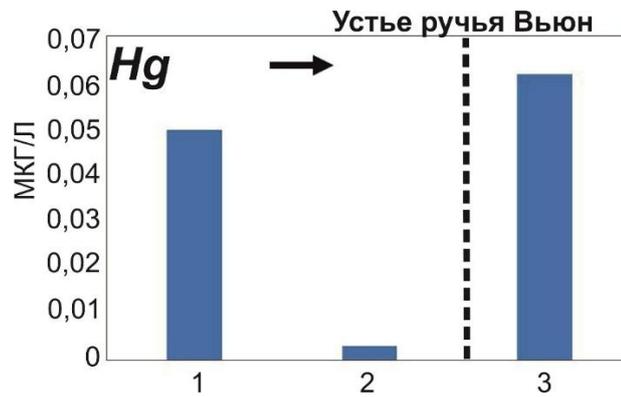


Рисунок 32 – Содержание Hg в воде реки Бурганджа, мкг/л

По результатам расчетов кларков концентраций химических элементов в поверхностных водах золоторудного месторождения Вьюн относительно среднего состава речных вод (Виноградов, 1967) выделяется гидрогеохимическая ассоциация, включающая в себя РЗЭ (Gd, Sm, Dy, Nd, Pr), а также Cs, Fe и Sr. Среди РЗЭ, преобладают имеющие чётные номера в Периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева (Gd, Sm, Dy, Nd), в то время как уровни содержаний РЗЭ под нечётными номерами (Eu, Tb, Ho, Tm, Lu) в исследованных пробах воды находятся ниже предела обнаружения, что является отображением геохимического закона Оддо–Гаркинса. При этом наибольшая средняя концентрация установлена для Nd (0,15 мг/л), а наибольшее превышение кларковых значений – для Gd (кларк концентрации 9,1 ед.).

Отдельные геохимические ассоциации ручья Вьюн, его притоков и реки Бурганджа значительно схожи между собой и отражают закономерности общей гидрогеохимической специализации водотоков, протекающих на территории месторождения, однако помимо перечисленных химических элементов, формирующих общую гидрогеохимическую специализацию поверхностных вод месторождения Вьюн, для ручья Вьюн выделяется индивидуальная гидрогеохимическая ассоциация As–Fe, а для правого притока ручья Вьюн Fe–Mn–Ce–La–Ni–Al. Необходимо отметить, что данные водотоки дренируют рудную зону и частично несут черты химического состава руд месторождения, в котором присутствуют такие компоненты, как Fe и As.

На данный момент вопрос распространённости и поведения РЗЭ в природных поверхностных водах освещён довольно широко (Харитонов и др., 2015; Biddau et al., 2002; Shannon et al., 2005; Andersson et al., 2006; Leybourne et al., 2008; Ferreira da Silva et al., 2009), при этом мало затрагивается проблема поведения РЗЭ в водах территорий распространения многолетнемерзлых пород (Bagard et al., 2011; Laukert et al., 2017).

В настоящее время известны три главных источника поступления РЗЭ в природные воды – атмосферные осадки, почвенно-растительный слой и вмещающие горные породы.

Согласно опубликованным работам (Martin et al., 1979; Viers et al., 2009), главными факторами, определяющими характеристики распределения и величину содержаний редких земель в донных осадках и поверхностных водотоках, являются состав исходных горных пород на территориях водосбора, процессы выветривания и почвообразования (Харитонов и др., 2015).

Стоит отметить, что по ходу параллельно проведённых исследований в составе проб литогенных образований рудного поля были обнаружены фосфаты РЗЭ, предположительно монацит и ксенотим, которые являются главнейшими минералами редких земель. Данный факт коррелирует с известными данными, представленными выше.

Не менее важную роль в распространённости редких земель в поверхностных водах, вероятно, играет гидрокарбонат-ион, определяющий состав вод зоны гипергенеза и образующий комплексы с редкоземельными металлами.

Совместное присутствие в ассоциации РЗЭ и железа может быть обусловлено наличием в воде тонкодисперсных гидроксидов Fe, представляющих собой активный сорбент (Харитонов и др., 2015). Способность к комплексообразованию с такого рода сорбентами, а также с глинистыми частицами и органическим веществом, согласно экспериментальным данным (Duddy, 1980), убывает в ряду от лёгких РЗЭ к тяжёлым и определяет подвижность лантаноидов в природных

процессах (Харитонов и др., 2015). Более наглядно корреляция Fe и редких земель показана ниже.

В целом, касаясь вопроса миграции РЗЭ в поверхностных водах, в том числе в районах с многолетней мерзлотой и ультрапресными природными водами, распространёнными на исследуемой территории, ряд учёных отмечают особую роль органических веществ, которые участвуют в переносе РЗЭ (Davranche et al., 2008; Ronnback et al., 2008).

Природа высоких концентраций Cs в поверхностных водах исследуемой территории требует дополнительного изучения. Как известно, природный цезий является моноизотопным элементом и состоит из одного стабильного изотопа Cs^{133} . Остальные же изотопы Cs с массовыми числами от 112 до 151 радиоактивны и имеют техногенное происхождение. Некоторые из них являются значимыми загрязнителями окружающей среды при радиационных авариях или ядерных взрывах. Главным образом это Cs^{137} с периодом полураспада около 30 лет и Cs^{135} с периодом полураспада более 2 млн лет (Meija et al., 2016). Цезий является химическим аналогом калия (Платонова и др., 2019), что ведёт к его интенсивной аккумуляции растениями, попаданию в пищевые цепи и тем самым обуславливает опасность для природной среды и человека.

Опасен и радиоактивный стронций, представляющий собой химический аналог кальция (Платонова и др., 2019). Выделяются четыре природных стабильных изотопа данного химического элемента: Sr^{84} (изотопная распространённость составляет 0,56 %); Sr^{86} (9,86 %); Sr^{87} (7 %); Sr^{88} (82,58 %) (Meija et al., 2016). Содержания Sr в исследованных водотоках находятся по большей части на околочларковых уровнях, за исключением вод реки Бурганджа (кларк концентрации Sr составляет 2,4 ед.). С большой долей уверенности можно утверждать о распространённости в водотоках месторождения Вьюн именно природных изотопов Cs и Sr, т.к. в районе работ и на прилегающих к нему территориях отсутствуют объекты ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), а ядерные взрывы в данной части Республики Саха (Якутия) не проводились.

Полученные средние содержания изучаемых компонентов в водотоках исследуемой территории и в пробе льда из штольни были сопоставлены с литературными данными о среднем химическом составе речных вод (Виноградов, 1967; Livingstone, 1963; Turekian, 1969) и вод зоны гипергенеза (Шварцев, 1998). Результаты сопоставления отражены на графике (рисунок 33).

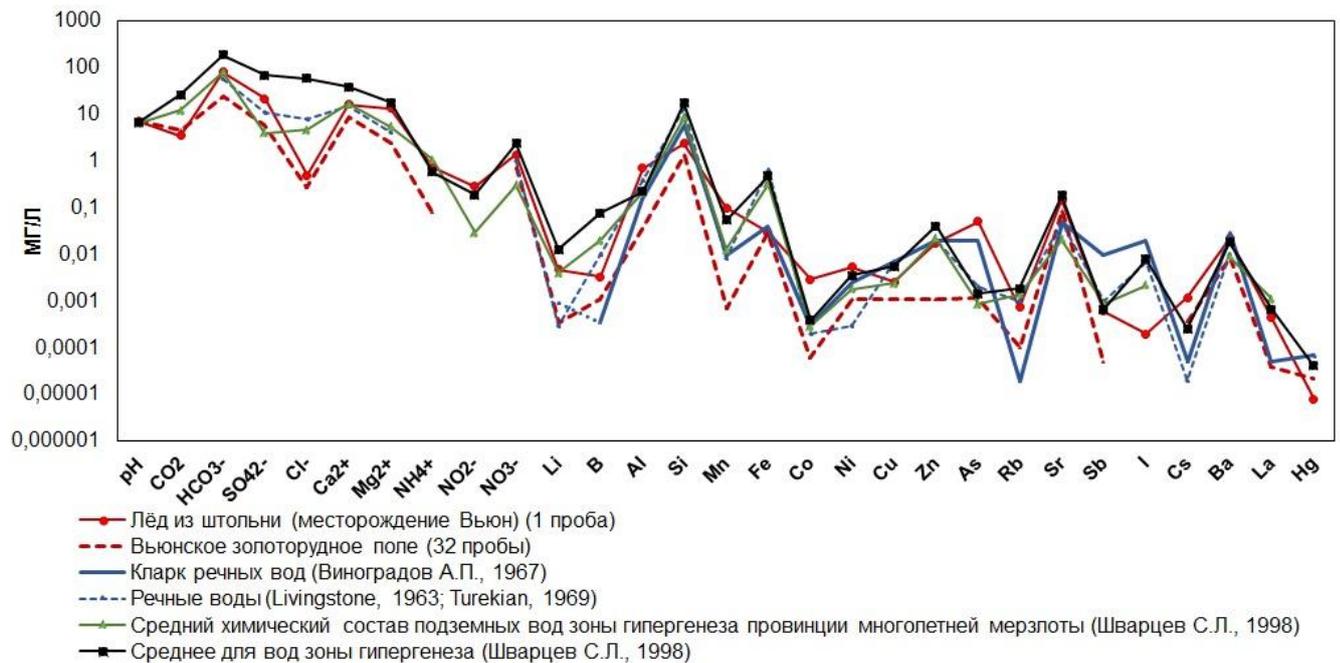


Рисунок 33 – График сопоставления средних содержаний изучаемых компонентов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля и пробе льда из штольни месторождения Вьюн с литературными данными о среднем химическом составе речных вод (Виноградов, 1967; Livingstone, 1963; Turekian, 1969) и вод зоны гипергенеза (Шварцев, 1998), мг/л (шкала логарифмическая)

Среднее содержание As, одного из спутников малосульфидного золотокварцевого 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 обусловлено интенсивным контактом поверхностных вод с зоной сульфидизации.

В пробе льда из штольни установлены более высокие концентрации As, Mn, Co, Ni относительно литературных данных. Особенно в пробе льда выделяется содержание As (0,051 мг/л), которое превышает как литературные значения (в 0,6–10 раз), так и среднее содержание в поверхностных водах рудного поля (в 43 раза), что также отражает природную геохимическую специфику месторождения.

Кластеризация данных гидрогеохимического состава поверхностных вод месторождения Вьюн (рисунок 34) позволила выявить взаимосвязи между изучаемыми компонентами.

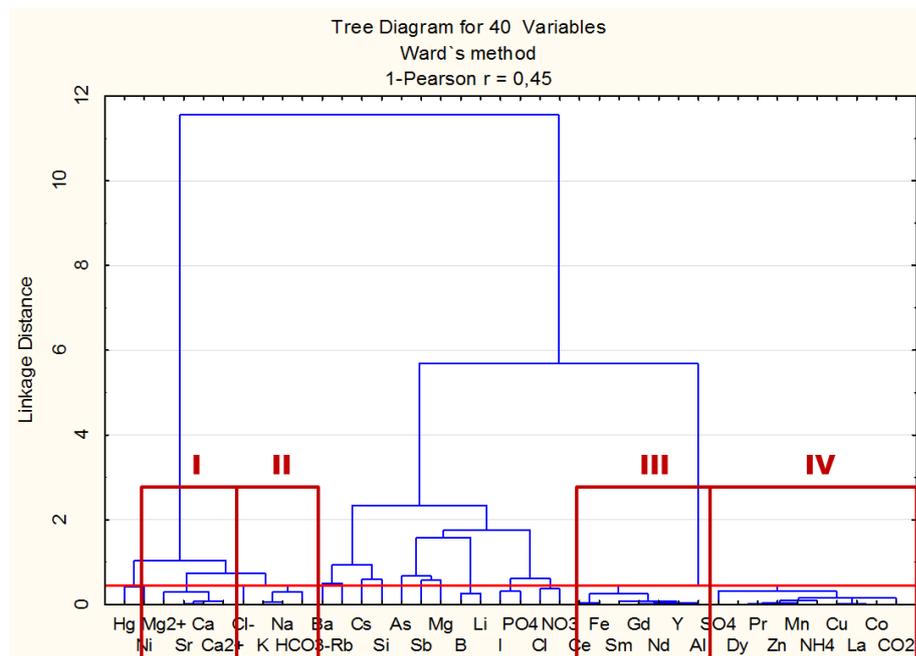


Рисунок 34 – Дендрограмма матрицы корреляционных связей гидрогеохимического состава поверхностных вод месторождения Вьюн (количество проб – 13; $1-r_{0,05} = 0,45$)

Выделяется несколько кластеров химических элементов. Первые два кластера образуют макроэлементы: Mg^{2+} , Sr, Ca, Ca^{2+} и Cl^- , K, Na, а также гидрокарбонат-ион, определяющий исходный тип природных вод месторождения. Третий, наиболее выделяющийся, кластер формируют Fe, Al и РЗЭ (Ce, Sm, Gd, Nd, Y). В четвёртый кластер объединены сульфат-ион (индикатор контакта вод с зоной сульфидизации), халькофильные элементы (Zn, Cu), Mn, Co, некоторые РЗЭ (Dy, Pr, La), что обуславливает выделенную ранее гидрогеохимическую специализацию

природных вод месторождения, а также NH_4^+ и CO_2 . Третий и четвёртый кластеры отражают черты геохимической специализации водотоков месторождения.

Выделенные кластеры химических элементов и веществ в составе поверхностных вод на территории золоторудного месторождения Вьюн отражают парные коэффициенты корреляции. Так, например, значимые положительные корреляции установлены между содержаниями SO_4^{2-} и Zn (0,86), Cu (0,86), Dy (0,86), Mn (0,84), Co (0,81).

Для оценки эколого-гигиенических параметров поверхностных вод Вьюнского золоторудного поля, полученные значения изучаемых компонентов и показателей были сопоставлены с нормативами ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (СанПин 1.2.3685-21) и с нормативами ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения («Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016...») (таблица 24–25).

По показателю рН все пробы воды соответствуют требованиям, предъявляемым к качеству водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (рН от 6,0 до 9,0 ед.).

Выявлены превышения ПДК по взвешенным веществам (в пробах воды из ручья Вьюн, его притоков и в пробе из левого притока №3 реки Бурганджа), причём максимальное превышение установлено в пробах из правого притока ручья Вьюн (13,2 и 20,8 доли ПДК_{ВВ})), по Al для правого притока ручья Вьюн и по Fe (единичный случай: проба, отобранная возле устья правого притока ручья Вьюн). Незначительное превышение величины ХПК (1,01 доли ПДК) выявлено в пробе № 1 из правого притока ручья Вьюн.

Установленные содержания SO_4^{2-} , NO_3 , Li, B, Na, Mg, Si, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Sb, I, Ba, Hg во всех изученных пробах воды ниже ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Относительно водных объектов рыбохозяйственного значения установлены превышения ПДК по NH_4 , Mn, Fe и Cu в водах правого притока ручья Вьюн. ПДК

превышены по взвешенным веществам (в двух пробах из правого притока ручья Вьюн, в пробе №1 из левого притока ручья Вьюн, в пробе №5 из ручья Вьюн и в пробе №2 из левого притока реки Бурганджа), Al (во всех пробах, кроме отобранных из реки Бурганджа и её левого притока), Hg (в четырёх пробах из ручья Вьюн и двух пробах из реки Бурганджа).

Установленные содержания SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , Li, B, Na, K, Co, Ni, Zn, As, Sr, I, Cs, Ba во всех изученных пробах воды ниже ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения.

Таким образом, наибольшая частота превышений ПДК зафиксирована для правого притока ручья Вьюн.

В целом, вода бассейна реки Яна, к которому относятся водотоки исследуемой территории, по данным «Государственного доклада о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году» («Государственный доклад...», 2022), за последние восемь лет стабильно характеризуется как «грязная» (4-й класс, разряд «а»). Значение удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) в 2021 году составило 4,13 при расчёте относительно ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения. К загрязняющим отнесено большинство веществ, участвующих в комплексной оценке (11 из 14). Загрязнение поверхностных вод бассейна реки соединениями Mn зафиксировано во всех отобранных пробах, среднегодовая и максимальная концентрации по сравнению с 2020 годом увеличились и равнялись 2,7 и 3,2 ПДК соответственно. Среднегодовая концентрация Fe составила 3,3 ПДК, максимальная – 27,9 ПДК (река Яна, 2 км выше г. Верхоянска). Среднегодовая концентрация Cu составила 1,3 ПДК (что ниже показателя предыдущего года), максимальная – 5 ПДК. Средние за год величины ХПК и фенолов составили 1,8 и 3,6 ПДК соответственно. Единичные случаи превышения нормативов были зафиксированы для Zn, нефтепродуктов, хлоридов и сульфатов. Критические показатели загрязненности воды в 2021 году отсутствовали.

Таблица 24 – Доли ПДК химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля относительно водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (СанПин 1.2.3685-21)

Компонент	ПДК, мг/л	Водоток																	
		Водотоки месторождения Вьюн										Водотоки вне месторождения Вьюн							
		Ручей Вьюн						Правый приток ручья Вьюн		Левый приток ручья Вьюн		Река Бурганджа			Правый приток реки Бурганджа		Левый приток №3 реки Бурганджа		
		Номер пробы																	
		1	2	3	4	5	6	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	
Доли ПДК, ед.																			
SO ₄ ²⁻	500	0,012	0,013	0,016	0,012	0,011	0,015	0,031	0,027	0,005	–	0,015	0,015	0,014	0,011	0,009	0,015	0,015	
NO ₃ ⁻	45	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,014	0,025	0,016	0,026	
ХПК*	30*	0,53	0,46	0,58	0,64	0,62	0,55	1,01	0,87	0,48	0,43	0,48	0,25	0,15	0,9	0,99	–	–	
ВВ	0,25	2,3	2,4	–	–	5,2	–	13,2	20,8	4,8	–	–	–	–	–	–	–	6,8	
Li	0,03	0,11	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07	0,07	0,01	0,01	–	–	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	
B	0,5	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	–	–	–	–	
Na	200	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004	0,004	0,002	0,002	0,003	0,003	0,006	0,007	0,006	0,002	0,002	0,003	0,003	
Mg	50	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	
Al	0,2	0,36	0,35	0,31	0,33	0,29	0,27	1,15	1,4	0,42	0,38	0,08	0,06	0,06	0,6	0,55	0,19	0,17	
Si	25	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	
Mn	0,1	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,51	0,25	0,02	0,03	0,003	0,002	0,003	0,007	0,006	0,004	0,003	
Fe	0,3	0,25	0,21	0,21	0,21	0,18	0,18	0,68	1,6	0,23	0,23	0,08	0,06	0,08	0,17	0,13	0,003	0,003	
Co	0,1	–	–	–	–	–	–	0,003	0,005	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Ni	0,02	–	–	–	–	–	–	0,24	0,18	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Cu	1	–	–	–	–	–	–	0,002	0,003	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Zn	5	–	–	–	–	–	–	0,001	0,001	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
As	0,01	–	–	0,35	0,37	0,53	0,65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Sr	7	0,011	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,009	0,008	0,004	0,004	0,017	0,016	0,019	0,003	–	0,014	0,014	
Sb	0,005	–	–	–	–	–	0,02	–	0,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
I	0,125	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	
Ba	0,7	0,012	0,008	0,01	0,009	0,011	0,01	0,014	0,014	0,01	0,011	0,014	0,014	0,006	0,012	0,016	0,007	0,007	
Hg	0,005	0,005	0,001	0,001	0,007	0,006	0,008	0,001	–	–	–	0,01	0,001	0,012	–	–	–	–	

Примечания: ХПК – химическое потребление кислорода; ВВ – взвешенные вещества; * - значение ПДК для ХПК приведено в мгО₂/дм³; – - нет данных, т.к. содержания/значения компонента/показателя ниже аналитического предела обнаружения.

Таблица 25 – Доли ПДК химических элементов в поверхностных водах Вьюнского золоторудного поля относительно водных объектов рыбохозяйственного значения («Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016...»)

Компонент	ПДК, мг/л	Водоток																	
		Водотоки месторождения Вьюн										Водотоки вне месторождения Вьюн							
		Ручей Вьюн						Правый приток ручья Вьюн		Левый приток ручья Вьюн		Река Бурганджа			Правый приток реки Бурганджа		Левый приток №3 реки Бурганджа		
		Номер пробы																	
		1	3	3	4	5	6	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	
Доли ПДК, ед.																			
SO ₄ ²⁻	100	0,06	0,06	0,08	0,06	0,05	0,07	0,16	0,13	0,02	–	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07	0,07	
Ca ²⁺	180	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,01	0,01	0,06	0,06	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05	
Mg ²⁺	40	0,06	0,06	0,09	0,07	0,06	0,08	0,09	0,06	0,02	0,02	0,08	0,09	0,09	0,05	0,03	0,05	0,05	
NH ₄ ⁺	0,5	0,42	0,42	0,46	0,8	0,46	0,46	1,8	1,4	0,4	0,4	–	–	–	0,8	0,8	0,4	0,5	
NO ₃ ⁻	40	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	
BB	0,75	0,8	0,8	–	–	1,7	–	4,4	6,9	1,6	–	–	–	–	–	–	–	2,3	
Li	0,08	0,041	0,008	0,008	0,007	0,008	0,008	0,025	0,028	0,005	0,005	–	–	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	
B	0,5	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	–	–	–	–	
Na	120	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	0,011	0,011	0,011	0,004	0,004	0,005	0,005	
Al	0,04	1,8	1,7	1,6	1,7	1,5	1,3	5,8	7,0	2,1	1,9	0,4	0,3	0,3	3,0	2,8	0,9	0,9	
K	10	0,027	0,013	0,011	0,012	0,015	0,015	0,005	0,008	0,008	0,011	0,032	0,029	0,033	0,01	0,01	0,02	0,02	
Mn	0,01	0,2	0,14	0,12	0,12	0,12	0,09	5,1	2,5	0,2	0,28	0,03	0,02	0,03	0,07	0,06	0,04	0,03	
Fe	0,1	0,76	0,64	0,62	0,64	0,55	0,54	2,0	4,7	0,68	0,69	0,23	0,17	0,24	0,5	0,04	0,009	0,008	
Co	0,01	–	–	–	–	–	–	0,03	0,05	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Ni	0,01	–	–	–	–	–	–	0,47	0,36	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Cu	0,001	–	–	–	–	–	–	2,3	2,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Zn	0,01	–	–	–	–	–	–	0,51	0,39	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
As	0,05	–	–	0,07	0,07	0,11	0,13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Sr	0,4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,004	0,004	0,02	0,02	0,02	0,06	0,06	0,3	0,2	
I	0,4	0,0004	0,0004	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0006	0,0005	0,0007	0,0005	0,0003	0,0002	0,0002	0,0006	0,0007	0,0005	0,0004	
Cs	1	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	0,0003	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	
Ba	0,74	0,011	0,008	0,009	0,008	0,01	0,01	0,014	0,013	0,009	0,01	0,013	0,013	0,005	0,01	0,01	0,007	0,006	
Hg	1·10 ⁻⁵	2,4	0,3	0,6	3,3	2,9	4,1	0,5	–	–	–	5,0	0,3	6,2	–	–	–	–	

Примечания: BB – взвешенные вещества; – - нет данных, т.к. содержания компонента ниже аналитического предела обнаружения

4.2 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения донных отложений из водотоков

Средние содержания химических элементов в пробах донных отложений водотоков Вьюнского золоторудного поля приведены в таблице 26. В пробах установлены повышенные содержания 25 элементов относительно кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003), в том числе 4 элементов 1–2 классов опасности (ГОСТ Р 70281-2022). Оценки числовых характеристик содержаний элементов приведены в таблице 27.

Таблица 26 – Средние содержания химических элементов в пробах донных отложений водотоков Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (количество проб – 33)

Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание
Mg, %	0,94±0,02	Zr	124±4	Dy	4,3±0,1
P, %	0,09±0,003	Nb	14±0,3	Ho	0,82±0,02
Ti, %	0,47±0,02	Mo	1,4±0,2	Er	2,3±0,04
Mn, %	0,066±0,008	Ru	0,08±0,01	Tm	0,36±0,01
Fe, %	4,9±0,2	Ag	0,24±0,01	Yb	2,2±0,1
Ba, %	0,054±0,003	Cd	0,32±0,01	Lu	0,35±0,01
Be	2,4±0,1	In	0,12±0,006	Hf	3,3±0,1
Cr	100±8	Sn	2,2±0,1	Ta	0,84±0,02
Co	19±2	Sb	1,6±0,2	W	2,0±0,3
Ni	29±4	Te	0,23±0,02	Au	0,016±0,014
Cu	38±3	Cs	4,8±0,3	Hg	0,062±0,011
Zn	119±4	La	35±1	Tl	0,51±0,01
Ga	22±0,4	Ce	76±2	Pb	20±1
Ge	1,8±0,04	Pr	8,7±0,3	Bi	0,34±0,05
As	31±13	Nd	32±1	Th	9,7±0,4
Se	8,1±0,4	Sm	5,8±0,1	U	2,4±0,1
Rb	103±3	Eu	1,3±0,03	Re	<0,01
Sr	215±14	Gd	5,7±0,1	-	-
Y	25±1	Tb	0,77±0,02	-	-
Количество проб					33

Примечания: среднее значение ± стандартная ошибка. Аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов, превышающие значения кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003)

Таблица 27 – Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов в пробах донных отложений водотоков Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (количество проб – 33)

Элемент	Среднее содержание	Минимум	Максимум	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
Mg, %	0,94	0,73	1,17	120	12
P, %	0,09	0,074	0,156	2,3	16
Ti, %	0,47	0,37	0,69	74	18
Fe, %	4,9	3,5	8,0	14153	24
Ba, %	0,054	0,047	0,09	1,3	17
Co	19	10	42	86	50
Cu	38	24	94	258	40
Zn	119	81	160	556	20
Ga	22	17	28	2,5	11
Ge	1,8	1,3	2,3	0,23	13
As	31	14	325	5357	149
Se	8,1	2,0	13	6,0	31
Nb	14	12	18	3,0	11
Ag	0,24	0,14	0,33	0,05	20
Sb	1,6	0,5	5,0	1,0	62
Te	0,23	0,05	0,55	0,5	60
Ce	76	56	103	157	17
Au	0,016	0,005	0,33	0,02	184
Pb	20	15	30	11	17
Th	9,7	5,6	14	5	24
U	2,4	1,8	3,1	0,06	13

Средние содержания химических элементов в донных отложениях водотоков месторождения Вьюн приведены в таблице 28.

Таблица 28 – Средние содержания химических элементов в пробах донных отложений водотоков месторождения Вьюн, мг/кг (количество проб – 13)

Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание
Mg, %	0,98±0,03	Zr	141±7	Ho	0,79±0,03
P, %	0,1±0,003	Nb	14±1	Er	2,3±0,1
Ti, %	0,53±0,03	Mo	1,8±0,2	Tm	0,37±0,01
Mn, %	0,1±0,02	Ag	0,25±0,01	Yb	2,2±0,1
Fe, %	5,5±0,3	Cd	0,33±0,02	Lu	0,37±0,01
Ba, %	0,06±0,003	In	0,1±0,01	Hf	3,5±0,2
Be	2,4±0,1	Sn	2,4±0,2	Ta	0,79±0,02
Cr	129±11	Sb	2,8±0,4	W	3,3±0,7
Co	24±2	Te	0,21±0,04	Au	0,07±0,03
Ni	46±7	Cs	5,7±0,4	Hg	0,09±0,02

Продолжение таблицы 28

Cu	47±3	La	32±1	Tl	0,47±0,01
Zn	130±6	Ce	67±2	Pb	19±1
Ga	22±0,4	Pr	7,9±0,3	Bi	0,6±0,1
Ge	1,9±0,1	Nd	30±1	Th	8,2±0,5
As	45±22	Sm	5,6±0,1	U	2,3±0,1
Se	7,3±0,6	Eu	1,2±0,04	Ru	<0,1
Rb	94±4	Gd	5,5±0,1	Re	<0,01
Sr	146±18	Tb	0,78±0,04	-	-
Y	22±1	Dy	4,1±0,1	-	-
Количество проб					13

Примечания: среднее значение ± стандартная ошибка. Аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов, превышающие значения кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003)

Для большинства элементов за средние содержания взяты средние арифметические (в связи с применимостью для них нормального закона распределения). Отличное от нормального распределение установлено для As, Mo, Tb и Au, для которых использованы средние геометрические значения содержаний. Содержания большей части элементов характеризуются равномерным распределением. Сильно неоднородный характер распределения выявлен для As, крайне неоднородный – для Au (таблица 29).

Таблица 29 – Характеристика распределения содержаний химических элементов по коэффициенту вариации для проб донных отложений водотоков месторождения Вьюн (количество проб – 13)

Группа	Коэффициент вариации, %	Характер распределения	Химические элементы
I	< 39	Однородное	Be, Mg, P, Ti, Cr, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, Ge, Se, Rb, Y, Zr, Nb, Ag, Cd, In, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Tl, Pb, Th, U
II	40-79	Неоднородное	Mn, Ni, Sr, Mo, Sb, Te, W, Hg, Bi
III	80-119	Сильно неоднородное	As
IV	> 120	Крайне неоднородное	Au

Разброс содержаний химических элементов показан на рисунке 35.

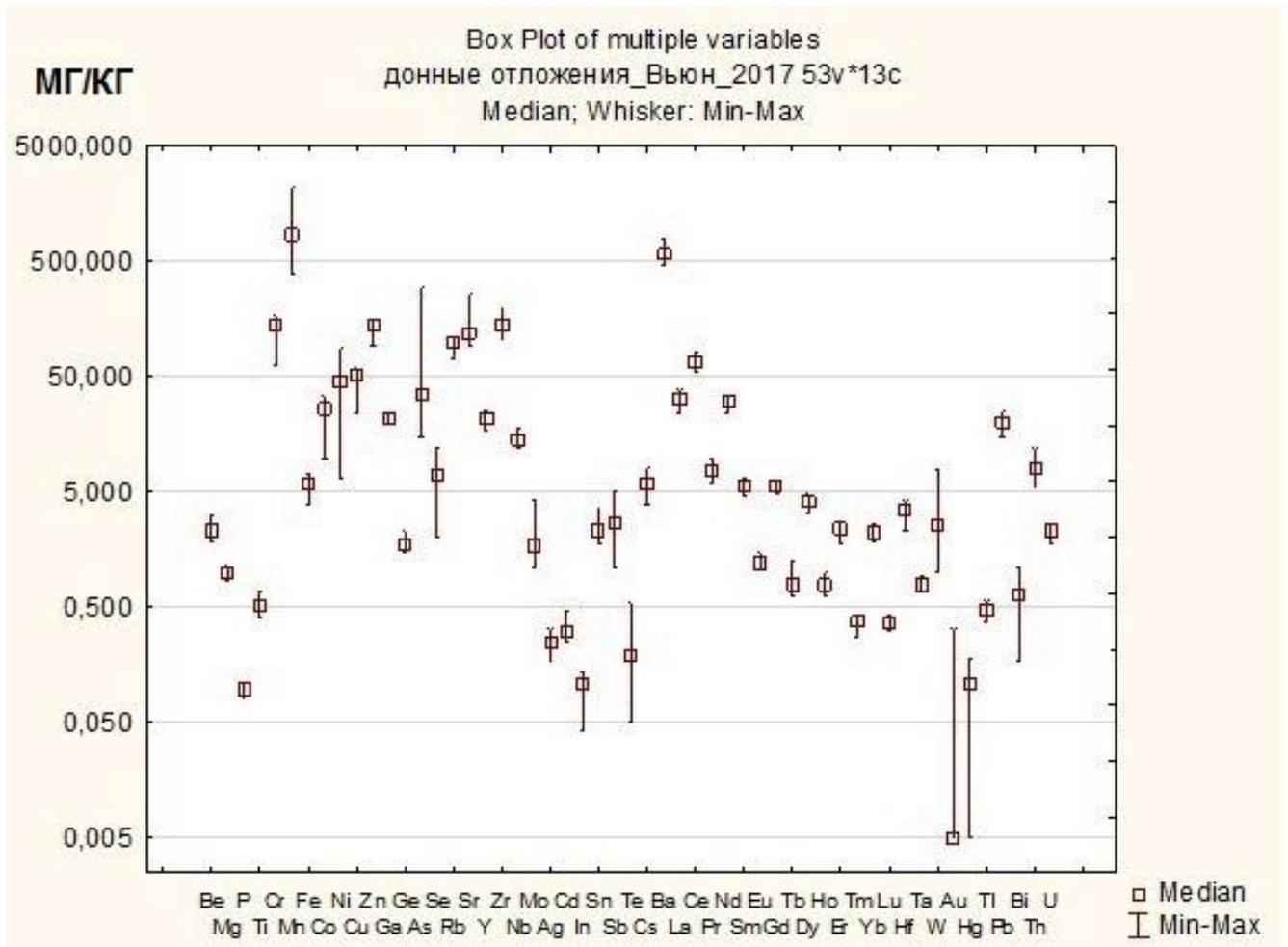


Рисунок 35 – Диаграмма размаха содержаний химических элементов в пробах донных отложений водотоков месторождения Вьюн (количество проб – 13)

Наибольшее число химических элементов, накапливающихся в донных отложениях в концентрациях, превосходящих средние по месторождению в целом, характерно для ручья Вьюн и его правого притока.

Воды ручья Вьюн дренируют зону локализации рудного тела, вскрытого штольнями, что влияет на химический состав донных отложений. Так, в донных отложениях ручья Вьюн повышены относительно средних по месторождению содержания Mg, P, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Zr, Ag, Sb, Te, Cs, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Au, Hg, Pb, Bi, а в донных отложениях правого притока ручья Вьюн – Mg, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sb, Te, Cs, Sm, Gd, Ho, Er, Yb.

Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений из водотоков золоторудного месторождения Вьюн с указанием номеров проб согласно направлению течения показана на рисунке 36.

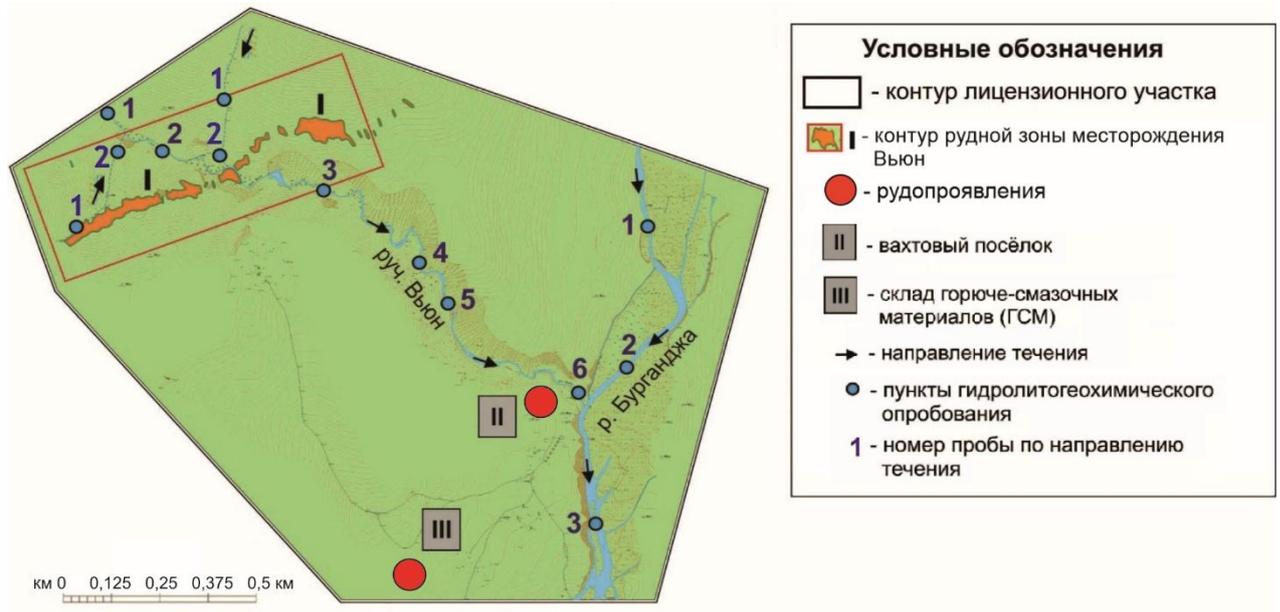


Рисунок 36 – Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений в центральной части Вьюнского золоторудного поля (месторождение Вьюн) с контуром рудной зоны, вскрытой штольнями, и рудопроявлений (Вьюн-1, Вьюн-2)

Анализ изменения концентраций химических элементов в донных отложениях на исследованном участке ручья Вьюн показал, что ниже по течению от рудной зоны и устья правого притока в 1,8–36 раз увеличиваются содержания Hg, Bi, W, In, Ni и Cr; далее после впадения в ручей Вьюн левого притока в донных отложениях в 1,2–66 раз возрастают уровни содержания Au, As, Se, Te, Ag, Sb. Данные химические элементы являются индикаторами золотоносных малосульфидных кварцевых жил (Макаров, 2016) и выносятся в окружающую среду вследствие окислительного растворения пирита, арсенопирита и других сульфидов (Бортникова и др, 2010). Резкое увеличение содержаний As и Au в донных отложениях ручья Вьюн ниже по течению от рудной зоны, вскрытой штольнями, наглядно показано на диаграммах (рисунок 37 а–б).

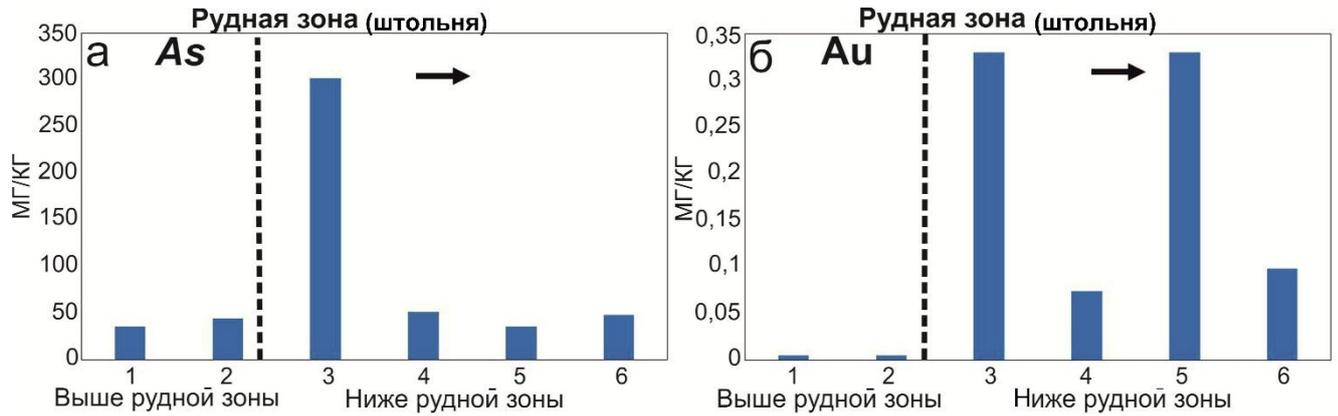


Рисунок 37 – Содержание As (а) и Au (б) в донных отложениях ручья Вьюн

относительно рудной зоны, вскрытой штольнями (мг/кг)

Примечание: цифрами показаны пункты отбора проб по направлению течения (обозначено стрелкой)

Влияние специфики оруденения и проведённых геологоразведочных работ проявляется в увеличении содержаний Se, Te, Ag, Sb в донных отложениях ниже по течению от рудной зоны, что наглядно показано на рисунке 38 а–г.

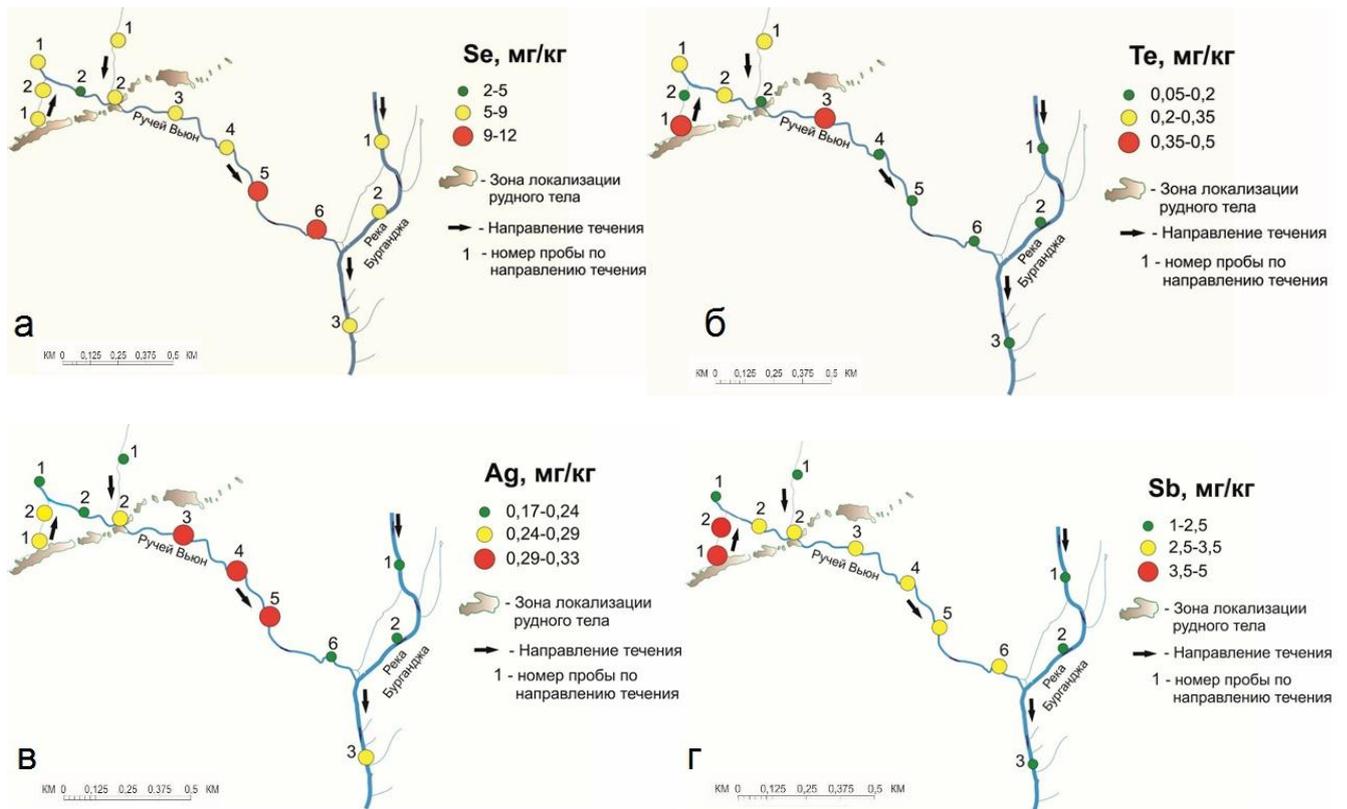


Рисунок 38 – Схемы распределения содержаний Se (а), Te (б), Ag (в), Sb (г) в донных отложениях водотоков месторождения Вьюн

Воды ручья Вьюн оказывают влияние на содержание элементов в донных отложениях реки Бурганджа, что показано на примере увеличения содержаний Hg и Ag ниже по течению от устья ручья Вьюн (рисунок 39 а–б).

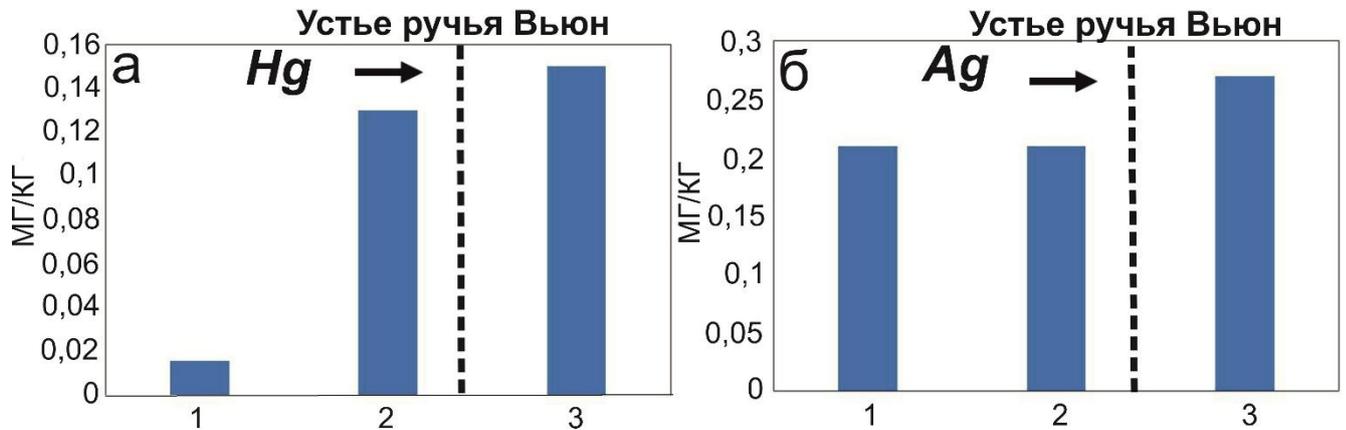
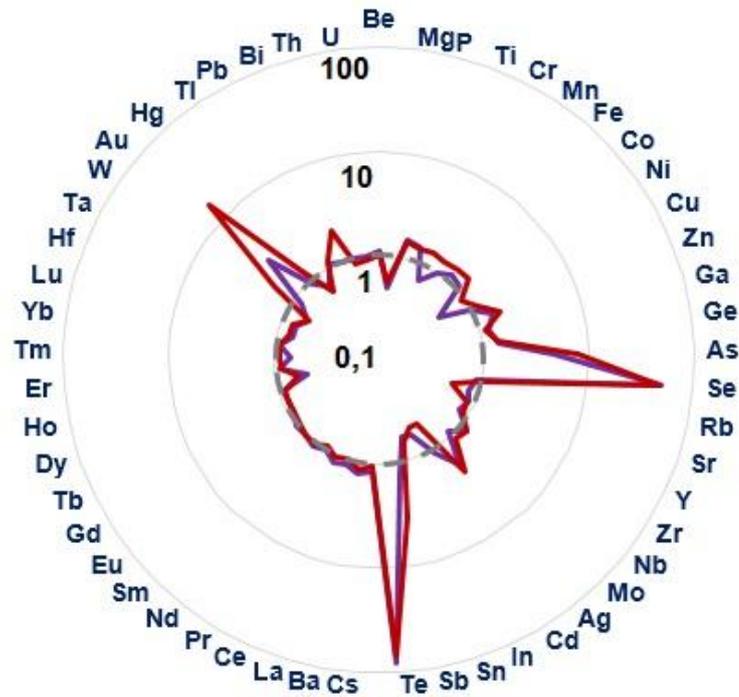


Рисунок 39 – Содержание Hg (а) и Ag (б) в донных отложениях реки Бурганджа, мг/кг

Примечание: цифрами показаны пункты отбора проб по направлению течения (обозначено стрелкой)

Как известно, донные осадки традиционно вовлекаются в исследования, направленные на установление геохимической специфики окружающей среды (Alemdaroglu et al., 2003; Jin et al., 2016; Machowski et al., 2017) и отражают геохимические особенности водосборных площадей (Страховенко и др., 2012). В ходе работы было установлено, что общая геохимическая специализация донных отложений водотоков Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003) сформирована высокими уровнями концентрирования Te, Se, Au, As, Sb, Ag (рисунок 40), что отражает минералогическо-геохимические особенности территории месторождения. При этом геохимические аномалии Au и его спутников более отчетливо выражены в донных отложениях водотоков месторождения Вьюн по сравнению с рудным полем в целом.

В целом, полученные результаты согласуются с известными данными о формировании во взвешях и донных осадках водотоков в пределах влияния золоторудной минерализации повышенных содержаний типоморфных рудам химических элементов (Макаров, 2008).



— Выюнское золоторудное поле — Месторождение Выюн

Рисунок 40 – Средние кларки концентраций химических элементов в донных отложениях водотоков Выюнского золоторудного поля (33 пробы) и месторождения Выюн (13 проб) относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003)

Гидролитогеохимические ассоциации отдельных водотоков месторождения схожи между собой и идентичны с общей ассоциацией, что показано в таблице 30.

Ассоциации включают в себя химические элементы, входящие в число элементов-спутников малосульфидного золотокварцевого оруденения (As, Sb, Ag, Hg, Cu, Pb), т.е. поисковых геохимических признаков месторождений золота данного типа (Макаров, 2016). При этом показано (Hartikainen, 2012), что в ходе различных поисковых работ наиболее широко применимым в качестве индикатора оруденения элементом является As за счёт его генетической близости с Au. Но в то же время следует учесть, что связь As и Au в рудных объектах не всегда имеет отражение в ореолах рассеяния над зонами оруденения, в связи с чем в некоторых исследованиях As предлагается использовать как косвенный гидрогеохимический признак (Воротников и др., 1968). В данном исследовании также не наблюдается прямой значимой связи As и Au в донных осадках.

Таблица 30 – Геохимические ряды химических элементов в донных отложениях водотоков месторождения Вьюн относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003)

Водоток	Количество проб	Геохимический ряд химических элементов
Ручей Вьюн	6	$Te_{88,5} - Se_{49,0} - Au_{31,5} - As_{15,3} - Sb_{3,7} - Bi_{3,0} - W_{2,4} - Ag_{2,3} - Zn_{1,8} - Hg_{1,8} - Cr_{1,6} - Ge_{1,6} - Ti_{1,6} - P_{1,6} - Fe_{1,5} - Co_{1,5} - Cu_{1,3} - Pb_{1,2} - Ni_{1,2} - Ga_{1,2} - Nb_{1,1} - Ba_{1,1} - Mn_{1,1} - Cs_{1,1} - Ce_{1,1} - Nd_{1,1}$
Правый приток ручья Вьюн	2	$Te_{89,7} - Se_{45,0} - As_{22,3} - Sb_{6,1} - Ag_{2,3} - Zn_{2,0} - Co_{1,8} - Mn_{1,8} - Cr_{1,6} - Mo_{1,5} - Cu_{1,5} - W_{1,5} - P_{1,5} - Ge_{1,4} - Nb_{1,4} - Fe_{1,4} - Ti_{1,4} - Ba_{1,2} - Ga_{1,2} - Zr_{1,2} - Ni_{1,1} - Cs_{1,1}$
Левый приток ручья Вьюн	2	$Se_{45,7} - Te_{43,1} - As_{5,5} - Sb_{3,1} - Mn_{2,8} - Ag_{2,1} - Co_{2,0} - Mo_{2,0} - Zn_{1,7} - Cr_{1,6} - Fe_{1,4} - P_{1,4} - Cu_{1,4} - Cs_{1,4} - Ge_{1,3} - Nb_{1,3} - Ti_{1,2} - W_{1,1}$
Река Бурганджа	3	$Se_{53,6} - Te_{35,6} - Au_{3,8} - As_{3,2} - Bi_{2,1} - Ag_{2,1} - Hg_{1,5} - Ba_{1,4} - Sb_{1,4} - Zn_{1,4} - P_{1,3} - Ge_{1,2} - Ce_{1,2} - Th_{1,2} - La_{1,2} - Pb_{1,2} - Be_{1,2} - Nd_{1,1} - Ga_{1,1} - Rb_{1,1} - Nb_{1,1}$

На рисунке 41 представлены результаты кластерного анализа.

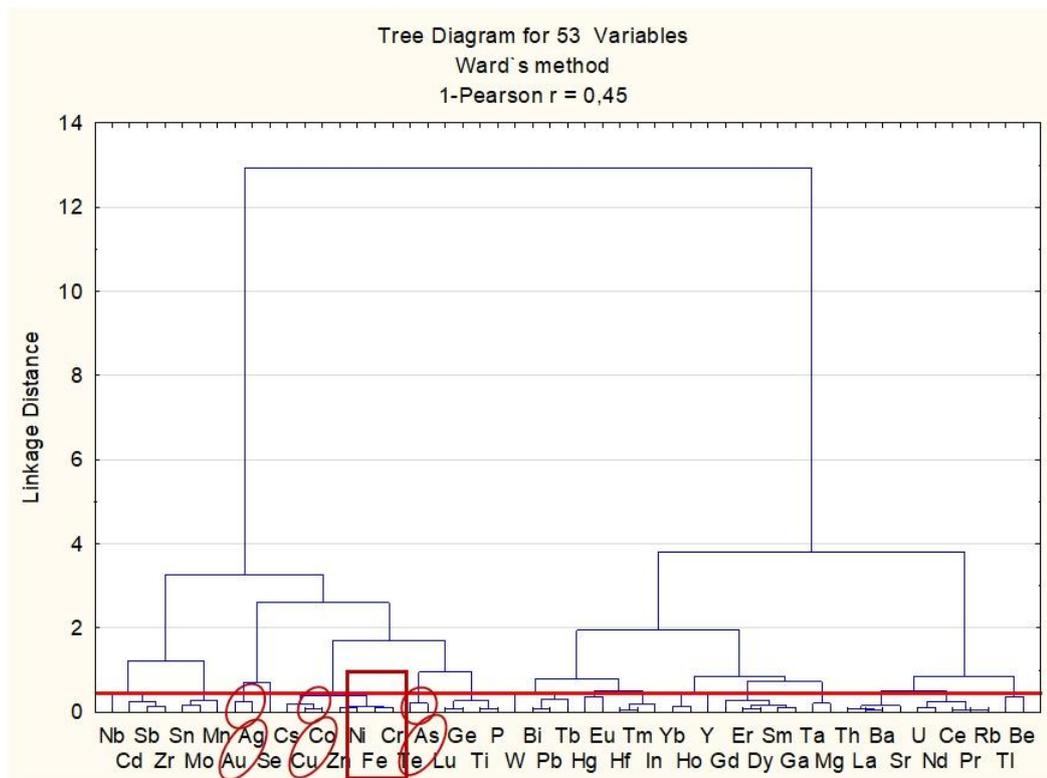


Рисунок 41 – Дендрограмма матрицы корреляционных связей химического состава донных отложений водотоков месторождения Вьюн (количество проб – 13; $1-r_{0,05} = 0,45$)

На дендрограмме, иллюстрирующей корреляционные связи компонентов химического состава донных отложений, выделяются значимые связи между Au и Ag, Te и As, Cu и Co, а также микроассоциация тяжёлых металлов (Ni, Fe, Cr). Выделенные значимые связи между химическими элементами и кластеры по большей части отражают черты геохимической специализации донных отложений водотоков золоторудного месторождения Вьюн.

Накапливая вещества, поступающие с бассейнов водных объектов в течение длительного времени, донные отложения являются депонирующей средой (Страховенко и др., 2010; Иванов, 2016) и индикатором экологического состояния территорий (Брюхань, 2011; Grotti et al., 2017; Çakmak et al, 2017). Результаты сопоставления концентраций химических элементов (Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg, Pb) и группы суммации (Pb+Hg) в донных отложениях водотоков месторождения Вьюн с нормативами валовых ПДК для почв (СанПиН 1.2.3685-21) представлены в таблице 31.

Для донных отложений водотоков на территории месторождения не установлено превышений нормативов ПДК для почв по содержаниям Cu, Zn, Cd, Hg, Pb.

Небольшое превышение ПДК по Mn отмечено в трёх пробах донных отложений из притоков ручья Вьюн (1,1–1,5 долей ПДК), единичные превышения установлены для Ni (проба №2 из ручья Вьюн) и Sb (пробы из правого притока ручья Вьюн). В большей части проб наблюдаются небольшие превышения ПДК по группе суммации Pb+Hg (в пределах 1,2 долей ПДК).

Особо выделяются содержания As, которые во всех исследованных пробах донных отложений из водотоков месторождения Вьюн превышают валовую ПДК для почв (1,5–30,2 долей ПДК при среднем значении 3,1 долей ПДК). Максимальные превышения выявлены для проб из ручья Вьюн и его правого притока.

Таблица 31 – Сравнение концентраций химических элементов в донных отложениях водотоков с нормативами ПДК для почв (доли ПДК) относительно валовых содержаний (согласно СанПиН 1.2.3685-21)

Водоток	№ пробы	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Hg	Pb	Pb+Hg
<i>Предельно допустимая концентрация для почв, мг/кг</i>		1500	80	132	220	10	2	4,5	2,1	130	21
Среднее содержание в донных отложениях водотоков Выюнского золоторудного поля (33 пробы), мг/кг		660	29	38	119	31	0,32	1,6	0,06	20	20,06
Среднее содержание в донных отложениях водотоков месторождения Выюн (13 проб), мг/кг		1000	46	47	130	45	0,33	2,8	0,09	19	19,09
Доли ПДК для средних содержаний в донных отложениях водотоков Выюнского золоторудного поля (33 пробы)		0,4	0,4	0,3	0,5	3,1	0,2	0,4	0,03	0,2	0,9
Доли ПДК для средних содержаний в донных отложениях водотоков месторождения Выюн (13 проб)		0,7	0,6	0,4	0,6	4,5	0,2	0,6	0,04	0,1	0,9
Ручей Выюн	1	0,5	0,5	0,3	0,5	3,5	0,2	0,5	0,01	0,1	0,7
	2	0,6	1,1	0,4	0,7	4,4	0,2	0,6	0,09	0,2	1,1
	3	0,6	0,8	0,4	0,7	30,2	0,1	0,7	0,06	0,2	1,0
	4	0,5	0,8	0,4	0,6	5,1	0,2	0,7	0,07	0,2	1,2
	5	0,6	0,6	0,4	0,6	3,5	0,2	0,8	0,05	0,2	1,1
	6	0,5	0,7	0,4	0,6	4,8	0,1	0,8	0,07	0,2	1,1
Правый приток ручья Выюн	1	1,1	0,5	0,5	0,7	11,0	0,2	1,1	0,02	0,1	0,8
	2	0,8	0,9	0,4	0,7	14,0	0,2	1,1	0,01	0,1	0,8
Левый приток ручья Выюн	1	1,4	0,4	0,4	0,5	2,7	0,2	0,5	0,03	0,1	0,7
	2	1,5	0,8	0,4	0,6	3,5	0,2	0,6	0,01	0,1	0,8
Река Бурганджа	1	0,3	0,3	0,2	0,5	2,2	0,1	0,2	0,01	0,2	1,0
	2	0,3	0,1	0,2	0,5	1,6	0,2	0,2	0,06	0,2	1,0
	3	0,3	0,1	0,2	0,4	1,5	0,1	0,2	0,07	0,1	0,9

На данный момент в Российской Федерации довольно остро стоит проблема загрязнения водных объектов. Проблема усугубляется тем фактом, что в стране нет федеральных нормативов, регламентирующих качество донных отложений. Существуют лишь единичные примеры региональных нормативов, базирующихся на основе иностранных данных, например, «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» («Нормы и критерии оценки загрязненности...», 1996), в которых использован опыт Нидерландов (Коломийцев и др., 2020). Этот нормативный акт характеризует

способность загрязнённых донных отложений оказывать негативное влияние на чистую водную среду и регламентирует концентрации Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb, которые сопоставляются с допустимыми концентрациями (ДК) по каждому элементу. При этом выделяются 5 классов состояния донных отложений («Нормы и критерии оценки загрязнённости...», 1996): «чистые» (концентрация элемента ниже пограничного значения ДК-I); «слабозагрязнённые» (значение концентрации элемента находится в диапазоне пограничных значений ДК-I – ДК-II); «умеренно загрязнённые» (ДК-II – ДК-III); «сильно загрязнённые» (ДК-III – ДК-IV); «опасно загрязнённые» (концентрация элемента превышает пограничное значение ДК-IV).

Полученные в ходе исследований концентрации Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb были сопоставлены с данным нормативом (таблица 32).

Таблица 32 – Концентрации химических элементов в донных отложениях водотоков месторождения Вьюн (мг/кг) в сравнении с «Нормами и критериями оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» («Нормы и критерии оценки загрязнённости...», 1996)

№ пробы	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
Ручей Вьюн								
1	97	40	45	110	35	0,30	0,005	15
2	170	89	53	160	44	0,34	0,180	22
3	160	63	54	150	302	0,25	0,130	20
4	170	62	51	130	51	0,31	0,140	25
5	140	45	51	140	35	0,35	0,110	22
6	150	55	55	140	48	0,29	0,140	22
<i>Среднее</i>	148	59	52	<i>138</i>	58	<i>0,31</i>	<i>0,118</i>	<i>21</i>
Правый приток ручья Вьюн								
1	150	42	60	150	110	0,42	0,047	16
2	140	69	56	150	140	0,47	0,012	16
<i>Среднее</i>	145	56	58	150	125	<i>0,45</i>	<i>0,030</i>	<i>16</i>
Левый приток ручья Вьюн								
1	140	35	48	120	27	0,36	0,067	15
2	150	61	59	140	35	0,36	0,021	17
<i>Среднее</i>	145	48	54	<i>130</i>	<i>31</i>	<i>0,36</i>	<i>0,044</i>	<i>16</i>
Река Бурганджа								
1	79	22	30	110	22	0,26	0,016	21
2	69	11	26	101	16	0,30	0,130	20
3	63	7	24	93	15	0,28	0,150	18
<i>Среднее</i>	<i>70</i>	<i>13</i>	<i>27</i>	<i>101</i>	<i>18</i>	<i>0,28</i>	<i>0,099</i>	<i>20</i>

«Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга» («Нормы и критерии оценки загрязненности...», 1996)								
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
< ДК-I	< 100	< 35	< 35	< 140	< 29	< 0,8	< 0,3	< 85
ДК-I	100	35	35	140	29	0,8	0,3	85
ДК-II	380	35	35	480	55	2	0,5	530
ДК-III	380	45	90	720	55	7,5	1,6	530
ДК-IV	380	210	190	720	55	12	10	530
> ДК-IV	> 380	> 210	> 190	> 720	> 55	> 12	> 10	> 530

Примечания: классы состояния донных отложений: «чистые» (концентрация элемента ниже пограничного значения ДК-I); «слабозагрязненные» (значение концентрации элемента находится в диапазоне пограничных значений ДК-I – ДК-II); «умеренно загрязненные» (значение концентрации элемента находится в диапазоне пограничных значений ДК-II – ДК-III); «сильно загрязненные» (значение концентрации элемента находится в диапазоне пограничных значений ДК-III – ДК-IV); «опасно загрязненные» (концентрация элемента превышает пограничное значение ДК-IV) («Нормы и критерии оценки загрязненности...», 1996). Жирным шрифтом выделены концентрации химических элементов \geq ДК-I.

Донные отложения ручья Вьюн и его притоков характеризуются слабой степенью загрязнения по отношению к содержаниям Cr (кроме пробы №1 из ручья Вьюн, отвечающей характеристике «чистых» донных отложений), умеренной степенью загрязнения по отношению к содержаниям Cu, умеренной и сильной степенью загрязнения по отношению к содержаниям Ni. Исходя из содержаний Zn, донные отложения правого притока ручья Вьюн, а также донные отложения пробы №2 из левого притока ручья Вьюн и пробы №2, 3, 5, 6 из ручья Вьюн слабо загрязнены (причём для трёх проб отмечено пограничное значение содержания Zn ДК-I в 140 мг/кг).

Очень отчётливо проявлена опасная степень загрязнения донных отложений правого притока ручья Вьюн по As, кроме того «опасно загрязнёнными» являются и донные отложения ручья Вьюн. При этом для левого притока в среднем по двум пробам установлено слабое загрязнение.

Концентрации Cd, Hg и Pb во всех исследованных пробах ниже пограничного значения ДК-I. В реке Бурганджа донные отложения являются «чистыми» относительно содержаний всех рассматриваемых химических элементов.

Также в рамках работы были рассчитаны коэффициенты донной аккумуляции (КДА) химических элементов для проб поверхностных вод и донных отложений водотоков месторождения Вьюн (таблица 33).

Таблица 33 – Коэффициенты донной аккумуляции химических элементов для проб поверхностных вод и донных отложений водотоков месторождения Вьюн

Водоток	№ пробы	Ce	Fe	Mn	Nd	Y	Gd	Ba	Cs	Hg	Mg	Sr
Ручей Вьюн	1	$8,4 \cdot 10^5$	$7,4 \cdot 10^5$	$3,9 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$7,3 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^2$	$5,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$
	2	$1,1 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$
	3	$2,6 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$8,7 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$
	4	$1,1 \cdot 10^6$	$9,1 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^4$	$8,8 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$
	5	$1,3 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$	$7,9 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$
	6	$2,6 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$9,1 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$	$4,7 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$
Правый приток ручья Вьюн	1	$5,3 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$6,1 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$8,9 \cdot 10^3$	$5,7 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$
	2	$2,8 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$4,8 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^4$	–	$4,1 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$
Левый приток ручья Вьюн	1	$7,8 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	–	$1,1 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$
	2	$8,9 \cdot 10^5$	$9,0 \cdot 10^5$	$8,2 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	–	$1,1 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^3$
Река Бурганджа	1	$3,2 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$7,7 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^2$	$7,0 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
	2	$3,2 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$
	3	$2,9 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$

По итогам расчётов была выявлена группа из 11 элементов с наибольшими средними значениями КДА. Расположенные по мере снижения интенсивности аккумуляции в донных отложениях из поверхностных природных вод эти химические элементы составляют следующий ряд: Ce–Fe–Mn–Nd–Y–Gd–Ba–Cs–Hg–Mg–Sr.

4.2.1 Характеристика минерального состава донных отложений водотоков территории Выюнского золоторудного поля

С целью установления закономерностей между минеральным составом руд и геохимией донных отложений, были проведены комплексные исследования минерального вещества методами порошковой рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектроскопией.

По данным рентгеновской дифрактометрии, минеральное вещество донных отложений сложено различными алюмосиликатами с преобладанием мусковита и иллита (рисунок 42).



Рисунок 42 – Минеральный состав проб донных отложений водотоков Выюнского золоторудного поля по данным рентгенофазового анализа, %

В ходе изучения минеральной составляющей донных отложений под бинокулярным оптическим микроскопом, был выделен сульфид Fe (рисунок 43 а–б) и изучен на сканирующем электронном микроскопе (рисунок 44).

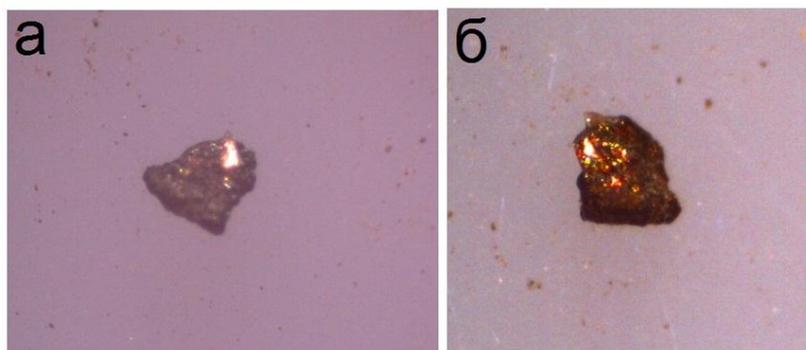


Рисунок 43 а–б – Сульфид Fe (увеличение 35х)

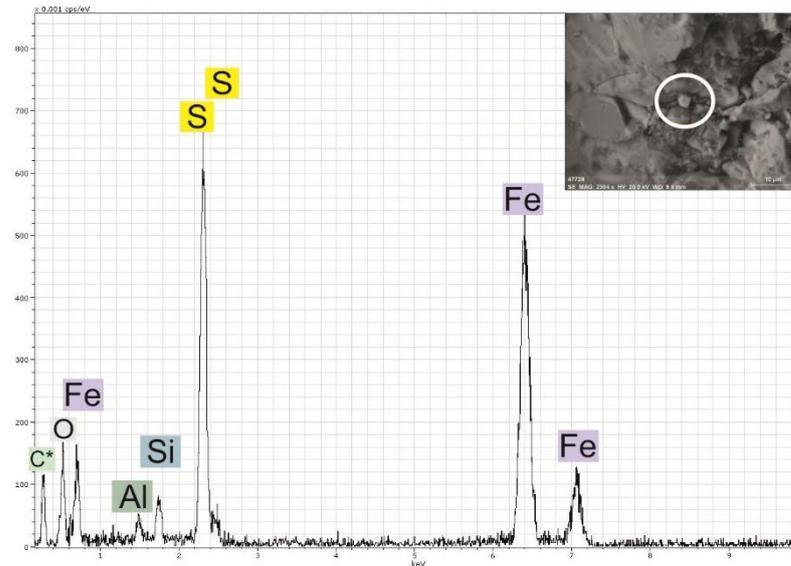


Рисунок 44 – Энергодисперсионный спектр и снимок в режиме обратно рассеянных электронов сульфида Fe (% масс.: Fe – 41, S – 26, O – 32)

Также методом сканирующей электронной микроскопии в донных отложениях обнаружены минеральные фазы, содержащие Cu и Zn (рисунок 45 а), Fe и Cr (рисунок 45 б).

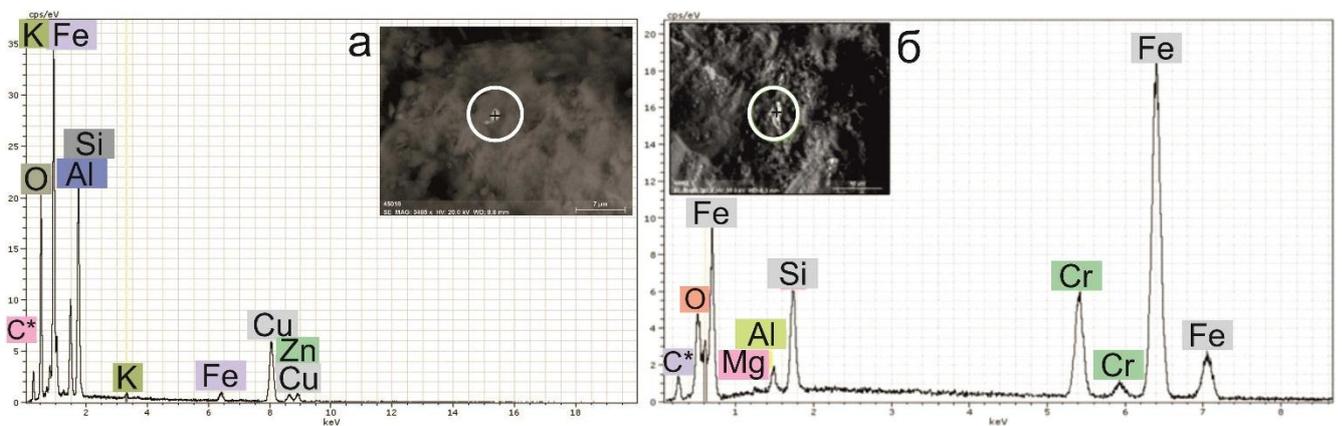


Рисунок 45 – Энергодисперсионные спектры и снимки в режиме обратно рассеянных электронов минеральной фазы: а) содержащей Cu и Zn (% масс.: Cu – 39, Zn – 5; O – 32); б) содержащей Fe и Cr (% масс.: Fe – 75, Cr – 13; O – 6)

Таким образом, проявленность оруденения в минеральном веществе донных отложений водотоков на территории Вьюнского золоторудного поля заключается

в присутствии сульфидных минеральных фаз, типичных для малосульфидного золотокварцевого оруденения.

Au не обнаружено в ходе исследований минерального состава донных отложений, но в то же время его концентрации превышают кларк. В связи с этим встаёт вопрос о формах нахождения данного элемента. Согласно известным материалам, ведущая роль в процессах миграции и концентрирования Au в зоне гипергенеза принадлежит явлению комплексообразования с органическими веществами (Bowell et al., 1993). Подвижность Au в приповерхностных условиях определяется взаимодействием с органическими лигандами (Vlassopoulos et al., 1990). Согласно экспериментальным данным (Сергеев и др., 2015), преобладающая доля Au в донных осадках водотоков находится в подвижной форме.

As, чьи концентрации в донных отложениях водотоков исследуемой территории превышают кларковые, не найден в составе минералов, но в то же время с рудами месторождения связан минерал As арсенопирит. Особенностью As является высокая подвижность и активная миграция в природных обстановках. В ходе разрушения коренных пород As мигрирует вверх по разрезу в виде анионных комплексов H_2AsO_4^- или HAsO_4^{2-} (Сергеев и др., 2015). Донные отложения природных водных систем функционируют как временный накопитель при миграции As (Woolson, 1977).

Поведение Sb как токсичного и высоко технофильного элемента (Перельман, 1972; Иванов, 1996) в техногенных и экологических системах изучено на данный момент недостаточно. Однако, имеются данные о том, что Sb в зоне окисления может быть связана с гидроксидами Fe (Лазарева и др., 2000).

ГЛАВА 5: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ПОЧВ

5.1 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения почв

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) (таблица 34). Оценки числовых характеристик содержаний элементов приведены в таблице 35.

Таблица 34 – Средние содержания химических элементов в пробах почв с территории Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (количество проб – 37)

Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание
Mg, %	0,74±0,04	Zr	118±5	Ho	0,67±0,03
P, %	0,08±0,01	Nb	14±1	Er	2,0±0,1
Ti, %	0,46±0,02	Mo	1,9±0,1	Tm	0,3±0,01
Mn, %	0,075±0,007	Ag	0,38±0,08	Yb	2,0±0,1
Fe, %	4,6±0,2	Cd	0,34±0,01	Lu	0,3±0,001
Ba, %	0,054±0,003	In	0,11±0,01	Hf	2,5±0,1
Be	2,7±0,1	Sn	2,6±0,1	Ta	0,92±0,03
Cr	118±7	Sb	1,8±0,3	W	2,1±0,3
Co	19±2	Te	0,2±0,03	Au	0,011±0,006
Ni	35±3	Cs	6,4±0,4	Hg	0,03±0,004
Cu	43±3	La	32±1	Tl	0,49±0,02
Zn	112±6	Ce	65±2	Pb	20±1
Ga	20±1	Pr	7,5±0,2	Bi	0,22±0,01
Ge	1,5±0,1	Nd	28±1	Th	8,2±0,4
As	33±11	Sm	5,2±0,2	U	2,1±0,1
Se	5,7±0,5	Eu	1,1±0,1	Ru	<0,1
Rb	83±3	Gd	5,0±0,2	Re	<0,01
Sr	159±11	Tb	0,65±0,03	-	-
Y	18±1	Dy	3,5±0,2	-	-
Количество проб					37

Примечания: среднее значение \pm стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в почвах, превышающие значения кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003).

Таблица 35 – Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов (мг/кг) в пробах почв, отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 37)

Элемент	Среднее содержание	Минимум	Максимум	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
Mg, %	0,59	0,18	1,38	730	36
P, %	0,07	0,036	0,18	9,4	37
Ti, %	0,45	0,09	0,65	109	22
Mn, %	0,064	0,021	0,216	19	54
Fe, %	4,4	1,34	7,85	13504	25
Be	2,5	1,6	3,8	0,3	20
Cr	126	39	210	1658	34
Co	17	6	48	98	51
Ni	38	2,4	87	416	59
Cu	42	24	94	267	37
Zn	103	39	234	1487	34
Ga	19	7,2	25	13	18
As	32	7,4	402	4115	147
Se	5,8	0,5	12	8,3	50
Ag	0,6	0,24	449	5435	575
Cd	0,34	0,21	0,62	0,007	24
Sn	2,6	0,6	6,6	0,81	34
Sb	2,0	0,64	7,1	2,4	76
Te	0,17	0,05	0,69	0,025	71
Cs	6,9	2,2	15,9	6,6	40
W	1,8	0,46	8,1	2,5	69
Au	0,02	0,005	0,24	32	245
Pb	18	6,8	34	29	27
Th	6,7	1,9	13	5,6	29
U	1,8	0,7	2,9	0,17	20

Средние содержания химических элементов в пробах почв, отобранных на территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн), приведены в таблице 36.

Таблица 36 – Средние содержания химических элементов в пробах почв с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн), мг/кг (количество проб – 19)

Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание	Химический элемент	Содержание
Mg, %	0,59±0,06	Zr	112±8	Ho	0,6±0,04
P, %	0,07±0,01	Nb	14±1	Er	1,8±0,1
Ti, %	0,45±0,03	Mo	1,8±0,1	Tm	0,28±0,01
Mn, %	0,064±0,01	Ag	0,6±0,1	Yb	1,8±0,1
Fe, %	4,4±0,27	Cd	0,34±0,02	Lu	0,27±0,01
Ba, %	0,043±0,002	In	0,11±0,01	Hf	2,4±0,1
Be	2,5±0,1	Sn	2,6±0,2	Ta	0,92±0,06
Cr	126±10	Sb	2,0±0,4	W	1,8±0,4
Co	17±2	Te	0,17±0,04	Au	0,02±0,01
Ni	38±5	Cs	6,9±0,7	Hg	0,03±0,01
Cu	42±3	La	29±1	Tl	0,44±0,03
Zn	103±9	Ce	60±3	Pb	18±1
Ga	19±1	Pr	7,2±0,3	Bi	0,21±0,01
Ge	1,5±0,1	Nd	25±1	Th	6,7±0,4
As	32±20	Sm	4,8±0,3	U	1,8±0,1
Se	5,8±0,9	Eu	1,0±0,1	Ru	<0,1
Rb	74±5	Gd	4,6±0,4	Re	<0,01
Sr	116±8	Tb	0,61±0,05	-	-
Y	15±1	Dy	3,1±0,2	-	-
Количество проб					19

Примечания: среднее значение ± стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в почвах, превышающие значения кларка верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003).

Для содержаний Be, Mg, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, Ga, Ge, Se, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th в качестве средних приняты средние арифметические значения в силу соответствия их распределения нормальному закону по результатам расчёта отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам. Для содержаний P, Ti, Mn, Cu, As, Rb, Ag, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, W, U за средние приняты средние геометрические значения, т.к. для них установлено отличное от нормального распределение.

Содержания большинства элементов характеризуются однородным распределением (74% от числа анализируемых элементов). В данную группу

входят в основном литофильные элементы, в том числе РЗЭ. Наиболее неоднородное распределение установлено для халькофильных элементов (Sb, Hg, As, Ag,) и Au (таблица 37). Минимальное значение коэффициента вариации выявлено для содержаний Nd (14%), максимальное значение – для содержаний Ag (17 130%). Наибольший разброс содержаний выявлен для Au и Ag (рисунок 46).

Таблица 37 – Характеристика распределения химических элементов по коэффициенту вариации для проб почв с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн) (количество проб – 19)

Группа	Коэффициент вариации, %	Характер распределения	Химические элементы
I	< 39	Однородное	Be, Ti, Cr, Fe, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Tl, Pb, Bi, Th, U
II	40-79	Неоднородное	Mg, P, Mn, Co, Ni, Se, Te, Cs, W
III	80-119	Сильно неоднородное	Sb, Hg
IV	> 120	Крайне неоднородное	As, Ag, Au

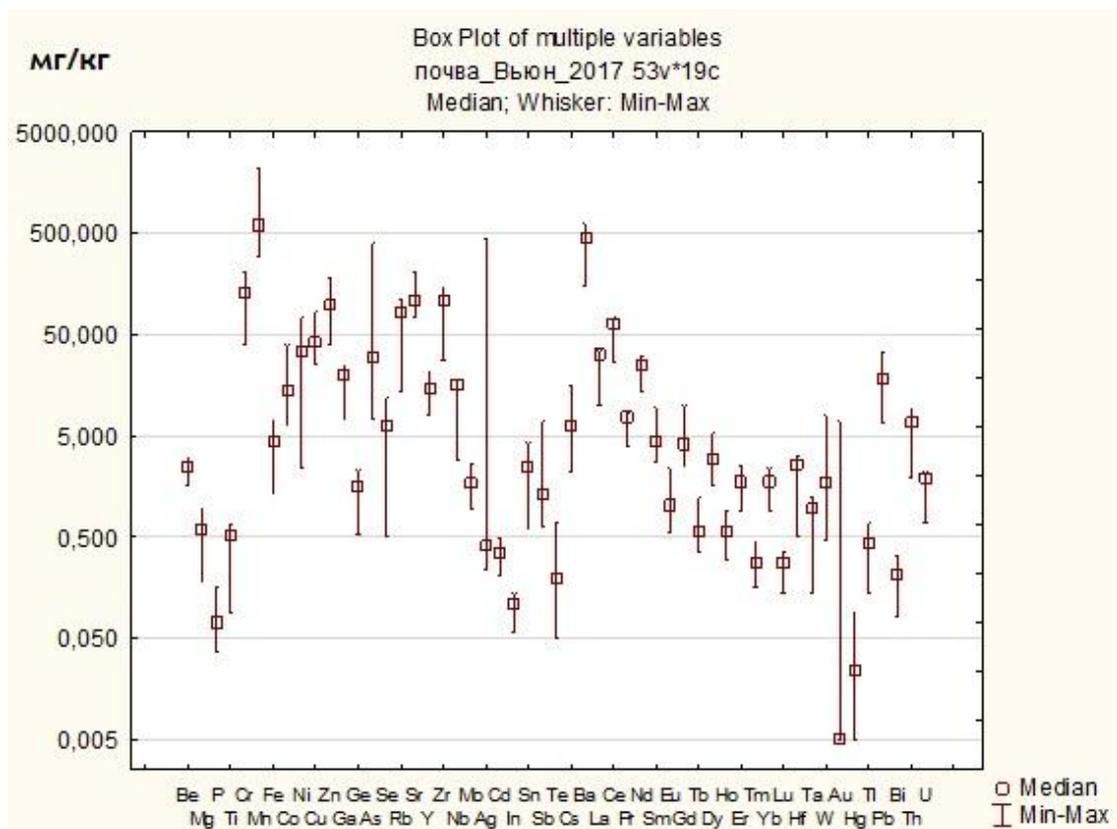


Рисунок 46 – Диаграмма размаха содержаний химических элементов в почвах территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн) (количество проб – 19)

Неоднородность наглядно проявляется на примере гистограммы распределения содержаний Sb, которая представлена на рисунке 47.

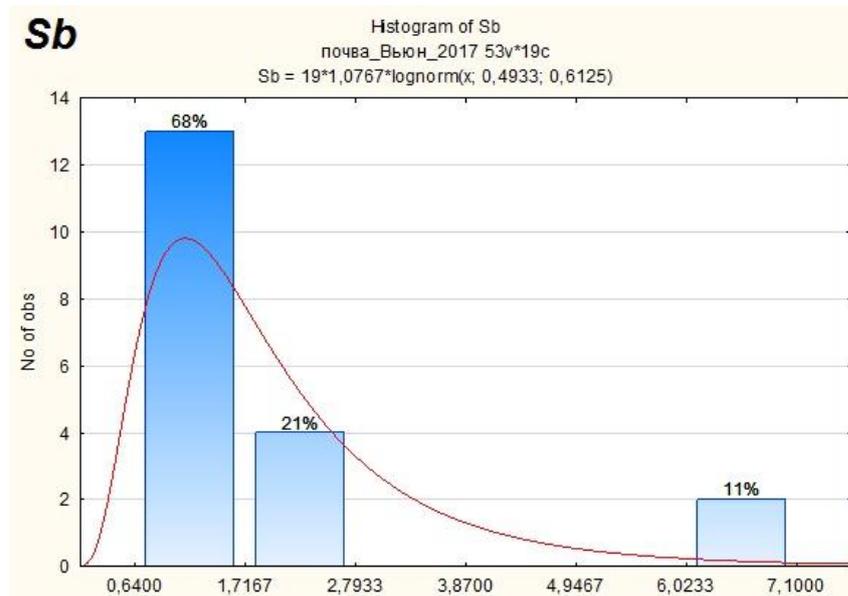


Рисунок 47 – Гистограмма распределения содержаний Sb в пробах почв с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн)

Касаемо почв рудного поля в целом, содержания элементов-спутников малосульфидного золотокварцевого оруденения имеют характер распределения от неоднородного (Se, Te) до крайне неоднородного (As, Au, Ag). Гистограмма распределения содержаний Sb в почвах рудного поля приведена на рисунке 48.

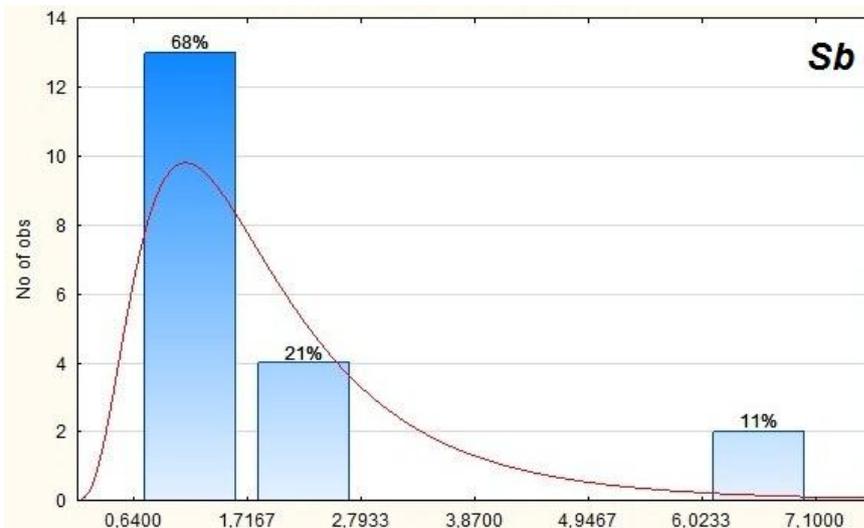


Рисунок 48 – Гистограмма распределения содержаний Sb в пробах почв Вьюнского золоторудного поля

По некоторым химическим элементам проведено сравнение концентраций в почвах исследуемой территории с опубликованными данными по Центральной Якутии. Согласно данным Л.С. Волковой и В.Н. Макарова (Волкова и др., 2019), в почвах Вилуйского района Якутии фоновые содержания Pb, Mn и Cd достигают величин 32,4, 215 и 0,1 мг/кг соответственно, тогда как в почвах месторождения Вьюн средние концентрации этих элементов составляют 18,2, 757 и 0,3 мг/кг. В целом, данные элементы не играют основной роли в процессах рудообразования на месторождении Вьюн, в отличие от As, Sb и др., которые входят в состав основных рудных минералов и распространены в почвах. В контексте величин концентраций данных химических элементов почвы месторождения Вьюн характеризуются более высокими значениями в сравнении с некоторыми районами естественных геохимических аномалий, например, Каракульским месторождением полиметаллов (Архипов и др., 2018).

Геохимическая специализация почв устанавливалась путём расчёта кларков концентраций химических элементов для средних содержаний по Вьюнскому рудному полю и месторождению Вьюн. Расчёт производился 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). Полученные кларки концентраций являлись основой для построения геохимических рядов химических элементов, т.е. групп элементов, чьи содержания в изучаемом компоненте природной среды отличаются от кларкового уровня в большую сторону (Саэт и др., 1990). Геохимические ряды химических элементов в почвах рудного поля и месторождения относительно вышеуказанных кларков приведены в таблице 38.

Опробованные почвы характеризуется высокими кларками концентраций халькофильных элементов, а именно Te, Se, As, Au, Ag, Sb. Данные химические элементы формируют основу литогеохимической специализации территории месторождения и рудного поля. Кроме того, содержания, превышающие кларковые, зафиксированы для некоторых тяжёлых металлов (Zn, Cr, Mo, Fe, Co, Cu).

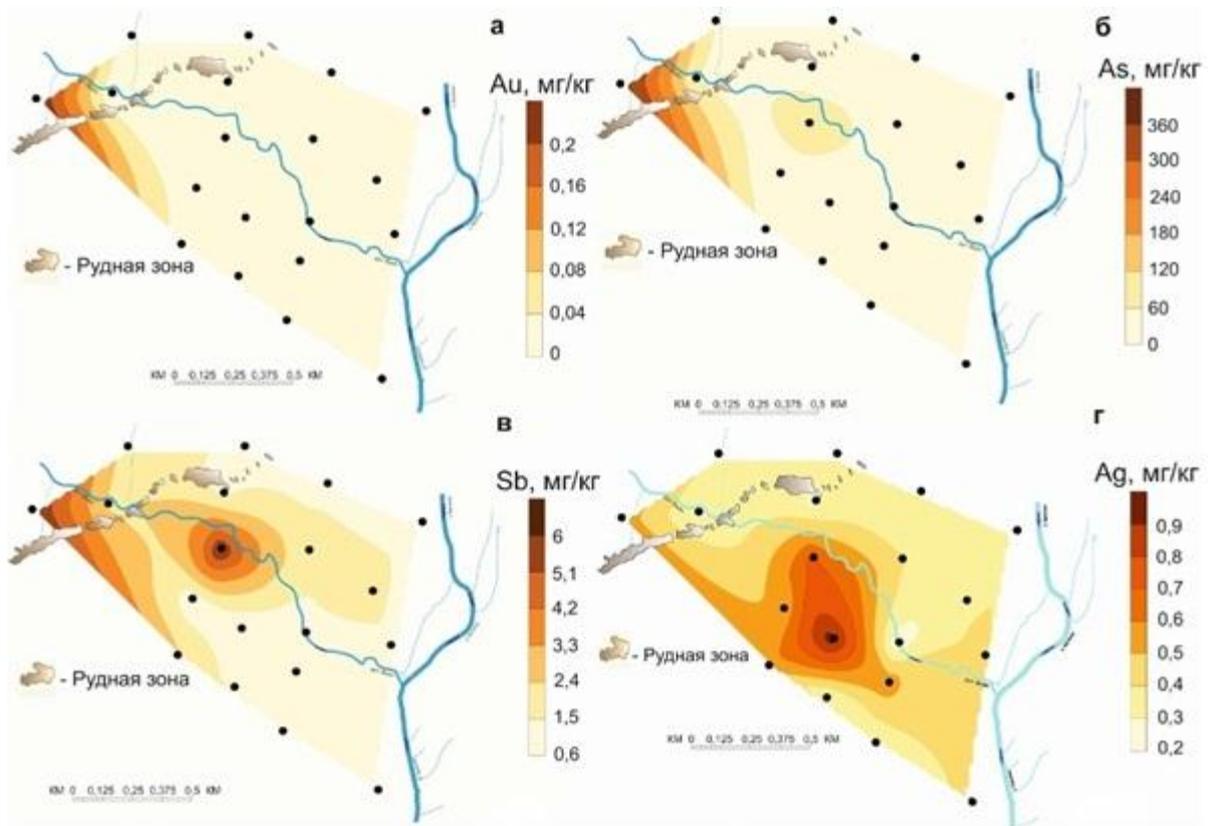
Таблица 38 – Геохимические ряды химических элементов в почвах Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн

Вьюнское золоторудное поле (37 проб)		
Кларк	Автор	Геохимический ряд химических элементов
Кларк химических элементов верхней части континентальной земной коры	Н.А. Григорьев, (2003)	$Te_{6,9} - Se_{3,8} - As_{5,9} - Ag_{3,5} - Au_{2,5} - Sb_{2,2} - Zn_{1,5} - Cr_{1,3} - Mo_{1,2} - Ti_{1,2} - Pb_{1,2} - Fe_{1,1} - Co_{1,1} - Cu_{1,1} - Ga_{1,1}$
Кларк химических элементов в почвах континентов	А.А. Ярошевский, (1990)	$Se_{14} - Au_{11} - As_{5,5} - Ag_{3,8} - Sn_{2,4} - Cs_{2,1} - Cd_{2,1} - Co_{2,1} - W_{2,1} - Sb_{2,0} - Cr_{2,0} - Cu_{1,9} - Zn_{1,9} - Be_{1,8} - Ni_{1,8} - Mn_{1,5} - Fe_{1,2}$
Месторождение Вьюн (19 проб)		
Кларк	Автор	Геохимический ряд химических элементов
Кларк химических элементов верхней части континентальной земной коры	Н.А. Григорьев, (2003)	$Te_{5,9} - Se_{3,8} - As_{5,7} - Ag_{5,5} - Au_{4,0} - Sb_{2,5} - Zn_{1,4} - Cr_{1,4} - Ti_{1,2} - Fe_{1,1} - Mo_{1,1} - Cu_{1,1} - Pb_{1,1}$
Кларк химических элементов в почвах континентов	А.А. Ярошевский, (1990)	$Au_{17} - Se_{15} - Ag_{6,0} - As_{5,3} - Sn_{2,4} - Cs_{2,3} - Sb_{2,3} - Cd_{2,1} - Cr_{2,1} - Ni_{1,9} - Co_{1,9} - W_{1,8} - Cu_{1,8} - Zn_{1,7} - Be_{1,6} - Mn_{1,3} - Ti_{1,2}$

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. При этом средние содержания большинства лито- и сидерофильных элементов в почвах месторождения находятся на околосреднем уровне относительно кларка верхней части континентальной земной коры (Григорьев, 2003), или значительно ниже него, что в целом характерно для почв месторождений золота Якутии (Макаров, 2008).

Анализ пространственного распределения концентраций химических элементов позволил установить, что наибольшее количество элементов в

повышенных концентрациях относительно средних значений приурочено к центральной части рудной зоны месторождения Вьюн. В частности, в пробах почв, отобранных в районе локализации рудного тела, в 1,4–12,6 раза повышены содержания Sb, W, As, Cs, Co, Cu, Te, Cr, Pb, Zn, Tm и Ge. Наибольшее количество химических элементов в повышенных концентрациях отмечено в пробе №3, отобранной в центре зоны локализации оруденения. Максимальные превышения средних значений в данной пробе отмечены для W (в 4,4 раза), для Sb (в 3,5 раза), для As (в 3,5 раза), Co (в 2,4 раза), Cu (в 2 раза), Cr (в 1,7 раза). Максимальные содержания специфичных для месторождения элементов, также приурочены к рудной зоне, что наглядно иллюстрируют схемы распределения содержаний Au, As, Sb, Ag, Se, Te (рисунок 49 а–е). Данный факт еще раз подтверждает ведущую роль влияния ореолов рассеяния рудного тела при формировании геохимических особенностей почв. Следует также отметить проявленность повышенных концентраций элементов-спутников малосульфидной золотокварцевой минерализации (As, Sb, Ag), и вне рудной зоны, что потенциально может свидетельствовать о развитии ореолов рассеяния скрытого оруденения.



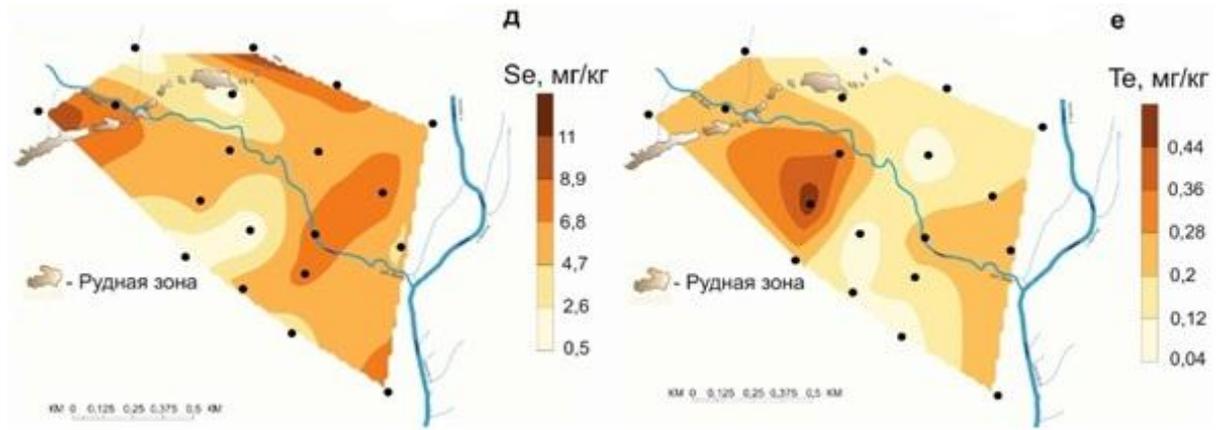


Рисунок 49 – Схемы распределения содержаний Au (а), As (б), Sb (в), Ag (г), Se (д), Te (е) в почвах территории месторождения Вьюн

Согласно С.В. Григоряну (Григорян, 1974), для различных месторождений полезных ископаемых с рудными телами крутого падения, к числу которых относится месторождение Вьюн, наблюдается чётко выраженная осевая зональность элементов-индикаторов оруденения, проявляющаяся в смене надрудных элементов подрудными в первичных ореолах рудных тел. Для золоторудных месторождений в качестве надрудных явно выделяются такие химические элементы, как 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 почв Вьюнского золоторудного поля величина отношения Au/As составляет 0,0003, а для месторождения Вьюн – 0,0006. При этом содержание Au для почв рудного поля составляет 0,011 мг/кг, As – 33 мг/кг, а для месторождения Au – 0,02 мг/кг, As – 32 мг/кг.

В ходе выявления геохимической специфики компонентов природной среды немаловажно иметь представление о различных глобальных оценках содержаний тех или иных химических элементов в природных объектах, потенциальных формах их нахождения, особенностях миграции и концентрирования в природных обстановках.

Подобная информация приводится ниже об элементах, характеризующихся в почвах месторождения Вьюн высокими уровнями концентрирования и формирующих основу литогеохимической специализации территории месторождения.

Селен и теллур являются родственными в геохимическом плане элементами (Kabata-Pendias, 2010). Среднее содержание Se в земной коре составляет 0,15 мг/кг (Григорьев, 2003), тогда как оценки содержания данного элемента в почвах мира составляют около 0,33 мг/кг по А. Kabata-Pendias (Kabata-Pendias, 2010) и 0,4 мг/кг по F. Fordyce (Fordyce, 2005). При этом в почвах Европы средняя концентрация Se достигает 0,03 мг/кг (Kabata-Pendias, 2010). Концентрации Те в земной коре ощутимо ниже и имеют значения около 0,002 мг/кг (Greenwood, 1984). Se и Те имеют химическое сходство с серой (халькофильные элементы) (Greenwood, 1984) за счёт близости ионных радиусов. Данные элементы изоморфно входят в кристаллические решётки сульфидных минералов. Из-за процессов выветривания на сульфидных рудных объектах, Se и Те могут поступать в природные объекты, например, в почвы (Pyrzynska, 2002).

Среднее содержание мышьяка в горных породах достигает 5,6 мг/кг (Григорьев, 2003). Особенностью данного элемента является высокая подвижность и активная миграция в природных обстановках. При разрушении коренных пород As мигрирует вверх по разрезу в виде анионных комплексов $H_2AsO_4^-$ или $HAsO_4^{2-}$. Подвижность и биодоступность As контролируется адсорбцией и десорбцией (Fendorf et al., 2004).

Содержание золота в земной коре составляет 0,0044 мг/кг (Григорьев, 2003). В почвах, как правило, превалирует прочно закреплённая форма Au, связанная с гумусовой органической составляющей (Gray et al., 1990; Bowel, 1992). Подвижность данного элемента в приповерхностных условиях определяется взаимодействием с органическими лигандами (молекулами или атомами, связанными с комплексообразователями), а в миграции Au ведущую роль играют органические соединения гумусовой природы и фульвокислоты, которые, взаимодействуя с Au и осаждая его, могут формировать с ним стабильные

коллоиды (Kabata-Pendias, 2010; Wang-Wang et al., 2014). Также встречаются формы нахождения Au, ассоциированные с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, которые выступают в качестве сорбентов (Pandey et al., 2000; Wang-Wang et al., 2014).

Содержание серебра в земной коре достигает 0,11 мг/кг (Григорьев, 2003). В почвенном покрове наиболее часты концентрации в диапазоне от 0,006 до 0,04 мг/кг (Kabata-Pendias et al., 2007). Ag – наиболее активный из благородных металлов, образует три ионных модификации (Ag^+ , Ag^{2+} и Ag^{3+}) (Ratte, 1999). В результате химического выветривания горных пород, процессов перераспределения и реконцентрации, Ag может формировать аномалии в пределах зоны гипергенеза (Shuster et al., 2017). Среди процессов химического выветривания, обуславливающих поступление Ag в почву, можно выделить следующие: окислительное растворение первичных сульфидов и сульфосолей материнской породы, высвобождение Ag в виде водорастворимых ионов (Ag^+), иммобилизация Ag^+ в почве путём сложной комбинации механизмов связывания, наиболее эффективным из которых является захват в кристаллической решётке. По причине накопления Ag в зоне гипергенеза, расположенные над рудными площадями почвы, где оруденению сопутствует Ag, часто бывают обогащены данным элементом (Fernández-Caliania et al., 2019). В адсорбции Ag в почвах приоритетную роль играет органическая составляющая, главным образом – гуминовые вещества, которые участвуют в механизмах комплексообразования или обмена (Settimio et al., 2015; Fernández-Caliania et al., 2019). Попадая в почвенный раствор, Ag становится высокоподвижным и склонным к ремобилизации (Jacobson et al., 2005), но в то же время Ag^+ имеет тенденцию со временем восстанавливаться до металлического Ag и связываться с оксидами Fe и оксигидроксидами, что снижает его подвижность (Settimio et al., 2015).

Сурьма в земной коре находится главным образом в форме сульфидных руд за счёт своего сродства к сере и относится к числу халькофильных элементов (Greenwood, 1984). Вокруг рудных тел в почвенном покрове данный элемент может фиксироваться в минеральной форме в ореолах рассеяния (Shahida et al., 2019).

С помощью кластерного анализа была построена дендрограмма матрицы корреляционных связей элементов для почв месторождения Вьюн (рисунок 50). В результате выделен кластер, включающий в себя объединённые значимыми связями элементы-спутники малосульфидной золото кварцевой минерализации (As, Sb, Cu), что отражает геохимическую специфику месторождения.

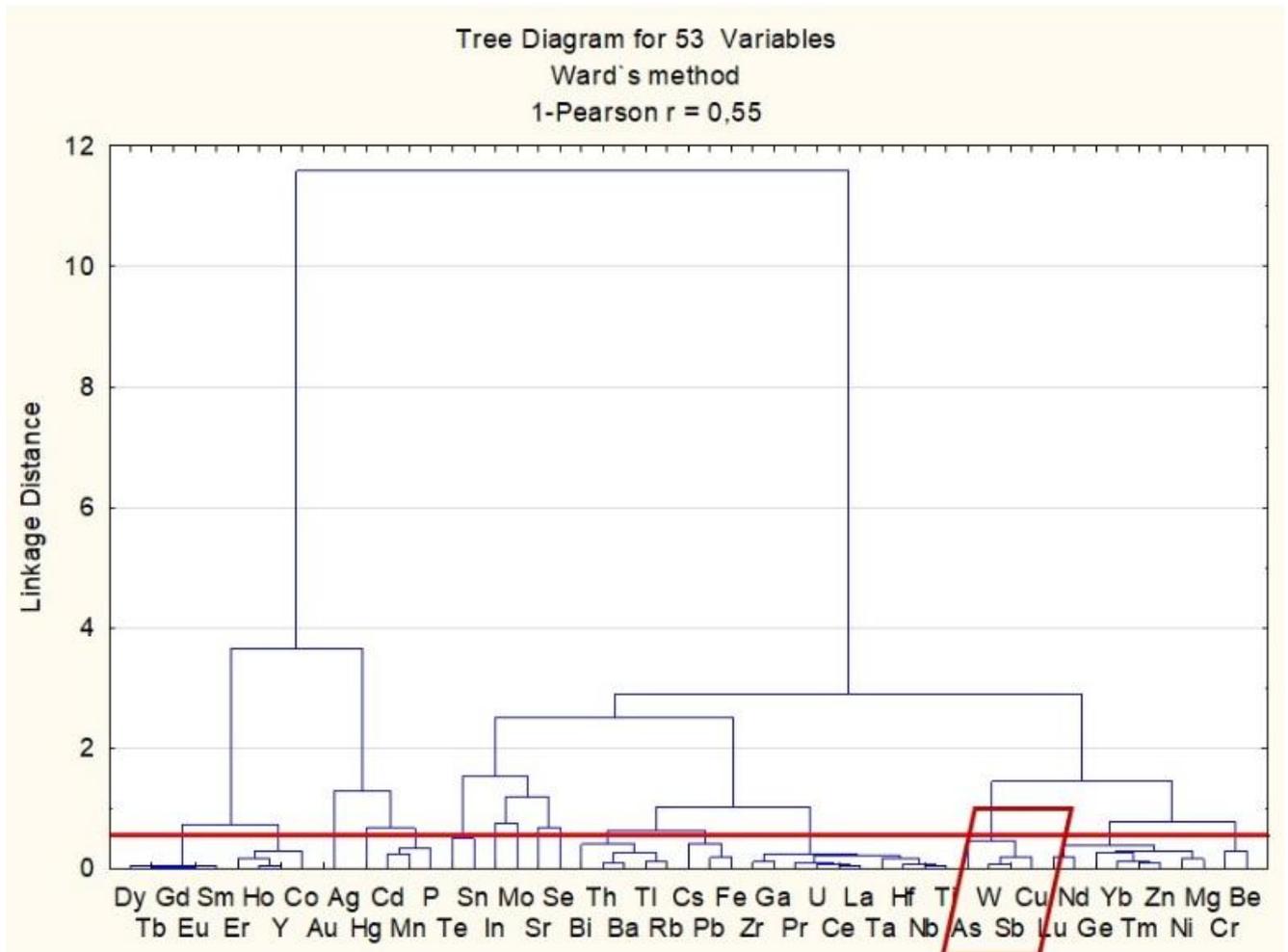


Рисунок 50 – Дендрограмма матрицы корреляционных связей элементного состава почв месторождения Вьюн (количество проб – 19; $1-r_{0,05} = 0,55$)

Результаты сопоставления концентраций химических элементов (Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg, Pb) и группы суммации химических элементов (Pb+Hg) в почвах Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн с нормативами ПДК для почв (СанПиН 1.2.3685-21) относительно валовых содержаний представлены в таблице 40.

Таблица 40 – Сравнение концентраций химических элементов в почвах Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн с нормативами ПДК для почв (доли ПДК) относительно валовых содержаний согласно СанПиН 1.2.3685-21

№ пробы	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Hg	Pb	Pb+Hg
<i>Валовые ПДК для почв, мг/кг</i>	1500	80	132	220	10	2	4,5	2,1	130	21
Среднее содержание в почвах Вьюнского золоторудного поля (37 проб), мг/кг	750	35	43	112	33	0,34	1,8	0,03	20	20,03
Доли ПДК для средних содержаний в почвах Вьюнского золоторудного поля	0,5	0,4	0,3	0,5	3,3	0,2	0,4	0,01	0,2	0,95
Среднее содержание в почвах месторождения Вьюн (19 проб), мг/кг	640	38	42	103	32	0,34	2,0	0,03	18	18,03
Доли ПДК для средних содержаний в почвах месторождения Вьюн	0,4	0,5	0,3	0,5	3,2	0,2	0,4	0,01	0,1	0,9
1	0,5	0,9	0,5	0,7	40,2	0,2	1,5	0,031	0,2	1,2
2	0,5	0,8	0,4	0,7	6,0	0,2	0,6	0,006	0,2	1,0
3	0,7	0,7	0,6	0,8	11,0	0,2	1,6	–	0,3	1,6
4	0,3	0,5	0,3	0,5	3,5	0,1	0,4	0,034	0,2	1,0
5	0,2	0,7	0,3	0,6	3,4	0,1	0,3	–	0,1	0,9
5/10	0,5	0,6	0,3	0,6	3,1	0,2	0,3	0,012	0,2	1,0
6	0,4	0,8	0,4	0,6	5,6	0,2	0,4	0,007	0,2	1,0
7	0,4	0,4	0,3	0,5	3,5	0,2	0,6	0,005	0,1	0,8
8	1,2	0,2	0,3	0,2	0,7	0,2	0,1	0,032	0,1	0,3
9	0,7	0,3	0,3	0,4	3,0	0,1	0,3	0,031	0,2	1,1
10	0,2	0,1	0,3	0,3	2,8	0,1	0,4	0,011	0,1	0,6
10/14	0,2	0,3	0,2	0,4	2,1	0,2	0,3	0,009	0,1	0,7
11	0,3	0,4	0,2	0,5	1,7	0,2	0,3	–	0,1	0,9
12	0,6	0,1	0,4	0,3	0,9	0,2	0,2	0,045	0,1	0,6
13	0,3	0,1	0,3	0,2	2,2	0,1	0,3	0,017	0,1	0,7
14	0,3	0,4	0,4	0,3	2,4	0,1	0,3	0,025	0,1	0,9
16	1,4	0,4	0,3	0,5	1,8	0,2	0,3	0,030	0,1	0,8
17	0,4	0,6	0,3	0,4	3,5	0,1	0,3	0,008	0,1	0,9
19	0,4	0,6	0,2	0,4	2,9	0,2	0,2	–	0,1	0,7

В ходе сопоставления содержаний элементов с нормативами для почв было установлено, что наибольшие превышения ПДК характерны для содержаний As, типичного для руд месторождения элемента. Превышения выявлены в 17 из 19 проб с территории месторождения Вьюн, причём максимальные из них (6,0–40,2 долей ПДК) установлены в пробах №1–3, отобранных в районе залегания рудного тела,

вскрытых разведочными штольнями. Средние содержания As по рудному полю и месторождению также превышают ПДК (3,3 и 3,2 долей ПДК соответственно).

Отмечены единичные случаи небольших превышений ПДК по Mn (пробы №8 и №16) и Sb (пробы №1 и №3). В 7 из 19 проб выявлены превышения ПДК по группе суммации Pb+Hg (1,0–1,6 доли ПДК).

5.2 Характеристика минерального состава почв территории Вьюнского золоторудного поля

С целью установления закономерностей между минеральным составом руд и геохимией почв, были проведены комплексные исследования минерального вещества проб при помощи бинокулярного оптического микроскопа, рентгеновского дифрактометра и сканирующего электронного микроскопа с функцией микроанализа.

В ходе исследования вещества проб почв под бинокулярным оптическим микроскопом был определён состав по методу палеток С.А. Вахромеева (Вахромеев, 1956). Результаты определения приведены в таблице 41.

Таблица 41 – Результаты визуального определения состава проб почв

Компонент	Доля в пробе, %
Полевые шпаты	40
Кварц	25
Слюдистые минералы (биотит, мусковит и др.)	20
Биогенные частицы	10
Карбонатные минералы	5

Основную часть изученного вещества проб почв составляют полевые шпаты. Среди других породообразующих минералов выделяются кварц (рисунок 51), слюды и карбонатные минералы. Известно, что приповерхностные части рудных тел претерпевают изменения и последующее развитие вторичных процессов, главным из которых является окисление (Черепнин и др., 1981). Не является исключением и исследуемое месторождение. Фотографии окисленных минеральных агрегатов показаны на рисунке 52 а–б.



Рисунок 51 – Кварц (увеличение 35х)

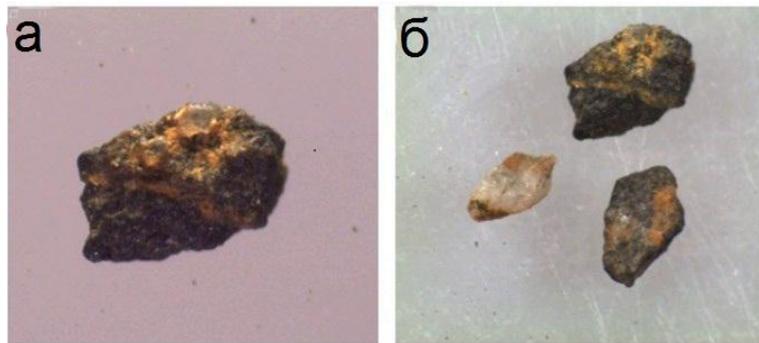


Рисунок 52 а–б – Окисленные минеральные агрегаты (увеличение 35х)

Согласно опубликованным данным (Васильева, 2016), в почвах Центральной Якутии происходит образование вторичных глинистых минералов. В минеральном веществе почв на исследуемой территории в большом количестве обнаружен глинистый минерал иллит. Результаты рентгенофазового анализа общей массы минерального вещества проб почв показаны на рисунке 53 а–б.

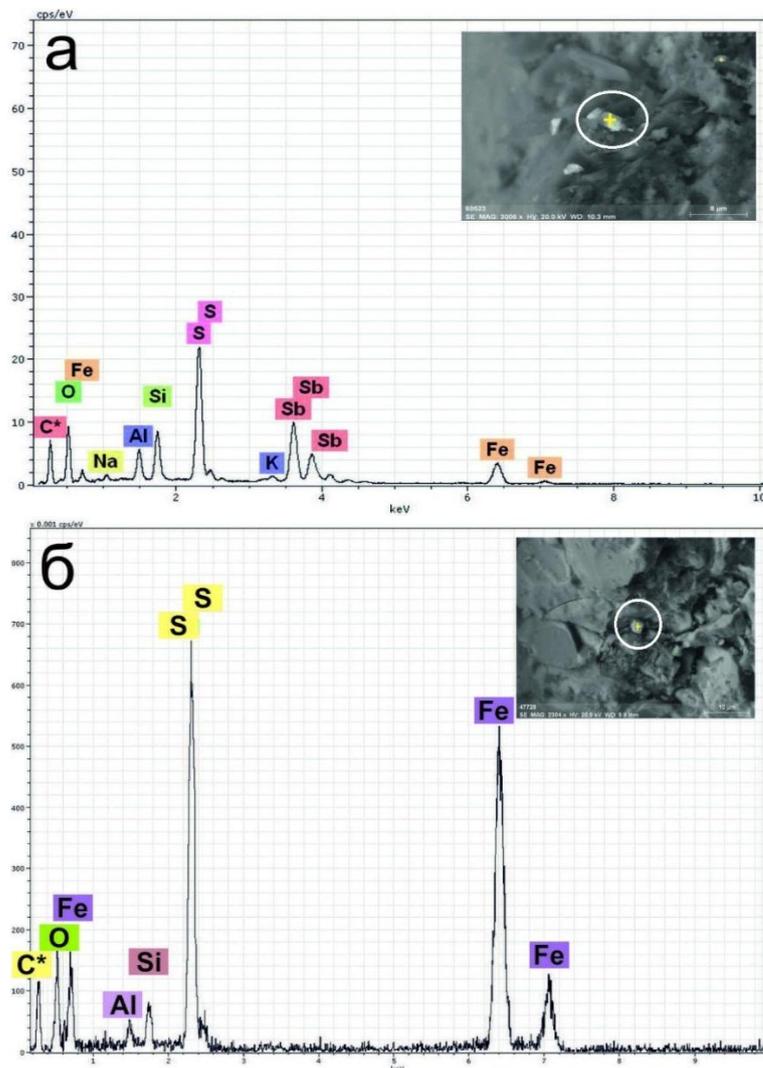


Рисунок 53 а–б – Содержание минералов в пробах почв месторождения Вьюн по данным рентгенофазового анализа, %

Минеральный состав почв схож с минеральным составом донных отложений водотоков, который также представлен алюмосиликатными минералами.

Как в почвах, так и донных отложениях водотоков установлено присутствие мусковита. Мелкочешуйчатая его разновидность в виде серицита входит в состав околорудных метасоматитов (березитов), которые являются поисковым признаком золоторудных жильных месторождений (Петров, 2010).

Под бинокулярным оптическим микроскопом для анализа методом сканирующей электронной микроскопии с энерго-дисперсионной спектроскопией отбирались минеральные частицы, представляющие интерес с точки зрения особенностей рудной минерализации. По результатам исследования в почвах обнаружены специфичные для месторождения сульфиды Sb (рисунок 54 а) и Fe (рисунок 54 б), а также частицы Cu (рисунок 54 в).



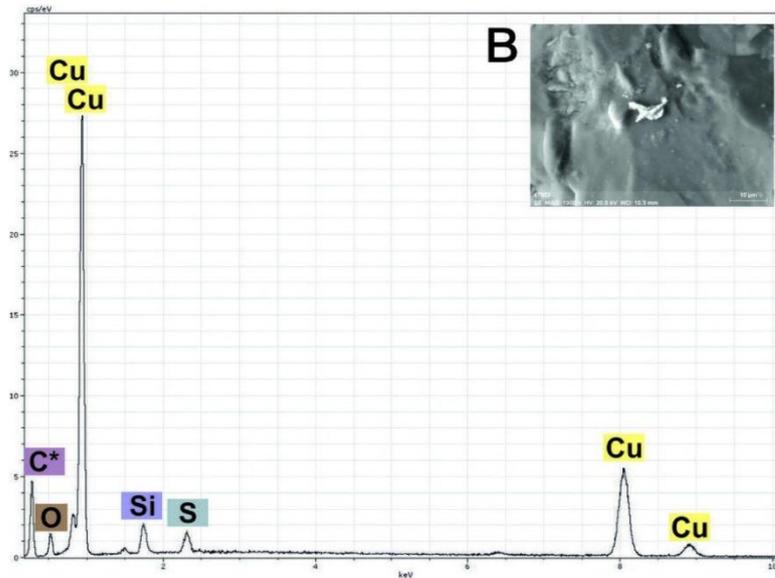
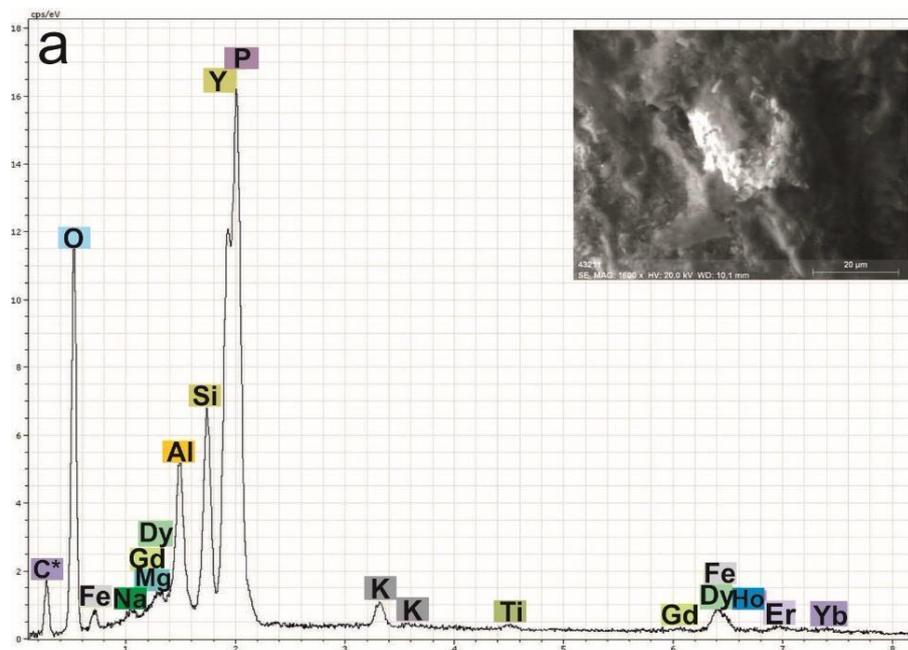


Рисунок 54 – Энергодисперсионные спектры и снимки в режиме обратно рассеянных электронов: *а*) сульфид Sb (% масс: Sb – 39; S – 18); *б*) сульфид Fe (% масс: Fe – 59; S – 26); *в*) частица Cu (% масс: Cu – 89; S – 3)

Кроме того, выявлены фосфаты РЗЭ (рисунок 55 а–б) и циркон (рисунок 55 в). Месторождение Вьюн расположено в границах Бурганджинского гранитоидного массива, что влечёт за собой проявленность в почвенном покрове редкоземельной минерализации в виде ксенотима и монацита, которые попадают в почвы в результате процессов выветривания горных пород.



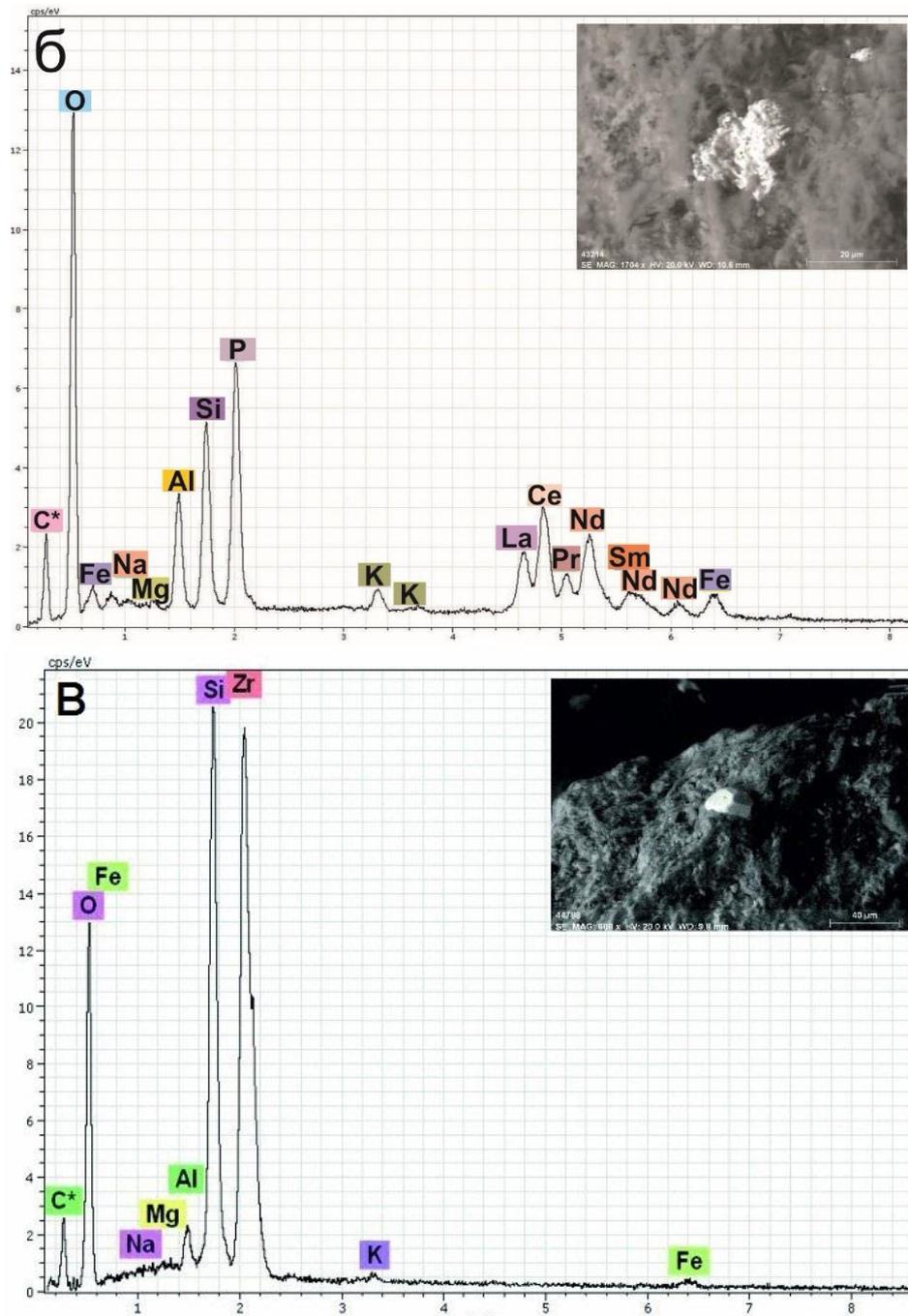


Рисунок 55 – Энергодисперсионные спектры и снимки в режиме обратно рассеянных электронов: *а*) ксенотим YPO_4 (% масс: Y – 27; P – 12, O – 40); *б*) монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$ (% масс: Ce – 21; La – 11; Nd – 7; P – 11; O – 29); *в*) циркон (ZrSiO_4) (% масс: Zr – 44; Si – 13; O – 41)

Теллур и селен, чьи концентрации существенно выше кларковых, наряду с Ag, Bi, Sb, Cu, As, Hg определяют геохимию Au (Сергеев и др., 2015). Наиболее часто концентрации данных химических элементов в природе связаны с сульфидными рудами (Синдеева, 1959). В ходе исследований минерального состава

почв данные элементы не найдены в минеральном виде, что может быть обусловлено их нахождением в преимущественно рассеянной форме и, как отмечалось ранее, изоморфным включением в кристаллические решётки сульфидных минералов (Коваленкер, 1977), среди которых основным носителем Se является пирит. Высокие содержания Se присущи также галениту, халькопириту и некоторым другим сульфидам (Кирезиди, 2018). Стоит отметить, что Se в почве также может находиться в виде органических соединений (метилселениды, ионы триметилселенония или селеноаминокислоты) (Fendorf et al., 2004).

Золото также не обнаружено в составе минералов, но в то же время его концентрации в исследованных почвах превышают кларковые уровни. Данный факт приводит к вопросу о формах нахождения данного элемента. Ведущая роль в процессах миграции и концентрирования Au в зоне гипергенеза принадлежит явлению комплексообразования с органическими веществами (Wang-Wang et al., 2014). В почвах, как правило, преобладает форма нахождения Au, связанная с гумусовой органической составляющей (Vlassopoulos, 1990).

Мышьяк не обнаружен в минеральной форме в исследуемых пробах, однако в рудах месторождения присутствует в арсенопирите. По данным экспериментальных работ (Сергеев и др., 2015), для почв месторождений золота наиболее характерна анионообменная форма нахождения As, а также оксидная и гидроксидная с Fe и Mn.

Повышенные относительно кларков содержания серебра и сурьмы обусловлены развитием ореолов рассеяния элементов рудного тела.

5.3 Содержания химических элементов во фракциях почвы

Содержания химических элементов в валовых пробах почвы и в отдельных фракциях различной размерности были определены методом ИНАА. Схема расположения пунктов отбора проб почвы с указанными пунктами, пробы с которых были взяты для исследований элементного состава отдельных фракций, приведена на рисунке 56.

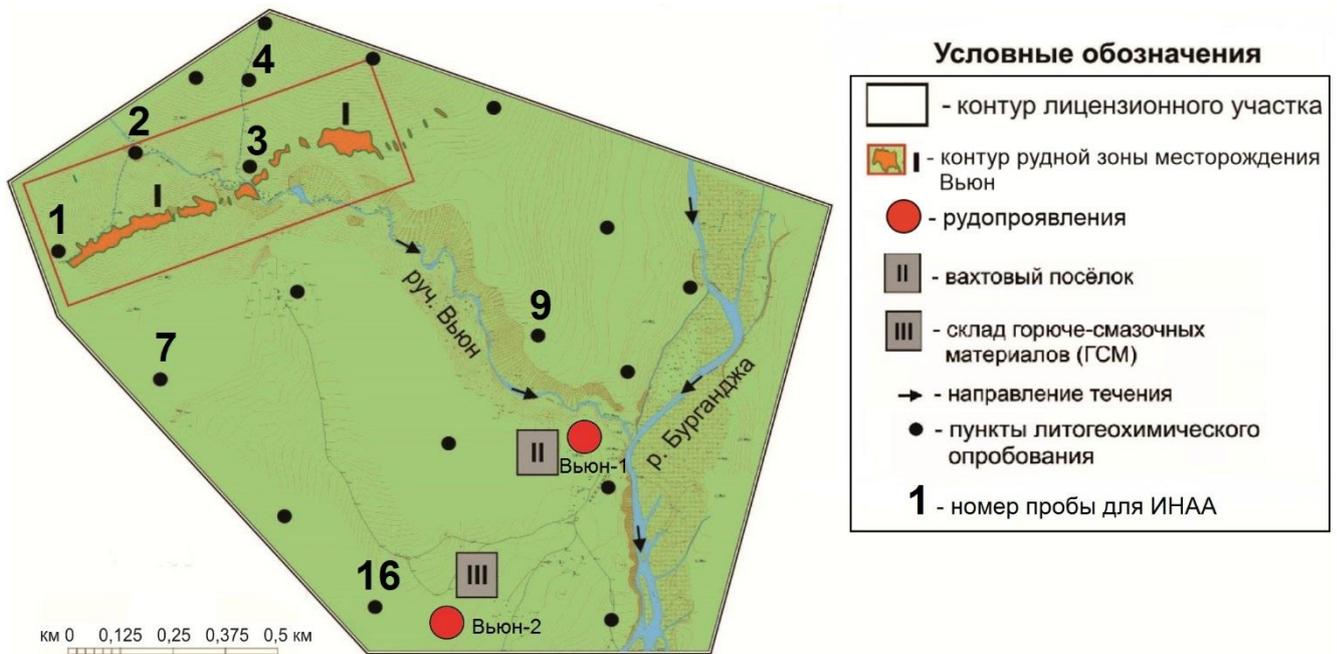


Рисунок 56 – Схема расположения пунктов отбора проб почвы на территории месторождения Вьюн для инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА)

Пробы почвы, отобранные в районе рудной зоны месторождения (№1–4), а также другие выделяющиеся высокими относительно средних по месторождению концентрациями элементов-спутников малосульфидного золотокварцевого оруденения (пробы №7, №16, №9), ситовым анализом были разделены на фракции размерностью 0,5–0,25 мм, 0,25–0,1 мм и <0,1 мм. Масса каждой навески при этом составляла 100 ± 1 мг. Всего было проанализировано 28 навесок из 7 проб почвы с учётом валовых. Были определены концентрации 28 химических элементов, включая тяжёлые металлы, редкоземельные и радиоактивные элементы. Средние содержания химических элементов во фракциях почвы, размерностью <1 мм (валовая), 0,5–0,25 мм, 0,25–0,1 мм и <0,1 мм, показаны на рисунке 57.

Среди элементов, формирующих основу ранее установленной литогеохимической специализации территории золоторудного месторождения Вьюн, наибольшие концентрации As зафиксированы для пробы №1, отобранной в районе рудной зоны, причём максимальная концентрация (655 мг/кг)

установлена для тонкой фракции почвы, размерностью <0,1 мм. Концентрации Au в большей части проб ниже предела обнаружения. Однако, в пробе №1 для фракции <0,1 мм концентрация Au зафиксирована на уровне 0,227 мг/кг, что в 51,5 раз превышает кларк верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву (Григорьев, 2003). Для Sb не отмечено закономерностей в дифференциации концентраций по фракциям почвы. Наибольшие концентрации данного элемента (7,4–7,8 мг/кг) установлены для пробы №3, также приуроченной к локализации рудной зоны.

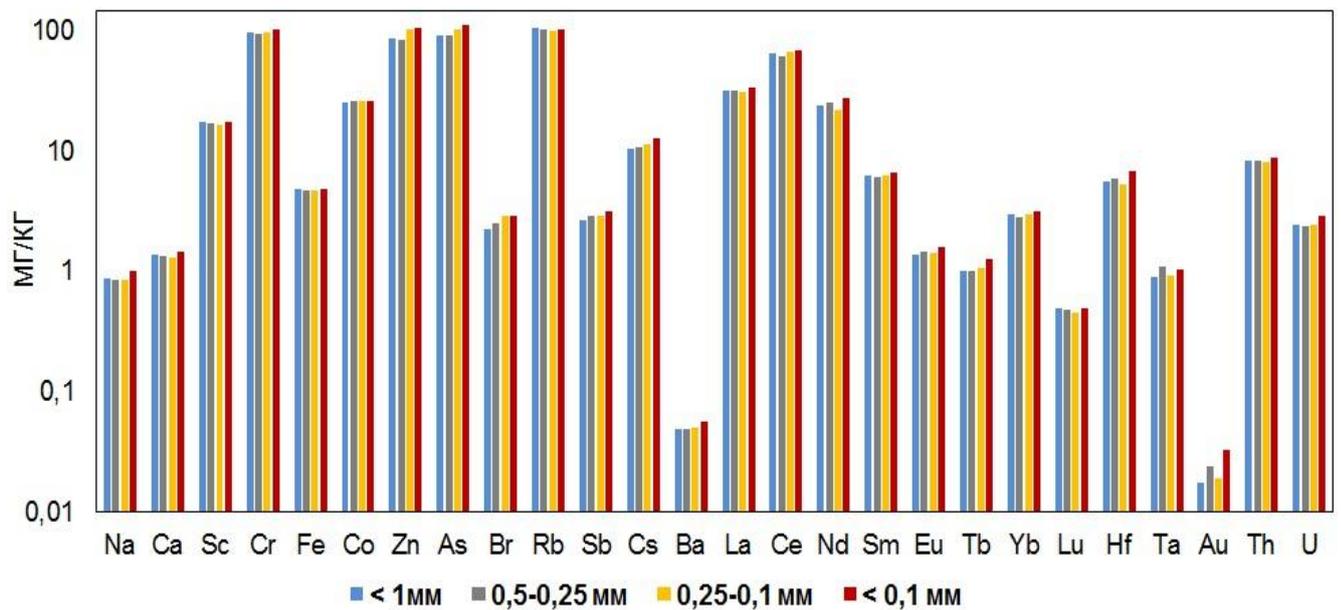


Рисунок 57 – Средние содержания химических элементов, полученных методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА), во фракциях почвы, мг/кг

Средние по 7 пробам концентрации наиболее специфичных для месторождения химических элементов (As, Sb, Au) во фракциях почвы, полученные методом ИНАА, представлены в таблице 42.

Таблица 42 – Средние содержания As, Sb и Au во фракциях почвы, полученные с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа, 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

Таким образом, установлено, что содержания специфичных для месторождения элементов-спутников сульфидной минерализации увеличиваются по мере уменьшения размерности фракции почвы. Наибольшими средними уровнями концентрирования As, Sb и Au, характеризуется тонкая фракция почвы, размерностью <0,1 мм, что потенциально свидетельствует о целесообразности её детального химического анализа в целях выявления токсичных элементов, а также проведения поисков скрытого малосульфидного золотокварцевого оруденения.

ГЛАВА 6: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВЬЮНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ

6.1 Характеристика территории Вьюнского золоторудного поля по данным изучения коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*)

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) (таблица 43).

Таблица 43 – Средние содержания химических элементов в пробах коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (количество проб – 35)

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Mg, %	0,045±0,002	Rb	1,0±0,1	Dy	0,003±0,0005
Al, %	0,018±0,002	Sr	82±10	Ho	0,0005±0,0001
P, %	0,064±0,005	Y	0,022±0,004	Er	0,0011±0,0002
K, %	0,14±0,009	Zr	0,013±0,0001	Yb	0,0006±0,0002
Ca, %	0,55±0,04	Nb	0,0025±0,0003	Hf	0,00035±0,00003
Mn, %	0,076±0,004	Mo	0,006±0,0009	Ta	0,0005±0,0001
Ba, %	0,01±0,0006	Ru	0,0023±0,0002	W	0,004±0,001
Li	0,032±0,011	Rh	0,0021±0,0003	Au	0,0033±0,0011
Be	0,006±0,001	Pd	0,0008±0,0001	Hg	0,017±0,002
Na	21±4	Ag	0,014±0,001	Tl	0,0037±0,0005
Sc	0,96±0,03	Cd	0,098±0,014	Pb	0,12±0,04
Ti	0,35±0,08	In	0,0005±0,0001	Bi	0,0016±0,0002
V	0,026±0,005	Sn	0,0068±0,0008	Th	0,0021±0,004
Cr	2,3±0,1	Sb	0,01±0,002	U	0,0009±0,0001
Fe	40±6	Cs	0,028±0,008	Te	<0,07
Co	0,24±0,03	La	0,029±0,005	Tm	<0,0005
Ni	1,0±0,16	Ce	0,045±0,007	Lu	<0,0005
Cu	3,5±0,1	Pr	0,005±0,0007	Re	<0,0005
Zn	30±3	Nd	0,019±0,003	Os	<0,0005
Ga	0,2±0,01	Sm	0,005±0,001	Ir	<0,0005

Продолжение таблицы 43

Ge	0,0041±0,0003	Eu	0,0022±0,0002	Pt	<0,007
As	0,073±0,017	Gd	0,005±0,0009	–	–
Se	0,15±0,02	Tb	0,0007±0,0001	–	–
Количество проб					35

Примечания: среднее значение ± стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в коре лиственницы даурской, превышающие значения среднего состава референтного растения (Markert, 1992).

Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов в сухом веществе коры лиственницы приведены в таблице 44.

Таблица 44 – Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов (мг/кг) в пробах сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 35)

Элемент	Среднее содержание	Минимум	Максимум	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
Mg, %	0,045	0,019	0,075	1,8	30
Al, %	0,018	0,0015	0,046	1,5	67
P, %	0,064	0,02	0,16	9,3	48
K, %	0,14	0,058	0,29	25	36
Ca, %	0,55	0,2	1,2	551	42
Mn, %	0,076	0,038	0,13	5,8	32
Ba, %	0,01	0,0045	0,019	0,12	34
Be	0,006	0,004	0,024	0,00003	79
Sc	0,96	0,55	1,4	0,038	20
Cr	2,3	1,4	2,8	0,094	13
Co	0,24	0,037	0,85	0,038	82
Ga	0,2	0,1	0,32	0,0026	25
As	0,073	0,016	0,51	0,01	110
Rb	1,0	0,35	3,4	0,45	66
Sr	82	13	256	3428	71
Ru	0,0023	0,0005	0,0055	0,000002	64
Rh	0,0021	0,0002	0,0062	0,000002	72
Pd	0,0008	0,0005	0,0027	0,0000004	76
Cd	0,098	0,0056	0,35	0,007	82
Au	0,0033	0,0015	0,036	0,00004	140
Th	0,002	0,00057	0,0096	0,000005	91
U	0,001	0,00025	0,0037	0,0000007	82

Средние содержания химических элементов в пробах сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), отобранных на территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн), приведены в таблице 45.

Таблица 45 – Средние содержания химических элементов в пробах сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), отобранных на территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн), мг/кг (количество проб – 18)

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Mg, %	0,046±0,003	Rb	0,88±0,1	Dy	0,003±0,0008
Al, %	0,02±0,003	Sr	67±11	Ho	0,001±0,0002
P, %	0,06±0,006	Y	0,02±0,006	Er	0,001±0,0003
K, %	0,12±0,01	Zr	0,01±0,002	Yb	0,001±0,0003
Ca, %	0,51±0,04	Nb	0,003±0,0005	Hf	0,0004±0,0001
Mn, %	0,075±0,006	Mo	0,01±0,0009	Ta	0,001±0,0002
Ba, %	0,011±0,001	Ru	0,002±0,0003	W	0,01±0,001
Li	0,02±0,009	Rh	0,002±0,0002	Au	0,0055±0,002
Be	0,01±0,001	Pd	0,0009±0,0002	Hg	0,01±0,002
Na	25±6	Ag	0,02±0,003	Tl	0,003±0,0003
Sc	1,0±0,05	Cd	0,06±0,01	Pb	0,22±0,08
Ti	0,52±0,15	In	0,0005±0,00008	Bi	0,002±0,0003
V	0,04±0,01	Sn	0,0065±0,001	Th	0,002±0,0005
Cr	2,3±0,1	Sb	0,01±0,002	U	0,001±0,0002
Fe	42±9	Cs	0,03±0,009	Te	<0,07
Co	0,18±0,02	La	0,03±0,006	Tm	<0,0005
Ni	0,92±0,18	Ce	0,04±0,01	Lu	<0,0005
Cu	3,4±0,2	Pr	0,005±0,001	Re	<0,0005
Zn	37±4	Nd	0,02±0,005	Os	<0,0005
Ga	0,19±0,01	Sm	0,01±0,001	Ir	<0,0005
Ge	0,005±0,0005	Eu	0,002±0,0004	Pt	<0,007
As	0,12±0,03	Gd	0,01±0,001	–	–
Se	0,11±0,02	Tb	0,001±0,0002	–	–
Количество проб					18

Примечания: среднее значение ± стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в коре лиственницы даурской, превышающие значения среднего состава референтного растения (Markert, 1992).

В качестве средних для большинства рассматриваемых элементов были приняты средние арифметические значения содержаний ввиду соответствия их распределения нормальному закону по результатам расчёта отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам.

Группировка химических элементов по коэффициенту вариации приведена в таблице 46.

Таблица 46 – Характеристика распределения химических элементов по коэффициенту вариации для проб сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн) (количество проб – 18)

Группа	Коэффициент вариации, %	Характер распределения	Химические элементы
I	< 39	Однородное	Mg, K, Ca, Sc, Cr, Mn, Cu, Ga, Ba
II	40-79	Неоднородное	Al, P, Co, Zn, Ge, Se, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Eu, Hf, Hg, Bi
III	80-119	Сильно неоднородное	Be, Na, V, Fe, Ni, As, Y, Sb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Er, Ta, W, Th, U
IV	> 120	Крайне неоднородное	Li, Ti, Sn, Cs, Ho, Yb, Au, Pb

Химические элементы в пробах сухого вещества коры лиственницы характеризуются в основном неоднородным и сильно неоднородным (по 36% от числа принимаемых в расчёт элементов) характером распределения. Однородным распределением отличаются макроэлементы (Mg, K, Ca) и некоторые тяжёлые металлы. Крайне неоднородное распределение установлено для 8 элементов, в том числе для Au (величина коэффициента вариации составляет 158%).

Максимальная величина коэффициента вариации зафиксирована для Sn (399%), которое отличается большим разбросом содержаний, что наглядно показано на диаграмме размаха (рисунок 58). Стоит отметить, что широкий диапазон содержаний химических элементов в растениях типичен для территорий золоторудных объектов (Сорокина, 2007).

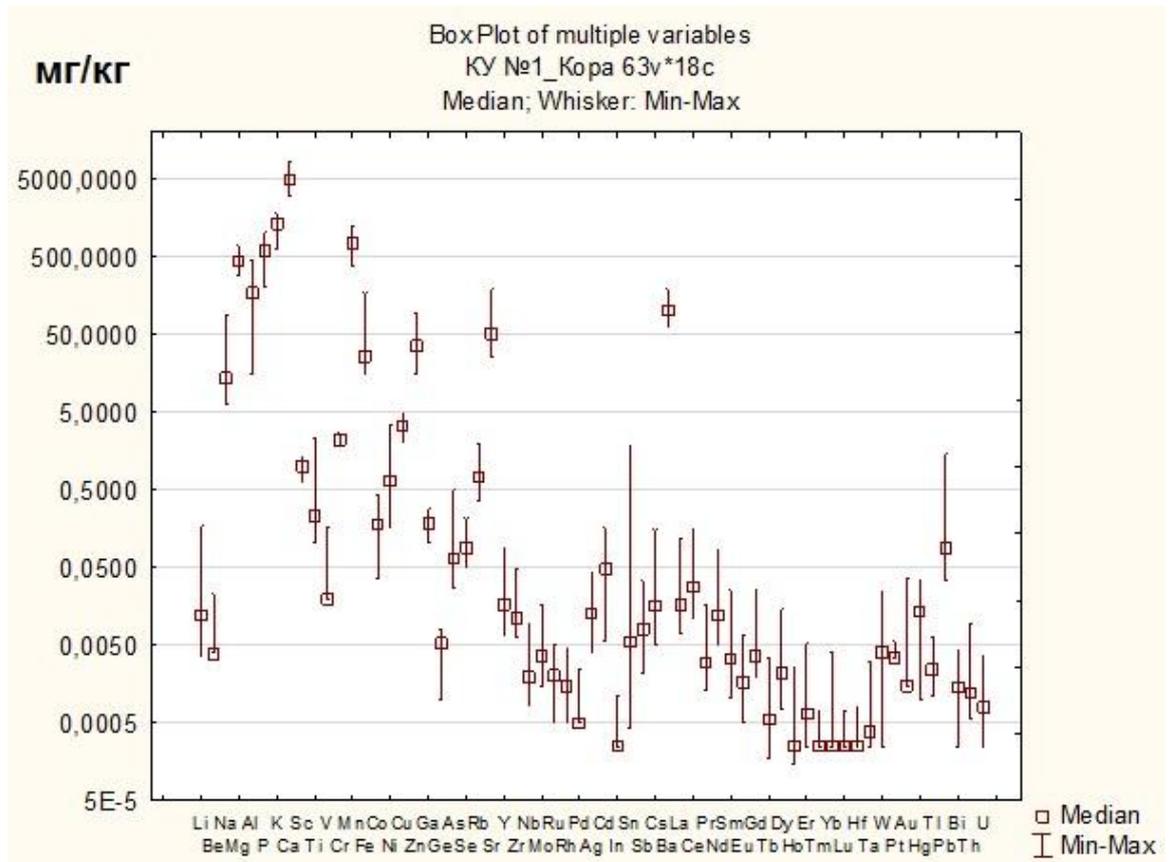


Рисунок 58 – Диаграмма размаха содержаний химических элементов в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн) (количество проб – 18)

Ожидаемое нормальное и фактическое распределение содержаний Au в пробах сухого вещества коры лиственницы показано на рисунке 59.

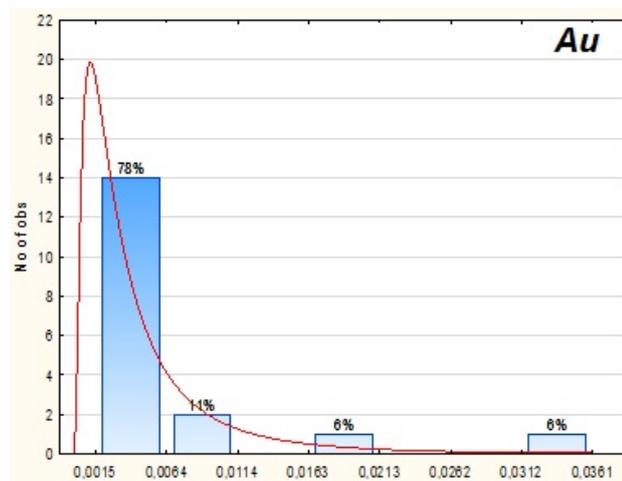


Рисунок 59 – Гистограмма распределения содержаний Au в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*)

Результаты расчёта кларков концентраций химических элементов относительно среднего состава референтного растения по Б. Маркерт (Markert, 1992) приведены в таблице 47 и на рисунке 60 а–б. Геохимический ряд ассоциаций химических элементов в сухом веществе коры лиственницы формируют высокие содержания тяжёлых металлов (Mn, Ba, Ga Cr, Cd, Co), Sc, Au и некоторых других элементов. Для абсолютного большинства рассмотренных химических элементов в пробах коры характерны содержания ниже кларковых.

Таблица 47 – Геохимические ряды химических элементов в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на территории Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн

Кларк	Геохимический ряд ассоциаций
Вьюнское золоторудное поле (количество проб – 35)	
Средний состав 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}
Месторождение Вьюн (количество проб – 18)	
Средний состав референтного растения (Markert, 1992)	Sc ₅₀ – Be _{5,9} – Au _{5,5} – Mn _{3,8} – Ba _{2,7} – Al _{2,5} – Ga _{1,9} – Cr _{1,5} – Sr _{1,3} – Cd _{1,2} – As _{1,2}

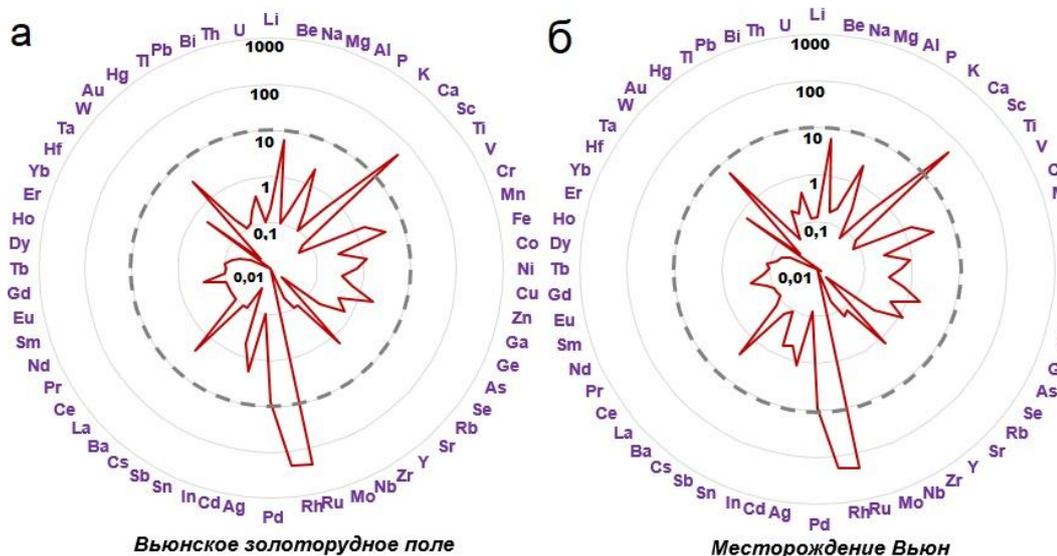


Рисунок 60 а–б – Кларки концентраций химических элементов в пробах сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) относительно среднего состава референтного растения (Markert, 1992): а) на территории Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 35); б) на территории месторождения Вьюн (количество проб – 18)

Из результатов расчёта кларков концентраций химических элементов следует, что для коры лиственницы характерны положительные геохимические аномалии Au, в особенности для территории месторождения Вьюн (среднее значение кларка концентрации 5,5 относительно среднего состава сухого вещества референтного растения (Markert, 1992)). Причиной формирования повышенных величин кларков концентраций Au служит то, что лиственница даурская (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) является безбарьерным видом по отношению к высоким концентрациям данного элемента в почвах (Разин и др., 1966; Юсупов, 2009).

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. Ореолы повышенных концентраций As и Au приурочены к рудной зоне месторождения Вьюн (рисунок 61 а–б).

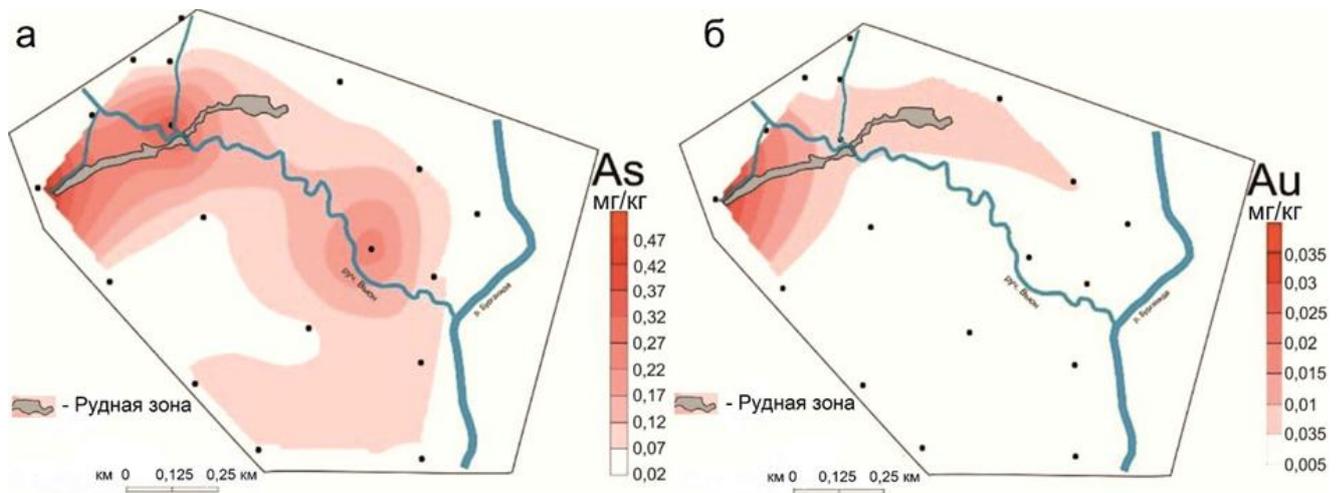


Рисунок 61 – Схемы распределения содержаний As (а) и Au (б) в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) на ключевом участке №1 (месторождение Вьюн)

На рисунке 62 представлена дендрограмма кластерного анализа элементного состава сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*), на которой выделяются значимые связи между Cd и As, Co и Sc, которые отражают черты биогеохимической специализации коры лиственницы.

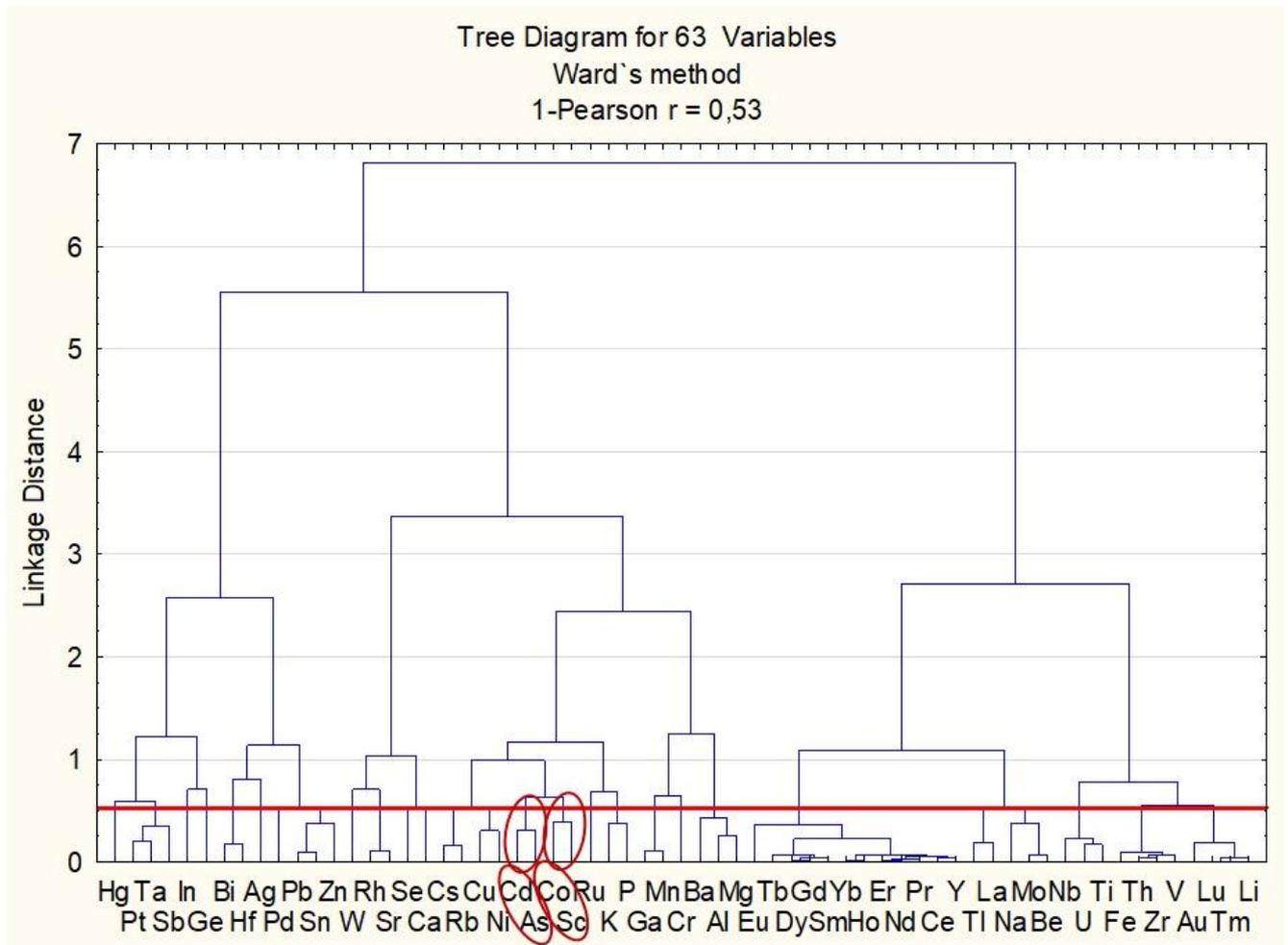


Рисунок 62 – Дендрограмма матрицы корреляционных связей содержаний химических элементов в сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) (количество проб – 18; $1-r_{0,05} = 0,53$)

Результаты корреляционного анализа содержаний химических элементов в пробах коры лиственницы приведены в таблице 48 и на рисунке 63.

Между химическими элементами, формирующими геохимическую специализацию коры лиственницы даурской, имеются значимые положительные корреляционные связи, что подтверждает полиэлементный характер биогеохимической специфики месторождения. Наиболее значимые связи установлены между содержаниями Mn и Ga (величина коэффициента парной корреляции составляет 0,89), Sr и Rh (0,89), Cd и Au (0,68).

Таблица 48 – Коэффициенты парной корреляции содержаний химических элементов в пробах коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*) (уровень значимости $r = 0,47$ при $p < 0,05$; количество проб – 18)

	Be																
Be	1,00	Al															
Al	0,34	1,00	P														
P	0,27	0,46	1,00	Sc													
Sc	0,46	0,14	0,25	1,00	Cr												
Cr	0,20	0,37	-0,09	0,10	1,00	Mn											
Mn	0,19	0,52	0,01	0,23	0,51	1,00	Ga										
Ga	0,11	0,40	0,06	0,12	0,47	0,89	1,00	Rb									
Rb	0,21	0,57	0,48	0,37	0,16	0,59	0,52	1,00	Sr								
Sr	-0,20	-0,52	0,12	0,21	-0,32	-0,47	-0,39	-0,19	1,00	Ru							
Ru	0,21	-0,19	0,44	0,31	-0,03	-0,25	-0,09	0,14	0,45	1,00	Rh						
Rh	-0,24	-0,33	0,35	0,27	-0,36	-0,36	-0,28	0,04	0,89	0,45	1,00	Pd					
Pd	-0,04	0,32	0,05	-0,51	0,01	-0,11	0,04	-0,17	-0,29	-0,23	-0,27	1,00	Cd				
Cd	-0,03	-0,12	0,29	0,55	-0,22	0,15	0,17	0,60	0,41	0,33	0,52	-0,44	1,00	Ba			
Ba	0,50	0,56	0,35	0,23	0,09	0,31	0,37	0,14	-0,23	0,03	-0,21	0,24	-0,10	1,00	Au		
Au	0,27	0,06	0,31	0,46	-0,10	-0,07	0,03	0,58	0,24	0,36	0,31	-0,19	0,68	0,06	1,00		

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые связи.

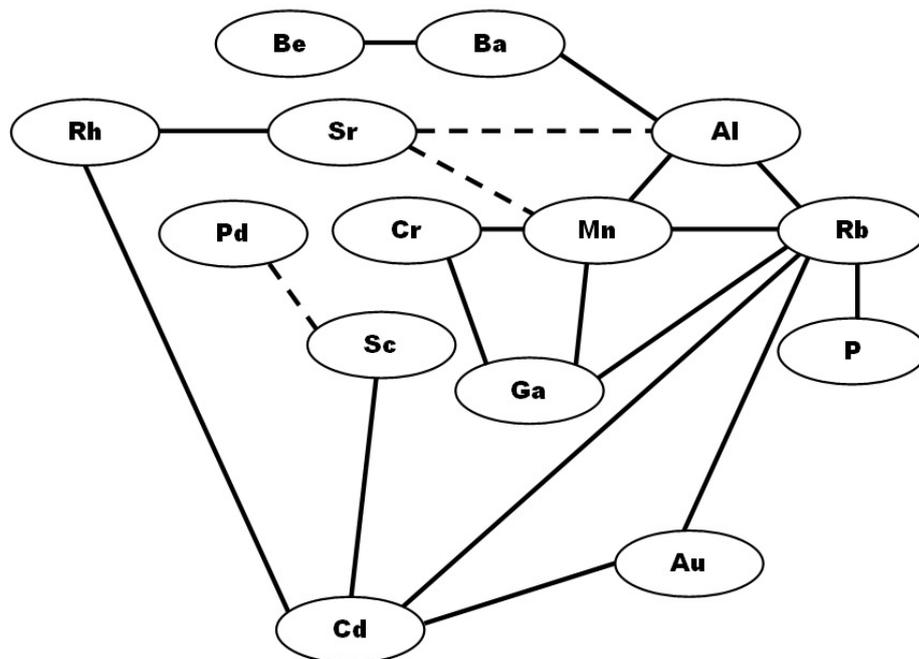


Рисунок 63 – Граф-ассоциация химических элементов в пробах сухого вещества коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz. et Trautv.*)

Примечание: прямой линией показаны положительные значимые связи, пунктирной – отрицательные.

6.2 Характеристика территории золоторудного месторождения Вьюн по данным изучения лишайника (*Cladonia rangiferina*)

Лишайник характеризуется повышенными содержаниями As (элемента 1-го 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) (таблица 49).

Таблица 49 – Средние содержания химических элементов в пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*), отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (количество проб – 35)

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Mg, %	0,021±0,002	Sr	6,3±0,9	Dy	0,0062±0,0006
P, %	0,041±0,003	Y	0,031±0,003	Ho	0,0011±0,0001
K, %	0,1±0,006	Zr	0,061±0,005	Er	0,0024±0,0002
Ca, %	0,062±0,005	Nb	0,0075±0,0009	Tm	0,00035±0,00004
Mn, %	0,013±0,001	Mo	0,013±0,001	Yb	0,002±0,0002
Li	0,055±0,008	Ru	0,0011±0,0001	Lu	0,00029±0,00002
Be	0,006±0,001	Rh	0,0007±0,0001	Hf	0,001±0,0001
Na	55±6	Pd	0,0007±0,0001	Ta	0,00075±0,0001
Al	64±6	Ag	0,016±0,001	W	0,0044±0,002
Sc	1,2±0,1	Cd	0,032±0,002	Au	0,0028±0,0004
Ti	1,8±0,1	In	0,00064±0,00007	Hg	0,016±0,002
V	0,1±0,01	Sn	0,02±0,001	Tl	0,0026±0,0002
Cr	2,3±0,1	Sb	0,023±0,001	Pb	0,36±0,02
Fe	74±9	Cs	0,083±0,010	Bi	0,0042±0,0002
Co	0,085±0,011	Ba	5,9±0,4	Th	0,011±0,001
Ni	0,24±0,03	La	0,047±0,004	U	0,0032±0,0003
Cu	0,79±0,05	Ce	0,1±0,008	Te	<0,07
Zn	8,2±0,4	Pr	0,013±0,001	Re	<0,0005
Ga	0,09±0,003	Nd	0,047±0,004	Os	<0,0005
Ge	0,0029±0,0003	Sm	0,011±0,001	Ir	<0,0005
As	0,19±0,05	Eu	0,0021±0,0002	Pt	<0,007
Se	0,057±0,006	Gd	0,011±0,001	–	
Rb	0,93±0,05	Tb	0,0014±0,0001	–	
Количество проб					35

Примечания: среднее значение \pm стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в лишайнике, превышающие значения среднего состава референтного растения (Markert, 1992).

Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов в сухом веществе лишайника приведены в таблице 50.

Таблица 50 – Оценки числовых характеристик содержаний химических элементов (мг/кг) в пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*), отобранных на территории Вьюнского золоторудного поля (количество проб – 35)

Элемент	Среднее содержание	Минимум	Максимум	Дисперсия	Коэффициент вариации, %
Mg, %	0,021	0,009	0,042	0,78	40
P, %	0,041	0,017	0,083	2,5	38
K, %	0,1	0,048	0,18	11	33
Ca, %	0,062	0,021	0,15	10	52
Be	0,006	0,004	0,021	0,00002	77
Sc	1,2	0,76	2,6	0,22	39
Cr	2,3	1,5	3,5	0,2	20
As	0,19	0,06	1,2	0,075	111
Se	0,057	0,012	0,16	0,001	53
Rb	0,93	0,52	1,9	0,1	33
Ru	0,0011	0,0005	0,0039	0,000001	78
Rh	0,0007	0,0005	0,0022	0,0000002	63
Pd	0,0007	0,0005	0,0021	0,0000002	63
Au	0,0028	0,0015	0,01	0,000005	71
Th	0,011	0,004	0,032	0,00004	54
U	0,0032	0,0013	0,0073	0,000002	46

Средние содержания химических элементов в пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*), отобранных на территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн), приведены в таблице 51.

Таблица 51 – Средние содержания химических элементов в пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*), отобранных на территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн), мг/кг (количество проб – 19)

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Mg, %	0,019±0,002	Sr	3,8±0,5	Dy	0,01±0,001
P, %	0,035±0,003	Y	0,19±0,16	Ho	0,001±0,0002
K, %	0,086±0,006	Zr	0,06±0,01	Er	0,003±0,0003
Ca, %	0,045±0,005	Nb	0,01±0,002	Tm	0,0004±0,0001
Mn, %	0,011±0,001	Mo	0,01±0,001	Yb	0,002±0,0003
Li	0,07±0,01	Ru	0,0009±0,0002	Lu	0,0003±0,00004
Be	0,005±0,001	Rh	0,0006±0,0001	Hf	0,001±0,0002
Na	56±10	Pd	0,001±0,0001	Ta	0,001±0,0001
Al	72±9	Ag	0,01±0,001	W	0,01±0,003
Sc	0,98±0,04	Cd	0,03±0,003	Au	0,003±0,0005
Ti	2,0±0,1	In	0,001±0,0001	Hg	0,01±0,001
V	0,12±0,01	Sn	0,02±0,001	Tl	0,002±0,0002
Cr	2,0±0,1	Sb	0,02±0,002	Pb	0,36±0,03
Fe	79±13	Cs	0,1±0,02	Bi	0,004±0,0003
Co	0,08±0,01	Ba	4,7±0,4	Th	0,012±0,002
Ni	0,2±0,02	La	0,05±0,006	U	0,003±0,0003
Cu	0,67±0,04	Ce	0,11±0,01	Te	<0,07
Zn	7,7±0,5	Pr	0,01±0,002	Re	<0,0005
Ga	0,09±0,005	Nd	0,05±0,006	Os	<0,0005
Ge	0,003±0,0005	Sm	0,01±0,002	Ir	<0,0005
As	0,34±0,08	Eu	0,003±0,0004	Pt	<0,007
Se	0,06±0,01	Gd	0,01±0,002	–	–
Rb	0,88±0,04	Tb	0,002±0,0002	–	–
Количество проб					19

Примечания: среднее значение ± стандартная ошибка, аномальные величины концентраций, для которых рассчитанный критерий для отбрасывания крайних значений превышает критическое значение данного критерия, заменены на максимально допустимые для выборки. Жирным шрифтом выделены средние содержания химических элементов в лишайнике, превышающие значения среднего состава референтного растения (Markert, 1992).

В качестве средних для большинства рассматриваемых элементов (кроме Cu, Ge, Rb, Hg, Pb) были приняты средние арифметические значения содержаний ввиду отсутствия оснований отвергать гипотезу о нормальном характере их распределения в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) (т.к. величина

отношений показателей асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам не превышает $|3,0|$ единиц (Михальчук и др., 2014)).

Группировка химических элементов по коэффициенту вариации приведена в таблице 52. Для абсолютного большинства рассматриваемых химических элементов (65%) в пробах лишайника установлен неоднородный характер распределения. В частности, неоднородным распределением характеризуются все РЗЭ, благородные и тяжёлые металлы. Однородное распределение установлено для макроэлементов и некоторых цветных металлов. Сильно неоднородное распределение характерно для Li, As, Nb, крайне неоднородное – для W.

Таблица 52 – Характеристика распределения химических элементов по коэффициенту вариации для проб сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*) с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн) (количество проб – 19)

Группа	Коэффициент вариации, %	Характер распределения	Химические элементы
I	< 39	Однородное	P, K, Sc, Ti, Cr, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Tl, Pb, Bi
II	40-79	Неоднородное	Be, Na, Mg, Al, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ge, Se, Sr, Y, Zr, Mo, Ru, Rh, Pd, In, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Hg, Th, U
III	80-119	Сильно неоднородное	Li, As, Nb
IV	> 120	Крайне неоднородное	W

Разброс содержаний элементов показан на диаграмме размаха (рисунок 64). Наибольшим разбросом содержаний характеризуются Y и W.

Ожидаемое нормальное распределение и фактическое распределение содержаний Au и As в сухом веществе лишайника представлено на рисунке 65–66.

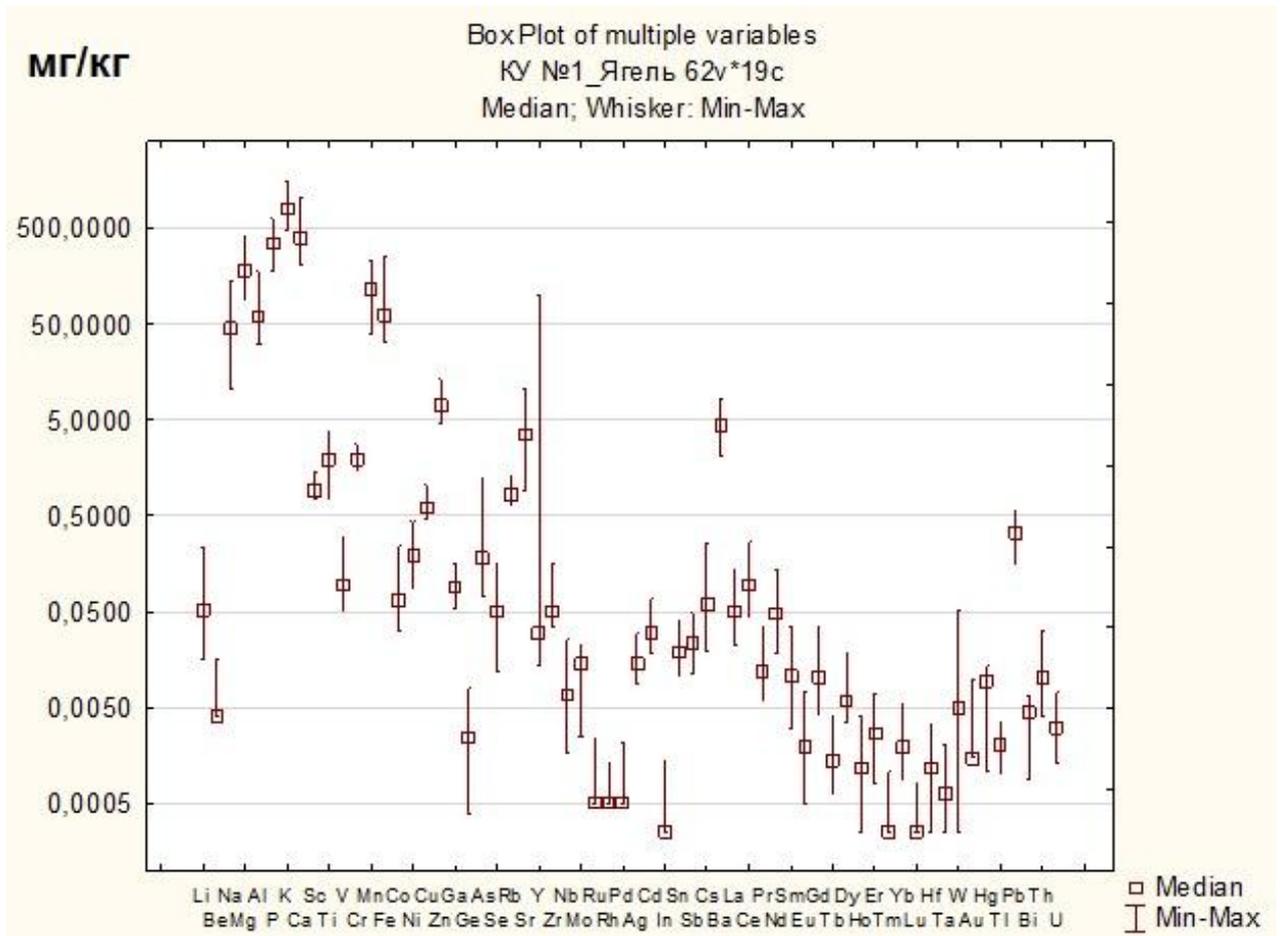


Рисунок 64 – Диаграмма размаха содержаний химических элементов в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) с территории ключевого участка №1 (месторождение Вьюн) (количество проб – 19)

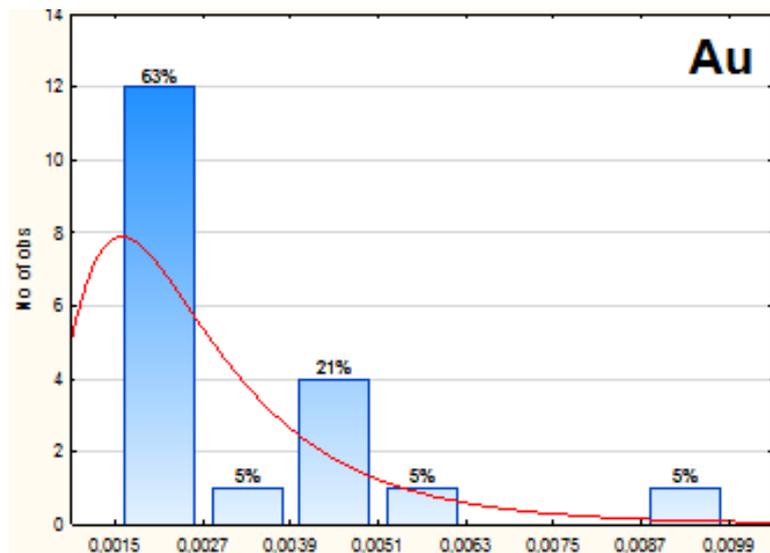


Рисунок 65 – Гистограмма распределения содержаний Au в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*)

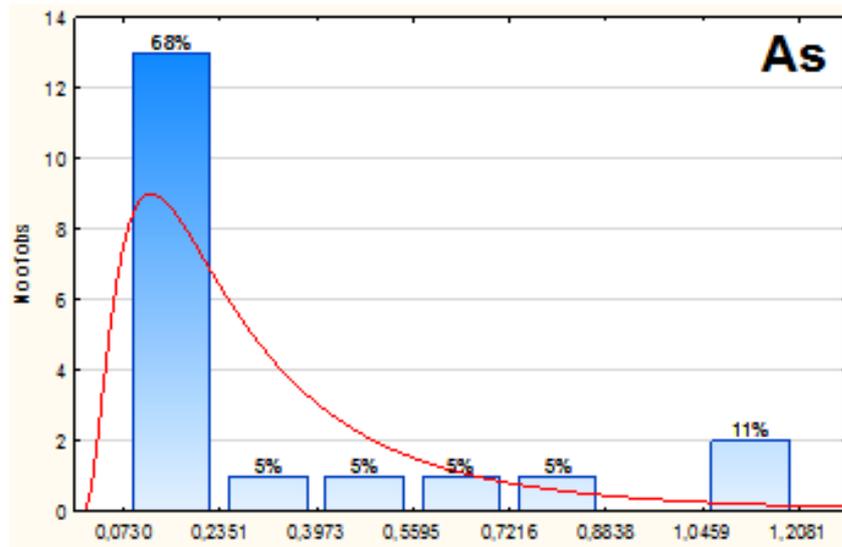


Рисунок 66 – Гистограмма распределения содержаний As в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*)

Геохимическая специализация лишайника (*Cladonia rangiferina*), так же, как и в случае с корой лиственницы, определялась путём расчёта кларков концентраций химических элементов относительно среднего состава референтного растения (Markert, 1992).

Полученные геохимические ряды ассоциаций сформированы повышенными содержаниями элементов-спутников малосульфидного золотокварцевого оруденения (Au, As, Se), а также Sc, Be, Th, Cr (таблица 53). Графически геохимическая специализация лишайника показана на рисунке 67 а–б.

Таблица 53 – Геохимические ряды химических элементов в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории Вьюнского золоторудного поля и месторождения Вьюн

Кларк	Геохимический ряд ассоциаций
Вьюнское золоторудное поле (количество проб – 35)	
Средний состав референтного растения (Markert, 1992)	Sc ₆₁ – Be _{5,9} – Se _{2,9} – Au _{2,8} – Th _{2,2} – As _{1,9} – Cr _{1,5}
Месторождение Вьюн (количество проб – 19)	
Средний состав референтного растения (Markert, 1992)	Sc ₄₉ – Be _{5,1} – As _{3,4} – Se _{3,1} – Au _{3,0} – Th _{2,5} – Cr _{1,3}

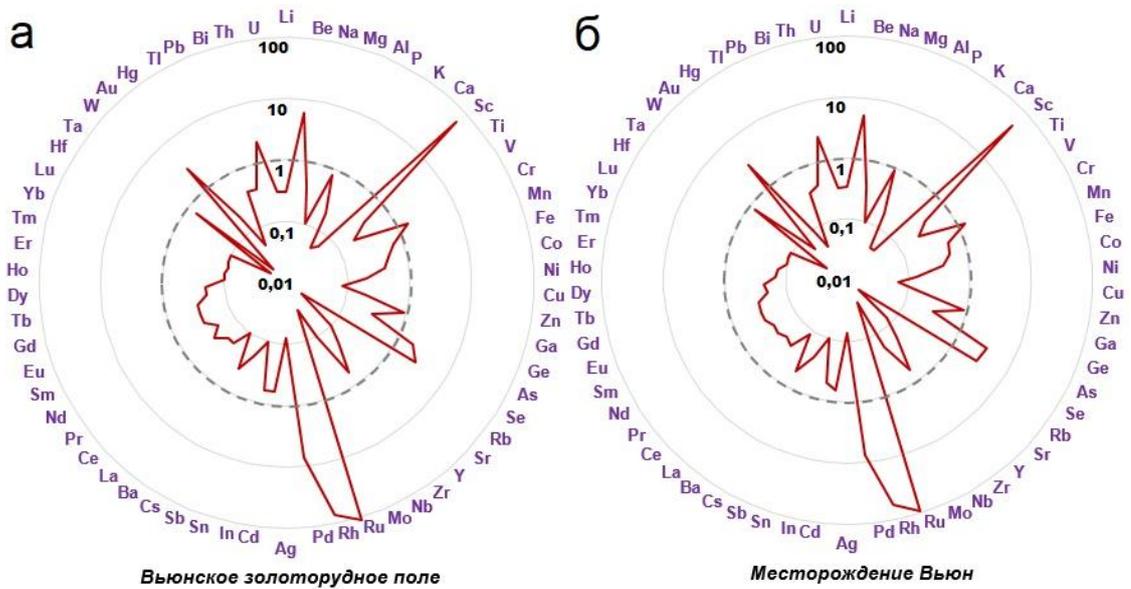


Рисунок 67 а–б – Кларки концентраций химических элементов в пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*) относительно среднего состава референтного растения (Markert, 1992): *а*) на территории Выюнского золоторудного поля (количество проб – 35); *б*) на территории месторождения Выюн (количество проб – 19)

Наибольшие кларки концентраций As и Au в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) фиксируются в пределах месторождения Выюн, биогеохимические ореолы рассеяния повышенных содержаний приурочены к рудной зоне (рисунок 68 а–б).

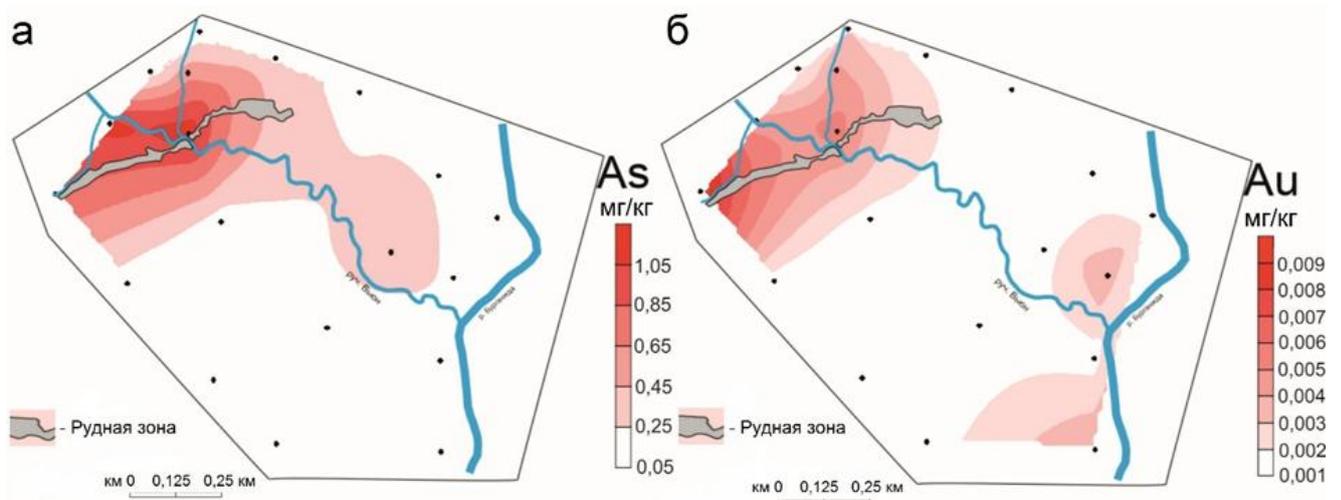


Рисунок 68 – Схемы распределения содержаний As (*а*) и Au (*б*) в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории месторождения Выюн

По данным кластерного (рисунок 69) и корреляционного (таблица 54, рисунок 70) анализов выявлена значимая положительная связь между типичными для месторождения элементами: Au и As. Тесная ассоциация данных элементов характерна для золоторудных объектов (Некрасов, 1991; Скобелева, 2011).

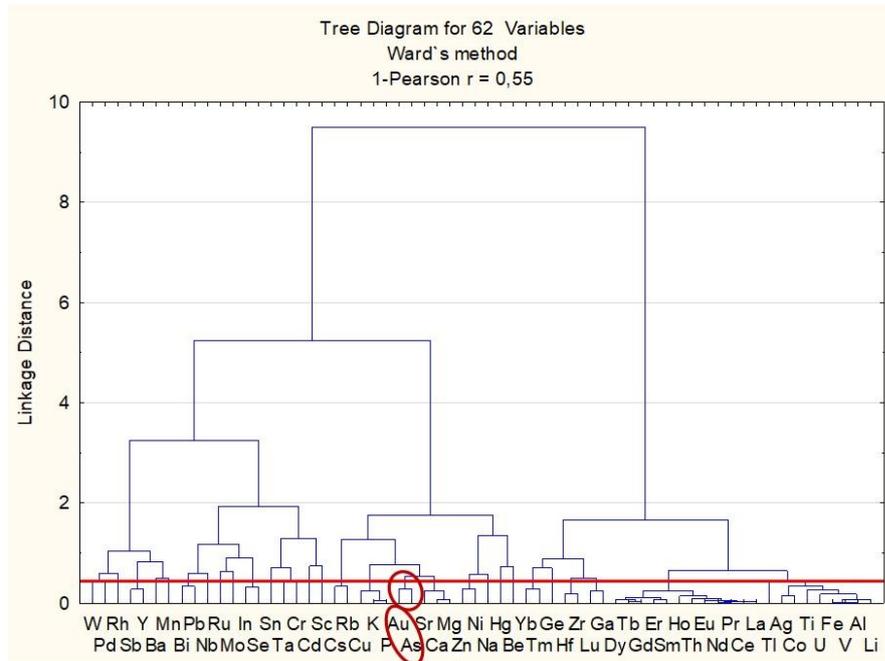


Рисунок 69 – Дендрограмма матрицы корреляционных связей содержаний химических элементов в сухом веществе лишайника (*Cladonia rangiferina*) (количество проб – 19; $1-r_{0,05} = 0,55$)

Таблица 54 – Коэффициенты парной корреляции содержаний химических элементов в пробах лишайника (*Cladonia rangiferina*) (уровень значимости $r = 0,45$ при $p < 0,05$; количество проб – 19)

	Be												
Be	1,00	Sc											
Sc	-0,26	1,00	Cr										
Cr	-0,25	0,14	1,00	As									
As	-0,23	0,40	-0,08	1,00	Se								
Se	-0,34	0,16	0,08	-0,18	1,00	Rb							
Rb	0,10	0,03	0,23	0,29	-0,19	1,00	Ru						
Ru	-0,08	-0,24	0,16	0,23	0,41	0,20	1,00	Rh					
Rh	-0,21	0,32	0,19	-0,23	0,47	-0,16	-0,08	1,00	Pd				
Pd	-0,13	-0,06	0,30	0,24	0,10	0,18	0,43	0,52	1,00	Au			
Au	-0,09	0,002	-0,08	0,70	-0,24	0,43	0,38	-0,26	0,14	1,00	Th		
Th	-0,10	-0,10	0,27	0,17	0,09	0,10	0,51	-0,28	0,07	0,02	1,00		

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые связи.

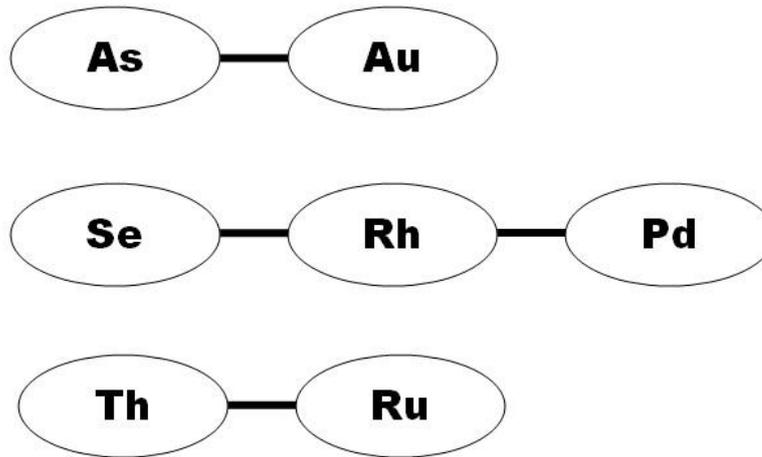


Рисунок 70 – Граф-ассоциация химических элементов в пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*) (показаны положительные значимые связи между химическими элементами)

Таким образом, геохимическая специализация лишайника (*Cladonia rangiferina*) имеет сходства с геохимией коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) и сформирована повышенными уровнями концентрирования Sc, Rb, Be, Se, Au, Th, As, Cr. Исследованные растения отражают особенности содержаний химических элементов в почве, что показано на графике (рисунок 71).

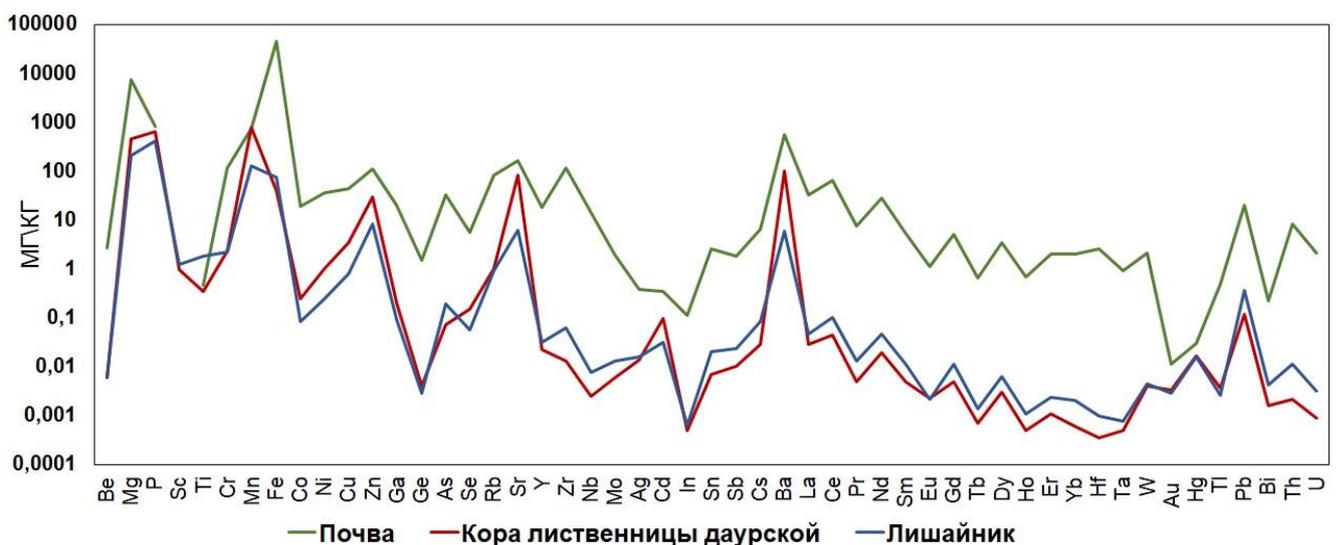


Рисунок 71 – Средние содержания химических элементов в почве (37 проб), сухом веществе коры лиственницы даурской (*L. dahurica Turcz.*) (35 проб) и лишайника (*Cladonia rangiferina*) (35 проб) на территории Вьюнского золоторудного поля, мг/кг (шкала логарифмическая)

6.3 Индикаторные свойства лишайника (*Cladonia rangiferina*) в условиях криолитозоны

Биогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых базируются на выявлении биогенных ореолов элементов-индикаторов полезных ископаемых (Брукс, 1986), поступающих из почвенного покрова в растения, отличаются доступностью и являются одним из наиболее эффективных инструментов, используемых при поисках скрытых руд (Овсянникова, 2019).

Полиметаллические геохимические аномалии на территориях рудных объектов зачастую обладают ярко выраженной контрастностью (Gałuszka et al., 2018), что находит отражение в химическом составе растений, которые наследуют специфику локальных геохимических фонов, в том числе аномально высоких (Рихванов и др., 2017).

Поступление химических элементов в почву, а затем и в растения, связано с такими факторами, как выветривание материнских пород, ветровая эрозия, комплексообразование с гуминовыми кислотами, сорбция минеральных веществ в почвенном покрове (Ghazban et al., 2018; Pérez-Sirvent et al., 2016).

Степень поглощения того или иного химического элемента растениями из почвенного покрова во многом зависит от формы нахождения элементов. Так, элементы в почве могут быть сконцентрированы в минеральной кристаллической структуре, находиться в адсорбированном состоянии на поверхности глинистых минералов, а также в виде оксидов и комплексов с органическими веществами (Du Laing et al., 2009).

Растворенные в воде формы химических элементов поглощаются растениями со значительно большей (в тысячи раз) интенсивностью, чем из твердой фазы, контактирующей с корневыми системами (Брукс, 1986).

Конкретные методики проведения биогеохимических работ по выявлению индикации оруденения могут быть весьма разнообразными и зависят от геологических задач исследований, условий их проведения и имеющейся аналитической базы. Однако существует ряд универсальных принципов, которым

необходимо следовать в практике биогеохимических работ. Одним из таких является принцип однообразия опробования. Он заключается в том, что все отбираемые пробы должны быть идентичными одна другой. С целью исключения вегетационных колебаний рекомендуется проводить опробование растений в течение как можно более короткого промежутка времени. Важную роль также играет принцип комплексности, согласно которому работы рекомендуется проводить с применением совокупности методов (Поликарпочкин и др., 1964; Ковалевский, 1984), например, вместе с растительностью исследуя почвенный покров.

Основываясь на общих требованиях, предъявляемых к биогеохимическим работам, при выборе объекта в качестве индикатора оруденения золота в условиях криолитозоны следует отдавать предпочтение мху или лишайнику.

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 на участке с отбором проб лишайника (*Cladonia rangiferina*), отдельный профиль показан на рисунке 72 а–б.

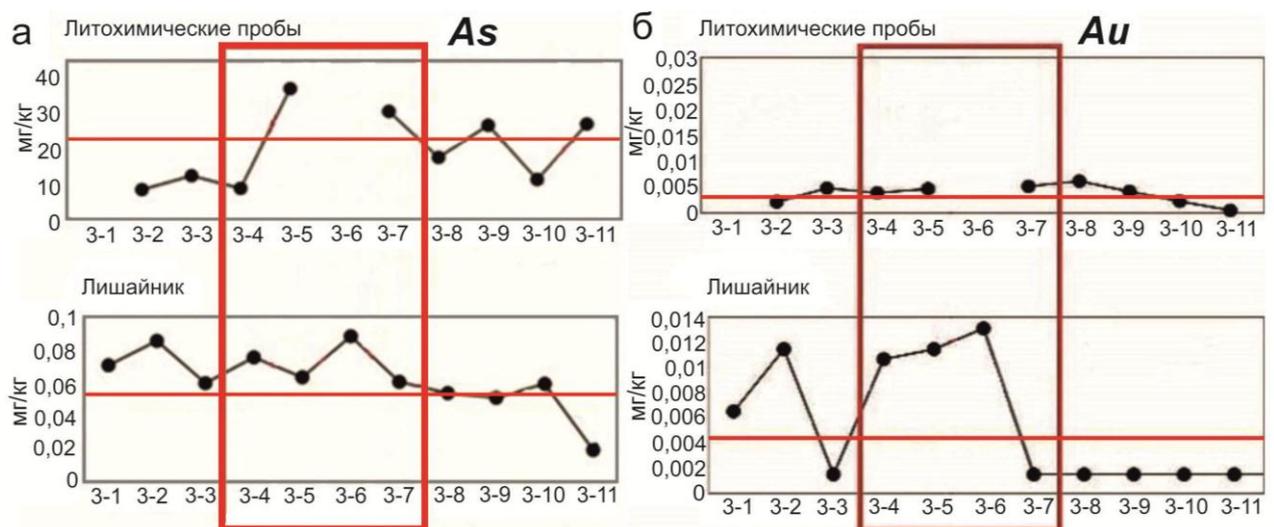


Рисунок 72 – Концентрации As (а) и Au (б) в литохимических пробах и пробах сухого вещества лишайника (*Cladonia rangiferina*) на территории участка Андрей (Вьюнское золоторудное поле) (Язиков и др., 2020)

Были установлены повышенные концентрации As и Au в перспективных рудоконтролирующих структурах при отсутствии рыхлых отложений, что позволило использовать лишайник (*Cladonia rangiferina*) в качестве дополнительного поискового индикатора (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), покрывающие большие пространства гольцовых плоскогорий – солифлюкционные склоны, днища речных и ледниковых долин, где развиты погребенные рудные зоны, которые возможно выявлять по лишайникам.

Лишайник (*Cladonia rangiferina*), произрастая на моховой дернине, может получать растворенные минеральные вещества, поглощая их гифами гриба. При этом слоевище лишайника пропитывается водой, частично прямо из субстрата, в силу чего лишайник может выступать визуальным и геохимическим индикатором, маркирующим границы рудной зоны. Уровни содержания Au и его спутников в сухом веществе лишайника являются достаточными для выявления биогеохимических аномалий (при использовании высокочувствительного аналитического метода – масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой).

Преимуществом лишайников является их доминантность для многих типов растительных сообществ тундры, лесотундры и северной тайги, что позволяет организовать отбор проб на обширных территориях (Московченко и др., 2011). При этом использование лишайников в качестве биогеохимического индикатора оруденения Au особо актуально для слабо увлажненных 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 золото кварцевого 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 почв 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 СОКРАЩЕНИЙ

АЗР – Арктическая зона Российской Федерации

АН – Академия наук

АО – автономный округ

ВАК – Высшая аттестационная комиссия

ВВ – взвешенные вещества

ВУЗ – высшее учебное заведение

ГИС – геоинформационная система

ГОСТ – межгосударственный стандарт

ГРР – геологоразведочные работы

ГСО – государственный стандартный образец

ДК – допустимая концентрация

ИНАА – инструментальный нейтронно-активационный анализ

ИРТ-Т – исследовательский реактор тепловой томский

ИШПР – Инженерная школа природных ресурсов

КДА – коэффициент донной аккумуляции

КК – кларк концентрации

КУ – ключевой участок

МИНОЦ – Международный инновационный научно-образовательный центр

ММП – многолетнемёрзлые породы

МЭД – мощность экспозиционной дозы

НИ ТПУ – Национальный исследовательский Томский политехнический университет

НОЦ – научно-образовательный центр

ОБУВ – ориентировочно безопасный уровень воздействия

ОГ – отделение геологии

ОДК – ориентировочно допустимая концентрация

ОЖ – общая жёсткость

ООО – общество с ограниченной ответственностью

ПДК– предельно допустимая концентрация

ПО – программное обеспечение

Р – руководство

РД – руководящий документ

РЗЭ – редкоземельные элементы

РФ – Российская Федерация

СанПиН – санитарные правила и нормы

СРП – сцинтилляционный радиометр полевой

СССР – Союз Советских Социалистических Республик

СТС – сезонно-талый слой

УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязнения воды

ХПК – химическое потребление кислорода

ЯТЦ – ядерно-топливный цикл

ICP-MS – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Опубликованная литература

1. Алексеенко В. А. Экологическая геохимия / В. А. Алексеенко. – М. : Логос, 2000. – 627 с.
2. Ананичев К. В. Проблемы окружающей среды, энергии и природных ресурсов. Международный аспект / К. В. Ананичев. – М. : Изд-во ВИНТИ Московского государственного университета, 1974. – 164 с.
3. Андреев М. П. Лишайники оазиса Молодёжный и близлежащих территорий (Земля Эндерби, Антарктида) // Новости систематики низших растений. – 2013. – Т. 47. – С. 167-177.
4. Анисимова Г. С. Геологическое строение и состав руд золото-кварцевого месторождения Вьюн, Восточная Якутия / Г. С. Анисимова, Р. И Протопопов // Руды и металлы. – 2009. – № 5. – С. 59-69.
5. Аньшакова В. В. Биотехнологическая переработка возобновляемого сырья Якутии / В. В. Аньшакова, А. В. Степанова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 409.
6. Архипов И. А. Распределение микроэлементов в почвах районов естественных геохимических аномалий (на примере Каракульского месторождения полиметаллов) / И. А. Архипов, Ю. В. Робертус // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2. – С. 53-58.
7. Барановская Н. В. Ртуть в ряске как индикатор техногенеза на территории России / Н. В. Барановская, А. Ю. Барановская, О. А Капитонова. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 10. – С. 23-31.
8. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений / Р. Баргальи. – М. : ГЕОС, 2005. – 457 с.
9. Басова И. А. Оценка экологического состояния почв в регионах с развитой горной промышленностью / И. А. Басова, Н. П. Иватанова, А. Б. Копылов // Известия ТулГУ. – 2012. – № 1-2. – С. 14-16.

10. Башкин В. Н. Биогеохимия / В. Н. Башкин, Н. С. Касимов. – М. : Научный мир, 2004. – 648 с.
11. Белозерцева И. А. Воздействие разведки, добычи и переработки полезных ископаемых на почвы Сибири / И. А. Белозерцева, Н. И. Гранина // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 10. – С. 238-242.
12. Белошейкина А. В. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова территории Сорского горного-обогатительного комбината (Республика Хакасия) / А. В. Белошейкина, А. В. Таловская, Е. Г. Языков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331, № 1. – С. 44-53.
13. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов : монография / Л. П. Рихванов [и др.] ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт геологии и минералогии СО РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 437 с.
14. Биомониторинг состояния окружающей среды : учебное пособие / под ред. И. С. Белюченко, Е. В. Федоненко, А. В. Смагина. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2014. – 153 с.
15. Бортникова С. Б. Геохимическая оценка потенциальной опасности отвальных пород Ведугинского месторождения / С. Б. Бортникова, О. Л. Гаськова, Н. А. Присекина // *Геохимия*. – 2010. – № 3. – С. 295-310.
16. Брукс Р. Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых / Р. Р. Брукс. – М. : Недра, 1986. – 311 с.
17. Брукс Р. Р. Химия окружающей среды / Р. Р. Брукс. – М. : Химия, 1982. – 371 с.
18. Брюхань А. Ф. Индикаторы техногенного загрязнения ландшафтов промышленными предприятиями // *Современные проблемы экологии : сборник докладов на VII Всероссийской научно-технической конференции «Инновационные технологии»*. – Тула, 2011. – С. 3-8.

19. Брюхань А. Ф. Система индикаторов комплексного загрязнения природной среды в зонах техногенного воздействия ТЭС // Вестник МГСУ. – 2011. – №1. – С. 1-6.
20. Васильева Т. И. Особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии // Наука и образование. – 2016. – № 1. – С. 30-39.
21. Вахромеев С. А. Руководство по минераграфии / С. А. Вахромеев. – Иркутск : Иркутский горнометаллургический институт, 1956. – 264 с.
22. Вернадский В. И. Биогеохимические очерки (1922–1932 гг.) / В. И. Вернадский. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1940. – 250 с.
23. Вернадский В. И. Проблемы биогеохимии / В. И. Вернадский. – М. : Наука, 1980. – 226 с.
24. Верхотуров А. Г. Трансформация геологической среды при разработке месторождений полезных ископаемых в Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 1. – С. 370-373.
25. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана / А. П. Виноградов. – М. : Наука, 1967. – 215 с.
26. Винокуров И. П. Геохимические поиски скрытых месторождений в криолитозоне / И. П. Винокуров, В. Н. Макаров. – Якутск : Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. – 108 с.
27. Влияние разработки Сибайского месторождения (Южный Урал) на трансформацию потока металлов в подчинённых ландшафтах / А. Ю. Опекунов, М. Г. Опекунова, В. В. Сомов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2018. – № 1. – С. 14-24.
28. Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжёлыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 872-881.
29. Волков А. В. Богатство Арктических недр // Золото и технологии. – 2019. – № 1 (43). – С. 46-56.
30. Волков А. В. Компьютерное моделирование золоторудных месторождений – исторический аспект // Золото и технологии. – 2021. – № 1 (51). – С. 46-56.

31. Волкова Л. С. Экологический мониторинг в районах падения отделяющихся частей ракетносителя «Союз-2» на территории Якутии / Л. С. Волкова, В. Н. Макаров // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 38-48.
32. Волостнов А. В. Методы исследования радиоактивных руд и минералов : учебное пособие / А. В. Волостнов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 162 с.
33. Втюрин Б. И. Криогенное строение многолетнемерзлых пород Якутии как основа долгосрочного инженерно-геокриологического прогноза // Устойчивость поверхности к техногенным воздействиям в области вечной мерзлоты. – Якутск : ИМЗ СО АН СССР, 1980. – С. 50-57.
34. Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья / под ред. Г. А. Юргенсона. – Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 574 с.
35. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д. В. Юсупов, Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 6. – С. 25-36.
36. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин [и др.]. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
37. Геоэкологические проблемы зон горнорудного техногенеза Северного Кавказа / М. Р. Ураскулов, И. А. Богуш, В. И. Черкашин [и др.] // Аридные экосистемы. – 2018. – Т. 24. № 1 (74). – С. 65-71.
38. Гипераккумуляция цезия ряской LEMNA MINOR / Е. В. Платонова, А. В. Карташов, Д. В. Беляев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 51-59.
39. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР : учебное пособие / М. А. Глазовская. – М. : Высшая школа, 1988. – 328 с.
40. Гололобова А. Г. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии / А. Г. Гололобова, Я. Б. Легостаева

// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 146-157.

41. Горбатюк Е. В. Особенности элементного состава *Filipendula Ulmaria* (L) Maxim (Rosaceae) на территории Ново-Урского хвостохранилища в Кемеровской области / Е. В. Горбатюк, Н. В. Барановская, В. А. Жданов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 116-125.

42. Григорьев Н. А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785-792.

43. Григорян С. В. Геохимические методы при поисках эндогенных рудных месторождений / С. В. Григорян. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1974. – 216 с.

44. Дендрогеохимические особенности ископаемой лиственницы (урочище Пазырык) и современных лиственниц Горного Алтая / Л. П. Рихванов, Ю. В. Робертус, А. С. Миронова [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 108-119.

45. Денисова А. И. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды / А. И. Денисова, Е. П. Нахшина, Б. И. Новиков. – Киев : Научный доклад, 1987. – 164 с.

46. Добровольский В. В. Основы биогелибохимии : учебник для студ. высш. учеб., заведений. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.

47. Достовалов Б. Н. Общее мерзлотоведение / Б. Н. Достовалов, В. А. Кудрявцев. – М. : Изд-во МГУ, 1967. – 403 с.

48. Дягилева А. Г. Влияние техногенеза на экологическое состояние мерзлотных почв (на примере Нюрбинского ГОКа) / А. Г. Дягилева, Я. Б. Легостаева // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2013. – Т. 10. № 2. – С. 79-84.

49. Елпатьевский П. В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах / П. В. Елпатьевский. – М. : Наука, 1993. – 253 с.

50. Ермаков В. В. Роль биогеохимии в условиях техногенеза биосферы // *Фундаментальные и инновационные аспекты биогеохимии : материалы VII международной Биогеохимической Школы.* – М. : ГЕОХИ РАН, 2011. – С. 4-8.
51. Загрязнение тяжёлыми металлами экосистемы реки Таналык, сообщества водных макрофитов и возможности их использования для биологической очистки / З. Б. Бактыбаева, Я. Т. Суяндукоев, С. М. Ямалов [и др.]. – Уфа : Гилем, 2011. – 206 с.
52. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озёр различных регионов Сибири / В. Д. Страховенко, Б. Л. Щербов, И. Н. Маликова [и др.] // *Геология и геофизика.* – 2010. – Т. 51. – С. 1501-1514.
53. Иванов А. Ю. Закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений слабопроточных водоёмов Томского района // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2016. – Т. 327, № 2. – С. 88-101.
54. Иванов В. В. Геоэкологические особенности освоения месторождений полезных ископаемых Якутии // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* – 2013. – № 8-1. – С. 59-62.
55. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов. Книга 2. Редкие р-элементы / В. В. Иванов. – М. : Недра, 1996. – 352 с.
56. Иванов О. П. О возможности обнаружения скрытых сульфидных рудных тел по криогенным солевым ореолам рассеяния // *Геохимия.* – 1969. – № 3. – С. 367-371.
57. Иванова А. М. Геохимические ландшафты Яно-Индибирского региона / А. М. Иванова, Ю. С. Куликов, И. С. Егорова. – Л. : Недра, 1974. – 68 с.
58. Иванова О. А. Оценка влияния золотодобывающего производства на горные геосистемы Восточного Саяна : на примере рудника Холбинский : автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Иванова Оксана Алексеевна. – Улан-Удэ, 2004. – 22 с.

59. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Информационно-техническое сопровождение (ИТС) 49–2017. Добыча драгоценных металлов. – М. : Бюро НДТ, 2017. – 143 с.
60. К вопросу защиты окружающей среды от мелкодисперсной пыли горных предприятий / Г. В. Стась, С. З. Калаева, К. М. Муратова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 92-109.
61. Кирезиди С. В. Геохимия селена и теллура в рудах месторождения Кочбулак // XII Межрегиональная научно-практическая конференция «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана». – Уфа : Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 2018. – С. 249-255.
62. Ковалевский А. Л. Биогеохимические поиски рудных месторождений / А. Л. Ковалевский. – М. : Недра, 1984. – 172 с.
63. Коваленкер В. А. Минералогия и геохимия селена и теллура в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла / В. А. Коваленкер. – М. : Наука, 1977. – 136 с.
64. Ковальский В. В. Геохимическая экология : очерки / В. В. Ковальский. – М. : Наука, 1974. – 299 с.
65. Контурская О. А. Биоиндикация тяжелых металлов в условиях промышленного Донбасса / О. А. Контурская // Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга : материалы XI Международного симпозиума по биоиндикаторам. – Сыктывкар, 2001. – С. 84.
66. Корнеева Т. В. Геохимическое моделирование поведения тяжелых металлов в техногенных системах / Т. В. Корнеева, Н. В. Юркевич, О. П. Саева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 89-101.
67. Косолапов А. В. Типизация воздействий, оказываемых на окружающую среду при разработке месторождений полезных ископаемых // Известия Уральского государственного горного университета. – 2014. – № 2 (34). – С. 54-60.

68. Кочуров Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие / Б. И. Кочуров. – Смоленск : Маджента, 2003. – 384 с.
69. Крамаренко В. В. Практикум по исследованию мерзлых грунтов для изыскателей: методические материалы к выполнению лабораторных работ по курсу «Мерзлотоведение» для студентов, обучающихся по специальности 130101 «Прикладная геология» специализация «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» / В. В. Крамаренко. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 300 с.
70. Криогенные почвы в долине реки Чара, Забайкалье / Ю. К. Васильчук, А. П. Гинзбург, Н. А. Буданцева [и др.] // Арктика и Антарктика. – 2022. – № 3. – С. 54-91.
71. Крючков В. В. Лишайники как биоиндикаторы качества окружающей среды в северной тайге / В. В. Крючков, Н. А. Сыроид // Экология. – 1990. – № 6. – С. 63-66.
72. Ксенофонтова М. И. Основные гидрохимические параметры поверхностных вод верхнего течения р. Яна // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 5. – С. 123-127.
73. Куимова Н. Г. Концентрирование палладия на биогеохимических барьерах / Н. Г. Куимова, В. И. Радомская, Л. М. Павлова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 9. – С. 77-84.
74. Ляпунов М. Ю. Эколого-геохимическая характеристика поверхностных вод золоторудного месторождения Пионер Амурской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 7. – С. 44-50.
75. Макаров В. Н. Геохимические ореолы золоторудных месторождений Якутии // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» / В. Н. Макаров. – Якутск : [б. и.], 2016. – С. 110-113.
76. Макаров В. Н. Геохимические поля в криолитозоне / В. Н. Макаров. – Якутск : Институт мерзлотоведения СО РАН, 1998. – 116 с.

77. Макаров В. Н. Геохимия окружающей среды Верхнеиндигирского золотоносного района // Наука и образование. – 2008. – № 4. – С. 45-48.
78. Макаров В. Н. Гидрогеохимические аномалии цинка в р. Яне // Наука и техника в Якутии. – 2020. – № 1 (38). – С. 26-30.
79. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н. Г. Зырина, С. Г. Малахова. – М. : Гидрометиздат, 1981. – 108 с.
80. Миграция химических элементов в системе «почва-растение» и её изменение под влиянием горнорудного производства (Сибай, Башкортостан) / М. Г. Опекунова, А. Ю. Опекунов, В. В. Сомов [и др.] // Степи Северной Евразии : материалы IX международного симпозиума. – 2021. – С. 620-626.
81. Михальчук А. А. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Часть II. Компьютерный практикум : учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Языков. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 150 с.
82. Московченко Д. В. Содержание тяжёлых металлов в лишайниках на севере Западной Сибири / Д. В. Московченко, Э. И. Валеева // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2011. – № 11. – С. 162-172.
83. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М. : Астрель, 2011. – 632 с.
84. Неверова О. А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 82-92.
85. Некрасов А. И. Геология и благороднометальная минерализация Верхояноколымской складчатой области : автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук / Некрасов Алексей Иванович. – М., 2017. – 56 с.
86. Некрасов И. А. Морфология криолитозоны бассейна реки Яны и сопредельных районов / И. А. Некрасов, В. Н. Девяткин. – Новосибирск : Наука, 1974. – 72 с.

87. Некрасов И. Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений / И. Я. Некрасов. – М. : Наука, 1991. – 304 с.
88. Николаевский В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / В. С. Николаевский. – М. : Московский государственный университет леса, 1999. – 193 с.
89. Овсянникова Т. М. Биогеохимические методы поисков скрытых месторождений // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 2. – С. 3-11.
90. Озарян Ю. А. Особенности восстановления биоты в зоне техногенного воздействия горных предприятий Юга Дальнего Востока // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 2. – С. 372-379.
91. Оконешникова М. В. Гумусное состояние мерзлотных палевох осолоделых почв Центральной Якутии разного гранулометрического состава // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. – 2019. – № 4. – С. 34-45.
92. Опытные работы по совершенствованию биогеохимического метода поисков золота в условиях криолитозоны (на примере территории Вьюнского рудного поля, Республика Саха (Якутия)) / Е. Г. Язиков, Е. А. Филимоненко, А. Ю. Мишанькин [и др.] // Руды и металлы. – 2020. – № 4. – С. 22-31.
93. Особенности исходных и вторичных соединений сурьмы в зоне окисления отходов цианидного передела / Е. В. Лазарева, С. Б. Бортникова, О. В. Шуваева [и др.] // Минералогия техногенеза. – 2000. – Т. 1. – С. 24-39.
94. Оценка содержания и миграции тяжёлых металлов в компонентах речных экосистем горнорудных территорий Республики Башкортостан / З. Б. Бактыбаева, Р. А. Сулейманов, С. М. Ямалов [и др.] // Гигиена и санитария. – 2016. – № 95 (9). – С. 822-827.
95. Парфенов В. М. Рекультивация нарушенных земель / В. М. Парфенов, А. В. Резникова // Атлас. Иркутская область. Экологические условия развития. – Иркутск : ИГ СО РАН, 2004. – С. 80-81.
96. Певзнер М. Е. Горная экология : учебное пособие для вузов / М. Е. Певзнер. – М. : Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 395 с.

97. Перельман А. И. Геохимия горнопромышленных ландшафтов и их систематика / А. И. Перельман, А. Е. Воробьев // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 1995. – № 1. – С. 16-22.
98. Перельман А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М. : Астрей-2000, 1999. – 768 с.
99. Перельман А. И. Геохимия ландшафтов / А. И. Перельман. – М. : Высшая школа, 1979. – 423 с.
100. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза / А. И. Перельман. – М. : Недра, 1972. – 288 с.
101. Петров О. В. Геологический словарь / О. В. Петров. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2010. – 430 с.
102. Питулько В. М. Вторичные ореолы рассеяния в криолитозоне / Питулько В. М. – Л. : Недра, 1977. – 197 с.
103. Поведение золота и его спутников в полях золоторудных месторождений северной части Кузнецкого Алатау / Б. А. Воротников, Л. М. Попова, Н. А. Росляков [и др.] // Известия Томского политехнического института. – 1968. – Т. 134. – С. 189-196.
104. Поддубный А. В. Экологические проблемы и устойчивое развитие регионов / А. В. Поддубный. – Владивосток : Изд-во Дальневосточного государственного университета, 2002. – 143 с.
105. Поликарпочкин В. В. Биогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых / В. В. Поликарпочкин, Р. Т. Поликарпочкина. – М. : Недра, 1964. – 106 с.
106. Поцелуев А. А. Математические методы в геохимических исследованиях. Методические указания / А. А. Поцелуев, С. И. Сарнаев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 1994. – 38 с.
107. Разин Л. В. К геохимии золота в коре выветривания и биосфере золоторудных месторождений Куранахского типа / Л. В. Разин, И. С. Рожков. – М. : Наука, 1966. – 252 с.

108. Рассадина Е. В. Биоиндикация и её место в системе мониторинга окружающей среды // Актуальные вопросы ветеринарной медицины, биологии и экологии. – 2015. – № 3. – С. 48-53.
109. Рафикова Ю. С. Отходы горнорудного производства и содержание металлов в окружающей среде / Ю. С. Рафикова, И. Н. Семёнова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010. – № 9. – С. 72-74.
110. Роева Н. Н. Донные отложения как депонирующая среда для загрязняющих веществ / Н. Н. Роева, В. В. Исправникова, А. Б. Бекетова // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 12. – С. 116-118.
111. Романовский Н. Н. Основы криогенеза литосферы / Н. Н. Романовский. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – 336 с.
112. Савичев О. Г. Исследование взаимосвязей между химическим составом вод и донных отложений рек Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 178-188.
113. Сергеев А. В. Формы нахождения As и Au во вторичных ореолах рассеяния золотого рудопроявления Пиилола в Восточной Финляндии / А. В. Сергеев, В. А. Коршунова, В. В. Семёнова // Записки российского минералогического общества. – 2015. – № 6. – С. 61-74.
114. Синдеева Н. Д. Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура / Н. Д. Синдеева. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – 257 с.
115. Скобелева Ю. М. Корреляция содержаний золота и мышьяка на рудопроявлении Уахан (Восточная окраина Хасынской вулканической дуги) и парагенезисы самородного золота и сульфидов в руде // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2011. – № 1 (24). – С. 41-43.
116. Славиковская Ю. О. Сравнительная оценка техногенного воздействия на окружающую среду открытой и подземной геотехнологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 188-192.

117. Сорокина О. А. Влияние золотодобычи на состояние растительности долины реки Джалинда (Дальний Восток) // География и природные ресурсы. – 2009. – № 3. – С. 37-42.
118. Сорокина О. А. Микроэлементный состав и экологическая оценка состояния компонентов природной среды района золотодобычи : автореф. дис. канд. биол. наук / Сорокина Ольга Александровна. – Владивосток, 2007. – 22 с.
119. Специальные наблюдения за загрязнением тяжелыми металлами донных отложений водных объектов в системе мониторинга / Н. В. Коломийцев, Б. И. Корженевский, Г. Ю. Толкачёв [и др.] // Географический вестник. – 2020. – Т. 1. – № 52. – Р. 139-154.
120. Станис Е. В. Изменение гидросферы под воздействием подземной добычи угля // Вестник РУДН. – 2004. – № 1 (10). – С. 99-103.
121. Страховенко В. Д. Распределение ртути в компонентах окружающей среды Сибири / В. Д. Страховенко, И. Н. Маликова, Б. Л. Щербов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20, № 1. – С. 117-123.
122. Тайсаев Т. Т. Биогенная концентрация золота в ландшафтах золоторудных полей гольцовой зоны // Доклады Академии наук СССР. – 1988. – Т. 301, № 4. – С. 972.
123. Тентюков М. П. Особенности распределения химических элементов в мёрзлых почвах // Криосфера Земли. – 2013. – Т. 17, № 3. – С. 100-107.
124. Титов А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.
125. Трансформация экологических функций литосферы под влиянием горнодобывающей промышленности / В. Т. Трофимов, Т. А. Барабошкина, А. Д. Жигалин [и др.] // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2005. – Т. 80, № 6. – С. 59-71.
126. Труфанов А. В. Геоэкологические проблемы разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Методическое пособие. Часть 1 / А. В. Труфанов, Ю. А. Ревинский. – Ростов-на-Дону : Изд-во ООО «ЦВВР», 2008. – 50 с.

127. Харитонов Н. А. Редкоземельные элементы в поверхностных водах Амурской области. Особенности накопления и фракционирования / Н. А. Харитонов, Е. А. Вах // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 396. – С. 232-244.
128. Черепнин В. К. Вторичные процессы в сульфидных и золоторудных месторождениях / В. К. Черепнин, В. К. Бернатонис. – Томск : Изд-во ТПИ, 1981. – 90 с.
129. Шварцев С. Л. Геохимическая деятельность мерзлоты // Природа. – 1975. – № 6. – С. 66-73.
130. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев. – М. : Недра, 1998. – 365 с.
131. Шварцев С. Л. Общая гидрогеология / С. Л. Шварцев. – М. : Недра, 1996. – 324 с.
132. Швецов П. Ф. Криогенные геохимические поля на территории многолетней мерзлоты // Известия АН СССР. Серия Геология. – 1961. – № 1. – С. 46-51.
133. Юсупов Д. В. Биогеохимические ореолы золота и ртути Покровского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. – № 6. – С. 38-43.
134. Юсупов Д. В. Применение биогеохимического и минералого-геохимического методов поисков в золотоносных районах Верхнего Приамурья / Д. В. Юсупов. – Благовещенск : Изд-во Амурского Государственного университета, 2013. – 136 с.
135. Языков Е. Г. Геоэкологический мониторинг : учебное пособие для вузов / Е. Г. Языков, А. Ю. Шатилов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – 336 с.
136. Яковлев Ф. Г. Храни в душе дыхание тайги / Ф. Г. Яковлев. – Якутск : Бичик, 2005. – 102 с.
137. Якутин М. В. Почвенно-биологические методы в экологическом мониторинге палевых почв Центральной Якутии / М. В. Якутин, В. С. Андриевский, А. Н. Пучнин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – № 1. – С. 39-46.
138. Ярошевский А. А. Кларки геосфер / А. А. Ярошевский // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. – М. : Недра, 1990. – С. 7-14.

139. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment / Q. Yang, Z. Li, X. Lu [et al.] // *Science of the total environment*. – 2018. – Vol. 642. – P. 690-700.
140. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations / J. Csavina, J. Field, M. P. Taylor [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2012. – Vol. 433. – P. 58-73. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.013
141. Adriano D. C. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals / D. C. Adriano. – New York : Springer, 2001. – 867 p.
142. Alemdaroglu T. Trace metal levels in surface sediments of Lake Manyas, Turkey and tributary rivers / T. Alemdaroglu, E. Onur, F. Erkakan // *International Journal of Environmental Studies*. – 2003. – Vol. 60. – P. 287-298.
143. Angelovičová L. Toxicity of heavy metals to soil biological and chemical properties in conditions of environmentally polluted area middle Spiš (Slovakia) / L. Angelovičová, L. Bobuľská, D. Fazekašová // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 10. – P. 193-201.
144. Assessment of the Amaruq gold deposit signature in glacial sediments using multivariate geochemical data analysis and indicator minerals / V. Bronac de Vazelhes, G. Beaudoin, I. McMartin [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2021. – Vol. 228. – P. 1-17. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2021.106800
145. Baron S. Dispersion of heavy metals (metalloids) in soils from 800-year-old pollution (Mont-Lozere, France) / S. Baron, J. Carignan, A. Ploquin // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – Vol. 40. – P. 5319-5326.
146. Bech J. Research strategies for metalophytes: some examples from Andes (South America) // *Biogeochemistry and Geochemical Ecology*. – M. : GUN NPC TMG MZ RF, 2001. – P. 159-168.
147. Biddau R. Rare earth elements in waters from the albitite-bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy / R. Biddau, R. Cidu, F. Frau // *Chemical Geology*. – 2002. – Vol. 182, № 1. P. 1-14. – DOI: 10.1016/S0009-2541(01)00272-8

148. Bioaccessibility of antimony and arsenic in highly polluted soils of the mine area and health risk assessment associated with oral ingestion exposure / J. Li, Y. Wei, L. Zhao [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2014. – Vol. 110. – P. 308-315.
149. Biogeochemical cycling of silver in acidic, weathering environments / J. Shuster, F. Reith, M. R. M. Izawa [et al.] // *Minerals*. – 2017. – Vol. 7. – P. 218.
150. Biogeochemistry of antimony in soil-plant system: Ecotoxicology and human health / M. Shahida, S. Khalida, C. Dumat [et al.] // *Applied Geochemistry*. – 2019. – Vol. 106. – P. 45-49.
151. Biogeochemistry of Major World Rivers / ed. by E. T. Degens, S. Kempe, J. E. Richey, John Wiley. – Chichester, 1991. – Scope 42. – 356 p.
152. Bowel R. W. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: Implications for the supergene behavior of gold // *Mineralogical Magazine*. – 1992. – Vol. 56. – P. 545-560. – DOI: 10.1180/minmag.1992.056.385.10
153. Bowell R. The role of fulvic acid in the supergene migration of gold in tropical rain forest / R. Bowell, A. Gise, R. Foster // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – Vol. 57, № 17. – P. 4179-4190. – DOI: 10.1016/0016-7037(93)90314-M
154. Ćakmak D. Contamination, risk, and source apportionment of potentially toxic microelements in river sediments and soil after extreme flooding in the Kolubara River catchment in Western Serbia / D. Ćakmak, V. Perovic, S. Antic-Mladenovic // *Journal of Soils and Sediments*. – 2017. – Vol. 18. – P. 1981-1993.
155. Clemens S. Schizosaccharomyces pombe as a model for metal homeostasis in plant cell: phytochelatin-dependent pathway is the main cadmium detoxification mechanism / S. Clemens, C. Simm // *New Phytol.* – 2003. – Vol. 159. – P. 323-330. – DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00811.x
156. Colloidal rare earth elements in a boreal river: changing sources and distributions during the spring flood / K. Andersson, R. Dahlgqvist, D. Turner [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2006. – Vol. 70. – P. 3261-3274.
157. Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: Impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption / M. Davranche,

- O. Pourret, G. Gruau, A. Dia [et al.] // *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 247, is. 1. – P. 154-170.
158. Complexation of silver and dissolved organic matter in soil water extracts / L. Settimo, M. J. McLaughlin, J. K. Kirby [et al.] // *Environmental Pollutants*. – 2015. – Vol. 199. – P. 174-184.
159. Concentration, distribution, and translocation of mercury and methylmercury in mine-waste, sediment, soil, water, and fish collected near the Abbadia San Salvatore mercury mine, Monte Amiata district, Italy / V. Rimondi, J. E. Gray, P. Costagliola [et al.] // *Science of the total environment*. – 2012. – Vol. 414. – P. 318-327.
160. Duddy I. R. Redistribution and fractionation of the rare-earth and other elements in a weathering profile // *Chemical Geology*. – 1980. – Vol. 30. – P. 363-381.
161. Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sectors of European countries / A. Fugiel, D. Burchart-Korol, K. Czaplicka-Kolarz [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 143. – P. 159-168.
162. Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines / K. Moreau, C. Laamanen, R. Bose [et al.] // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2021. – Vol. 31. – P. 1159-1167.
163. Evaluation of heavy metal contamination of surface soils in Zarshouran gold district, Northwestern Iran / F. Ghazban, A. Parizanganeh, A. Zamani [et al.] // *International Journal of environmental research*. – 2018. – Vol. 12, is. 6. – P. 843-860.
164. Fendorf S. Temporal changes in soil partitioning and bioaccessibility of arsenic, chromium, and lead / S. Fendorf, M. J. La Force, G. Li // *Journal of Environmental Quality*. – 2004. – Vol. 33, is. 6. – P. 2049-2055.
165. Fernández-Caliania J. C. Source and geochemical partitioning of silver in a naturally-enriched soil / J. C. Fernández-Caliania, M. I. Giráldezb, M. B. Riveraa // *Applied Geochemistry*. – 2019. – Vol. 103. – P. 85-96. – DOI:10.1016/j.apgeochem.2019.02.010
166. Fordyce F. Selenium deficiency and toxicity in the environment // *Essentials of medical geology*. – 2005. – Vol. 1. – P. 373-415.

167. Geochemical anomalies of trace elements in unremediated soils of Mt. Karczówka, a historic lead mining area in the city of Kielce, Poland / A. Gałuszka, M. Zdzisław, S. Dołęgowska [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 63. – P. 397-405.
168. Geochemical characterisation of surface waters, topsoils and efflorescences in a historic metal-mining area in Spain / C. Pérez-Sirvent, C. Hernández-Pérez, M. J. Martínez-Sánchez [et al.] // *Journal of Soils and Sediments*. – 2016. – Vol. 16, iss. 4. – P. 1238-1252.
169. Geochemical evaluation of potentially toxic elements determined in surface sediment collected in an area under the influence of gold mining / M. V. S. Santos, J. B. da Silva Júnior, C. E. V. de Carvalho [et al.] // *Marine pollution bulletin*. – 2020. – Vol. 158. – P. 385-398.
170. Gray D. J. Chemistry of gold-humic interaction / D. J. Gray, M. J. Lintern, G. D. Longman. – London : CSIRO division of exploration geoscience report, 1990. – 32 p.
171. Greenwood N. N. Chemistry of the elements / N. N. Greenwood, A. Earnshaw. – Oxford : Pergamon Press. Publ., 1984. – 1542 p.
172. Grotti M. Trace elements in surface sediments from Kongsfjorden, Svalbard: occurrence, sources and bioavailability / M. Grotti, F. Soggia, F. Ardini // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2017. – Vol. 97. – P. 401-418.
173. Hartikainen Å. Soil geochemical studies in gold exploration at three targets in Haapaluoma, Senajoki. W-Finland // *Geological Exploration*. – 2012. – Vol. 52. – P. -149-176.
174. Hassan Z. Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants / Z. Hassan, M. G. M. Aarts // *Environmental and Experimental Biology*. – 2011. – Vol. 72. – P. 53-63.
175. Heave metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety / G. Toth, T. Hermann, M. R. da Silva [et al.] // *Environmental International*. – 2016. – Vol. 88. – P. 299-309.

176. Hongsheng Zhang Meteorological mechanism of regional PM_{2.5} transport building a receptor region for heavy air pollution over Central China / J. Xipeng, C. Xuhui, Y. Mingyuan [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2020. – Vol. 224. – P. 1-14.
177. Hydro-chemical processes in Lake Qinghai throughout climate warming: in situ investigations of the largest lake in China / C. F. Jin, S. J. Li, H. L. Zhang [et al.] // *Natural Science*. – 2016. – Vol. 8. – P. 574-590.
178. Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: A review / T. Wang-Wang, Z. Guang-Ming, G. Ji-Lai [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2014. – Vol. 1. – P. 1014-1027.
179. Influence of quarry mining dust on PM_{2.5} in a city adjacent to a limestone quarry: Seasonal characteristics and source contributions / P. Xing, S. Guo-Liang, Z. Jun [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2016. – Vol. 550. – P. 940-949.
180. Kabata-Pendias A. Biogeochemistry of trace elements / A. Kabata-Pendias, H. Pendias. – Warsaw : [s . n.], 1999. – 398 p.
181. Kabata-Pendias A. Trace elements from Soils to Humans / A. Kabata-Pendias, A. B. Mukherjee. – Berlin : Springer Publ., 2007. – 449 p.
182. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants / A. Kabata-Pendias. – 4th edn. – FL, USA : CRC Press Publ., 2010. – 548 p.
183. Leybourne M. I. Rare earth elements (REE) and yttrium in stream waters, stream sediments, and Fe–Mn oxyhydroxides: fractionation, speciation, and controls over REE+Y patterns in the surface environment / M. I. Leybourne, K. H. Johannesson // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2008. – Vol. 72, is. 24. – P. 5962-5983.
184. Livingstone D. A. Chemical composition of rivers and lakes // *Geological Survey professional paper*. – 1963. – № 440. – P. 1-64.
185. Machowski R. Chemical composition of the surface layer of bottom sediments in the northern part of the chott el jerid periodic lake in Tunisia / R. Machowski, M. Rzetala // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Albena, Bulgaria. – 2017. – Vol. 17. – P. 89-96.

186. Markert B. Establishing of 'reference plant' for inorganic characterization of different plant species by chemical fingerprinting // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 1992. – № 64 (3). – P. 533-538.
187. Martin C. W. Trace metal concentrations along tributary streams of historically mined areas, Lower Lahn and Dill River basins, central Germany // *Catena*. – 2019. – Vol. 174. – P. 174-183.
188. Martin J. M. Elemental mass balance of material carried by world major / J. M. Martin, M. Meybeck // *Marine Chemistry*. – 1979. – Vol. 7, is. 3. – P. 173-206.
189. Meija J. Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) / J. Meija, M. Berglund // *Pure and Applied Chemistry*. – 2016. – Vol. 88, is. 3. – P. 293-306.
190. Mineralogy and geochemistry of trace metals and REE in volcanic massive sulfide host rocks, stream sediments, stream waters and acid mine drainage from the Lousal mine area (Iberian Pyrite Belt, Portugal) / E. Ferreira da Silva, I. Bobos, J. X. Matos [et al.] // *Applied Geochemistry*. – 2009. – Vol. 24, is. 3. – P. 383-401.
191. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments / A. Violante, V. Cozzolino, L. Perelomov [et al.] // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. – 2010. – Vol. 10, № 3. – P. 268-292.
192. Noble R. P. Hydrogeochemistry for mineral exploration in Western Australia (I): methods and equipment / R. P. Noble, D. J. Gray // *Explore Newsletter*. – 2010. – Vol. 146. – P. 2-11.
193. Okkenhaug G. Antimony (Sb) and arsenic (As) in Sb mining impacted paddy soil from Xikwangshan, China: differences in mechanisms controlling soil sequestration and uptake in rice / G. Okkenhaug, J. Mulder // *Environmental Science and Technology*. – 2012. – Vol. 46. – P. 3155-3162.
194. Oxalate-based remediation of arsenic bound to amorphous Fe and Al hydrous oxides in soil / J. C. Lee, E. J. Kim, H. W. Kim [et al.] // *Geoderma*. – 2016. – Vol. 270. – P. 76-82.

195. Pandey A. K. Stability Constants of Metal-Humic Acid Complexes and Its Role in Environmental Detoxification / A. K. Pandey, S. D. Pandey, V. Misra // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Environmental Research. – 2000. – Vol. 47. – P. 195-200.
196. Pyrzynska K. Determination of selenium species in environmental samples // *Microchimica Acta*. – 2002. – Vol. 140. – P. 55-62.
197. Ratte H. T. Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: a review // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 1999. – Vol. 18. – P. 89-108.
198. Robertson I. D. M. Geochemical exploration around the Harmony gold deposit, Peak Hill, Western Australia. *Geochemistry // Exploration, Environment, Analysis*. – 2001. – Vol. 4. – P. 113-127.
199. Ronnback P. Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburden groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoidic settings, Eastern Sweden / P. Ronnback, M. Astroma, J. P. Gustafsson // *Applied Geochemistry*. – 2008. – Vol. 23, is. 7. – P. 1862-1880.
200. Rybin I. V. Influence of mining industry on atmosphere // *New in knowledge of ore formation processes*. Collection of materials of the Seventh youth scientific and practical Russian school. Federal state budgetary institution of science Institute of Geology of ore deposits, petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (Moscow). – 2017. – P. 244-247.
201. Sahu H. B. Underground Mining for Meeting Environmental Concerns – A Strategic Approach for Sustainable Mining in Future / H. B. Sahu, N. Prakash, S. Jayanthu // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2015. – Vol. 11. – P. 232-241.
202. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas / M. L. Bagard, F. Chabaux, J. Viers [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – Vol. 75, is. 12. – P. 3335-3357.
203. Shannon W. M. The analysis of pictogram quantities of rare earth elements in natural waters / W. M. Shannon, S. A. Wood // *Rare earth elements in groundwater flow system*. – 2005. – Vol. 1. – P. 1-37.
204. Siegel F. R. Environmental geochemistry of potentially toxic metals / Siegel F. R. – Berlin : Springer-Verlag, 2002. – 218 p.

205. Søndergaard J. Mining pollution in Greenland – the lesson learned: A review of 50 years of environmental studies and monitoring / J. Søndergaard, A. Mosbech // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. – 812. – P. 1-14.
206. Study on surficial soil geochemistry in the high-elevation and –frigid mountainous region: A case of Qulong porphyry copper deposit in Tibet / S. Yang, H. Zhang, M. Kong [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – V. 139. – P. 144-151.
207. The chemistry and behavior of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: a critical review / S. C. Wilson, P. V. Lockwood, P. M. Ashley [et al.] // *Environmental Pollutants*. – 2010. – Vol. 158. – P. 1169-1181.
208. The desorption of silver and thallium from soils in the presence of a chelating resin with thiol functional groups / A. R. Jacobson, M. B. McBride, P. Baveye [et al.] // *Water, Air and Soil Pollutants*. – 2005. – Vol. 160. – P. 41-54.
209. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: a review / G. Du Laing, J. Rinklebe, B. Vandecasteele [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2009. – V. 407, is. 13. – P. 3972-3985.
210. Transport and transformation of riverine neodymium isotope and rare earth element signatures in high latitude estuaries: a case study from the Laptev Sea / G. Laukert, M. Frank, D. Bauch [et al.] // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2017. – Vol. 477. – P. 205-217.
211. Turekian K. K. The oceans, streams and atmosphere // *Handbook of Geochemistry* / K. H. Wedepohl [ed.]. – 1969. – P. 297-323.
212. Viers J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database / J. Viers, B. Dupre, J. Gaillardet // *Science of the Total Environment*. – 2009. – Vol. 407. – P. 853-868.
213. Vlassopoulos D. Gold speciation in natural waters. II. The importance of organic complexing – Experiments with some simple model ligands / D. Vlassopoulos, S. Wood, A. Mucci // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1990. – Vol. 54. – P. 1575-1586.
214. Woolson E. Fate of arsenicals in different environmental substrate // *Environmental Health Perspectives*. – 1977. – Vol. 19. – P. 73-81.

Нормативная литература

215. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность (с Изменением N 1). – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 7 с.
216. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к отбору проб. – М. : Стандартиформ, 2008. – 4 с.
217. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М. : Стандартиформ, 2008. – 7 с.
218. ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб. – М. : Стандартиформ, 2008. – 7 с.
219. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. – М. : Стандартиформ, 2013. – 32 с.
220. ГОСТ Р 70281-2022. Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. – М. : Российский институт стандартизации, 2022. – 6 с.
221. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив : утверждено : главный государственный санитарный врач В. И. Курчанов 17.06.1996 г. – С-Пб., 1996. – 10 с.
222. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ от 13 декабря 2016 года N 552 (с изменениями на 10 марта 2020 года). – Доступ из справочно-правовой системы «Кодекс».
223. Р 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. – М. : Стандартиформ, 2013. – 36 с.
224. РД 52.24.609. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2013. – 39 с.

225. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : постановление от 28 января 2021 года N 2 : (с изменениями на 30 декабря 2022 года). – Доступ из справочно-правовой системы «Кодекс».

Фондовые материалы

226. Анисимова Г. С. Минералогический состав руд золоторудного месторождения Вьюн / Г. С. Анисимова, В. М. Суплецов, Л. А. Кондратьева. – Якутск : Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 2008. – 15 с.

227. Протопопов Р. И. Подсчет запасов золоторудного месторождения Вьюн в Верхоянском улусе Республики Саха (Якутия) по состоянию на 01.01.2009 г. / Р. И. Протопопов, А. М. Сулейманов, Е. П. Пичугин. – Якутск, 2009. – 175 с.

Электронные ресурсы

228. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2021 году». Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) [Электронный ресурс]. – 776 с. –

URL:[https://minpriroda.sakha.gov.ru/uploads/ckfinder/userfiles/2022/08/02/files/Preview%20\(25\).pdf](https://minpriroda.sakha.gov.ru/uploads/ckfinder/userfiles/2022/08/02/files/Preview%20(25).pdf) (дата обращения: 28.08.2022).

229. Окружающая среда [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики (Росстат). – 1999-2023. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 03.04.2022).

