

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИГХ СО РАН)

УДК 549.01.08:[53+54

Рег. № НИОКТР АААА-А17-117041910031-4

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН,  
д.г.-м.н.

\_\_\_\_\_ А.Б. Перепелов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
по теме:

ГЕОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЛАГОРОДНО-  
МЕТАЛЬНЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНЫХ РУДНЫХ ПРОВИНЦИЙ  
(заключительный)

Номер проекта 0350-2019-0011

Приоритетное направление IX.130.3.2

Рудообразующие процессы, их эволюция в истории Земли, металлогенические эпохи и провинции и их связь с развитием литосферы; условия образования и закономерности размещения полезных ископаемых.

Руководитель проекта,  
гл.н.с., д.г.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

К.В. Чудненко

Иркутск, 2020

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,  
гл.науч.сотр, д.г.-м.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

К.В. Чудненко  
(введение, разделы 1–2, заключение)

Исполнители темы:

С.н.с., к.г.-м.н

\_\_\_\_\_

подпись, дата

В.А. Бычинский  
(введение, разделы 1–2, заключение)

Н.с., к.г.-м.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Н.Н. Брюханова  
(раздел 2)

Н.с., к.г.-м.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.В. Ощепкова  
(раздел 1)

М.н.с., к.г.-м.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Ю.Н. Шолохова  
(раздел 2)

М.н.с.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

С.Н. Просекин  
(раздел 2)

## РЕФЕРАТ

Отчет 36 с., 6 рис., 5 табл., 19 источников, 1 прил.

### РУДООБРАЗОВАНИЕ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ФЛЮИД, РУДА, МИНЕРАЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ, ЗОЛОТО

Цель исследования – развитие термодинамического обеспечения имитационного моделирования рудообразующих систем и создание моделей физико-химических процессов различных этапов формирования рудных месторождений.

В ходе выполнения НИР получены следующие научные результаты:

1. Выполнена оценка стандартных термодинамических функций рудных компонентов и соединений с целью дальнейшего расширения баз термодинамических данных физико-химического моделирования геохимических систем, как основы построения моделей рудообразования.

2. Разработанный способ расчета стехиометрических формул и термодинамических свойств сложных природных минералов использован в определении физико-химических условий процессов выветривания в водосборном бассейне в те или иные климатические эпохи.

3. Выполнена верификация метода физико-химического моделирования в определении содержания минералов в карбонатно-силикатных отложениях с использованием двух способов, основанных на методе рентгеновской порошковой дифрактометрии.

4. Проведены исследования физико-химических процессов различных этапов формирования Au-содержащих родингитов на месторождении «Золотая Гора» (Южный Урал) на базе созданных моделей, включающих твердые растворы четвертной Ag-Au-Cu-Hg системы и Au-Cu интерметаллидов, позволяет классифицировать золотонесущие родингиты, как особый тип минеральной системы.

5. С помощью физико-химического моделирования рассчитан вероятный состав рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Ленский золоторудный район Байкало-Патомского нагорья) и определен источник золота и P,T- условия процесса. Создан банк моделей рудообразования на месторождениях благородных металлов. Состав минералов используется как индикатор процесса рудообразования.

Результаты исследований могут быть использованы в изучении основных рудообразующих этапов и физико-химических условий образования золотонесущих серпентинитов и локализованных в них золото-сульфидно-магнетитовых руд в массивах гипербазитов.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
Раздел 1 Разработка термодинамического обеспечения для геохимического моделирования процессов рудообразования .....	9
1.1 Создание методов расчета термодинамических свойств компонентов и соединений .	9
1.2 Верификация метода физико-химического моделирования в определении содержания минералов в железных рудах.....	10
Раздел 2 Построение термодинамических моделей природного минералообразования .....	12
2.1 Изучение сапфирин-шпинелевых и гранатовых ждрититов Ауланджинского блока Омолонского массива Верхояно-Чукотского региона (Северо-Восток России).....	12
2.2 Моделирование формирования фторидных азотных терм в системе «вода – кристаллическая порода» .....	14
2.3 Физико-химическое моделирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог .....	17
2.4 Выводы.....	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	24
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	31

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Интерметаллид – химическое соединение двух или более металлов.

ПК – программный комплекс.

Родингиты – породы, сложенные преимущественно кальциевыми силикатами, весьма широко распространены в массивах ультраосновных пород.

Твердый раствор – фаза переменного состава, в которых атомы различных элементов расположены в общей кристаллической решётке.

Аурикуприд – минерал  $\text{AuCu}_3$ .

Тетрааурикуприд – минерал  $\text{AuCu}$ .

$\Delta_f G^\circ$  – свободная энергия Гиббса минерала.

$\Delta_f H^\circ$  – энтальпия образования минерала.

$S^\circ$  – стандартная энтропия.

$C_p^\circ$  – изобарная теплоемкость

ПК – программный комплекс.

$\log f_{\text{O}_2}$  – логарифм фугитивности (летучести) кислорода.

$\log f_{\text{S}_2}$  – логарифм фугитивности (летучести) серы.

NaCl-экв. – концентрация солевого компонента раствора в эквиваленте NaCl.

$\Delta H_f$  – энтальпия образования минерала.

$\Delta G_f$  – энергия Гиббса образования минерала.

### Индексы минералов [Whitney, Evans, 2010]

Ab – альбит	Ap – апатит	Amp – амфиболы	Ank – анкерит
Ann – аннит	Apy – арсенопирит	Arg – аргентит	Au самородное золото
Bt – биотит	Cal – кальцит	Ccp – халькопирит	Chl – хлорит
Crd – кордиерит	Dol – доломит	F-Ap – фторапатит	Fa – фаялит
Fl – флюорит	Gbs – гиббсит	Ged – жедрит	Gn – галенит
Grt – гранат	Gth – гетит	Hem – гематит	Ilm – ильменит
Kfs – полевошпат	Kln – каолинит	Lmt – ломонтит	Mag – магнетит
Mgs – магнезит	Mnt – монтмор	Mol – молибденит	Mrg – маргарит
Ms – мусковит	Orx – ортопироксен	Pg – парагонит	Pl – плагиоклаз
Po – пирротин	Py – пирит	Qz – кварц	Rds – родохрозит
Rt – рутил	Sd – сидерит	Sp – сфалерит	Spn – сфен
Spl – шпинель	Spr – сапфирин		

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет является завершающим по теме: «Формирование и эволюция рудно-магматических систем различных геодинамических обстановок» за 2016 – 2020 гг.

В 2017 г. основной задачей была разработка схемы стадийности минералообразования с реставрацией флюидного режима формирования Au-содержащих родингитов, учитывающие изоморфные замещения минералов, характерных для природных рудообразующих систем. Разработаны модели формирования Au-содержащих родингитов, которые были проверены на хорошо изученных гидротермально-метасоматических месторождениях. Рассмотрено взаимодействие гидротермальных растворов с вмещающей породой, и определена рудная и околорудная минеральная зональность.

В 2018 г. основная задача это создание термодинамических моделей эпитеpmальных месторождения золотосеребряных, золотосеребрянно-полиметаллических и полиформационных руд. В результате рассмотрены основные сценарии формирования рудной минерализации: 1) кипение гидротермального модельного раствора; 2) взаимодействие остаточного раствора с вмещающими породами; 3) смешение рудоносной газовой фазы с метеорными водами. На основе данных о флюидных включениях, определены P,T,X- параметры основных рудообразующих этапов.

В 2019 г. исследовались процессы мобилизации и транспортировки металлов в составе постмагматических, метаморфогенных или катагенных флюидов. Определены условия и механизмы локализации руд на геохимических барьерах реальных геологических объектов в различных геодинамических обстановках. Исследован вклад факторов, играющих определяющую роль в процессе рудообразования. Это состав и физико-химические характеристики флюидов, а также геохимические барьеры контролирующие концентрацию рудных компонентов на месторождениях благородных металлов.

В 2020 г. создан банк моделей рудообразования на месторождениях благородных металлов различных рудных провинций. В результате разработан способ использования состава минералов в качестве индикаторов процесса рудообразования.

Основной целью является физико-химическое моделирование процессов рудообразования месторождений различных формационных типов в благородно-металльных рудно-магматических системах. Требовалось исследовать процессы мобилизации и транспортировки металлов в составе постмагматических, метаморфогенных или катагенных флюидов. Для этого потребовалось разработать

теоретического обеспечения моделирования процессов рудообразования, расширить базы данных термодинамических свойств рудных компонентов и соединений, создание новых моделей минеральных твердых растворов; построить термодинамических моделей процессов рудообразования, включающих растворение, перенос и отложение рудных и петрогенных элементов на золоторудных и золотосеребряных месторождениях; и дать количественную оценку температурного и газового режима рудообразующих флюидов участвующих в процессах локализации и мобилизации компонентов в формировании рудных месторождений.

В термодинамических моделях, адекватных к природным объектам, необходимо добиться уровня полноты представления данных, которое позволяет с наибольшей степенью достоверности создавать вычислительные аналоги этих объектов. Новым элементом такого представления является включение в модель твердых растворов.

В проекте решен ряд взаимосвязанных задач. Выполнен сбор экспериментальных данных в системе Au–Ag–Pd, дан обзор месторождений с палладистым золотом и другими минеральными фазами. Подготовлены согласованные термодинамические модели Au–Pd, Ag–Pd, Ag–Au–Pd твердых растворов, создан соответствующий расчетный программный модуль для ПК “Селектор-С”. Выполнено физико-химическое моделирование образования палладистого золота и Au–Ag–Cu–Hg оруденения в гидротермально-метасоматических процессах.

Расширены базы данных моделирования рудообразующих процессов на основе подбора, расчета и согласования термодинамических свойств рудных компонентов и соединений.

Оценен вклад системообразующих факторов, играющих определяющую роль в процессе рудообразования, это состав и физико-химические параметры рудообразующих флюидов.

В результате выполнения проекта получены научные результаты, позволившие усовершенствовать алгоритмическое, программное и термодинамическое обеспечение для имитационного моделирования рудообразующих систем. В результате созданы модели физико-химических процессов различных этапов формирования рудных месторождений. Это существенный вклад в развитие теоретической базы теории процессов рудообразования на основе создания сети опорных моделей как несущего каркаса теории эндогенных флюидных систем. Рассчитанные значения стандартных термодинамических потенциалов минералов и сложных соединений в универсальных стехиометрических представлениях включены в базу данных ПК «Selektor» и могут быть использованы в

дальнейшем в прикладных геохимических расчётах.

Убедительно доказано, что природные твердые растворы Ag-Au-Cu-Hg и Au-Cu интерметаллидов, это главные носители рудных компонентов в процессах образования рудной минерализации. Выполненные термодинамические расчеты определили основные этапы формирования золото-серебряной минерализации эпитеpmальных месторождений.

Разработанные теоретические и алгоритмические методы и модели позволят выявить новые закономерности процессов рудообразования и формирования месторождений в различных геодинамических обстановках.



## Раздел 1 Разработка термодинамического обеспечения для геохимического моделирования процессов рудообразования

### 1.1 Создание методов расчета термодинамических свойств компонентов и соединений

Отсутствие согласованных термодинамических данных, описывающих системы Au–Pd, Ag–Pd и Ag–Au–Pd, не позволяет интерпретировать свойства этих типов сплавов. Предложен подход к созданию моделей расчета тройного и бинарных твердых растворов, основанный на едином вычислительном аппарате. Обобщены данные о термодинамических свойствах сплавов Au–Pd и Ag–Pd, полученные из различных экспериментальных работ и расчетных моделей, в которых приводятся термодинамические характеристики при определенных значениях температуры. С использованием формализма Редлиха–Кистера оценены избыточные парциальные энергии Гиббса и активности компонентов тройного твердого раствора в системе Ag–Au–Pd в интервале температур 400–1300 К.

Избыточную энергию смешения Гиббса бинарного твердого раствора определяли с использованием формализма Редлиха–Кистера (1):

$$G^{ex} = \sum_i \sum_{j>i} x_i x_j \sum_{k=0}^m {}^k L_{ij} (x_i - x_j)^k \quad (1)$$

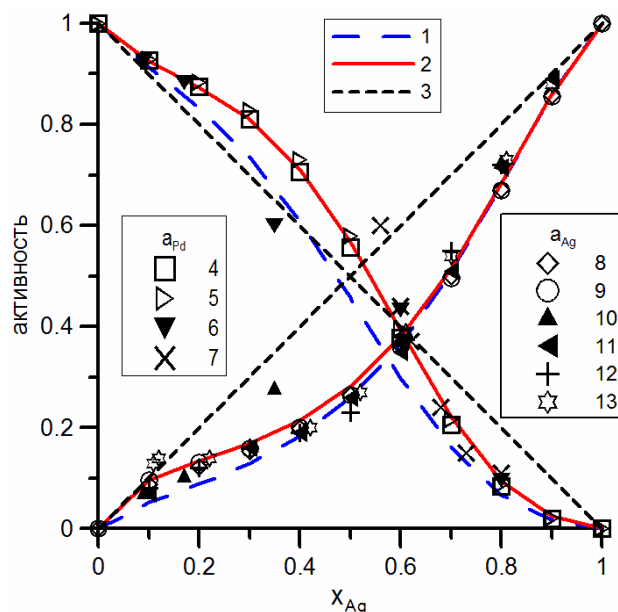
где  ${}^k L$  – параметры полинома аппроксимации;  $m$  – степень полинома.

Активности компонентов твердых растворов оценивали на основе избыточных парциальных энергий Гиббса (2):

$$a_i = x_i \exp(G_i^{ex}/(R \cdot T)) \quad (2)$$

Для системы Ag–Pd расчет активностей Ag и Pd, выполненный для 600 и 1200 К, показал достаточно универсальные возможности предложенного уравнения в заданном температурном интервале (Рисунок 1).

Подготовлен алгоритм для создания расчетных модулей в программах моделирования природного минералообразования в системах, содержащих Au, Ag и Pd.



**Рисунок 1** – Активности Ag и Pd в бинарной системы Ag-Pd.

1 – 600 К (расчетная модель), 2 – 1200 К (расчетная модель), 3 – закон Рауля, 4 – 1200 К [1], 5 – 1200 К [2], 6 – 600 К [3], 7 – 956 К [4], 8 – 1200 К [1], 9 – 1200 К [2], 10 – 600 К [3], 11 – 1200 К [5], 12 – 1200 К [6], 13 – 1200 К [7]

## 1.2 Верификация метода физико-химического моделирования в определении содержания минералов в железных рудах

Предложен способ определения содержания минеральных фаз в железных рудах на основе математической модели физико-химических процессов их образования, опирающейся на данные об элементном составе. Железные руды представляют собой сложные минеральные системы, содержащие помимо минералов железа силикаты, карбонаты и оксиды других элементов. Методы рентгеновской дифракции и электронно-зондового микроанализа часто позволяют только качественно оценить минеральный (фазовый) состав руд. Метод физико-химического моделирования, опираясь на данные химического состава, дает возможность не только предсказать основные минеральные фазы, но и определить их действительное количество. Определение минерального состава методом физико-химического моделирования позволяет установить минеральные фазы, содержащиеся в пробе в количестве менее десятых долей процента (что затруднительно другими методами), однако не всегда возможно установить полиморфные модификации ряда минералов. Сложные минералы, образующие изоморфные ряды, могут быть рассчитаны как смесь более простых минералов. Точность расчета может быть повышена использованием дополнительных данных о минеральном составе, позволяющих расширить список минералов в твердом растворе и приблизить его к обнаруженным фазам. Полученные результаты сопоставлены с приведенным в паспортах фазовым составом

стандартных образцов и качественным рентгенофазовым анализом (Таблица 1). Железные руды значительно варьируют по фазовому составу, однако разработанный метод позволяет количественно оценивать содержания рудных минералов, в том числе тех, которые не удастся обнаружить методом рентгенофазового анализа. Следовательно он может быть использован для определения фазового состава руд с целью оценки потенциальной промышленной значимости.

**Таблица 1** – Сопоставление результатов определения качественного фазового состава стандартных образцов железных руд методами физико-химического моделирования и рентгеновской порошковой дифракции

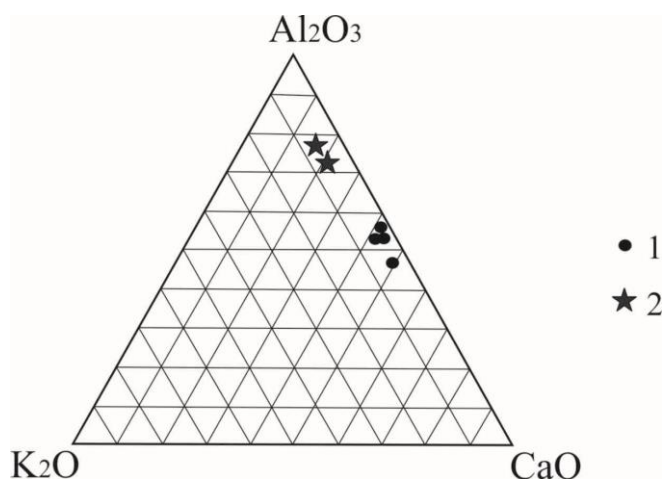
Стандартный образец	Метод рентгеновской порошковой дифракции	Метод физико-химического моделирования
4б	Магнетит Mag Хлориты Chl (клинохлор)	Магнетит Mag (62.9 %), Хлориты Chl (13.6 %), Гранаты Grt (9.0 %), Кварц Qz (4.5 %), Амфиболы Amp (3.5 %), Кальцит Cal(3.2 %), Сфен Spn (0.8 %), Родохрозит Rds (0.8 %)
P9б	Сидерит Sd Анкерит Ank	Сидерит Sd (62.5 %), Магнетит Mgs (19.6 %), Кальцит Cal (4.3 %), Магнетит Mag (4.1 %), Амфиболы Amp (2.9 %), Хлориты Chl (2.4 %), Родохрозит Rds (2.2 %)
НФС-28	Гематит Hem	Гематит Hem (85.3 %), Гетит Gth (12.3 %), Сидерит Sd (0.7 %), Гидрослюды (0.7 %)
P39	Магнетит Mag Кварц Qz Гидромусковит Полевые шпаты Kfs	Кварц Qz (38.8 %), Магнетит Mag (37.8 %), Амфиболы Amp (8.3 %), Полевые шпаты Kfs (5.7 %), Гидрослюды (3.5 %), Кальцит Cal (1.4 %), Сидерит Sd (1.1 %)
P7г	Гетит Gth	Гетит Gth (57.0 %), Хлориты Chl (10.7 %), Кварц Qz (7.0 %), Гематит Hem (8.0 %), Вивианит (5.4 %), Гидрослюды (3.1 %), Родохрозит Rds (2.5 %), Гидроксиапатит Ap (2.5%), Псиломелан Rds (0.8%), Полевые шпаты Kfs (0.8%)

## Раздел 2 Построение термодинамических моделей природного минералообразования

### 2.1 Изучение сапфирино-шпинелевых и гранатовых жедрититов Ауланджинского блока Омолонского массива Верхояно-Чукотского региона (Северо-Восток России)

Омолонский массив (ОМ) – один из наиболее длительно развивавшихся тектонических элементов современной зоны перехода континент – океан на северо-востоке Азии. В его структуре четко обособлены древний кристаллический фундамент и слабдеформированный рифейско-мезозойский вулканогенно-осадочный чехол. Сейчас ОМ чаще именуется кратонным террейном или микроконтинентом. На юге ОМ особенно интересен Ауланджинский блок (горст, выступ), где обнажена наиболее глубинная часть архейского яруса континентальной коры Верхояно-Чукотского региона.

Изучены уникальные магнезиально-глиноземистые ультраосновные сапфирино-шпинелевые и гранатовые жедрититы Ауланджинского блока, где обнажена наиболее глубинная часть архейского яруса Омолонского массива. Эти породы резко отличаются от других метаультрамафитов этого же блока по петрохимии и геохимии. Отличия выражены в обогащении жедрититов глиноземом, цирконием, барием, рубидием, гафнием, ураном и обеднении их кальцием и тяжелыми редкоземельными элементами. В отношении компонентов  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обе разновидности жедрититов резко отличаются от вмещающих метаультрамафитов – жедрититы обогащены глиноземом и содержат значительно меньше кальция, так что на тройной диаграмме  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}$  они образуют отдельную группу по сравнению с метаультрамафитами (Рисунок 2).



**Рисунок 2** – Положение фигуративных точек метаультрамафитов Ауланджинского блока на тройной диаграмме  $\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ . 1 — типоморфные метаультрамафиты; 2 — гранатовые и сапфириновые жедрититы

Оценка окислительного потенциала в ассоциации сапфирин – шпинель, произведенная методом физико-химического моделирования на ПК Селектор. Была принята двухрезервуарная модель, когда в один резервуар помещается флюид, а в другой – состав образца сапфиринового жедритита Ауланджинского блока. В процессе моделирования флюид переходит в резервуар, где находится порода, и в нем происходит реакция с образованием равновесного минерального парагенезиса и соответствующего состава флюида, находящегося в равновесии с данной минеральной ассоциацией. Моделирование проводилось с использованием термодинамической базы [8] при учете моделей твердых растворов, которые были существенно переработаны и расширены за счет новых моделей орто- и клиноамфиболов, биотита, клинопироксена, ильменита, шпинели, сапфирина, опубликованных в работах [9; 10; 11; 12]. Газовый флюид моделировался как идеальная смесь реальных газов  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ , причем зависимость термодинамических характеристик газов от давления вычислялась по модифицированному уравнению состояния Бенедикта – Вебба – Рубина. Далее в условиях буферирования рассматриваемой породой) флюида осуществлялся поиск таких условий  $P$  и  $T$ , чтобы в результате решения получилась модельная ассоциация, содержащая сапфирин и шпинель, составы минералов в которой были бы максимально близки к наблюдаемым в реальности. В результате проведенных исследований при  $P = 6$  кбар и  $T = 900$  °С получена минеральная ассоциация, содержащая сапфирин и шпинель, составы которых по величине магниальности и окисленности очень близки к наблюдаемым в реальности составам (Таблица 2).

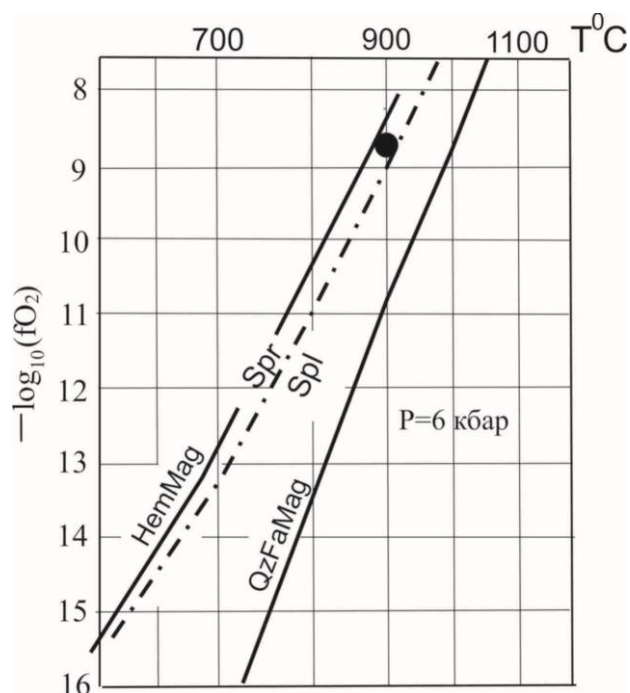
**Таблица 2** – Сравнение реальных и модельных минеральных составов при 900 °С и 6 кбар

Минерал	Параметр	Реальность	Модель
Spr	$X_{mg}$	0.89 (среднее)	0.89
Spl	$X_{mg}$	0.65 (среднее)	0.66
Spr	$X_{Fe^{3+}}$	0.41 (среднее)	0.37
Spl	$X_{Fe^{3+}}$	0.17 (среднее)	0.16
Bt	$X_{mg}$	0.83	0.82
Orx	$X_{mg}$	0.81	0.84
Pl	$X_{An}^{Pl}$	54-80	63

Примечание: Индексы минералов [9]: Spr – сапфирин, Spl – шпинель, Bt – биотит, Орх – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Grt – гранат, Kfs – калиевый полевой шпат, Rt – рутил, Hem – гематит, Crd – кордиерит, Ged – жедрит.

Важно отметить, что расчетные модельные параметры  $P$  и  $T$  достаточно близки к оценкам  $P$  и  $T$ , выведенным по геотермобарометрам. Полученная величина активности (фугитивности) кислорода в данной минеральной ассоциации имеет повышенное

значение, близкое к уровню магнетит-гематитового буфера, который в древних гранулитовых комплексах ранее не отмечался (Рисунок 3).

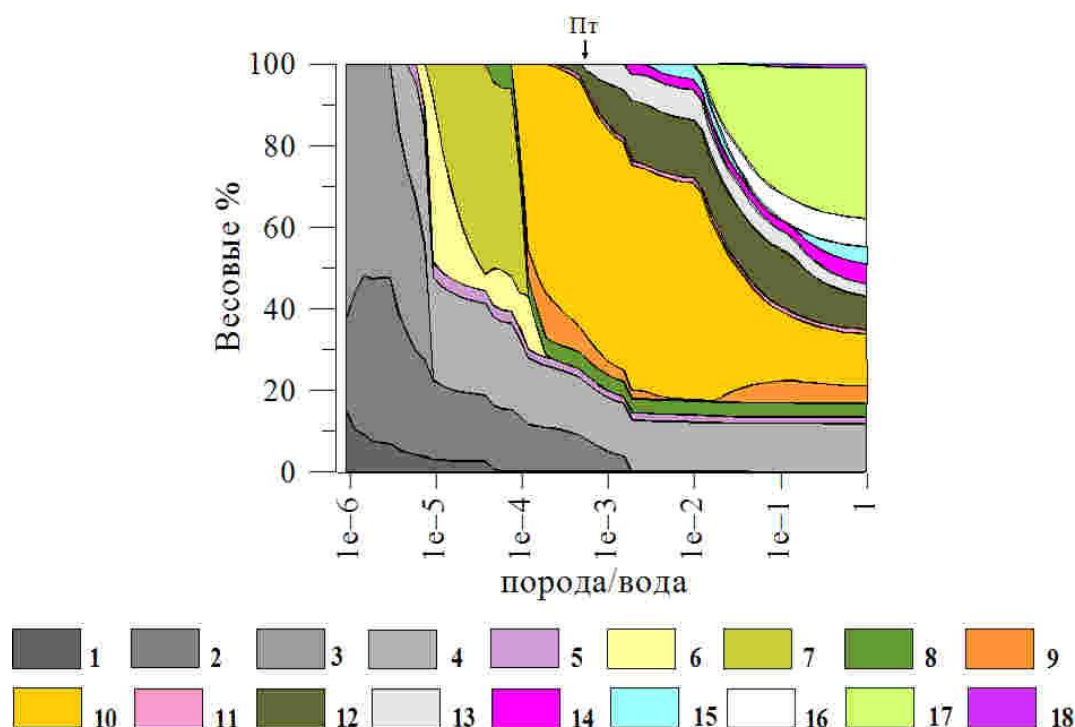


**Рисунок 3** – Величина активности кислорода в ассоциации сапфиринов—шпинель (кружок) для образца сапфириновых жедрититов на диаграмме  $-\lg_{10} f\text{O}_2 - T$ ,  $P = 6$  кбар. Сплошные линии – буферные равновесия магнетит – гематит (MagHem) и кварц – фаялит – магнетит (QzFaMag), штрихпунктирная — граница сапфиринов – шпинелевого (Spr) и шпинелевого (Spl) полей.

На основании выявленных петро- и геохимических особенностей жедрититов Ауланджинского блока, имеющих изотопный возраст 1.9 млрд лет, можно сделать вывод о том, что они представляют собой, кору выветривания вмещающих метаультрамафитов. При справедливости этой гипотезы данные породы могут служить свидетельством того, что уже в раннем протерозое величина потенциала кислорода на поверхности Земли соответствовала буферу магнетит – гематит.

## 2.2 Моделирование формирования фторидных азотных терм в системе «вода – кристаллическая порода»

С целью исследования механизмов формирования фторидных флюидов, имеющих важное значение в процессах природного минералообразования, выполнено моделирование физико-химических взаимодействий в системе «вода–порфирит» в условиях формирования азотных терм. Состав модельного раствора в процессе взаимодействия определяется совокупным влиянием состава первичной породы и вторичных минеральных образований (Рисунок 4).



**Рисунок 4** – Формирование вторичных минеральных образований в зависимости от степени взаимодействия в системе «вода –порфирит» при  $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P=250\text{ бар}$ .  
 1 – рутил Rt; 2 – магнетит Mag; 3 – гиббсит Gbs; 4 – клинохлор Chl; 5 – фторапатит F-Ap; 6 – каолинит Kln; 7 – маргарит Mrg; 8 – сфен Spn; 9 – мусковит Ms; 10 – ломонтит Lmt; 11 – родохрозит Rds; 12 – аннит Ann; 13 – кварц Qz; 14 – гематит Hem; 15 – калиевый полевой шпат Kfs; 16 – кальцит Cal; 17 – альбит Ab; 18 – флюорит Fl. Пт – пирит Py.

По мере увеличения количества взаимодействующей с водой породы растет минерализация и увеличиваются щелочные и восстановительные свойства раствора. На конечных этапах взаимодействия минерализация достигает 2.2 г/кг  $\text{H}_2\text{O}$  и формируется высоко щелочная, резко восстановительная геохимическая среда с  $\text{pH} = 8.7$  и  $E_h = -423\text{ мВ}$ . Устойчивый и относительно равномерный рост минерализации сильно замедляется с появлением среди вторичных минералов альбита. На этом же рубеже начинают понижаться восстановительные и щелочные свойства раствора. Все эти характеристики также испытали изменение интенсивности роста, а  $\text{pH}$  и  $E_h$ , кроме того, претерпели изменение направления движения в момент появления среди вторичных минералов ломонтита.

В исследованном интервале взаимодействий раствор активно перерабатывает большие количества первичной породы в пользу вторичных минеральных образований, сам при этом накапливает мало растворенных компонентов и поэтому имеет низкую минерализацию. В процессе необратимой эволюции гидrolитического преобразования порфирита отчетливо выделяются интервалы формирования раствора гидросиликатного,

гидрокарбонатного и сульфатного натриевого состава. В определенном интервале взаимодействий состав модельных растворов хорошо сопоставим с составом природных терм с высоким содержанием фтора. Глубинные воды, к каковым относятся азотные термы, испытывают сильное влияние метеогенных факторов, которое можно выявить при детальном и/или достаточно продолжительном наблюдении. Состав модельных растворов и природных терм в глубинных и поверхностных условиях имеет существенные отличия. Они слабо заметны в поведении катионов, фтора, хлора и сульфатов и сильно проявляются в изменении количества и преобразовании форм соединений углерода и кремния. Эти трансформации объясняют различия в соотношении гидрокарбонатных и карбонатных ионов и гидросиликатного иона и кремниевой кислоты как в разных гидротермах, так и в разных анализах одного и того же проявления природных терм, которое до настоящего времени было непонятно. Распространение термальных вод в кристаллических породах связано с двумя неоднородностями в развитии геологических тел. Первая неоднородность заключается в нарушении сплошности пород в местах развития разломов различного порядка, благодаря которому происходит распространение подземных вод в пространстве этих структур. Другая неоднородность, определяющая формирование состава подземных вод, и в частности накопление фтора, заключается в неравномерном распределении анионогенных элементов в пространстве геологических тел, что подтверждается результатами многочисленных геологических и геохимических исследований и данными изучения формирования подземных вод с высоким содержанием фтора, в том числе термальных, в различных геологических структурах.

Таким образом, проведенное исследование однозначно свидетельствует о том, что именно неоднородность химического состава вмещающих пород в конкретных термодинамических условиях и на определенном этапе протекания физико-химического процесса определяет разнообразие химического состава подземных вод. На площади развития фторидных азотных терм Байкальской рифтовой зоны такой вывод подтверждается данными повышенной концентрации анионогенных элементов в зонах вторичной минерализации, которые четко контролируются разломами [13]. В определенных условиях в процессе геологического развития территории, в силу особенностей кинематических характеристик разломов или последующей геологической деятельности подземных вод, разломы могут оказаться закрытыми или залеченными. Там же, где обе неоднородности в развитии геологических тел проявляются одновременно, они создают условия для распространения и формирования состава современных гидротерм.



На основании этих модельных экспериментов мы можем сделать следующие выводы. Присутствие и количество различных компонентов в рассмотренных современных термальных водах определяются совокупным влиянием состава взаимодействующей с инфильтрационной водой породы и формирующихся вторичных минеральных образований на определенной стадии взаимодействия в соответствующих термодинамических условиях. Эти процессы протекают в условиях физической и химической неоднородности геологического пространства, обеспечивающих распространение, движение и физико-химическое взаимодействие воды с различными минералами. Сформированные растворы, поднимаясь из глубинных условий к местам их появления на поверхности или вывода горными выработками, претерпевают различные изменения. Природа этих изменений имеет разный характер. С одной стороны, это обусловлено процессами смешения термальных и грунтовых (метеорных) вод, протекающих с различной интенсивностью даже в пространстве формирования одного и того же термопроявления в различные периоды времени. С другой стороны, большое значение имеют такие факторы в жизни термальных вод, как различие температуры и давления аналитических образцов в условиях «in situ» и «in vitro»; дегазация водного раствора и последующая его аэрация в результате контакта с атмосферой при отборе пробы или в процессе проведения ее анализа; выпадение осадков; время от момента выхода воды на поверхность до проведения химического анализа. Большую роль при этом играет метастабильность водного раствора. Эти и другие, не упомянутые здесь, моменты, связанные с отбором проб и их аналитическим исследованием, затрудняют прямую, «только по химическому анализу», физико-химическую интерпретацию процессов в системе «газ – водный раствор – минералы – органическое вещество». Проведенное исследование достаточно наглядно показало роль геологической неоднородности и влияние метеогенных факторов на формирование термальных вод и их изменения в процессе перемещения от места формирования до места получения результатов, отражающих их состав. Учесть и устранить или минимизировать эти изменения состава терм, полученных в лабораторных условиях, позволяет целенаправленное использование термодинамического моделирования.

### **2.3 Физико-химическое моделирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог**

В данном исследовании с помощью ФХМ рассчитан вероятный состав рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Ленский золоторудный район Байкало-Патомского нагорья) и определен источник золота. Основными гипотезами

происхождения месторождений суходожского типа являются постмагматически-гидротермальная, и метаморфогенно-гидротермальная. Согласно первой, привнос золота связан со становлением постметаморфических интрузий, в качестве которых выступают гранитоиды (Константиновский шток), и гипотетические базитовые комплексы (Угаханский плутон), залегающие на глубине [14; 15; 16]. Вторая гипотеза основана на предположении, что рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме металлоносных углеродистых толщ, а интрузии имели второстепенное значение, влияя только на температурный режим [16; 17].

Сценарий, на основе, которой проводилось моделирование включает три этапа. Этап I – конседиментационный (седиментация и диагенез, 610–580 млн. лет), во время которого происходит накопление и диагенетическое преобразование осадков с высоким содержанием сидеро-халькофильных элементов [17]. На этом этапе золото связано с рассеянной пиритовой минерализацией, частично с глинистыми минералами и органическим веществом. Этап II – раннеколлизионный (катагенез, 570–540 млн. лет), связан с прохождением катагенного преобразование осадков, которому способствовало формирование пологих складчатых структур, возникших в результате тектонического напряжения из-за аккреции Байкало-Муйского композитного террейна и более молодых островодужных систем. Миграция катагенного флюида в сводовые части пологих антиклиналей, обеспечило аномальный фон золота и формирование сульфидной минерализации. На III – коллизионном этапе метаморфизма (450–420 млн. лет) формируются рудные тела. На первой стадии в T,P – условиях, соответствующих зеленосланцевой фации метаморфизма: 300-390 °C, 5–6 кбар [18], органическое вещество, сосредоточенное в апикальных частях антиклиналей, карбонизируется до состояния неструктурированного графита. Распад металлоносных флюидов сопровождается образованием воды, углекислоты, метана, сероводорода и азота. Золото и сопутствующие элементы, частично переходят в метаморфогенные растворы, а оставшаяся часть восстанавливается до свободного металла и образует рассеянную минерализацию, в самородной форме, и интерметаллических соединений [16]. Формируется высокотемпературная минеральная ассоциация кальцит, кварц, пирит, пирротин, арсенопирит. Следующая стадия характеризуется более низкими температурами (270–320 °C) и давлениями (0,5 кбар), что обусловлено метаморфическими преобразованиями и появлением зон трещиноватости вдоль осей складок в обезвоженных толщах. Как следствие, флюид, поступающий в зоны разуплотнения, формирует прожилково-вкрапленную минеральную ассоциацию, где высокотемпературный пирротин переходит в

пирит, и образуется полиметаллическая минеральная ассоциация с золотом. Рудоотложение становится более низкотемпературным, формируется сидерит – анкерит – кварцевой минеральная ассоциация с низким содержанием дисперсного золота.

На первом этапе моделировалось образование рудоносного флюида в результате взаимодействия гидротермального ( $H_2O + CO_2 + CH_4$ ) содержащего раствора с рудой (СЛг-1) в условиях гомогенизации водно-солевых растворов [19]. Расчеты проводились при P,T условиях характерных для прогрессивного метаморфизма – 385 °С, 2430 бар; регрессивного метаморфизма – 350 °С, 237 бар; стадии максимального рудоотложения – 210 °С, 237 бар и пострудной стадии – 210 °С, 190 бар при соотношениях флюид/порода (фл/п) = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 10, Максимальное перераспределение содержаний рудных компонентов между флюидом и породой происходили при отношении фл/п (1 кг/5 кг) = 0,2. Новообразованная газовая фаза представлена  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$ ,  $HF$ ,  $CH_4$ . Рассчитанный состав рудоносного флюида сопоставим с составом газожидких включений кварцевых прожилков рудной зоны (Таблица 3).

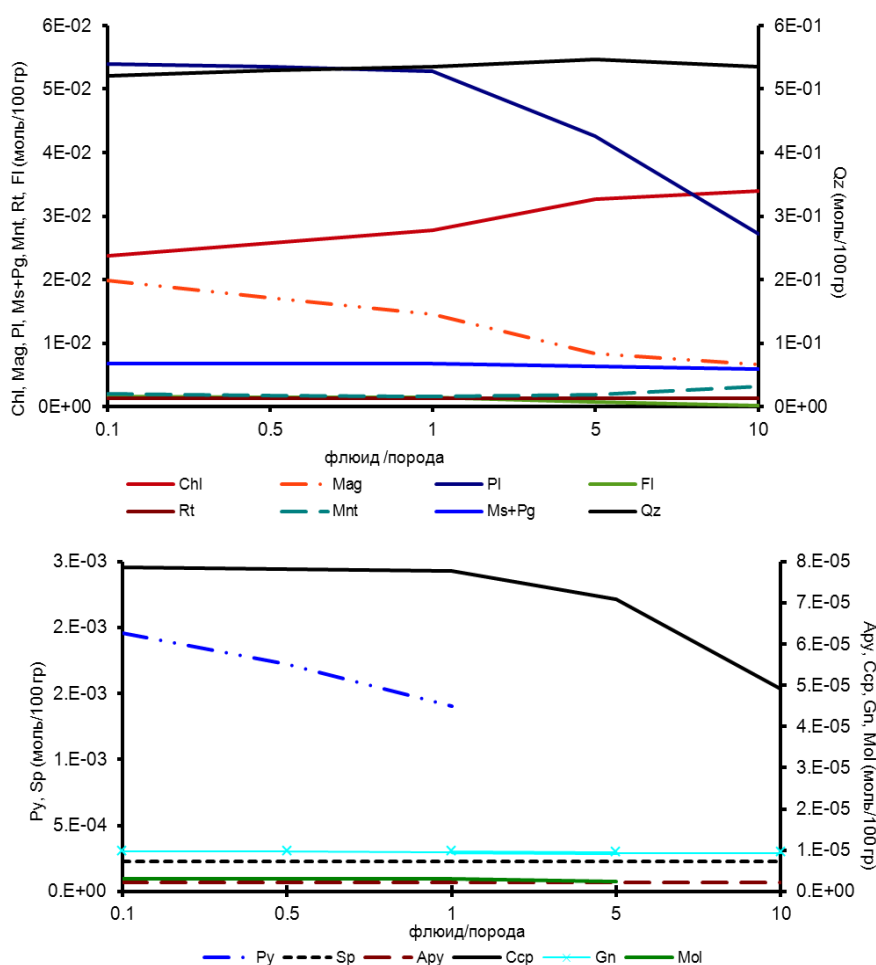
**Таблица 3** – Содержание химических элементов в рудообразующем флюиде

Элемент	СЛг-1 (рассчитанные) фл/п 0,2 (моль/кг $H_2O$ )				Юдовская и др. (2015)
	1 стадия 385°C, 2430бар	2 стадия 350°C, 237бар	3 стадия 210°C, 237бар	4 стадия 210°C, 190бар	
К	0,8	0,26	0,21	0,18	$1,59 \cdot 10^{-2}$
Mg	0,39	$7,83 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$3,27 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-6}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
As	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-5}$	$6,19 \cdot 10^{-5}$	$4,71 \cdot 10^{-5}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$7,93 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$2,93 \cdot 10^{-8}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$3,88 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-7}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$4,82 \cdot 10^{-3}$	$4,84 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
pH	4,84	5,57	5,96	6,08	
Eh, B	-0,15	-0,27	-0,24	-0,26	
Состав твер-дой фазы	Chl, Ap, Mgs, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp	Ap, Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp	Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, F-Ap, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Sd, Arg, Py, Sp	Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, F-Ap, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Py, Sp	

Примечание – Mgs – магнезит, Mnt – монтмориллонит, Dol – доломит, Ccp – халькопирит, Fl – флюорит, Hem- гематит, Qz — кварц, Au – самородное золото, Ilm – ильменит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Ap – апатит, Mag – магматит, Chl – хлорит, Pl - плагиоклаз, Gn-галенит, Apy — арсенопирит, Ms – мусковит, Pg — парагонит, Sd – сидерит, F-Ap – фторапатит, Arg – аргентит.

В результате определены оптимальное соотношение фл/п 0,2 и Р,Т условия процесса формирования рудообразующего флюида 350 °С, 237 бар.

На втором этапе моделировался процесс взаимодействия флюида (H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) с вмещающими породами при 350 °С и 237 бар, соотношение флюид/порода изменялось от 100 до 5 гр/100 гр породы. Установлено, что образование Au-содержащей твердой фазы и равновесного с ней флюида не происходит. Минеральный состав представлен Chl, Mag, Mnt, Pl, Ap, Mgs, sluda, Apy, Qz, Ccp, Gn, Py, Rt, Fl (Рисунок 5). рН флюида 5,6-5,9. Основная форма нахождения золота в растворе- Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>, AuHS<sup>0</sup>.



**Рисунок 5** – Минеральный состав твердой фазы (моль/100 гр. породы), образующейся при взаимодействии флюида с вмещающими породами (Chl – хлорит, Mag – магматит, Pl – плагиоклаз, Fl – флюорит, Rt – рутил, Mnt – монтмориллонит, Ms – мусковит, Pg — парагонит, Qz — кварц, Py – пирит, Sp – сфалерит, Apy – арсенипирит, Ccp – халькопирит, Gn-галенит, Mol – молибденит)

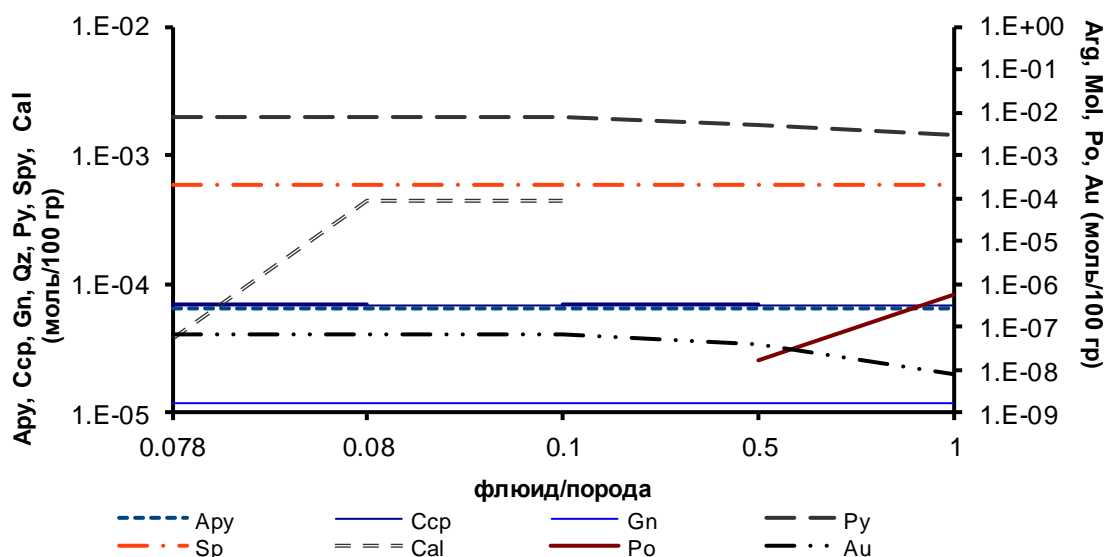
На третьем этапе моделировался процесс формирования рудообразующего раствора. Со сланцами надрудной зоны (Таблица 4) взаимодействует флюид содержащий CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Приняты Р,Т-условия соответствующие формированию рудного флюида – 237 бар и 350 °С. В реальных условиях, такой процесс возможен, когда раствор,

взаимодействующий с породами (Таблица 4) находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию. Расчеты проводились при соотношениях фл/п от 0,0781 (7,81 г/100г) до 1 (100г/100г). Установлено, что соотношение фл/п 0,08 является наиболее вероятным для формирования флюида, близкого по составу к составу газожидких включений в прожилках кварца [19] (Таблица 4).

**Таблица 4** – Изменение состава флюида в зависимости от соотношения фл/п

Элемент	фл/п (моль/кг H <sub>2</sub> O)					Юдовская и др. (2015)
	0,078	0,08	0,1	0,5	1	
Mg	$2,92 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,25 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$9,86 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
K	$3,69 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
As	$2,75 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$	$5,34 \cdot 10^{-11}$	$4,69 \cdot 10^{-11}$	$4,15 \cdot 10^{-11}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$4,39 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$9,93 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$5,98 \cdot 10^{-7}$	$6,32 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$9,53 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$9,91 \cdot 10^{-9}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$2,82 \cdot 10^{-6}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
Mo	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$4,12 \cdot 10^{-7}$	$6,10 \cdot 10^{-7}$	$5,81 \cdot 10^{-7}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
pH	5,63	5,93	6,41	6,71	6,73	
Eh, В	-0,42	-0,49	-0,55	-0,59	-0,59	

С уменьшением соотношения флюид/порода содержание золота во флюиде снижается, количество кварца, пирротина и пирита возрастает (Рисунок 6). Высокие содержания золота на месторождениях привязаны к кварцевым прожилкам с высоким содержанием, сульфидов, поскольку химический механизм осаждения золота связан с переходом серы из флюида в новообразованные твердые фазы – пирит, пирротин, аргентит и газовую фазу H<sub>2</sub>S.



**Рисунок 6** – Минеральный состав твердой фазы (моль/100гр. породы) равновесной с флюидом в зависимости от соотношения фл/п (Apy – арсенопирит, Ccp – халькопирит, Gn – галенит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Cal – кальцит, Po – пирротин, Au – золото)

Содержание Au в модельном рудоносном флюиде сопоставимое с составом включений достигалось при - 237 бар и 350 °С. На основе результатов моделирования можно предположить, что для основной стадии рудообразования характерны эти Т,Р условия. Оптимальным соотношением флюид/порода для СлГ-1 является 0,2, а для минерализованных сланцев - 0,08 (таблицы 5).

**Таблица 5** – Химический состав рудоносных флюидов (моль/кг H<sub>2</sub>O)

Элемент	Флюид/сланцы (0,08)	Флюид /СлГ-1 (0,2)	Юдовская и др. (2015)
Mg	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,31 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
K	$1,45 \cdot 10^{-1}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
As	$4,32 \cdot 10^{-11}$	$3,14 \cdot 10^{-5}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-7}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$1,92 \cdot 10^{-7}$	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$7,24 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$8,58 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
Mo	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$9,97 \cdot 10^{-7}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
pH	5,3	5,4	
Состав твердой фазы	Chl, Mag, Mnt, Pl, sluda, Apy, Ccp, Gn, Ap, Po, Qz, Rt, Au, Mol, Fl, Py, Sp	Ap, Mgs, Mag, Mnt, sluda, Apy, Ccp, Dol, Hem, Qz, Au, Ilm, Py, Sp	

## 2.4 Выводы

Содержание Au в модельном рудоносном флюиде сопоставимое с составом включений достигалось при 237 бар и 350 °С. На основе результатов моделирования можно предположить, что для основной стадии рудообразования характерны эти Т,Р условия. Оптимальным соотношением флюид/порода для Слг-1 является 0,2, а для минерализованных сланцев – от 0,08 до 1.

Образование флюида равновесного с твердой фазой Au, сопоставимой по составу с рудным золотом, из минерализованных сланцев, позволяет считать, что источником золота являются вмещающие месторождение черносланцевые породы, без дополнительного эндогенного источника.

Рудный процесс происходил при локальном перераспределении вещества. Оруденение сформировалось из минерализованных сланцев в объеме рудного тела и окаймляющих его минерализованных сланцев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения основных задач проекта за 2017–2020 годы проведена научно-исследовательская работа по развитию термодинамического обеспечения имитационного моделирования рудообразующих систем и созданы модели физико-химических процессов различных этапов формирования рудных месторождений.

Данные физико-химического моделирования о минеральном составе родингитов, состоящем из хлорита, пироксена и граната, согласуются с реальным содержанием этих минералов в породах месторождения Золотая Гора. Фазы золота, находящиеся в равновесном соотношении с минералами родингита, представлены золото-серебряными твердыми растворами, а также интерметаллическими соединениями AuCu и Au<sub>3</sub>Cu. Температурный интервал образования родингитов 1-й и 2-й стадии месторождения Золотая Гора (420-470 °С) согласуется с модельными условиями осаждения твердых растворов Au-Ag и тетрааурикуприда, в результате разгрузки флюида при T 450 °С. Температурный интервал минералов 3-й стадии (310-230 °С) соответствует как условиям стабильности Au<sub>3</sub>Cu в гидротермальной модели ниже 350 °С, так и критической температуре упорядочения твердого раствора этого состава при 230 °С (Вол, Каган, 1976). Расчеты показывают, что значительные количества минерала Au<sub>3</sub>Cu могут образовываться только из богатых золотом растворов (более 2 г/т).

Показано, что полное соответствие минерального состава системы Au-Ag-Cu (Hg) реализуется в метасоматической модели, где протолитовой породой является ранее образованный родингит. При воздействии низко углекислотного золотосодержащего раствора минералы родингита устойчивы при соотношении (W/R<1). По мере увеличения W/R хлорит-гранат-пироксеновый состав родингита сменяется породой с преобладанием хлорита.

В результате выполнения программы работ за 2017 год установлено, что золотонесущие родингиты, классифицируются как особый тип минеральной системы. Золотая минерализация в родингитах образуется, как одновременно с формированием родингитов в режиме однократной разгрузки глубинного флюида, так и при метасоматическом замещении ранее сформированных родингитов под воздействием золотосодержащего водно-хлоридного флюида. Образование интерметаллидов Au-Cu происходило под воздействием слабокислотных гидротермальных растворов (pH = 3.5÷5) с низкой фугитивностью O<sub>2</sub> и S<sub>2</sub>:  $\log f_{O_2} = -26 \div -47$ ,  $\log f_{S_2} = -8 \div -20$ .

В 2018 году удалось установить, что магнетит-хлорит-карбонатные породы образуются в результате гидротермального выполнения свободного пространства, а



хлоритолиты за счет метасоматоза серпентинитов. Источником петрогенных и рудных компонентов являются серпентиниты, габброиды и известняки, глубинный магматогенный флюид в смеси с метаморфогенным флюидом, выделяющимся при дегидратации и десерпентинизации пород нижней коры. Модельные расчеты показали, что медьсодержащее золото может отлагаться и при серпентинизации глубинных оливиновых пород и рудного флюида, поднятых тектоническим потоком на более высокий гипсометрический уровень. Так же был разработан способ расчета стехиометрических формул и термодинамических свойств сложных природных минералов. Исходными данными является химический состав мономинеральной фракции, стехиометрические формулы рассчитываются с помощью модели твердых растворов, а термодинамические свойства – по двойственным решениям, полученным методом минимизации свободной энергии. Полученные значения по точности сопоставимы с результатами расплавной калориметрии растворения и справочными данными.

Выполнена верификация метода физико-химического моделирования в определении содержания минералов в карбонатно-силикатных отложениях с использованием двух способов, основанных на методе рентгеновской порошковой дифрактометрии. Показано, что метод физико-химического моделирования, опирающийся на отработанные термодинамические модели, позволяет оперативно получить удовлетворительные оценки содержания минеральных групп на основе данных об элементном составе, полученном с помощью рентгенофлуоресцентного метода анализа.

На основании анализа геологических и петрологических данных с использованием физико-химических моделей представлены обоснования формирования магнетит-хлорит-карбонатных пород с медьсодержащим золотом в Карабашском массиве гипербазитов в процессе разгрузки при перемещении корово-мантийной смеси и флюида в верхние горизонты.

В 2019 году были созданы адекватные термодинамические модели формирования золоторудной минерализации двух типов в Каганском гипербазитовом массиве на Южном Урале. Метасоматическое взаимодействие метаморфического флюида с серпентинитами по сценарию 1 объясняет образование при  $T=450-250$  °C и  $P=2.5-0.5$  кбар бедной золотом минерализации (до 0.1 г/т) 1 типа, рассеянной в рассланцованных породах. Необходимым условием формирования гидротермальной богатой золоторудной минерализации (до 10–13 г/т и более) в жилах магнетита 2 типа по сценарию 2 является смешение метаморфического и метеорного флюидов при  $T=500-400$ °C и  $P=2-3$  кбар и его разгрузка в открытом пространстве трещин в рассланцованных серпентинитах.

Разработан способ расчета стехиометрических формул и термодинамических свойств сложных природных минералов. Исходными данными является химический состав мономинеральной фракции, стехиометрические формулы рассчитываются с помощью модели твердых растворов, а термодинамические свойства – по двойственным решениям, полученным методом минимизации свободной энергии. Полученные значения по точности сопоставимы с результатами расплавной калориметрии растворения и справочными данными.

Физико-химическое моделирование объяснило причины образование двух типов золоторудной минерализации в коренных породах ультраосновных массивов. Минеральные ассоциации, количественные соотношения и последовательность отложения основных минералов и состав Au-Ag твердых растворов, полученные по сценариям 1 и 2, в совпадают с природными типами золотой минерализации в Каганском массиве. В 1 типе минерализации серпентинит содержит небольшие количества магнетита и талька, замещающего антигорит. Для расчетных и природных ассоциаций характерен Au-Ag состав твердых растворов пробностью выше 750‰ и близкие температуры отложения (300-500°C). Во 2 типе возникает ассоциация магнетита, преобладающего над серпентином, тальком и хлоритом. В этой ассоциации образуется несколько генераций Au-Ag твердых растворов, охватывающих весь диапазон составов от чистого золота до чистого серебра.

В 2020 году получены наиболее значимые результаты. Выполнена верификация метода физико-химического моделирования в определении содержания минералов в железных рудах, и предложен способ определения содержания минеральных фаз в железных рудах на основе математической модели физико-химических процессов их образования, опирающейся на данные об элементном составе. Сформированы термодинамические модели природного минералообразования. В частности изучены сапфирин-шпинелевые и гранатовые жедрититы Ауланджинского блока Омолонского массива Верхояно-Чукотского региона (Северо-Восток России). В результате проведенных исследований при  $P = 6$  кбар и  $T = 900$  °C получена минеральная ассоциация, содержащая сапфирин и шпинель, составы которых по величине магнизиальности и окисленности очень близки к наблюдаемым в реальности составам.

Также в этом году с целью исследования механизмов формирования фторидных флюидов, имеющих важное значение в процессах природного минералообразования, выполнено моделирование физико-химических взаимодействий в системе «вода–порфирит» в условиях формирования азотных терм. Состав модельного раствора в

процессе взаимодействия определяется совокупным влиянием состава первичной породы и вторичных минеральных образований. На основании этих модельных экспериментов мы можем сделать следующие выводы. Присутствие и количество различных компонентов в рассмотренных современных термальных водах определяются совокупным влиянием состава взаимодействующей с инфильтрационной водой породы и формирующихся вторичных минеральных образований на определенной стадии взаимодействия в соответствующих термодинамических условиях. Проведенное исследование достаточно наглядно показало роль геологической неоднородности и влияние метеогенных факторов на формирование термальных вод и их изменения в процессе перемещения от места формирования до места получения результатов, отражающих их состав.

К значимым результатам так же относятся результаты физико-химического моделирования процессов образования рудообразующего флюида гигантского золоторудного месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия). Установлено, что, формирование крупных рудных тел месторождения Сухой Лог возможно при взаимодействии вмещающих пород – черных сланцев с высоким содержанием золота с гидротермальными растворами. На этапе катагенной мобилизации золота ( $T \approx 360 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и миграции флюида в сводовые зоны антиклинальных структур с пониженной температурой и давлением, происходит истощение материнскими толщ. Соответственно зона разгрузки флюида, предполагает возможность формирования золоторудного месторождения, что объясняет приуроченность месторождений к близ ядерной части антиклинальных структур.

Показано, что на стадии прогрессивного метаморфизма, когда давление  $\sim 3$  Кбар, а температура выше  $360 \text{ }^\circ\text{C}$ , золото самородной форме рассеяно во вмещающих породах. При раскрытии системы, связанным с тектоническим срывом, происходит снижение давления и температуры. В результате образуется флюид с содержанием рудных элементов, соответствующим газовой-жидким включениям сульфидно-кварцевых прожилков. С образованием зон трещиноватости происходит снижение температуры и давления флюида ( $250\text{--}210 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $0,2\text{--}0,5$  кбар), золото из растворенного состояния переходит в интерметаллические соединения и самородное состояние, отлагаясь совместно с кварцем, кальцитом, доломитом, пиритом, галенитом, аргентитом, сульфидами Cu, Ni и Mo в сульфидно-кварцевые прожилки.

Следовательно образование рудообразующего флюида равновесного с вмещающими сланцами свидетельствует, что формирования месторождения возможно только за счет ресурса вмещающих черносланцевых толщ без участия глубинных

источников золота. Соответственно в пределах зоны рудообразования имело место локальное перераспределение вещества из обогащенных на предрудном этапе пород.

Результаты исследований могут быть использованы в изучении основных рудообразующих этапов и физико-химических условий образования золотоносных серпентинитов и локализованных в них золото-сульфидно-магнетитовых руд в массивах гипербазитов.

Научный уровень выполненной НИР в целом отвечает современным требованиям, предъявляемым к работам по развитию методов термодинамических расчетов и их применению к проблемам природного минералообразования, и можно с полным основанием сказать, что полученные результаты соответствуют мировому уровню, а по ряду позиций опережают аналогичные зарубежные работы в области компьютерного моделирования физико-химических процессов различных этапов формирования рудных месторождений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Karakaya I., Thompson W.T. The Ag-Pd (silver-palladium) system // Bull. Alloy Phase Diagr. – 1988. – V. 9. – P. 237-243.
- 2 Ghosh G., Kantner C., Olson G.B. Thermodynamic Modeling of the Pd-X (X = Ag, Co, Fe, Ni) Systems// J. Phase Equilibria. – 1999. – V. 20. – P. 295-308.
- 3 Feng D., Taskinen P. Thermodynamic properties of silver–palladium alloys determined by a solid state electrochemical method// J. Mater. Sci. – 2014. – V. 49. – P. 5790-5798.
- 4 Schmahl N.G. Die Erleichterung der Reduzierbarkeit von Metallverbindungen durch Legierungsbildung und ihre Berechnung // Z. Anorg. Allg. Chem. – 1951. – V. 266. – P. 1-29.
- 5 Myles K.M. Thermodynamic properties of solid palladium–silver alloys// Acta Metall. – 1965. – V. 13. – P. 109-113.
- 6 Еременко В.Н., Лукашенко Г.М., Припула В.Л. Исследование термодинамических свойств твердых растворов системы Ag-Pd методом измерения давления пара. Журн. физ. химии. – 1968. – Т. 42, с.657-659.
- 7 Raychaudhuri P.K. Mass spectrometric and galvanic cell studies of the thermodynamic properties of solid silver–palladium alloy. PhD Dissertation. Evanston, USA: Northwestern University. – 1971. – 236 p.
- 8 Holland T.J.B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // J. Metamorph. Geol. – 1998, v. 16, № 3, p. 309–343.
- 9 White R.W., Pomroy N.E., Powell R. An in situ metatexite–diatexite transition in upper amphibolite facies rocks from Broken Hill, Australia // J. Metamorph. Geol. – 2005. – V. 23. – P. 579–602.
- 10 Diener J.F.A., Powell R., White R.W., Holland T.J.B. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system Na<sub>2</sub>O—CaO—FeO—MgO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O—O // J. Metamorph. Geol. – 2007. – V. 25. – P. 631–656.
- 11 Green E., Holland T.J.B., Powell R. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite — diopside — hedenbergite — acmite, with applications to eclogitic rocks // Am. Mineral. – 2007. – V. 92, № 7. – P. 1181–1189.
- 12 Tajcmanova L., Connolly J.A.D., Cesare B. A thermodynamic model for titanium and ferric iron solution in biotite // J. Metamorph. Geol. – 2009. – V. 27. – P. 153–165.
- 13 Дворкин-Самарский В.А., Каперская Ю.Н., Козулина И.М., Кравченко А.И., Трубачева Е.Ш. Типы редкометалльных геохимических провинций Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1978. – 141 с.

14 Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н. и др. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // Геология руд. месторождений. – 1992. – Т. 34. № 6. – С. 3–15.

15 Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В. и др. Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно геохронологического изучения // Докл. РАН. – 2007. – Т. 415. № 2. – С. 236–241.

16 Дистлер В. В., Митрофанов Г. Л., Немеров В. К. и др. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. № 6. – С. 467–484

17 Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и  $\delta^{34}\text{S}$ ) и геохимические характеристики метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // Петрология. – 2018. – Т. 26. № 3. – С. 213–244

18 Петров Б.В., Макрыгина В.А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. – Новосибирск: Наука, 1975. – 342с.

19 Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С. А. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении сухой лог по данным U-Th-Pb-изотопного *shrimp*-датирования акцессорных минералов / Геология рудных месторождений. – 2011. – Том 53, № 1. – С. 32–64.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием за 2017–2020 гг.

1 Шарапов В.Н., Кузнецов Г.В., Тимина Т.Ю., Томиленко А.А., Чудненко К.В. Численное моделирование неизотермического метасоматического преобразования ультрабазитов мантийного клина под Авачинской группой вулканов (Камчатка) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. № 5. – С. 674–700.

2 Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokopyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold–silver ore mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) // Ore Geology Reviews, 91 (2017). 1 – 20. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.017.

3 Штенберг М.В., Бычинский В.А., Королева О.Н., Коробатова Н.М., Тупицын А.А., Фомичев С.В., Кренин В.А. Расчет термодинамических свойств щелочных и щелочно-земельных германатов // Журнал неорганической химии. – 2017. – Т. 62, № 11. – С. 1468-1473.

4 Головных Н.В., Бычинский В.А., Филимонова Л.М., Чудненко К.В., Шепелев И.И. Повышение эффективности систем газоочистки в алюминиевом производстве // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2017. – № 3. – С. 45–55.

5 Soldatova E., Guseva N., Bychinskiy V., Sun Z., Boeckx P., Gao B. Sources and behaviour of nitrogen compounds in the shallow groundwater of agricultural areas (Poyang Lake basin, China) // Journal of Contaminant Hydrology. – 2017. – V. 202. – P. 59–69.

6 Golovnykh N.V., Bychinskii V.A., Filimonova L.M., Chudnenko K.V. Modeling and reduction of fluorine-containing losses in aluminum production // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2017. – V. 51, № 4. – P. 587–593.

7 Koroleva O.N., Shtenberg M.V., Bychinsky V.A., Tupitsyn A.A., Chudnenko K.V. Methods for calculating and matching thermodynamic properties of silicate and borate compounds // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2017. – Т. 9. № 1. – С. 39–48.

8 Eremin O.V., Filenko R.A., Epova E.S., Rusal' O.S., Burchinskii V.A. Evaluation of standard Gibbs energies of the minerals alunite group from the supergene zone of tin-polymetallic deposit Sherlovaya Gora (Transbaikalia) // Experiment in Geosciences. – 2017. – V. 23, № 1. – P. 75–78.

9 Eremin O.V., Mikhailov M.A., Buchinskii V.A. Evaluation of Gibbs energies of formation from the elements for beryllium indialite // *Experiment in Geosciences*. – 2017. – V. 23, № 1. – P. 78–80.

10 Еремин О.В., Эпова Е.С., Филенко Р.А., Русаль О.С., Бычинский В.А. Использование цеолитовых пород в извлечении металлов из рудничных вод // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 5. – С. 131-140.

11 Чудненко К.В., Мурзин В.В., Пальянова Г.А. Термодинамическое моделирование формирования золотоносных родингитов месторождения Золотая Гора (Карабашский массив, Ю.Урал) // *Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 60-летию Института геохимии СО РАН и 100-летию со дня рождения Л.В. Таусона "Современные направления развития геохимии"*, 18–23 сентября 2017 года, г. Иркутск. Иркутск: Изд-во "Отгиск". – 2017. – С. 171-172.

12 Мурзин В.В., Чудненко К.В., Пальянова Г.А., Варламов Д.А. Условия образования минералов системы Au-Ag-Cu-Hg в родингитах месторождения Золотая Гора (Карабашский массив, Ю.Урал): гидротермальная модель// *Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием*. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2017. – С. 127-129.

13 Мурзин В.В., Чудненко К.В., Кисин А.Ю., Пальянова Г.А. Термодинамическое моделирование условий образования золотоносных магнетит-хлорит-карбонатных пород в хлоритолитах Карабашского массива на Южном Урале // *Тектонические, магматические, метаморфические факторы формирования и размещения месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых (XVII Чтения памяти А.Н.Заварицкого)*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. – 2017. – С. 104-108.

14 Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Varlamov D., Naumov E., Pirajno F. Physicochemical model for the genesis of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallics in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia) // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 93. – P. 81–97.

15 Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Kissin A., Varlamov D. Physicochemical model of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks at the Karabash ultramafic massif (Southern Urals, Russia) // *Minerals*. – 2018. – V. 8. № 7. – Номер статьи 306.

16 Авченко О.В., Жуланова И.Л., Чудненко К.В., Карабцов А.А. Шпинель-сапфириновые реакционные структуры в гранатовых метаультрамафитах Омолонского



массива: петрогенезис и геологическая интерпретация (Северо-Восток Азии) // Тихоокеанская геология. – 2018. – Т. 37. – № 3. – С. 15-30.

17 Бычинский В.А., Королева О.Н., Ощепкова А.В., Штенберг М.В. Способ определения термодинамических свойств веществ для изучения природных и технологических процессов методами физико-химического моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 48-56

18 Маркова Ю.Н., Ощепкова А.В., Кузьмин М.И., Солотчина Э.П., Солотчин П.А., Бычинский В.А., Чудненко К.В. Влияние изменений климата позднего плейстоцена–голоцена на состав донных отложений Селенгино-Бугульдейской перемычки озера Байкал // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2018. – Т. 26. – № 3. – С. 109-116.

19 Павлов С.Х., Чудненко К.В., Голубев В.А., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 221-248.

20 Штенберг М.В., Бычинский В.А., Королева О.Н., Коробатова Н.М., Мосунова Т.В., Дмитриева А.П. Расчет термодинамических свойств щелочных борогерманатов и германосиликатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2018. – Т. 10. – № 4. – С. 34-43.

21 Ощепкова А.В., Бычинский В.А., Чудненко К.В. Расчет термодинамических свойств слоистых силикатов методом физико-химического моделирования // Вопросы естествознания. – 2018. – № 2 (16). – С. 94-100.

22 Чудненко К.В., Мурзин В.В., Пальянова Г.А. Физико-химическое моделирование формирования золотоносных магнетит-хлорит-карбонатных пород (Карабашский массив, Ю. Урал) // Материалы всерос. конф. «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Чита, 22-25 августа 2018 г.) – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2018. – С. 84-86.

23 Бычинский В.А., Ощепкова А.В., Чудненко К.В. Методы расчета стехиометрических формул и термодинамических свойств иллитов, монтмориллонитов и хлоритов методами физико-химического моделирования // Материалы всерос. конф. «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Чита, 22-25 августа 2018 г.) – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2018. – С. 257-260.

24 Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Varlamov D. Formation of Au-bearing antigorite serpentinites and magnetite ores at the massif of ophiolite ultramafic rocks: thermodynamic modeling // Minerals. – 2019. – V. 9. – No. 12. – Номер статьи 758.

25 Шарапов В.Н., Мазуров М.П., Чудненко К.В., Сорокин К.Э. Динамика метасоматического преобразования пород литосферной мантии и земной коры в зонах глубинных разломов, контролировавших трапповый магматизм Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2019. – № 8. – С. 1055-1068.

26 Шоба В.Н., Чудненко К.В. Равновесия глинистых минералов с водными растворами в почвах // Геология и геофизика. – 2019. – № 5. – С. 688-698.

27 Богущ А.А., Бобров В.А., Климин М.А., Бычинский В.А., Леонова Г.А., Кривоногов С.К., Кондратьева Л.М., Прейс Ю.И. Особенности формирования отложений и концентрирования элементов в профиле торфяника Выдринский (Южное Прибайкалье) // Геология и геофизика. – 2019. – № 2. – С. 194-208.

28 Смелый Р.В., Канева Е.В., Ощепкова А.В., Бычинский В.А., Айсуева Т.С., Щетников А.А., Пашкова Г.В., Якимов И.С., Финкельштейн А.Л. Определение минерального состава озерных донных отложений методами рентгеновской дифракции и физико-химического моделирования // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2019. – Т. 12. – № 3. – С. 382-394.

29 Ощепкова А.В., Бычинский В.А., Чудненко К.В., Сасим С.А. Методы определения минерального состава донных осадков оз. Байкал и расчета их термодинамических параметров как критерия палеоклиматических изменений // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. – 2019. – Т. 28. – С. 76-88.

30 Головных Н.В., Чудненко К.В., Бычинский В.А., Шепелев И.И. Совершенствование технологии переработки растворов и отходов газоочистки алюминиевого производства // Химическая технология. – 2019. – Т. 20. – № 10. – С.453-461.

31 Авченко О.В., Чудненко К.В. О вероятной метапелитовой природе сапфирин-шпинелевых и гранатовых жедрититов Ауланджинского блока Омолонского массива // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – № 7. – С. 849—861.

32 Чудненко К.В. Термодинамические свойства компонентов в системе Ag-Au-Pd // Журнал неорганической химии. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 92–97.

33 Lipko S., Tauson V., Bychinskii V. Gold partitioning in a model multiphase mineral-hydrothermal fluid system: distribution coefficients, speciation and segregation // Minerals. – 2020. – V. 10. – Номер статьи 890.

34 Мазухина С.В., Чудненко К.В., Терещенко П.С., Дрогобужская С.В. Термодинамическое моделирование образования конкрементов в организме человека под

воздействием состояния окружающей среды Кольского полуострова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – Т. 28. – № 2. – С. 193-201.

35 Павлов С.Х., Чудненко К.В., Хромов А.В. Моделирование формирования фторидных азотных терм в системе "вода – кристаллическая порода" // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2020. – V. 11. – Is. 2. – P. 378-396.

36 Просекин С.Н., Бычинский В.А., Чудненко К.В., Амосова А.А., Знаменская Т.И. Физико-химические особенности процессов почвообразования в условиях техногенной нагрузки // *География и природные ресурсы*. – 2020. – № 2. – С. 71-77.

37 Шепелев И.И., Головных Н.В., Чудненко К.В., Сахачев А.Ю. Применение оперативного метода контроля и управления на основе компьютерного физико-химического моделирования в процессах спекания глиноземной шихты // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 694–708.

38 Ощепкова А.В., Чубаров В.М., Бычинский В.А., Канева Е.В. Физико-химическое моделирование качественного и количественного фазового состава железных руд // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия*. – 2020. – Т. 13. – № 1. – С. 65-77.

39 Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е., Чудненко К.В. Особенности формирования рудообразующего флюида золоторудного месторождения Сухой Лог // Четвертая Всерос. науч. конференция «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». 17-20 августа 2020 г., г. Улан-Удэ. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – 2020. – С. 324-326.

40 Головных Н.В., Чудненко К.В., Шепелев И.И. Переработка хвостов золотодобычи методами ионсорбционной технологии // XXV Международная научно-техническая конференция «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», 02-11 апреля 2020 г., г. Екатеринбург, 2020. С. 110-114. Екатеринбург: Из-во Форт Диалог-Исеть. – 2020. – С. 110-114.

41 M.V. Shtenberg, V.A. Bychinsky, A.A. Tupitsyn, O.N. Koroleva Evaluation of Thermodynamic Properties of Alkaline Borogermanates and Germanosilicates Using the Regression Analysis Method/ / *International Journal of Thermodynamics (IJOT)*. – 2020. –Vol. 23 (No. 4). –Pp. 252-258,

42 А.В. Ощепкова, В.А. Бычинский Моделирование минерального состава озерных осадков // В книге «30 лет программе «Байкал-бурение»» под ред. М.И. Кузьмина изд. Наука, Новосибирск 2020. – С. 293-207

43 Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е., Чудненко К.В. Физико-

химическое моделирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Иркутская область, Россия) // Геосферные исследования. – 2020 – № 4. – С. 77-90.

44 Липко С.В., Таусон В.Л., Бычинский В.А. Коэффициенты сокристаллизации золота в рудных минералах в гидротермальных системах // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН. Научное электронное издание / Под ред. Н.С. Бортникова и В.А. Петрова. М.: ИГЕМ РАН, 2020 – С. 598 – 601.

### Объекты Интеллектуальной собственности

**Чудненко К.В.** Программный комплекс «Selektor» / Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618511 от 02.08.2017 г.

### Показатели выполнения проекта

Показатель	Значение показателя	
	2020 год	Всего за время выполнения проекта
1. Общее количество научных сотрудников – исполнителей		
<i>в том числе:</i>		
академиков РАН		
членов-корреспондентов РАН		
докторов наук	1	1
кандидатов наук	4	4
молодых ученых (до 39 лет включительно)		2
2. Количество основных публикаций		
<i>в том числе:</i>		
монографий		
статей, опубликованных по теме проекта в журналах, индексируемых в WoS и Scopus	7	23
статей, опубликованных по теме проекта в журналах, индексируемых только в РИНЦ	3	22
объектов интеллектуальной собственности (патентов и других РИД)		1
докладов в материалах конференций	1	17