

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. Н.Л. ДОБРЕЦОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ГИН СО РАН)

УДК 553.4 (553.6, 553.2)

Рег. № НИОКТР АААА-А21-121011390003-9

Инв. № 4

УТВЕРЖДАЮ
Директор ГИН СО РАН
Д.Г.-М.Н.



А.А.Цыганков

2023 г.

Протокол № 12 от «21» декабря 2023 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Рудообразующие системы разновозрастных складчатых поясов южного
обрамления Сибирского кратона: геолого-генетические модели
месторождений благородных, редких и цветных металлов
(промежуточный, 3 этап)

Номер проекта в ИС управления НИР
FWSG-2021-0004 (рег. № 1021062110740-1-1.5.6)

**Приоритетное направление 1.5.5.1. Закономерности образования и размещения твердых
полезных ископаемых в различные периоды истории Земли**

Руководитель НИР,
зав. лаб., Д.Г.-М.Н.

Б.Б. Дамдинов

Улан-Удэ 2023

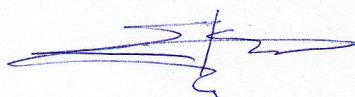
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, зам. директора
по научной работе, зав. лабораторией,
д-р геол.-мин. наук



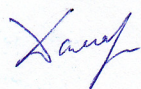
Б.Б. Дамдинов
(введение, разделы 1, 3, заключение)

Отв. исполнитель, вед. науч. сотр.,
канд. геол.-мин. наук, доцент



Е.В. Кислов
(раздел 2)

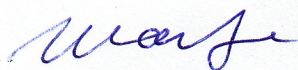
Отв. исполнитель, вед. науч. сотр.,
канд. геол.-мин. наук



Л.Б. Дамдинова
(разделы 1, 3)

Исполнители:

Вед. науч. сотр., канд. техн. наук



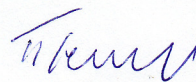
Б.Ж. Жалсараев
(раздел 4)

Ст. науч. сотр., канд. геол.-мин. наук



В.И. Васильев
(раздел 4)

Мл. науч. сотр., канд. геол.-мин. наук



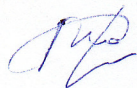
И.Г. Татьков
(раздел 1)

Мл. науч. сотр.



А.Д. Извекова
(раздел 1)

Исследователь



М.Л. Москвитина
(раздел 1)

Исследователь



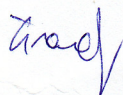
Т.И. Сажина
(раздел 1)

Исследователь



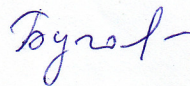
В.В. Вантеев
(раздел 2)

Исследователь



Б.Б. Бадмажапов
(раздел 1)

Нормоконтроль



Н.Г. Бугаева

РЕФЕРАТ

Отчет 32 с., 15 рис., 11 источн., 1 прил.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, ВОЗРАСТ, УСЛОВИЯ
ФОРМИРОВАНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ, БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТЫ, СУЛЬФИДНЫЕ
РУДЫ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведенные в 2023 году исследования являются продолжением научно-исследовательских работ в рамках рассматриваемого проекта. Изучены отдельные типы минерализации в пределах крупных рудных узлов. Проведены минералого-геохимические исследования и определены физико-химические условия формирования кварц-берилловой минерализации Джидинского рудного поля. Выявлены особенности минерального состава необычных циркон-титаномагнетитовых руд на Третьяковском золото-флюоритовом месторождении и определен их изотопный возраст методом U-Pb датирования по циркону. Продолжены исследования процессов рудообразования в связи с массивами базит-ультрабазитов на примере Йоко-Довыренского массива в Северном Прибайкалье. Изучены процессы формирования аподунитовых скарнов, минералов благородных металлов, проведено изучение Re-Os изотопной системы. Прикладные исследования включали модернизацию рентгенофлуоресцентного анализа для возможности минерально-фазового анализа пробы сульфидных руд. Продолжены разработки программного обеспечения для компьютерного моделирования геологических процессов.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОТЧЕТА	7
1 Исследования редкометальных рудообразующих систем.....	7
1.1 Проведены детальные исследования минерального состава и условий формирования кварц-берилловых прожилков Первомайского молибденового месторождения.	7
1.2 Установлены особенности минерального и химического состава и определен изотопный возраст циркон-титаномagnetитовых руд, развитых в пределах Третьяковского золото-флюоритового месторождения.	10
2 Исследования рудообразующих систем в связи с базит-ультрабазитами	13
2.2 Проведена детальная рентгеновская компьютерная томография платиноносного анортозита Главного рифа..	15
2.3 На основе Re-Os систематики пород и платинометально-медно-никелевых руд установлен первоначальный мантийной источник пород и выделены два этапа коровой контаминации.	17
3 Экспериментальные исследования процессов рудообразования.....	19
3.1 Проведены эксперименты по исследованию процессов миграции рудообразующих компонентов в термоградиентных условиях при повышенных P-T параметрах.	19
4 Прикладные исследования.....	21
4.1 Предложена версия расчета минерально-фазового состава (МФС) горных пород, на основе рентгено-флюоресцентного анализа (РФА).....	21
4.2 Предложен авторский метод динамико-параметрического моделирования (ДПМ) геологических объектов.	22
4.3 Разработана программа для ЭВМ «Vladi ParaModeling», предназначенная для динамико-параметрического моделирования природных объектов.....	23
4.4 Разработана программа для ЭВМ «Vladi Porosity», предназначенная для для расчёта физических взаимоотношений между плотностью и пористостью трещиновато-пористых горных пород и плотностью заполняющего пористую среду раствора.....	24

4.6 Разработана программа для ЭВМ «Vladi Radiography Line» – программа для получения усреднённых цветовых характеристик (RGB) на выбранном отрезке на автордиографических снимках в геохимии.....	26
4.7 Разработана программа для ЭВМ «Vladi Seidel» – программа, реализующая авторские модификации метода Гаусса-Зейделя для расчёта стационарных распределений интенсивных физических величин на плоскости вертикального геологического разреза.....	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А	31

ВВЕДЕНИЕ

Общая цель проекта – разработка концептуальных геолого-генетических моделей крупных рудных узлов и провинций, содержащих разнотипное оруденение на примере разновозрастных месторождений благородных, редких и цветных металлов в складчатых поясах южного обрамления Сибирского кратона.

На этапе 2023 г. проектом предусматривались изучение геолого-структурного положения, вещественного состава и физико-химических условий формирования редкометальных рудообразующих систем Забайкалья. Были продолжены исследования процессов рудообразования в связи с базит-ультрабазитами. Для уточнения условий образования и генезиса месторождений полезных ископаемых проводилось экспериментальное моделирование рудообразующих процессов, разработаны новые программные продукты, позволяющие моделировать различные эндогенные процессы, а также проводятся исследования с целью модернизации аналитических методик. Полученные в 2023 году результаты соответствуют заявленной цели проекта – разработке геолого-генетических моделей разнотипных рудообразующих систем.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОТЧЕТА

1 Исследования редкометалльных рудообразующих систем

1.1 Проведены детальные исследования минерального состава и условий формирования кварц-берилловых прожилков Первомайского молибденового месторождения. Первомайское месторождение входит в состав Джидинского рудного поля и приурочено к северо-западной апикальной части одноимённого массива гранит-порфиров [1]. Кварц-берилловые прожилки распространены в эндо- и экзоконтактах Первомайского штока и пересекают кварц-молибденитовые прожилки, что свидетельствует об их более позднем образовании.

Кварц-берилловые прожилки имеют достаточно чёткие и резкие границы с вмещающими породами, довольно часто кристаллы берилла растут от стенок прожилков (рисунок 1). Это свидетельствует о том, что такие прожилки формировались путём выполнения трещин.

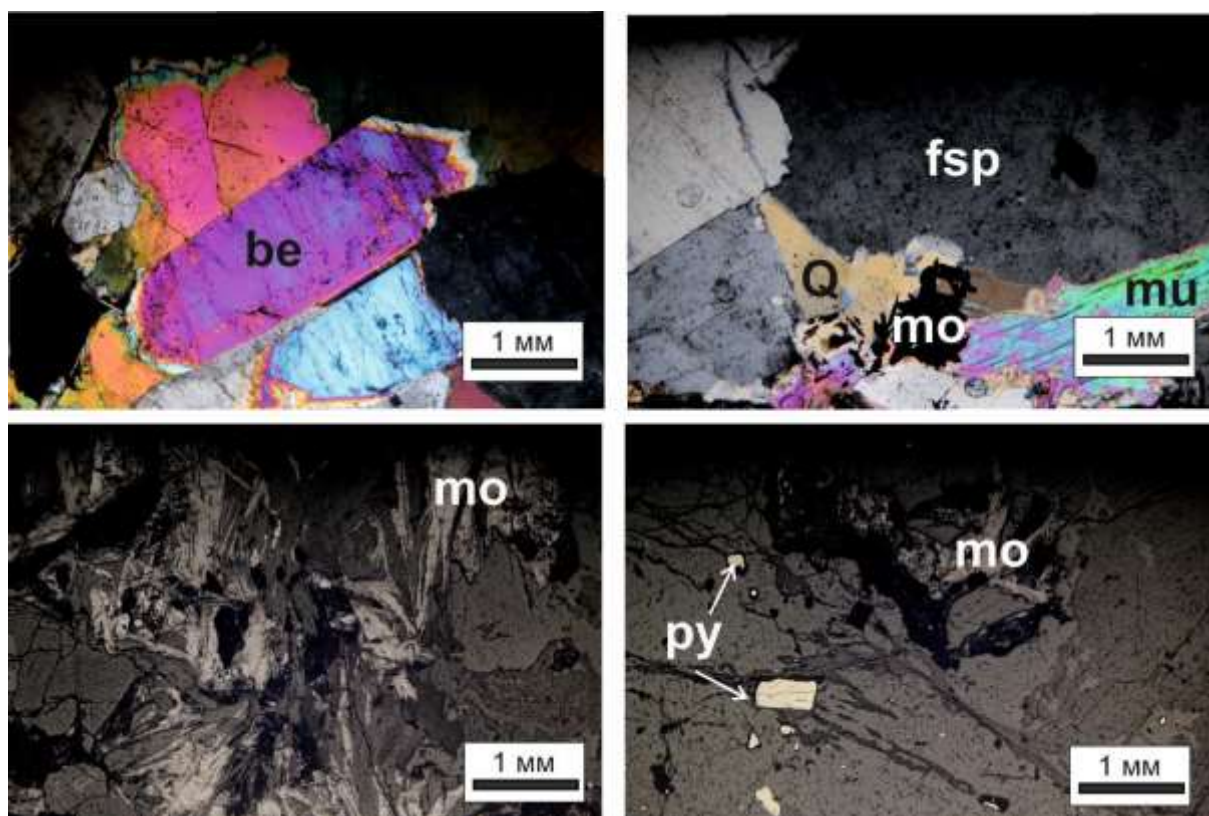


Рисунок 1 – Фотографии шлифов (верхний ряд) и аншлифов (нижний ряд) кварц-берилловых прожилков: а - удлиненно-призматические кристаллы берилла в шлифе; б - листоватые агрегаты молибденита в интерстициях кварца и мусковита; в - листоватый агрегат молибденита; г - кубические зерна пирита и агрегаты молибденита среди нерудной массы. Условные обозначения: Q – кварц, мо – молибденит, му – мусковит, be – берилл, py – пирит

Мощность прожилков варьирует от ~ 1 до 10 см. Установлено, что главными жильными минералами являются кварц и берилл, также присутствуют калиевый полевой шпат, флюорит и мусковит. Впервые на Первомайском месторождении идентифицирован фенацит. Рудные минералы представлены молибденитом, пиритом и редкими зёрнами касситерита, халькопирита, рутила, айкинита, вульфенита, колумбита, монацита и ксенотима.

Изотопные исследования показали, что кварц из кварц-берилловых и кварц-молибденитовых прожилков имеет близкий изотопный состав кислорода. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в кварце варьируют от 5.7 до 7.1 ‰. Самый низкий показатель $\delta^{18}\text{O}$ имеет мусковит (4.3 ‰); в берилле значения $\delta^{18}\text{O}$ немного ниже, чем в кварце (5.3–6.2 ‰). Наши данные по изотопному составу кислорода согласуются с результатами предшественников [2]. Расчёт температуры изотопного равновесия в паре кварц-мусковит был проведён по уравнению, опубликованному в работе [3]. Получено значение 461 °C, которое интерпретируется как температура изотопного равновесия

Для уточнения условий минералообразования были изучены наиболее пригодные первичные флюидные включения в кварце и берилле. Все изученные первичные включения – двухфазовые (жидкость > газ), а в более крупных флюидных включениях отчётливо просматривается кайма жидкой углекислоты (рисунок 2). Температура гомогенизации флюидных включений в берилле варьирует от 265 до 191 °C. Температуры эвтектики меняются в диапазоне от -55 до -38 °C, это свидетельствует о том, что главные солевые системы могут быть представлены хлоридами кальция, натрия, магния и калия. Температуры плавления гидрата CO_2 от 7.3 до 8.1, такие значения соответствуют солёности 5.2 – 2.5 мас. % экв. NaCl. Для флюидных включений из кварца были определены температуры гомогенизации в пределах от 281 до 250 °C. Температуры эвтектики имеют значения от -38 до -36 °C, это указывает на то, что главные солевые системы могут быть представлены хлоридами магния, натрия, калия и железа. В интервале температур от ~ 7.2 до 8.8 происходит плавление гидрата CO_2 , что соответствует солёности ~ 5.4 – 2.4 мас. % экв NaCl.

Таким образом, кварц-бериллиевое оруденение выделяется как самостоятельная, более поздняя по отношению к кварц-молибденитовому оруденению, стадия минералообразования. На основе анализа минерального состава кварц-берилловых прожилков можно сделать вывод о том, что в составе рудообразующих растворов присутствовали такие элементы, как Si, Na, K, Al, Ca, Fe, F, S, Be, Mo, Sn, Pb, Cu, Ti, Mn, Bi, Nb, PЗЭ, P, Ba и др.

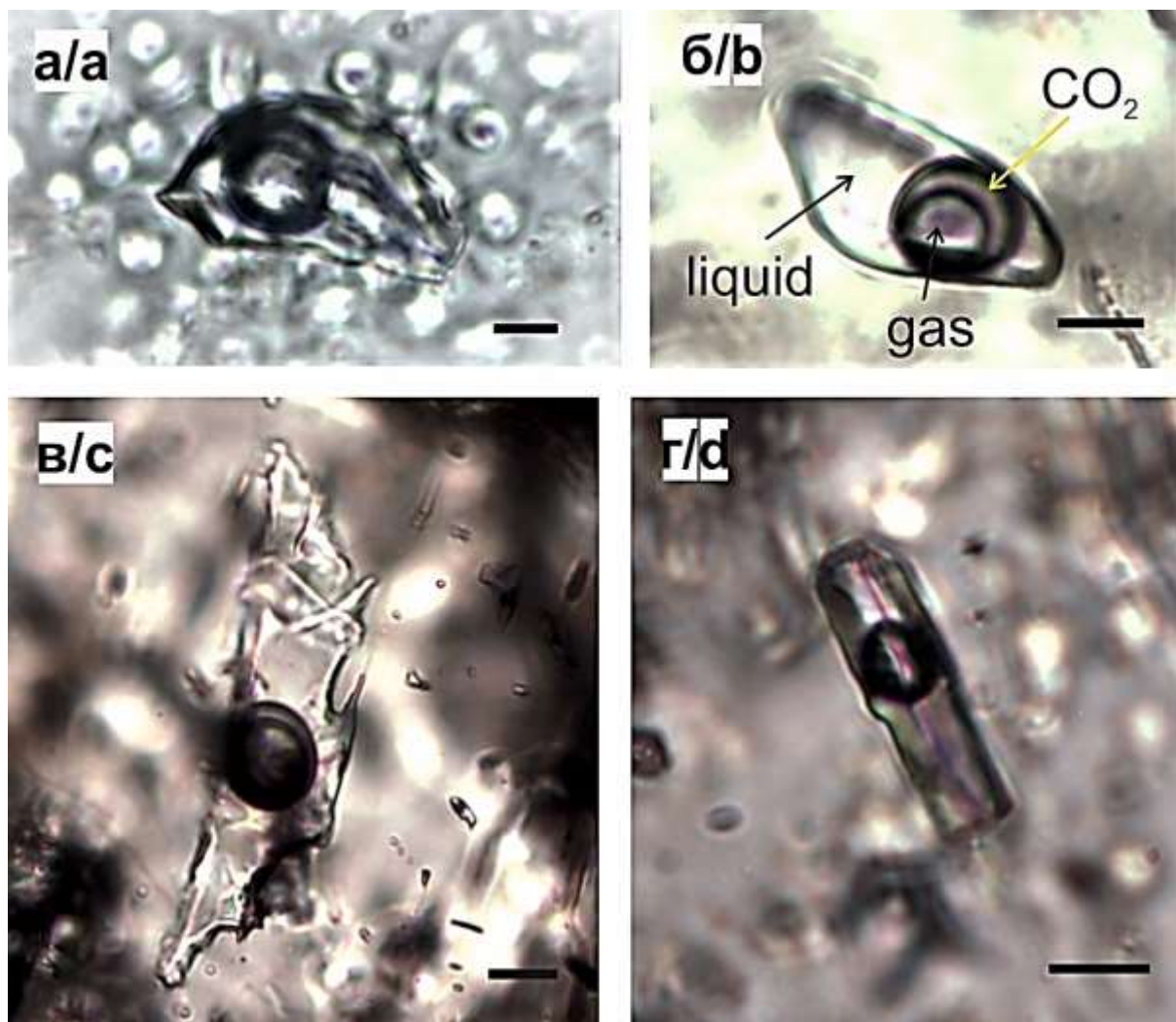


Рисунок 2 – Фотографии первичных флюидных включений в кварц-берилловых прожилках Первомайского месторождения: а, б – в кварце; в, г – в берилле. Масштабная линейка – 10 мкм

Результаты исследования флюидных включений показали, что температуры гомогенизации ФВ в берилле варьируют в интервале от 191 до 265°C, тогда как в кварце эти температуры выше и варьируют в интервале 250 – 281°C. При этом температура изотопного равновесия, соответствующая температуре минералообразования, имеет значение 461°C. Такая разница может быть обусловлена повышенным давлением при формировании минерализации. Рудообразующие растворы характеризуются относительно низкой солёностью 5,4 – 2,5 экв. NaCl, главные солевые компоненты представлены хлоридами кальция с примесью хлоридов натрия, калия, магния и железа. По сравнению с ранним кварц-молибденитовым оруденением стадия формирования кварц-берилловых прожилков характеризуется снижением общей солёности рудообразующих растворов. Результаты изотопных исследований позволяют предполагать, что формирование

бериллиевого оруденения протекало в условиях смешения магматогенных растворов и метеорных вод.

Сажина Т.И., Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. Минеральный состав и условия формирования кварц-берилловой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) // Руды и металлы. – 2023. – № 1. – С 25 – 39. DOI: 10.47765/08695997-2023-10003.

1.2 Установлены особенности минерального и химического состава и определен изотопный возраст циркон-титаномагнетитовых руд, развитых в пределах Третьяковского золото-флюоритового месторождения. Месторождение входит в состав Гильберинского золото-серебро-флюорит-редкометального рудного узла. Рудное поле Третьяковского месторождения сложено сиенитами позднепалеозойского интрузивного комплекса, породы которого рассечены мощными зонами катаклаза, милонитизации, содержащими жильные кварц-флюоритовые тела. Эти жилородоподобные тела (жильные зоны) представляют собой участки сплошной метасоматической аргиллизации, флюоритизации и окварцевания, мощностью порядка 0.3 – 1 м, редко до 2.3 м. Особенностью кварц-флюоритовых руд Третьяковского месторождения является их повышенная золотоносность. Согласно данным разведочных работ, содержания золота в рудах варьируют от 0.3 до 19.5 г/т, при среднем значении 3 г/т, серебра – 1.9 – 18.6 г/т, при среднем значении 7 г/т. Необычные циркон-титаномагнетитовые руды были найдены в центральной части месторождения, в зоне метасоматитов параллельной основному рудному телу. Руды сложены агрегатом Fe-Ti минералов с редкими тонкими прожилками кварц-хлоритового состава, содержащим многочисленные выделения идиоморфных кристаллов циркона и редкую вкрапленность относительно апатита, кварца и монацита (рисунок 3а, б). Fe-Ti агрегат сложен магнетитом, содержащим многочисленные пластинчатые вроски титановых минералов, среди которых нами диагностированы манганоильменит, псевдорутил, рутил и титаномагнетит. При больших увеличениях видно, пластинчатые выделения структуры распада неоднородны и состоят из нескольких вышеперечисленных титановых минералов (рисунок 3в)

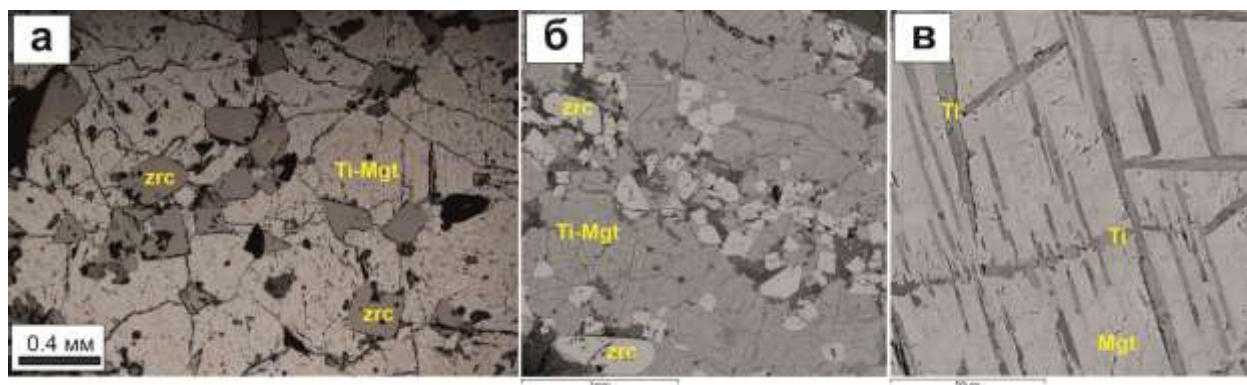


Рисунок 3 – Общий вид циркон-титаномagnetитового агрегата и структуры распада: а – фото в отраженном свете; б – в обратно-рассеянных электронах; в – увеличенное изображение пластинчатых выделений титановых минералов в магнетите; заметны неоднородности состава, различающиеся по оттенкам в обратно-рассеянных электронах. Ti-Mgt – агрегат Fe-Ti минералов; zrc – циркон; Mgt – магнетит; Ti – титановые минералы

В химическом составе образца циркон-титаномagnetитовых руд преобладают Fe (сумма оксидов Fe – 71.06 мас.%) и Ti (TiO_2 – 14.58 мас.%). Содержание Zr составляет 0.89 мас.%. В значимых концентрациях присутствуют SiO_2 (9.9 мас.%), MnO (1.15 мас.%) и P_2O_5 (0.54 мас.%). Содержания других петрогенных элементов низкое – на уровне десятых долей мас.%. Из элементов-примесей можно отметить относительно повышенные концентрации Zn, Nb, Hf и Y.

Наличие большого количества зерен циркона позволило провести изотопное U-Pb датирование непосредственно в аншлифе. Возраст образца был определен по точке пересечения конкордии и средней линии, построенной по 25 точкам измерения с помощью excel-макроса Isoplot (рисунок 4). Полученное значение возраста составляет 277 ± 1.5 млн лет, отвечающее возрасту рифтогенного магматизма Западного Забайкалья.

Значение изотопного возраста 277 млн лет, полученное для циркона, сопоставимо с возрастом (~280 млн. лет) расслоенных перидотит-габброидных массивов (Оронгойский, Арсентьевский и др.), несущих титаномagnetитовое оруденение. Однако, к этому же времени приурочено и формирование ассоциаций гранитоидов высокой щелочности: многофазного сиенит – щелочной сиенит – щелочно-гранитного Брянского плутона (279 – 283 млн. лет) [4], бимодальной трахибазальт-трахит-комендитовой дайковой серии (277 – 283 млн. лет) [5], распространенных относительно недалеко от Гильберинского рудного узла.

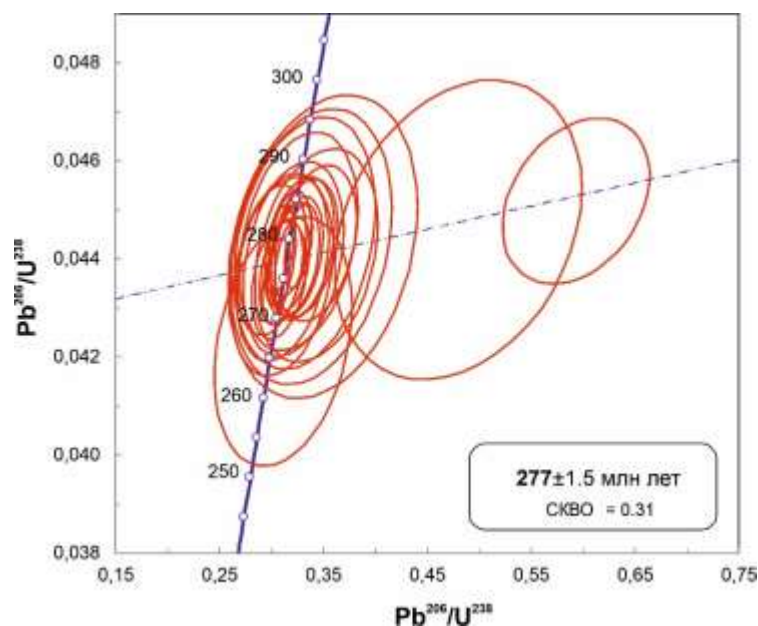


Рисунок 4 – U-Pb диаграмма с конкордией для цирконов из циркон-титаномагнетитовых руд Третьяковского месторождения

Совокупность данных о геологическом строении, минеральном и химическом составе руд, составе слагающих их минералов, низкотемпературных условиях их образования позволяют предполагать метасоматическую природу циркон-титаномагнетитовых руд Третьяковского месторождения. Находка таких необычных циркон-титаномагнетитовых руд в ассоциации с золото-флюоритовым оруденением обуславливает возможность нахождения на территории Забайкалья нового типа комплексных руд, подобных благороднометальным рудам Южной Австралии.

Дамдинов Б.Б., Хубанов В.Б., Горячев Н.А., Дамдинова Л.Б., Извекова А.Д. Состав и возраст необычных циркон-титаномагнетитовых руд Третьяковского золото-флюоритового месторождения (Западное Забайкалье) // Доклады РАН. Науки о Земле (в печати) DOI: 10.1134/S1028334X23602614.

2 Исследования рудообразующих систем в связи с базит-ультрабазитами

Продолжались работы по изучению особенностей формирования платинометалло-медно-никелевого оруденения по материалам Йоко-Довыренского дунит-троктолит-габбрового массива в Северном Прибайкалье.

2.1 Впервые описаны форстеритовые аподунитовые эндоскарны Йоко-Довыренского расслоенного массива и их роль в рудообразовании. В составе «контаминированных дунитов» оливин гораздо более магниальный и значительно обедненный Ni по сравнению с оливином магматических дунитов Йоко-Довыренского плутона, в нем содержатся фассаит и шпинель с большим содержанием Al_2O_3 , что вовсе не характерно для ортомагматических пород данного интрузива. Идиоморфный оливин дунитов состава Fo 82-87 с 0.15-0.40 Ni и до 0.1 % CaO – исходный, магматический. Его замещение прожилковым форстеритом Fo 89-99 с 0-0.15 % Ni и до 1 % CaO отражает метасоматический, скарновый процесс.

В результате распада твердого раствора высококальциевого новообразованного форстерита образуются тончайшие ламели распада монтichelлита. Этим ламелями объясняется совершенная отдельность новообразованного форстерита. Ламели зачастую реорганизуются в отдельные кристаллы. Отмечается рассеянная вкрапленность высоконикелистого пентландита, обедненного кобальтом $(Fe_{5.7}Ni_{3.1}Co_{0.2})S_8$. Она сформировалась за счёт сброшенного при процессе замещения никелистого магматического оливина низконикелистым метасоматическим форстеритом. Пентландит ассоциирует с метаморфогенно-гидротермальным Cr-магнетитом (рисунок 5).

Сравнение составов исходного магматического дунита и аподунитовых форстеритовых эндоскарнов показало, что Si, Cr, Mn, Co почти не изменились в концентрации. Существенен привнос Mg. Большинство других химических элементов заметно снизилось в концентрации: в 1,5 раза – Ni, Zn; в 2 раза – V, Pb, Ba, Sc; в 3 раза – Al, Ti, Ca, Y; в 4–6 раз – K, Rb, Li, Zr; в 8 раз – Sr; лантанидов на порядок – в 11 раз. То есть произошёл вынос большинства химических элементов при привносе только магния.

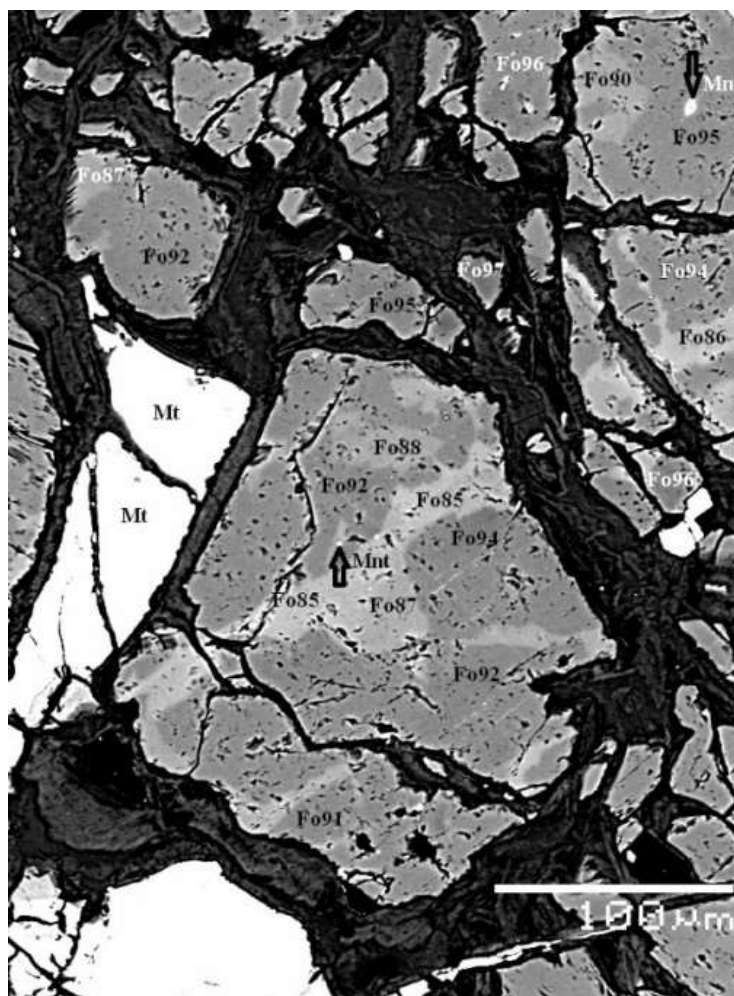


Рисунок 5 – Дуниты Йоко-Довыренского массива (обнажение по р. Большой), форстеритизированные в различной степени. Рядом с надписью Fo указано содержание форстеритового компонента. Тёмно-серые, чёрные прожилки состоят из минералов группы серпентина. Mt – магнетит, Mnt – монтичеллит

Таким образом, установлен процесс форстеритизации дунитов с образованием своеобразных высокомагнезиальных эндоскарнов. Оливин-хризолит Fo_{82-87} замещается обогащенным кальцием хризолитом Fo_{88-89} и далее форстеритом Fo_{90-99} . Скарновый форстерит беден никелем. Наиболее магнезиальный форстерит обеднён кальцием, очевидно, это вызвано распадом твердого раствора. Новообразованный обогащенный кальцием форстерит во многих участках в результате превратился в матрицу форстерита с системой тонких параллельных ламелей монтичеллита. Сам монтичеллит – малостойкий минерал, в большинстве случаев растворен, что приводит к образованию трещин отдельности. В других случаях он перекристаллизовывается с формированием зёрен монтичеллита. Оценка температуры его образования по составу сосуществующих форстерита и монтичеллита с использованием данных [6] 860–880 °С.

Синопальников Н.И., Кислов Е.В., Шубин И.И. Форстеритизированные аподунитовые эндоскарны Йоко-Довыренского расслоенного массива, Северное Прибайкалье//Геосферные исследования. – 2023. – № 2. – С. 18 – 24. DOI: 10.17223/25421379/27/2.

2.2 Проведена детальная рентгеновская компьютерная томография платиноносного анортозита Главного рифа. Эти исследования проводились в три этапа с получением информации в различных масштабах. На первом этапе был отсканирован образец размером 5-6 см с разрешением до 200 мкм; на втором этапе были пробурены два керны диаметром 10 мм из его наиболее богатых сульфидами зон, в которых были обнаружены вероятные минералы платиновой группы (МПГ); третий этап включал в себя разбуривание кернов диаметром 3 мм в областях, потенциально обогащенных МПГ. Такое систематическое исследование позволило визуализировать распределение сульфида в объеме матрицы плагиоклаза, а также установить пространственные соотношения сульфидов и МПГ. Минерализованные слои анортозита характеризуются неоднородным распределением сульфидов в пределах 1 см, при этом их содержание не превышает 10 об.%. Большинство МПГ выглядят как субизометрические, поскольку они приурочены к краям сульфидных выделений, реже встречаются внутри них. Размер зерен не превышает 135 мкм. По результатам стереологических реконструкций были подготовлены две небольших шашки с двумя самыми крупными зернами вероятных МПГ. Согласно результатам СЭМ-исследований, одно зерно диаметром 35 мкм в ассоциации с халькопиритом и эпидотом на границе сульфидной сегрегации было идентифицировано как мончеит, а удлиненное зерно длиной 135 мкм в срастании с кубанитом было идентифицировано как электрум (рисунок 6, 7).

Детальные исследования двух крупных зерен мончеита и электрума, выявленные в ходе КТ- и СЭМ-исследований, позволяют предположить два взаимосвязанных процесса, ответственных за образование минералов благородных металлов. Начальная стадия включает накопление несмешивающихся сульфидов в поровом пространстве закристаллизованных анортозитов (которые, вероятно, образовались в виде шпиров в толще кумулуса с преобладанием оливина), за которыми следует их длительная кристаллизация и субсолидусные трансформации при понижении температуры. Заключительная часть их истории предполагает важную роль низкотемпературных процессов, вероятно, под воздействием остаточных флюидов поздней стадии, которые ответственны за окончательное распределение и морфологию субидiomорфных зерен мончеита в ассоциации с эпидотом и появление агрегата электрума с высоким содержанием Ag и кубанита.

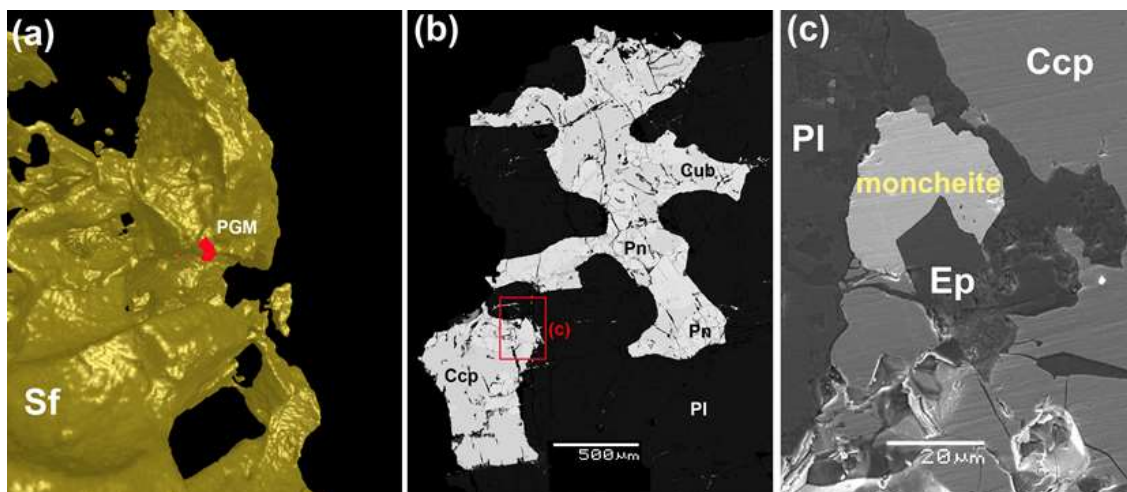


Рисунок 6 – Ассоциация мончеита с халькопиритом, плагиоклазом и эпидотом (Ep) в разных масштабах: а – результаты компьютерной томографии с разрешением 1-3 μm ; б,с – BSE-изображения выбранной области

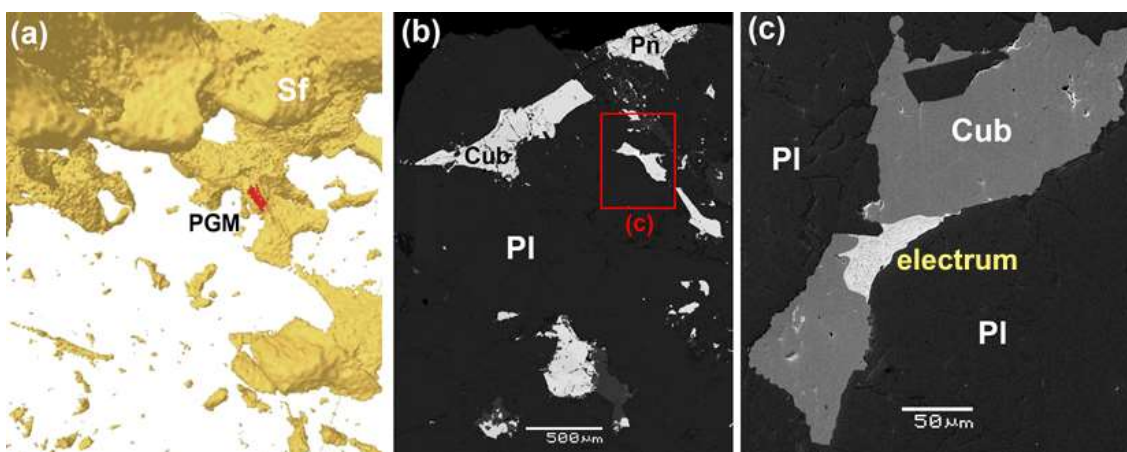


Рисунок 7 – Ассоциация электрума с кубанитом и плагиоклазом в разных масштабах: а – результаты компьютерной томографии с разрешением 1-3 μm ; б,с – BSE-изображения выбранной области

Результаты разномасштабной рентгеновской компьютерной томографии рудоносного анортозита из Главного рифа подтвердили предыдущие выводы о тесной пространственной ассоциации сульфидов и минералов благородных металлов, включая трехмерную визуализацию их взаимосвязей, а также количественную оценку ряда структурных параметров, таких как степень связанности сульфидов, морфология и распределение размеров для ряда потенциальных МПГ.

Pshenitsyn I.V., Ariskin A.A., Korost D.V., Sobolev S.N., Yapaskurt V.O., Nikolaev G.S., Kislov E.V. X-Ray computed tomography of PGE-rich anorthosite from the Main Reef of the Yoko-Dovyren layered massif //Minerals. – 2023. – 13. – 1307. DOI: 10.3390/min13101307.

2.3 На основе Re-Os систематики пород и платинометально-медно-никелевых руд установлен первоначальный мантийный источник пород и выделены два этапа коровой контаминации. Новые данные по геохимии элементов платиновой группы (ЭПГ) и Re-Os изотопной системе для 10 образцов Довыренского интрузивного комплекса позволяют сделать следующие выводы:

1) Геохимические данные для иридиевой и палладиевой групп ЭПГ позволили провести различие между “шпинелевым” и “сульфидным” контролем в исследованных породах, что коррелирует с основными типами магм Довыренского интрузивного комплекса – высокотемпературными исходными Fo₈₈ и Fo₈₆, а также их более эволюционировавшими производными.

2) Учитывая очень высокое значение СКВО = 110, все данные указывают на то, что изотопная Re-Os система дает возраст линейной регрессии 759,36 млн лет при начальном значении $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ $0,1309 \pm 0,0026$ (рисунок 8), возможно, из-за различий в начальных соотношениях Os, связанных с различными степенями контаминации. Эта оценка согласуется с результатами U-Pb датирования циркона, которые дали возраст $728,4 \pm 3,4$ млн лет для Довыренского интрузивного комплекса.

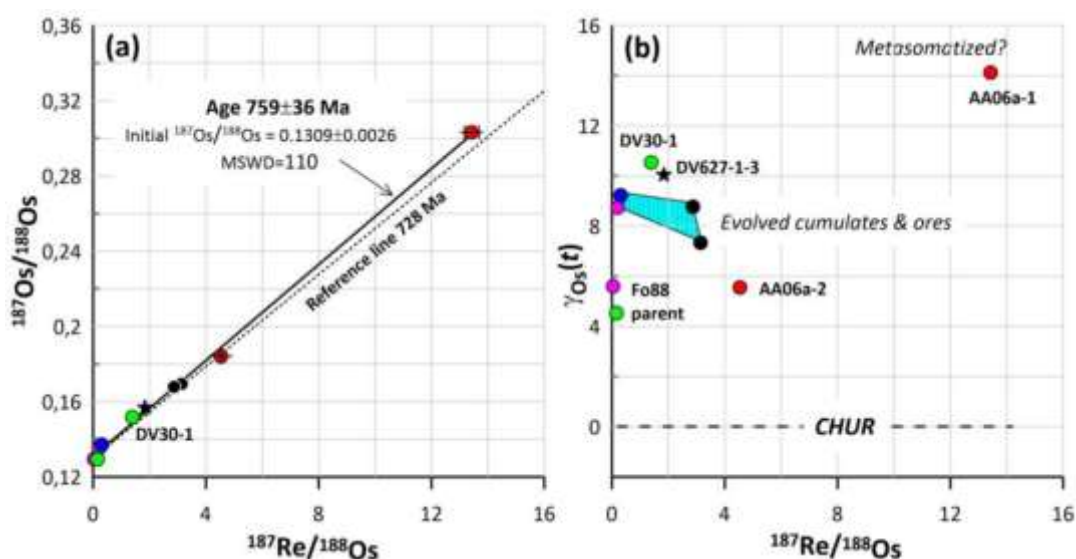


Рисунок 8 – Отношения изотопов $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ к изохроне $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ (а) и $\gamma_{\text{Os}}(t)$ к $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ при 728 млн лет (б). Линия для возраста 728 млн лет построена в предположении, что начальное значение $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0,13$

3) Показано, что после пересчета в $\gamma_{\text{Os}}(t)$ при $t = 728$ млн лет эти изотопные составы демонстрируют три отчетливых скопления в координатах $\text{Os}(t) \approx ^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$: 1) закаленный габбронорит и близконтактный оливиновый габбронорит DV10 дали наиболее

радиогенные значения $\text{Os}(t)$ 10,5 и 10,0 среди базальных ультрамафитов; 2) плагиодунит, троктолит и сульфидные руды показали более низкий радиогенный состав, с $\gamma\text{Os}(t)$ в диапазоне от 7,3 до 8,7; 3) оливиновый габбронорит и плагиоперидотит из нижней контактовой зоны и один образец ЭПГ-носного анортозита дали очень примитивные $\gamma\text{Os}(t)$ в диапазоне 4,5-5,6 (в среднем $5,2 \pm 0,6$).

4) На основе изотопных характеристик Os в совокупности с петрологическими реконструкциями и данными о системах изотопов Sm-Nd и серы, можно выделить два этапа формирования и преобразования довыренского магматизма. Первый этап предполагает неоархейское происхождение мантийного протолита с пониженным соотношением Sm/Nd по сравнению с примитивной мантией, вероятно, из-за взаимодействия мантии и коры. Вторая стадия включает в себя верхнерифейскую контаминацию наиболее примитивной довыренской магмы (родительская Fo_{88} , $\epsilon\text{Nd}(t)$ -16) вмещающими коровыми породами (вероятно, 10 мас.% сланцев). В результате генерируется более развитая «магма-прародительница» Fo_{86} с более высоким $\epsilon\text{Nd}(t)$ -14. Формирование содержащих сульфиды пород и Cu-Ni сульфидных руд связано с этим более эволюционировавшим типом магмы.

5) Самые высокие значения $\gamma\text{Os}(t)$ и относительное обогащение изотопом ^{34}S в закаленном габбронорите и около контактом оливиновом габбронорите DV10 указывают на то, что на верхнерифейские примитивные и эволюционировавшие магмы мог повлиять метаморфический флюид, обогащенный радиогенным ^{187}Os , который возник в ореоле экзоконтакта из-за термического разложения пирита в дегидратированных горных породах.

6) Нет очевидного объяснения относительно низкой $\gamma\text{Os}(t) = +5,6 \pm 0,8$, наблюдаемой в ЭПГ-носном анортозите AA06a-2.

7) Низкие значения $\gamma\text{Os}(t)$ для наименее фракционированных пород предполагают примитивный верхнерифейский мантийный источник в отношении изотопных характеристик Os, что было крайне аномальным при рассмотрении систематики изотопов Sm-Nd для тех же пород с $\epsilon\text{Nd}(t)$ около -16.

Ariskin A.A., Tessalina S.G., Kostitsyn Y.A., Pshenitsyn I.V., Sobolev S.N., Nikolaev G.S., Kislov E.V. Re-Os Systematics in the Layered Rocks and Cu-Ni-PGE Sulfide Ores from the Dovyren Intrusive Complex in Southern Siberia, Russia: Implications for the Original Mantle Source and the Effects of Two-Stage Crustal Contamination //Minerals. – 2023. – 13. – 1356. DOI: 10.3390/min13111356.

3 Экспериментальные исследования процессов рудообразования

3.1 Проведены эксперименты по исследованию процессов миграции рудообразующих компонентов в термоградиентных условиях при повышенных Р-Т параметрах. Опыты проводили при $T=500 - 680^{\circ}\text{C}$ и давлении 1.5 – 5 кбар в присутствии концентрированных водно-солевых растворах щелочной специфики в условиях температурного градиента в установках высокого газового давления. Целью экспериментов явилось моделирование процессов преобразования сульфидных руд, а также выявление условий и механизмов мобилизации, переноса и переотложения рудообразующих компонентов в условиях повышенных температур и давлений. Исследовался процесс переноса компонентов сульфидных руд при температурах $450 - 650^{\circ}\text{C}$, давлении до 5 кбар, в условиях температурного градиента. Температурный градиент в опытах составлял $0.5^{\circ}\text{C}/\text{мм}$, продолжительность опытов 14 суток. В качестве исходных материалов использованы океанические базальты, гранитные модельные смеси ($Fsp + Qz$) а также различные сульфидные минералы, оксиды и благородные металлы (Au, Pt). В результате экспериментов в термоградиентных условиях установлено, что при температуре $680-650^{\circ}\text{C}$ происходит интенсивная перекристаллизация и осаждение сульфидных минералов (сфалерита, галенита, халькопирита, пирита, куперита и др.) совместно с полевыми шпатами, слюдами и кварцем (рисунок 9). Наблюдается интенсивный перенос как главных петрогенных (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K), так и рудных элементов (Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Pt, Au, Hg, Bi), причем установлена совместная миграция силикатного и рудного вещества. Часть рудных элементов не образует собственные минералы, а входит в твердые растворы: Fe, Ni, Cu → пирит, пирротин; Pb, Au, As, Bi, Zn → галенит; Zn, Cd, Fe, Mn, Cu → сфалерит; As → галенит, аурипигмент, реальгар, золото; Hg → золото.

Проведенные эксперименты показали возможность совместного переноса и переотложения компонентов сульфидных руд и силикатного вещества в составе водно-солевых флюидов при повышенных Р-Т параметрах. Такие параметры в природных условиях могут возникать в зонах дислокационного метаморфизма (сдвиги, надвиги и др.), имеющих достаточно широкое распространение в складчатых поясах.

Признаки метаморфогенного происхождения руд ранее были установлены на Зун-Холбинском золоторудном месторождении в Восточном Саяне [7]. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность формирования золото-кварц-сульфидных руд за счет переотложения первичных гидротермально-осадочных сульфидов. Совместная миграция силикатного и рудного вещества фиксируется в продуктах перекристаллизации колчеданно-полиметаллических руд Озерного Pb-Zn

месторождения.

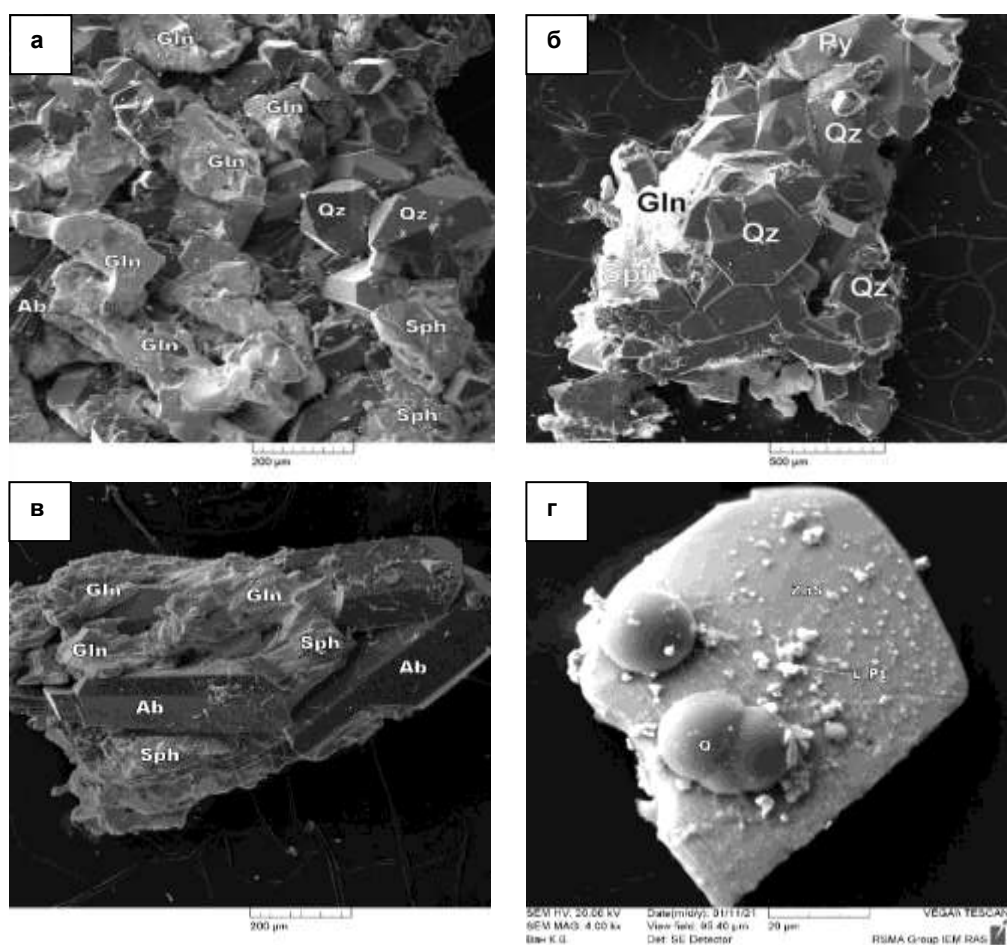


Рисунок 9 – Новообразованные рудно-силикатные сростки, полученные в ходе экспериментов: а – кварц-сфалерит-галенит; б – кварц-пирит-галенит-сфалерит; в – галенит-сфалерит-альбит; г - частицы куперита (PtS) и каплевидные выделения силикатной фазы на поверхности сфалерита

Дамдинов Б.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И., Дамдинова Л.Б., Ахмеджанова Г.М. Экспериментальное моделирование транспорта рудных компонентов водно-солевыми флюидами при повышенных РТ-параметрах //Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. – №8. – С. 1187-1204. DOI: 10.15372/GiG2023116.

4 Прикладные исследования

4.1 Предложена версия расчета минерально-фазового состава (МФС) горных пород, на основе рентгено-флуоресцентного анализа (РФА). Программу расчетов апробировали при оценке фазового состава пород Озерной группы вулканогенно-осадочных месторождений свинцово-цинковых сульфидных руд. Предварительно были разработаны методики экспрессных рентгено-флуоресцентных анализов измельченных порошковых (дисперсных) проб, с определением содержаний 40-50 элементов. Для анализа образцы горных пород уплотняют в кюветах с тонким днищем и облучают в атмосфере гелия, далее оценивают потери при прокалке в разных диапазонах температур.

В зависимости от данных РФА о химическом составе проб или полноты описания типов проб заказчиками оцениваются содержания от 30 до 80 минералов. Максимально возможные содержания минералов оценивают по стехиометрии минералов. Для сульфидных руд оценивались содержания следующих главных минералов: пирита-марказита FeS_2 , сфалерита ZnS , галенита PbS , плюмбоярозита $\text{PbFe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4$, барита BaSO_4 , пироморфита $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, гетеролита ZnMn_2O_4 , каламина $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7) \cdot (\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, манганита MnOOH , а также относительно малые содержания арсенопирита FeAsS , халькопирита CuFeS_2 и сульфидов ряда следовых элементов. В части проб оценили содержания карбонатов: кальцита, доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, сидерита FeCO_3 , смитсонита ZnCO_3 , малахита $(\text{CuOH})_2(\text{CO}_3)$. Кроме того, в образцах с большим содержанием алюмосиликатов оценивались содержания слюд, полевых шпатов, плагиоклаза, оливина, нефелина, апатита, флюорита и других минералов.

Основные выводы:

1) Первые оценки весьма ориентировочны и подлежат верификации известными методами инструментальной оценки МФС (оптической и электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и др.). К сожалению, часть методов оценки МФС основаны на трудоемком отборе монофракции. Штучные фазовые анализы дают только фрагментарную картину содержаний минералов, но они могут служить как реперы для расчета более широкого набора проб близкого состава.

2) РФА дисперсных проб позволяет достаточно быстро оценить содержание серы и хлора. Эти компоненты могут улетучиться при анализах с химическим вскрытии проб или при РФА стекол, полученных при плавке проб с флюсом.

3) При РФА порошковых проб велики погрешности определения легких элементов из-за шероховатости поверхности и сильного поглощения излучений легких элементов в пленках и атмосфере гелия. Поэтому РФА дисперсных проб можно использовать только для быстрой ориентировочной оценки МФС и отбора проб для более детальных

исследований.

4) Для оценки МФС предпочтительно использовать рентгеновские спектрометры, содержащие опции как рентгенофлуоресцентного, так и рентгенодифракционного анализов – современные (XRF + XRD)-спектрометры.

5) Расчеты первого этапа можно уточнить на следующем этапе, с привлечением данных рентгенофазового анализа отдельных проб. В этом случае расчет даст более подробную картину химического и соответственно фазового состава пород разных зон и участков исследуемых объектов.

1. **Бартанова С.В., Жалсараев Б.Ж.** *Определение химического состава геологических образцов методом РФА //Геодинамика и минерагения Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН. — Улан-Удэ: Издательство Бурятского госуниверситета, 2023. — С. 64 – 65.*

2. **Жалсараев Б.Ж.** *РФА руд без плавки или химического вскрытия: шаблоны для пересчета данных //Геодинамика и минерагения Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН. — Улан-Удэ: Издательство Бурятского госуниверситета, 2023. — С. 228 – 229.*

3. **Zhalsaraev B.Zh., Bartanova S.V.** *X-Ray Fluorescence Analysis of Dispersed Samples of Rocks and Ores // Abstract Book of the 6th International Hybrid Conference on X-Ray Analysis, 28-30 August 2023 in Ulaanbaatar, Mongolia. Ulaanbaatar, 2023. — P. 3 – 40.*

4.2 Предложен авторский метод динамико-параметрического моделирования (ДПМ) геологических объектов в случае необходимости оценки сложных результирующих величин при заранее неизвестном количестве воздействующих на них параметров. Сначала самые вероятные параметры, значительно влияющие на искомый результат, выражаются через произведение. Затем основные параметры модифицируются соответственно природным (природной динамике), а результаты изменения природного объекта и модели сравниваются с проверкой корректности последней согласно объектно-ориентированному подходу. При увеличении расхождения между модельной и природной результирующей величиной модель дополняется второстепенными и третьестепенными параметрами. Далее производится проверка соответствия размерностей параметров (факторов) и результирующей производной величины. После этого возможно включение в модель числовых коэффициентов и показателей степеней.

Данный метод был применён в модели подъёма магмы и/или рудоносного флюида – мантийно-корового мигранта (МКМ) со значительно меньшей плотностью вещества, чем у вмещающей пластичной среды. Результирующим параметром являлась скорость подъёма, обычно описываемая одним из ряда усложняющихся уравнений от простой

формулы сопротивления среды И. Ньютона [8] до рекурсивного уравнения Ф.Дж. Спера [9], учитывающего плотности среды и МКМ, пластическую вязкость среды, эффективный диаметр МКМ, текучесть среды и число Рейнольдса. Были рассчитаны скорости МКМ по уравнению Спера и по методу ДПМ. Относительное расхождение между двумя расчётами в зависимости от глубины начала подъёма показано на рисунке 10.

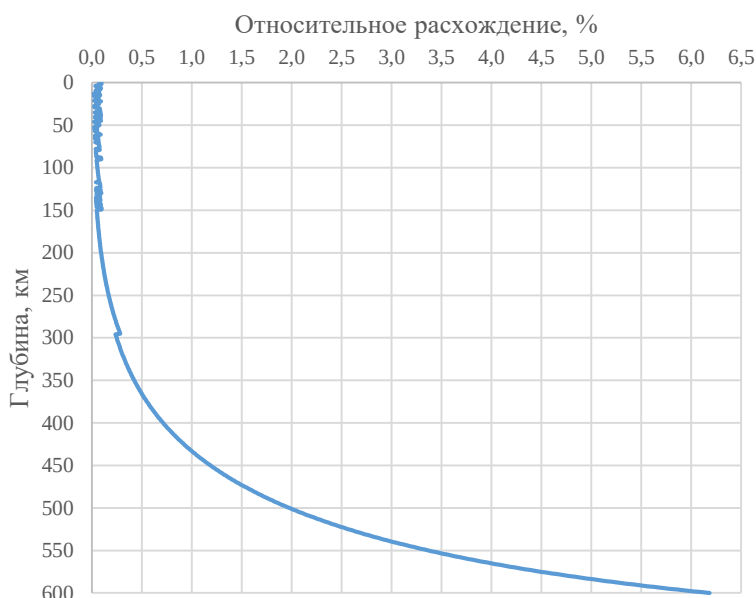


Рисунок 10 – Относительное расхождение между значениями скорости подъёма подвижных фаз, рассчитанными по уравнению Ф.Дж.Спера и по методу ДПМ в зависимости от глубины начала подъёма.

Васильев В.И. *Динамико-параметрическое моделирование в геологических приложениях //Геодинамика и минералогия Северной Евразии: материалы VI Международной научной конференции, посвящённой 50-летию Геологического института им. Н.Л. Дубрецова СО РАН. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2023. – С. 108–110.*

4.3 Разработана программа для ЭВМ «Vladi ParaModeling», предназначенная для динамико-параметрического моделирования природных объектов. Динамико-параметрическое моделирование предлагается использовать при оценке сложных результирующих свойств природного объекта при заранее неизвестном количестве факторов (параметров), на них влияющих. Пользователю предлагается сначала определить самые вероятные параметры, значительно влияющие на искомый результат, и выразить его через произведение их степеней; затем, изменяя основные параметры соответственно природным изменениям (природной динамике), наблюдать за изменением результата, проверяя корректность модели. При увеличении расхождения между модельной и природной результирующей величиной моделисту необходимо дополнять модель второстепенными и третьестепенными параметрами, включая их степени в общее

произведение. Интерфейс программы показан на рисунке 11.

Первичные параметры

Моменты времени: 20

☒ Длина L: 1 0.1

☒ Масса M: 1 0.02

☐ Температура K: 0 0

☐ Кол-во вещества N: 0 0

Применить

Производные параметры

Количество: 2

DP	L	M	K	N	ЧК
DP1	1	1	1	1	1
DP2	1	1	1	1	1

Применить

Первичные параметры | Производные параметры | Диаграммы

T	L	M	K	N
1.0000	1	1	1	1
2.0000	1.1	1.02	1	1
3.0000	1.2	1.04	1	1
4.0000	1.3	1.06	1	1
5.0000	1.4	1.08	1	1
6.0000	1.5	1.1	1	1
7.0000	1.6	1.12	1	1
8.0000	1.7	1.14	1	1
9.0000	1.8	1.16	1	1
10.0000	1.9	1.18	1	1
11.0000	2	1.2	1	1
12.0000	2.1	1.22	1	1

Рисунок 11 – Интерфейс программы Vlad ParaModeling

Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023611193. Российская Федерация.

4.4 Разработана программа для ЭВМ «Vladi Porosity», предназначенная для для расчёта физических взаимоотношений между плотностью и пористостью трещиновато-пористых горных пород и плотностью заполняющего пористую среду раствора. Программа позволяет рассчитывать физические характеристики изучаемых геологических образований хрупкой земной коры при любых известных вариантах совокупности величин: пористости, минеральной плотности, плотности порового раствора, понижающего коэффициента давления по закону Бернулли при заметной векторной фильтрации раствора. Результатом являются все недостающие расчётные величины. Интерфейс программы показан на рисунке 12.

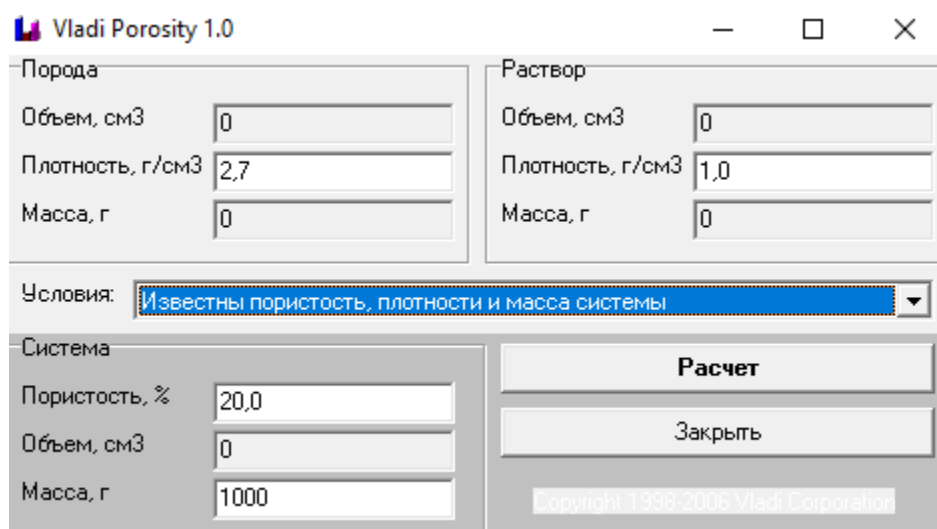


Рисунок 12 –Интерфейс программы Vladi Porosity

Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023680713. Российская Федерация.

4.5 Разработана программа для ЭВМ «Vladi Radiography Approach» – программа для получения усреднённых цветовых характеристик (RGB) выбранных участков на автордиографических снимках в геохимии. Метод автордиографии позволяет регистрировать распределение радиоактивных изотопов полезных компонентов при кристаллизации вмещающей среды (расплавленных горной породы или искусственного лабораторного субстрата). Результатом являются фотоснимки, на которых радиоактивное излучение изотопов засвечивает части этих снимков, соответствующие локализации компонента. В дальнейшем требуется точная количественная оценка интенсивности такого засвечивания. Программа Vladi Radiography Approach позволяет загружать такие снимки из графических файлов общепринятых форматов и получать числовую RGB-характеристику выделенной пользователем части изображения. При анализе числовые значения интенсивности RGB-составляющих каждый раз выводятся в новый столбец таблицы результатов, что позволяет сразу же сравнивать интенсивность засвечивания в разных фрагментах, и, соответственно, концентрацию в изучаемом субстрате изотопов полезных компонентов. Для предварительной оценки снимка предусмотрены варианты анализа всего снимка (это помогает определить общий фон) и анализа снимка (или его части) без белого цвета, что весьма полезно для определения общего фона субстрата, который всегда засвечен сильнее, чем окружающий тигель или иная вмещающая полость. Интерфейс программы показан на рисунке 13.

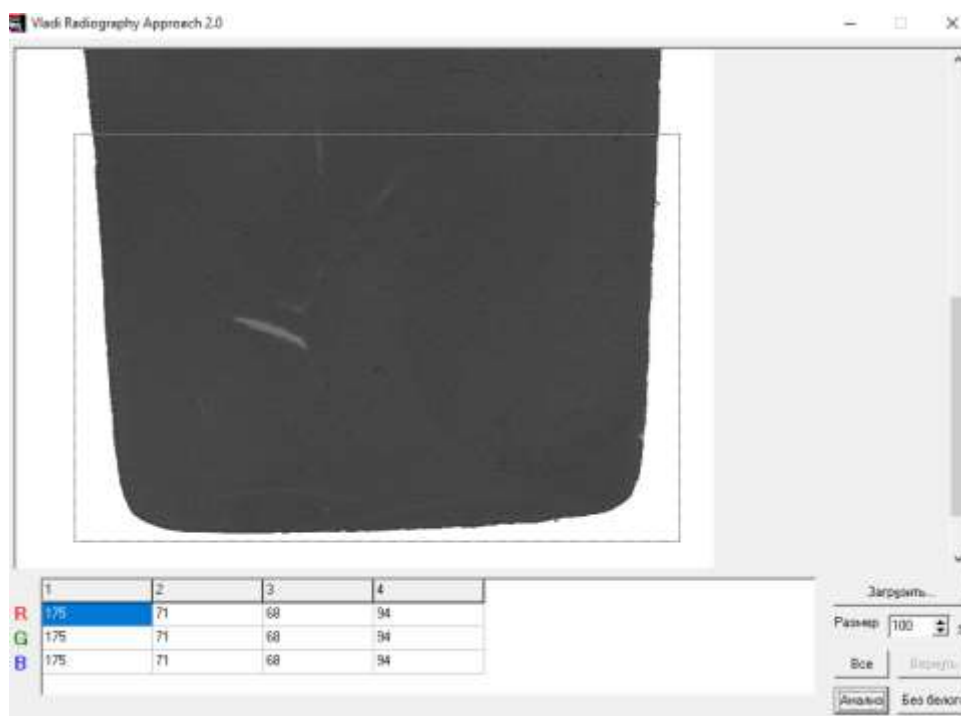


Рисунок 13 – Интерфейс программы Vladi Radiography Approach

Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681476. Российская Федерация.

4.6 Разработана программа для ЭВМ «Vladi Radiography Line» – программа для получения усреднённых цветовых характеристик (RGB) на выбранном отрезке на автордиографических снимках в геохимии. Метод автордиографии позволяет регистрировать распределение радиоактивных изотопов полезных компонентов при кристаллизации вмещающей среды (расплавленных горной породы или искусственного лабораторного субстрата) [10]. Результатом являются фотоснимки, на которых радиоактивное излучение изотопов засвечивает части этих снимков, соответствующие локализации компонента. В дальнейшем требуется точная количественная оценка интенсивности такого засвечивания. Программа Vladi Radiography Line позволяет загружать такие снимки из графических файлов общепринятых форматов, определять на снимке анализируемый профиль (отрезок) и получать графики RGB-значений вдоль него. При анализе числовые значения интенсивности RGB-составляющих вдоль профиля отображаются в виде трёх графиков в координатах расстояние – интенсивность. Программа имеет дружелюбный интерфейс и позволяет сохранять в виде графических файлов анализ каждого профиля (отрезка). Интерфейс программы показан на рисунке 14.

предусмотрен пользовательский ввод понижающих коэффициентов в долях от единицы. Это позволяет значительно точнее рассчитывать промежуточные итеративные и, соответственно, итоговые значения в узлах сетки. Кроме этого, с такой модификацией гораздо точнее реализуется рекурсивный расчёт значений в граничных узлах сеточной модели: если в классическом методе на граничные узлы «влияют» три соседних узла (или два – в углах сетки), то в предлагаемой модификации – шесть (или три в углах сетки). Описанные модификации и пользовательский интерфейс для их настроек реализованы в данной программе. Интерфейс программы показан на рисунке 15.

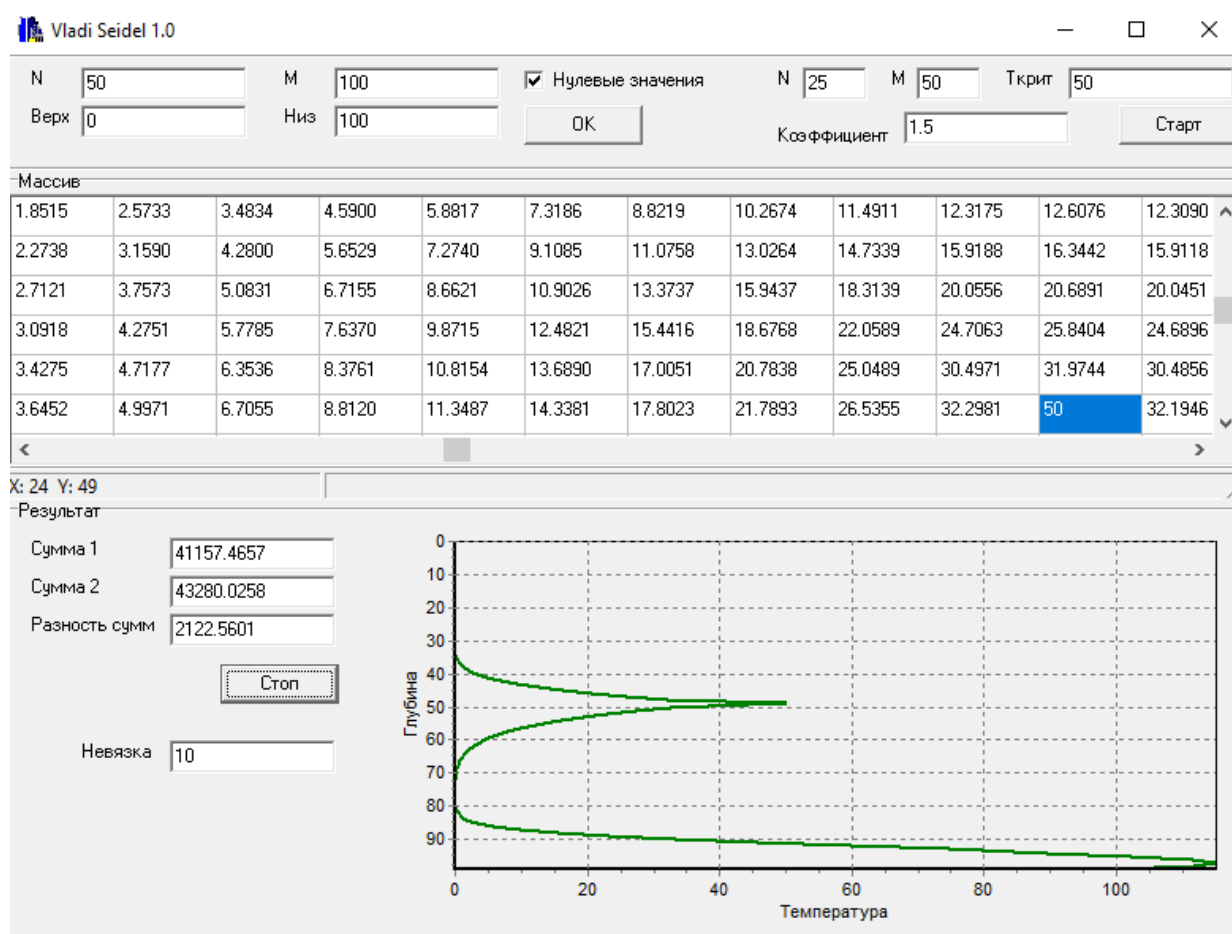


Рисунок 15 – Интерфейс программы Vladi Radiography Line

Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681245. Российская Федерация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в 2023 году исследования являются продолжением научно-исследовательских работ в рамках рассматриваемого проекта. Были изучены отдельные типы минерализации в пределах крупных рудных узлов. В частности, на Джидинском рудном поле проведены минералого-геохимические исследования и определены физико-химические условия формирования кварц-берилловой минерализации, образующей одну из стадий в эволюции вольфрам-молибденовой рудообразующей системы. В пределах Гильберинского золото-серебро-флюорит-редкометального рудного узла обнаружены необычные циркон-титаномагнетитовые руды, не имеющие аналогов в регионе. Они присутствуют в рудном поле Третьяковского золото-флюоритового месторождения и содержат до 14.58 мас.% TiO_2 и до 0.89 мас.% Zr. Выявлены особенности минерального состава этих руд и определен их изотопный возраст на основе U-Pb датирования по циркону. Продолжены исследования процессов рудообразования в связи с массивами базит-ультрабазитов на примере Йоко-Довыренского массива в Северном Прибайкалье. Изучены процессы формирования аподунитовых скарнов и выяснена их роль в рудообразовании. На основе рентгеновской томографии пород и руд выявлены особенности морфологии минералов благородных металлов и их взаимоотношения с окружающими минералами. Изучение Re-Os изотопной системы в породах и рудах Йоко-Довыренского массива позволило получить новые данные об источниках вещества. Установлено, что породы имеют первичный мантийный источник, однако преобразованы в ходе двух этапов коровой контаминации. Продолжены прикладные исследования. Одним из направлений является модернизация рентгено-флюоресцентного метода анализа, позволяющая проводить минерально-фазовый анализ на основе данных по химическому составу проб. Начата отработка методики на основе исследований руд Озерного полиметаллического месторождения. Разработаны программы, предназначенные для моделирования динамических параметров геологических процессов (Vladi ParaModeling) и расчета взаимоотношений между плотностью и пористостью пород (Vladi Porosity). Полученные в 2023 году результаты соответствуют заявленной цели проекта – разработке геолого-генетических моделей разнотипных рудообразующих систем. В течение года по теме проекта опубликовано 6 статей в рецензируемых изданиях, индексируемых в зарубежных и российских информационно-аналитических системах научного цитирования, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих во второй квартиль (Q2) в международных базах данных (WoS, Scopus и др.). Получено пять свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Damdinova L.B., Damdinov B.B., Huang X.-W., Bryansky N.V., Khubanov V. B., Yudin D.S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia)//Minerals. – 2019. – Vol. 9. – 572.
- 2 Vho A., Lanari P., Rubatto D. An internally-consistent database for oxygen isotope fractionation between minerals. // Journal of Petrology. – 2019. – Vol. 60. - № 11. – P. 2101–2130.
- 3 Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. An Isotope Study of the Dzhida Mo-W Ore Field (Western Transbaikalia, Russia)// Minerals. – 2018. – Vol. 8. – 546.
- 4 Litvinovsky B.A., Bor-ming Jahn, Zanvilevich A.N., Saunders A., Poulain S., Kuzmin D.V., Reichov M.K., Titov A.V. Petrogenesis of syenite- granite suites from the Bryansky complex (Transbaikalia, Russia): implications for the origin of A-type granitoid magmas. – Chemical Geology. – 2002. – Vol. 189 (1-2). – P. 105-133.
- 5 Буюнтуев М.Д., Хубанов В.Б., Врублевская Т.Т. U-Pb LA-ICP-MS датирование цирконов из субвулканитов бимодальной дайковой серии Западного Забайкалья: методика, свидетельства позднепалеозойского растяжения земной коры//Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 2. – С. 369—384.
- 6 Warner R.R., Luth W.C. Two-phase data for the join monticellite (CaMgSiO_4) - forsterite (Mg_2SiO_4): Experimental results. // Amer. Mineral. – 1973. – Vol. 58. – P. 998–1008.
- 7 Damdinov B.B., Goryachev N.A., Moskvitina M.L., Damdinova L.B., Izvekova A.D., Reutsky V.N., Posokhov V.F., Artemyev D.A. Zun-Kholba Orogenic Gold Deposit, Eastern Sayan, Russia: Geology and Genesis. – Minerals. – 2022. – Vol. 12. – 395.
- 8 Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica. – М.: Science, – 1989. – 688 р.
- 9 Spera F.J. Carbon dioxide in petrogenesis. // Contrib. Mineral. Petrol. – 1984. – Vol. 88. – P. 217–232.
- 10 Авторадиографический метод в научных исследованиях: Сб. науч. тр./АН СССР, Сиб. отделение, Бурят. фил., Геол. ин-т; отв. ред. Н. Л. Добрецов, А. Г. Миронов. – М.: Наука, 1990. – 195 с.
- 11 Волков Е.А. Численные методы. – М.: Наука, – 1987. – 248 с.

Список научных публикаций в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.)

по проекту за 2023 год:

- 1 **Дамдинов Б.Б.**, Котельников А.Р., Сук Н.И., **Дамдинова Л.Б.**, Ахмеджанова Г.М. Экспериментальное моделирование транспорта рудных компонентов водно-солевыми флюидами при повышенных РТ-параметрах //Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. – №8. – С. 1187-1204. DOI: 10.15372/GiG2023116.
- 2 **Дамдинов Б.Б.**, Хубанов В.Б., Горячев Н.А., **Дамдинова Л.Б.**, Извекова А.Д. Состав и возраст необычных циркон-титаномагнетитовых руд Третьяковского золото-флюоритового месторождения (Западное Забайкалье) //Доклады РАН. Науки о Земле. (в печати) DOI: 10.1134/S1028334X23602614.
- 3 **Сажина Т.И.**, **Дамдинова Л.Б.**, **Дамдинов Б.Б.** Минеральный состав и условия формирования кварц-берилловой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) //Руды и металлы. – 2023. – № 1. – С. 25 – 39. DOI: 10.47765/08695997-2023-10003.
- 4 Синопальников Н.И., **Кислов Е.В.**, Шубин И.И. Форстеритизированные аподунитовые эндоскарны Йоко-Довыренского расслоенного массива, Северное Прибайкалье //Геосферные исследования. – 2023. – №2. – С. 18 – 24. DOI: 10.17223/25421379/27/2.
- 5 Ariskin A.A., Tessalina S.G., Kostitsyn Y.A., Pshenitsyn I.V., Sobolev S.N., Nikolaev G.S., **Kislov E.V.** Re-Os Systematics in the Layered Rocks and Cu-Ni-PGE Sulfide Ores from the Dovyren Intrusive Complex in Southern Siberia, Russia: Implications for the Original Mantle Source and the Effects of Two-Stage Crustal Contamination // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – Art. 1356. – P. 1 – 19. DOI: 10.3390/min13111356.
- 6 Pshenitsyn I.V., Ariskin A.A., Korost D.V., Sobolev S.N., Yapaskurt V.O., Nikolaev G.S., **Kislov E.V.** X-Ray computed tomography of PGE-rich anorthosite from the Main Reef of the Yoko-Dovyren layered massif //Minerals. – 2023. – Vol. 13. – Art. 1307. - P. 1 – 15. DOI: 10.3390/min13101307.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023611193. Российская федерация. Vladi ParaModeling – программа для динамико-параметрического моделирования природных объектов / **Васильев В.И.**; правообладатель ГИН СО РАН (RU). – №2022686330; заявл. 19.12.2022; зарегистр. 17.01.2023; опубл. 17.01.2023. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», №1.

2 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023680713. Российская федерация. Vladi Porosity – программа для расчёта физических взаимоотношений между плотностью и пористостью трещиновато-пористых горных пород и плотностью заполняющего пористую среду раствора / **Васильев В.И.**; правообладатель ГИН СО РАН (RU). – №2023669971; заявл. 29.09.2023; зарегистр. 04.10.2023; опубл. 04.10.2023. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», №10.

3 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681125. Российская федерация. Vladi Radiography Line – программа для получения усреднённых цветовых характеристик (RGB) на выбранном отрезке на автордиографических снимках в геохимии / **Васильев В.И.**; правообладатель ГИН СО РАН (RU). – №2023669998; заявл. 29.09.2023; зарегистр. 10.10.2023; опубл. 10.10.2023. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», №10.

4 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681245. Российская федерация. Vladi Seidel – программа, реализующая авторские модификации метода Гаусса-Зейделя для расчёта стационарных распределений интенсивных физических величин на плоскости вертикального геологического разреза / **Васильев В.И.**; правообладатель ГИН СО РАН (RU). – №2023669548; заявл. 21.09.2023; зарегистр. 11.10.2023; опубл. 11.10.2023. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», №10.

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681476. Российская федерация. Vladi Radiography Approach – программа для получения усреднённых цветовых характеристик (RGB) выбранных участков на автордиографических снимках в геохимии / **Васильев В.И.**; правообладатель ГИН СО РАН (RU). – №2023680034; заявл. 29.09.2023; зарегистр. 13.10.2023; опубл. 13.10.2023. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», №10.