

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ ИМ. А.П. ВИНОГРАДОВА СИБИРСКОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 549.01.08:[53+54

№ госрегистрации 01201351650



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН

чл.-корр. РАН

 В.С.Шацкий

«12» 01 2016 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Моделирование процессов рудообразования и формирования месторождений  
благородных и редких металлов в различных геодинамических обстановках Азии

№ 0350-2015-0010

(промежуточный)

Научный руководитель темы



д.г.-м.н. К.В. Чудненко

подпись, дата

11.01.2016

Иркутск 2016

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д-р  
геолого-минералогических наук

  
11.01.16  
подпись, дата

К.В. Чудненко

Ответственные исполнители темы:

д-р геолого-минералогических наук

  
11.01.16  
подпись, дата

К.В. Чудненко (раздел 1)

кандидат геолого-минералогических  
наук

  
11.01.16  
подпись, дата

В.А. Бычинский (раздел 2)

УДК 549.01.08:[53+54

## Реферат

Отчет включает 18 стр., 8 илл., 1 табл., 8 ист.

Ключевые слова: физико-химические процессы, термодинамическое моделирование, рудные месторождения, компьютерные средства имитации, программные средства.

Целью исследования является физико-химическое моделирование процессов рудообразования различных по формационным признакам рудно-магматических систем (РМС) на основе ПК «Селектор», модифицированного для имитации рудообразующих процессов и решения задач мобилизации и транспортировки металлов в составе постмагматических, метаморфогенных или катагенных флюидов и локализации руд на геохимических барьерах реальных геологических объектов в различных геодинамических обстановках Азии.

## Содержание

Введение	5
Раздел 1. Построение термодинамических моделей процессов рудообразования и формирования месторождений в различных геодинамических обстановках Азии	6
Раздел 2. Исследование физико-химических закономерностей процессов формирования минеральных ассоциаций. Расчет термодинамических свойств рудных компонентов и соединений	10
Основные результаты проведенного исследования	15
Список публикаций по теме	16
Список использованных источников	18

## Введение

Невозможность создания одной «на все случаи» универсальной модели формирования и развития рудообразующих систем связано с уникальностью каждого природного объекта, с присущим только ему индивидуальным набором характеристик и параметров геохимических процессов. Поэтому особую актуальность приобретает разработка количественных схем эволюции конечного числа базовых структурно-динамических типов флюидно-магматических систем с моделями тех процессов, которые управляют растворением, переносом и отложением рудных и петрогенных элементов. Дальнейшее развитие теоретических разработок в области термодинамического моделирования процессов формирования месторождений, включая новые данные по термодинамическим свойствам минералов и моделям твердых растворов рудных компонентов, открывают перед исследователями возможность выхода на решение качественно иного, чем было ранее, круга проблем.

Главная задача проекта заключается в проведении полного цикла исследований от теоретического обоснования до алгоритмической реализации и существенного развития общей конфигурации, инфраструктуры и термодинамико-информационного обеспечения ПК «Селектор» [Чудненко, 2010] с целью проведения физико-химического моделирования процессов рудообразования различных по формационным признакам рудно-магматических систем (РМС) и локализации руд на геохимических барьерах реальных геологических объектов в различных геодинамических обстановках Азии.

## Раздел 1 Построение термодинамических моделей процессов рудообразования и формирования месторождений в различных геодинамических обстановках Азии

**1.1** Исследованы особенности формирования самородного золота на Au-Sb-Hg месторождении Кючюс (Якутия, Россия). Выделены четыре золотоносные стадии (три гипогенные и одна гипергенная), отличающиеся изменчивостью параметров оруденения, набором минеральных ассоциаций и уровнем золотоносности. Составы самородного золота I-IV генераций показаны на треугольнике составов Au-Ag-Hg (в ат.%) (рис. 1). Золото Ia встречается в кварц-карбонатных жилах и минерализованных зонах дробления, ассоциируется с кварцем, карбонатами и пиритом, его проба составляет  $\approx 610-620$  ‰. Высокая концентрация золота в золото-сульфидных рудах определяет промышленную значимость месторождения и является типоморфным признаком для золото-сульфидного типа оруденения. Золото II выделяется в стержневых кварц-антимонитовых жилах в составе кварц-антимонитовой минеральной ассоциации. Для него характерны незначительные количества ртути (0.01-0.07 вес.%) и высокая проба золота от 965-970 ‰. Самородное золото III изучено наиболее полно и представляет исключительный интерес в связи с высокой концентрацией в нём ртути. Оно крупнозернистое и расположено в межзерновых полостях и интратрудных трещинах в кварце, карбонатах и сульфидах. Золото III генерации находится в ассоциации с киноварью и Hg-содержащими блеклыми, проба золота (с учётом серебра, и ртути) составляет 710÷890‰. Наши данные по составу самородного золота III генерации хорошо совпадают с ранее полученными данными [Амузинский и др., 1992; Коньшев, 1995; Берзон и др., 1999]. Золото IV генерации (гипергенное) встречается в ассоциации с гипергенными минералами. Его характерной особенностью является концентрация ртути от 0 до 15.8%, серебра от 4.5 до 11.2 мас.%, проба колеблется от 770 до 860‰, в среднем составляет 820‰.

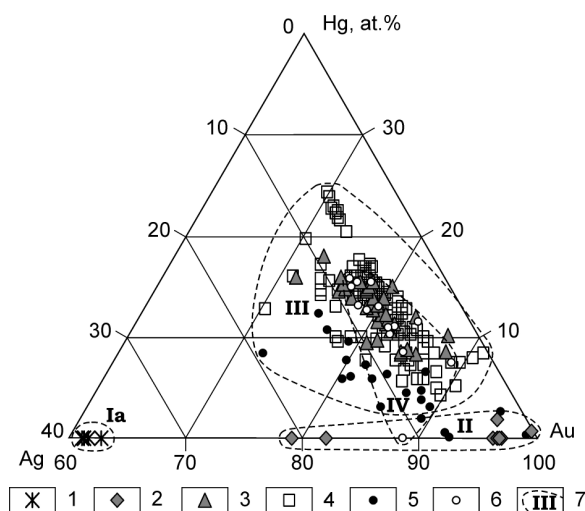


Рис. 1. Диаграмма составов природного золота Ag-Hg-Au на месторождении Кючюс. Генерации золота (Ia-IV): 1 – Ia, 2 – II, 3-5 – III (3 - новые данные, 4 – Амузинский и др. [1992], 5 - Коньшев [1995] и Берзон и др. [1999]), 6 – IV; 7 – контуры составов природного золота различных генераций.

**1.2** Разработаны гипогенные и гипергенные модели формирования самородного золота, включая ртутистое, на месторождении Кючюс. В расчетах, выполненных с помощью пакета программного обеспечения «Селектор-С», использованы новые модели твердых растворов в системе Ag-Au-Hg, что позволило провести детальное изучение физико-химических условий образования ртутистого золота в гидротермальных условиях и в зоне окисления (рис. 2). Результаты проведенных термодинамических модельных расчётов установили, что в рудах месторождения Кючюс развиты трехкомпонентные фазы самородного золота Ag-Au-Hg, а также бинарная фаза состава Au-Ag, причем в процессе формирования ртутистого золота основная роль принадлежит тройному твердому раствору Ag-Au-Hg. Данные закономерности хорошо согласуются с представительным эмпирическим материалом, собранным на месторождении. Получено термодинамическое подтверждение формирования руд месторождения Кючюс с образованием электрума на ранней основной продуктивной кварц-сульфидной стадии и тройных Au-Ag-Hg твердых растворов на более поздних второстепенных продуктивных стадиях. Разработанные модели могут быть применены к другим объектам, на которых встречаются самородное золото разной пробы, ртутистое золото и ртутистое серебро.

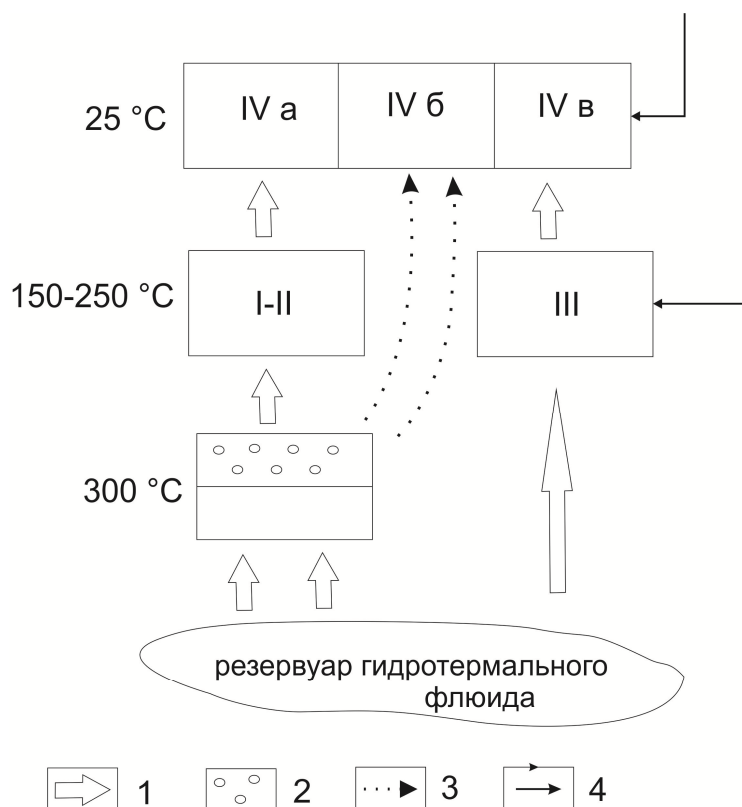


Рис. 2. Схема моделирования этапов формирования месторождения Кючюс. I-III – стадии гипогенного рудообразования, IVа, IVб, IVв – различные сценарии гипергенного минералообразования. 1 – восходящий флюид; 2 – газовая фаза, образующаяся в процессе кипения; 3 – восходящий поток летучих компонентов; 4 – метеорные воды.

1.3 Выполнено моделирование реальных минеральных парагенезисов для метапелитов Охотского гранулитового комплекса (Северо-Восток России). Получены решения с высокой степенью согласованности между модельными и наблюдаемыми минеральными ассоциациями по составу минералов и их модальным количествам (рис. 3), а также по железистости минералов, номеру плагиоклаза, величине кальциевости и марганцевистости граната, глиноземистости ортопироксена и биотита. Этот фундаментальный факт является прямой верификацией решения поставленной задачи, что доказывает выполнение принципа локального равновесия в изученных ассоциациях и хорошую согласованность использованных в моделях термодинамических данных.

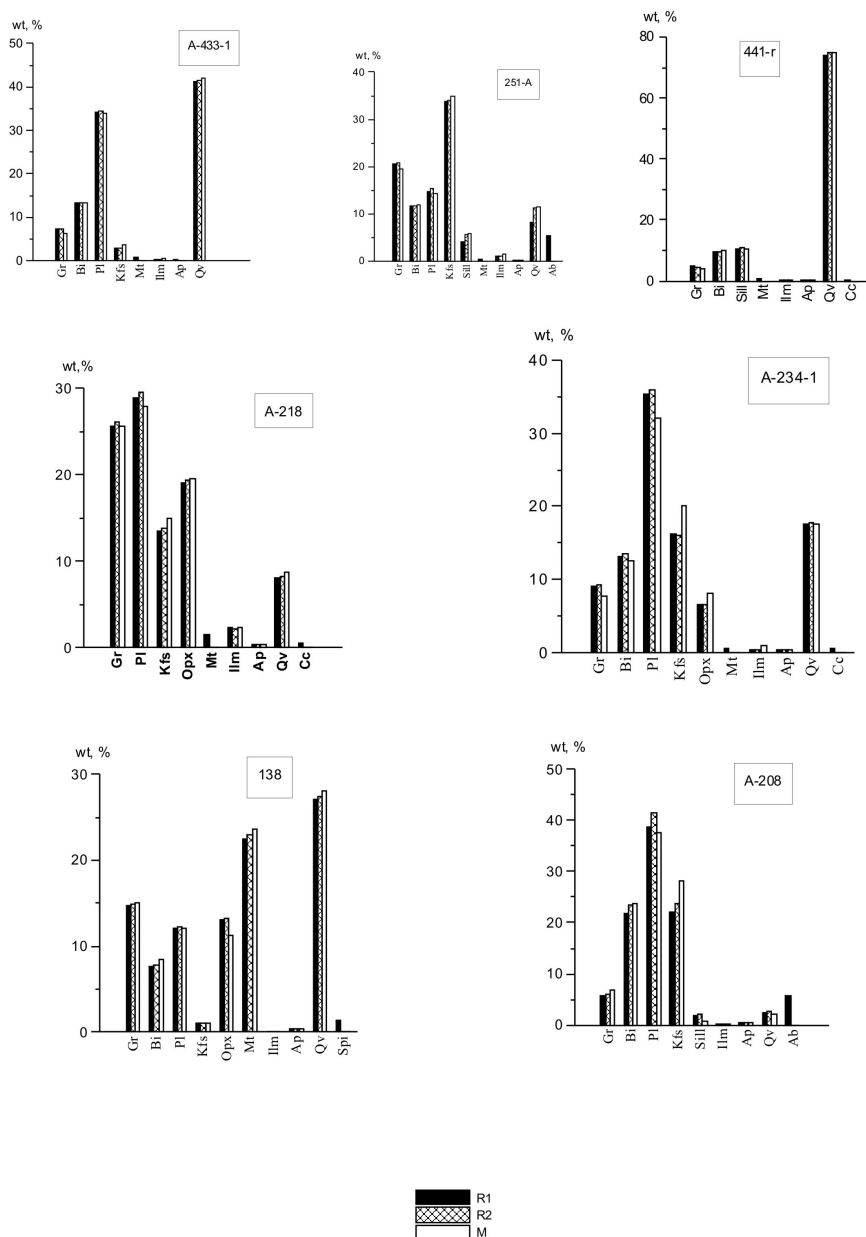


Рис. 3. Модальные количества минералов, вычисленные по реальным и эффективным химическим составам (R1, R2) и полученные в результате моделирования с помощью программного комплекса Селектор (M).



**1.4** Вероятные оценки P-T при метаморфизме гранулитов охотского комплекса, рассчитанные в результате моделирования, составляют 5.2-7 кбар по давлению и 620-770<sup>0</sup>С по температуре и, в целом, отвечают оценкам, полученным на основе экспериментальных термобарометров (рис. 4). Модельные минеральные ассоциации, близкие по составу минералов и их модам реальным парагенезисам, могут быть получены на ПК Селектор с одинаковым успехом в условиях инертного и вполне подвижного поведения воды, при весовом отношении флюид/порода, составляющего в первом приближении величину 0.03-0.3. С учетом определенных допущений вычисляется состав внешнего флюида, при котором совершался гранулитовый метаморфизм охотского комплекса. Величина окислительного потенциала этого флюида близка к величине потенциала кислорода на буфере C-CO-CO<sub>2</sub>, при величине P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, изменяющейся в пределах 1.8-0.35 кбар. Охотский метаморфический комплекс не является аналогом гранулитов юга Алданского Щита, поскольку для последних установлены значительно более высокие параметры P-T.

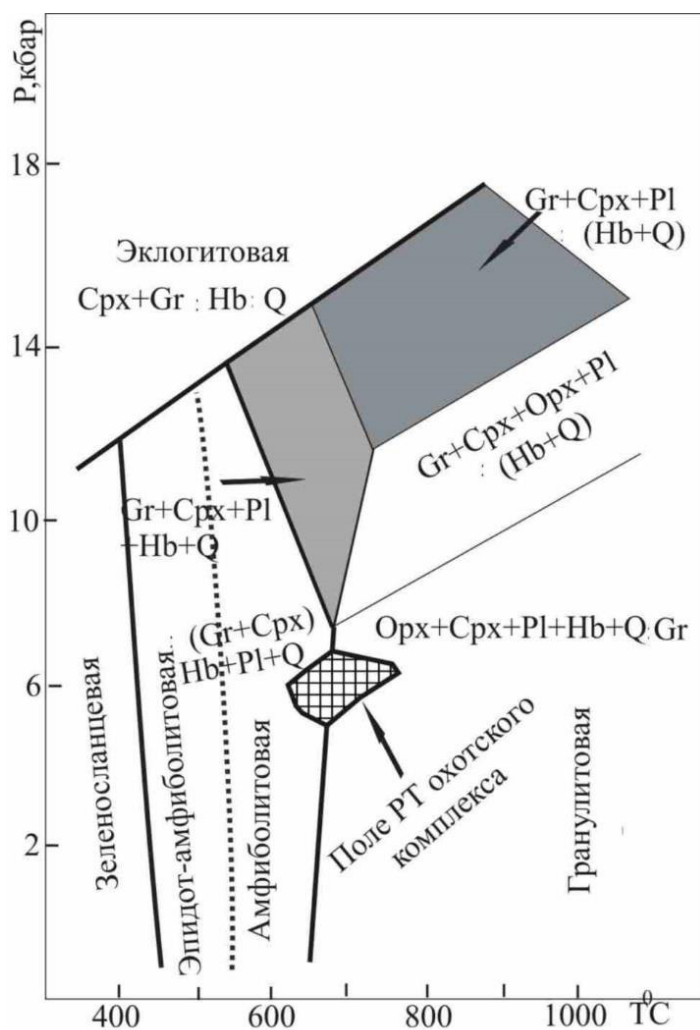


Рис.4. P-T поле условий образования метаморфических пород Охотского комплекса на диаграмме Паттисона [Pattison, 2003].

**1.5** Проведена термобарометрия минеральных ассоциаций метасоматитов и метапорфиритов Березитового месторождения (Верхнее Приамурье), выполненная с помощью новых геотермобарометров на основе гранат-биотит-плагиоклазовых и гранат-биотит-мусковит-плагиоклазовых минеральных равновесий. Оценки давления и температуры изменяются в небольших пределах и дают в среднем величину  $4\pm 0.31$  кбар и  $566\pm 12^\circ\text{C}$  (определение по центрам зональных гранатов) и  $4.4\pm 0.24$  кбар и  $624\pm 9^\circ\text{C}$  (определения по краевым зонам зональных гранатов). При этом P-T оценки метасоматитов и метапорфиритов отличаются незначительно друг от друга (Табл. 1). Уточненная термобарометрия метасоматитов и метапорфиритов подтверждает концепцию термального метаморфизма ранее сформированных березитовых ассоциаций и свидетельствует о том, что эти метасоматиты в формационном отношении не могут относиться к классическим березитам или грейzenам.

Таблица 1. Оценки давления и температуры в метасоматических породах (1-12) и метапорфиритах (13-16) Березитового месторождения по Grt–Bt–Pl–Qz\* (GBPQ), Grt–Bt–Pl–Ms–Qz (GBMP), Grt–Pl–Ms–Qz (GMPQ) геобаротермометрам

№ п/п	№ образца	Температура ( $^\circ\text{C}$ )	Давление (кбар)	Наименование геобартермометра	Примечание
1	8-1	620	5.3	GBPQ	Grt–rim
2	8-1	620	4.0	GBMP	Grt–rim
3	8-1	620**	4.0	GMPQ, P*** <sub>mg</sub>	Grt–rim
4	8-1	542	4.3	GBPQ	Grt–core
5	8-1	542	2.2	GBMP	Grt–core
6	8-1	542**	4.0	GMPQ, P <sub>mg</sub>	Grt–core
7	8/6	650	5.4	GBPQ	Grt–rim
8	8/6	650	4.4	GBMP	Grt–rim
9	8/6	650**	4.9	GMPQ, P <sub>mg</sub>	Grt–rim
10	8/6	597	5.4	GBPQ	Grt–core
11	8/6	597	4.0	GBMP	Grt–core
12	8/6	597**	4.4	GMPQ, P <sub>mg</sub>	Grt–core
13	1326	580	3.8	GBPQ	Grt–rim
14	1326	516	4.1	GBPQ	Grt core
15	1356	600	3.8	GBPQ	Grt–rim
16	1356	598	4.1	GBPQ	Grt–core

Примечания. \* – индексы минералов: Grt – гранат (Grt–rim – край, Grt–core – центр); Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Kfs – калиевый полевой шпат, Qz – кварц, Ms – мусковит; \*\* – температура принята по Grt–Bt термометру; \*\*\*P<sub>mg</sub> – расчет давления по магнезиальным реакциям.

## Раздел 2. Исследование физико-химических закономерностей процессов формирования минеральных ассоциаций. Расчет термодинамических свойств рудных компонентов и соединений.

**2.1** Рассчитаны стандартные энтальпии, энтропии и энергии Гиббса образования из элементов соединений системы Al–S–O–H. На основе анализа ошибок расчетов рекомендованы значения термодинамических характеристик минералов – сульфатов и гидросульфатов алюминия с кристаллизационной водой. Проведено тестирование достоверности полученных значений в сравнении с экспериментальными данными растворимости сульфата алюминия. Примером верификации полученных данных стало сопоставление с экспериментальной диаграммой растворимости сульфата алюминия – алуногена  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$  в воде. Была построена термодинамическая модель, в которой изменяются температура и массовое содержание  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Сравнение результатов моделирования с данными по растворимости сульфата алюминия представлены на рисунке 5. В целом результаты моделирования имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, что позволяет использовать полученные значения термодинамических характеристик сульфатов и гидросульфатов алюминия в прикладных геохимических расчетах.

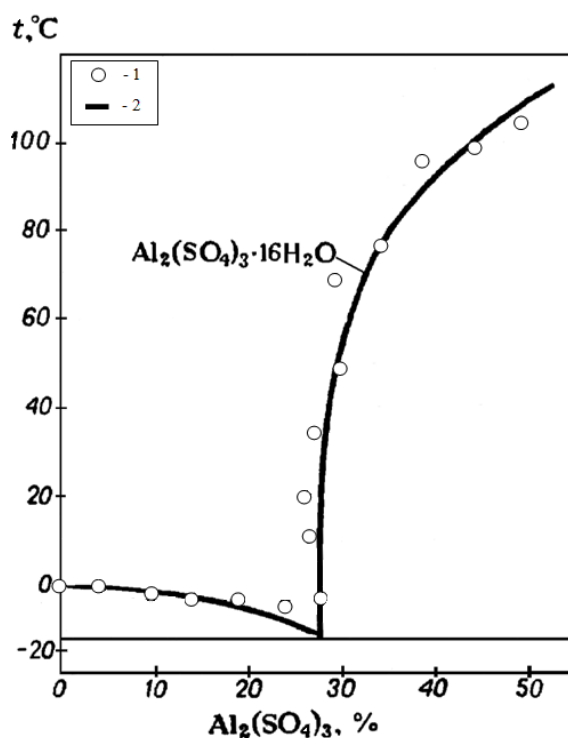


Рис. 5. Диаграмма растворимости сульфата алюминия в воде. 1- расчётные данные в ПК «Селектор», 2- данные по [Киргинцев и др., 1972; Taylor and Bassett, 1952].

**2.2** Выполнена калибровка термодинамических свойств хиолита – минерала, родственного криолиту и часто сопутствующего ему в рудах. Ранее на основании единственного измерения низкотемпературной теплоемкости, выполненного на образце синтетического хиолита в интервале температур 5.83...315.75 К методом адиабатической калориметрии, были рассчитаны термодинамические свойства хиолита путем «компьютерного сглаживания» [Stuve, Ferrante, 1980]. Однако расхождения экспериментальных и расчетных величин свидетельствует, что в результате «компьютерной» обработки в величины теплоемкости внесена ошибка, увеличивающаяся с ростом температуры (рис. 6). Нами выполнено интегрирование экспериментально измеренной зависимости теплоемкости от температуры (с учетом экстраполяции к 0 К), что позволило определить величину стандартной энтропии, равную 556.044 ДжК<sup>-1</sup>моль<sup>-1</sup>. Результаты физико-химического моделирования подтверждают, что это значение позволяет получить более достоверные результаты, чем с использованием данных из [Stuve, Ferrante, 1980].

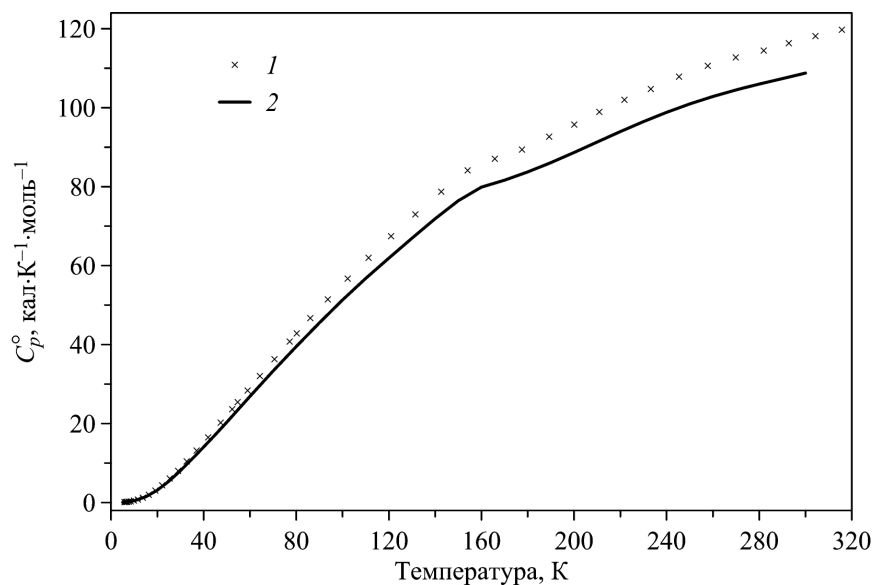


Рис. 6. Низкотемпературная теплоемкость хиолита по данным [Stuve, Ferrante, 1980]: 1 – измеренные величины; 2 – рекомендуемые величины (результат «компьютерной» обработки).

**2.3** Выполнено физико-химическое моделирование образования щелочно-силикатных расплавов в области температур 298.15–1473 К. Корректировка результатов расчета на основе спектроскопических данных позволила согласовать термодинамические свойства силикатов лития, натрия, калия и рассчитать термодинамические свойства структурных единиц Q<sup>n</sup>, существующих в щелочно-силикатных расплавах (рис. 7). Расхождение расчетных и экспериментальных данных является следствием недостатка экспериментальных данных по литиево- и калиево-силикатным расплавам. Сопоставление данных физико-химического моделирования с экспериментальными результатами позволяет сделать вывод о применимости разработанного метода расчета и

согласования термодинамических свойств для компонентов силикатного расплава, содержащего в качестве катионов-модификаторов литий, натрий или калий.

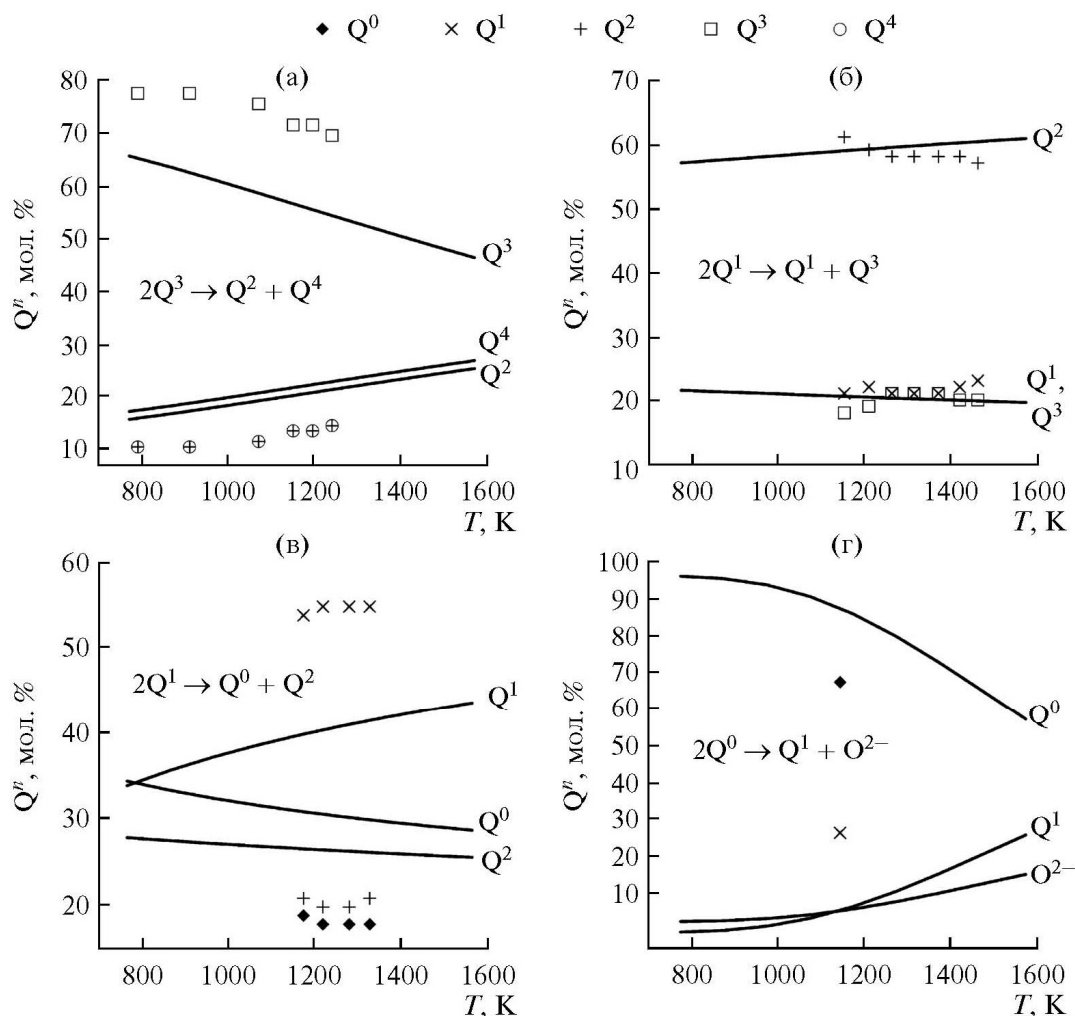


Рис. 7. Распределение структурных единиц  $Q^n$  в зависимости от температуры для системы  $x\text{Na}_2\text{O} \cdot (1-x)\text{SiO}_2$ , мол. %: а –  $x = 33$ ; б –  $x = 50$ ; в –  $x = 60$ ; г –  $x = 67$ . Маркерами показаны экспериментальные данные спектроскопии комбинационного рассеивания.

**2.4** Исследован процесс автоклавного растворения отечественных высококремнистых бокситов Североонежского месторождения соляной кислотой концентрацией 5 – 30% в интервале температур 150-180 °С с продолжительностью 1 – 3 часа. Степень извлечения алюминия и железа в раствор составила >95%. Построены зависимости растворения основных алюминийсодержащих минералов бемита и каолинита от температуры и продолжительности растворения (рис. 8). Полученные результаты позволяют выделить 3 лимитирующих стадии реакции разложения каолинита:  $T = 150-160$  °С – химическая реакция ( $E_a = 70.88$  кДж/моль,  $n = 0.54$ ),  $T = 160-170$  °С – промежуточная область ( $E_a = 40.88$  кДж/моль),  $T = 170-180$  °С – внутренняя диффузия ( $E_a = 22.66$  кДж/моль,  $n = 0.9$ ). Изучена возможность применения растворов после автоклавного растворения в

качестве смешанных коагулянтов. Полученный коагулянт имеет модуль активности  $1/3$ , что соответствует формуле –  $Al(OH)Cl_2$ . Проведенные исследования позволяют оценить физико-химические параметры формирования месторождений высококремнистых бокситов.

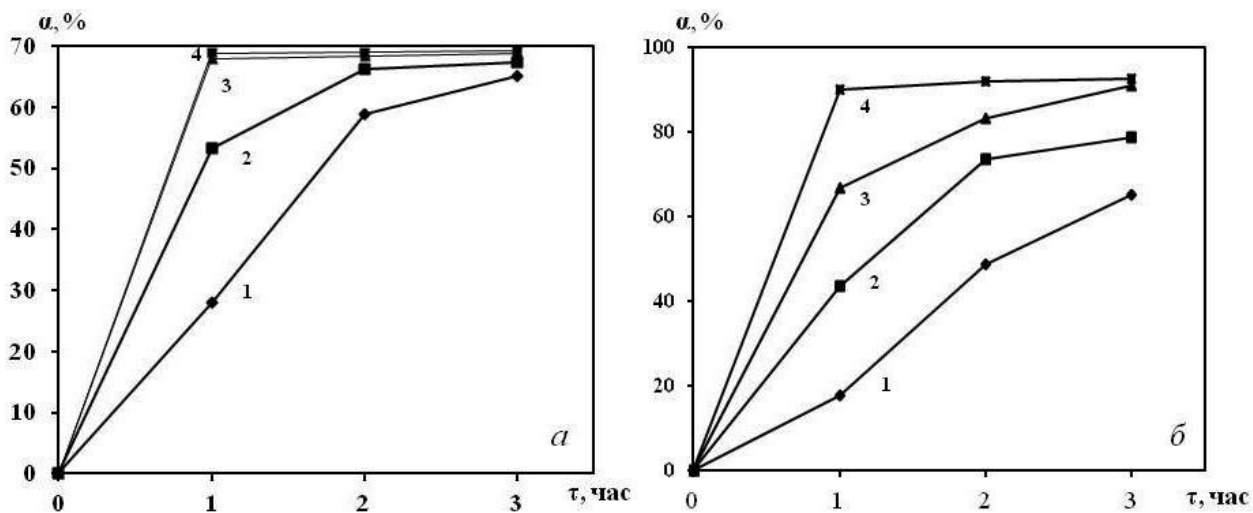


Рис. 8. Зависимость степени растворения каолинита (а) и бемита (б) от продолжительности выщелачивания и температуры: 150 °C (1), 160 °C (2), 170 °C (3), 180 °C (4).

## Основные результаты проведённого исследования

Разработаны гипогенные и гипергенные модели формирования самородного золота, включая ртутистое, на Au-Sb-Hg месторождении Кючюс (Якутия, Россия). В расчетах, выполненных с помощью программного комплекса «Селектор-С», использованы новые модели твердых растворов в системе Ag-Au-Hg, что позволило провести детальное изучение физико-химических условий образования ртутистого золота в гидротермальных условиях и в зоне окисления. Получено термодинамическое подтверждение формирования руд месторождения Кючюс с образованием электрума на ранней основной продуктивной кварц-сульфидной стадии и тройных Au-Ag-Hg твердых растворов на более поздних второстепенных продуктивных стадиях. Разработанные модели могут быть применены к другим объектам, на которых встречаются самородное золото разной пробы, ртутистое золото и ртутистое серебро.

Выполнено моделирование реальных минеральных парагенезисов для метapelитов Охотского гранулитового комплекса (Северо-Восток России). Вероятные оценки P-T при метаморфизме гранулитов охотского комплекса, полученные моделированием составляют 5.2-7 кбар по давлению и 620-770°C по температуре и близки оценкам, полученным на основе экспериментальных термобарометров. Величина окислительного потенциала этого флюида близка к величине потенциала кислорода на буфере C-CO-CO<sub>2</sub>, при величине P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, изменяющейся в пределах 1.8-0.35 кбар. Проведенное исследование позволило сделать вывод, что Охотский метаморфический комплекс не является аналогом гранулитов юга Алданского щита, поскольку для последних установлены значительно более высокие параметры P-T.

Проведена термобарометрия минеральных ассоциаций метасоматитов и метапорфиритов Березитового месторождения (Верхнее Приамурье), выполненная с помощью новых геотермобарометров на основе гранат-биотит-плагноклазовых и гранат-биотит-мусковит-плагноклазовых минеральных равновесий. Оценки давления и температуры изменяются в небольших пределах и дают в среднем величину 4±0.31 кбар и 566±12°C (определение по центрам зональных гранатов) и 4.4±0.24 кбар и 624±9°C (определения по краевым зонам зональных гранатов). Уточненная термобарометрия метасоматитов и метапорфиритов подтверждает концепцию термального метаморфизма ранее сформированных березитовых ассоциаций и свидетельствует о том, что метасоматиты месторождения в формационном отношении не могут относиться к классическим березитам или грейzenам.

## Список публикаций по теме

1. Chudnenko K.V., Palyanova G.A., Anisimova G.S., Moskvitin S.G. Physicochemical modeling of formation of Ag-Au-Hg solid solutions: Kyuchyus deposit (Yakutia, Russia) as an example // Applied Geochemistry, 2015, V. 55, P. 138-151.
2. Авченко О.В., Вах А.С., Чудненко К.В. Термобарометрия минеральных равновесий в метасоматитах и метапорфиридах Березитового месторождения (Верхнее Приамурье) // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле, 2015, Т. 2, № 26, С. 78-83.
3. Авченко О.В., Чудненко К.В., Бадрединов З.Г., Шарова О.И. Анализ минеральных парагенезисов метапелитовых гнейсов Охотского гранулитового комплекса методом минимизации термодинамического потенциала Гиббса // Геология и геофизика, 2015, Т. 56, № 8, С. 1448-1464.
4. Авченко О.В., Вах А.С., Пахомова В.А., Чудненко К.В. О составе и примерных объемах растворов при образовании метасоматических пород Березитового месторождения (верхнее Приамурье, Россия) // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 24-25.
5. Авченко О.В., Чудненко К.В., Бадрединов З.Г. Определение параметров флюидного режима гранулитовых минеральных парагенезисов Охотского метаморфического комплекса методом минимизации термодинамического потенциала Гиббса // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 25-26.
6. Бычинский В.А., Тупицын А.А., Чудненко К.В. Об ошибочной величине стандартной энтропии хиолита // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 35-37.
7. Бычинский В.А., Тупицын А.А., Чудненко К.В. Согласование величин температуры кипения и критической температуры высших гомологов // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 37-39.
8. Валеев Д.В., Бычинский В.А., Чудненко К.В. Исследование кислых алюминийсодержащих растворов методом моделирования физико-химических равновесий минимизацией термодинамических потенциалов // Журнал неорганической химии, 2015, том. 60, №. 11, с. 1428-1432.
9. Гомболевский Г.И., Бычинский В.А., Чудненко К.В. Физико-химическое взаимодействие в системе Si-Al-Ti-Ca-Mg-Fe-Na-K-O с учетом твердых растворов // Флюидный режим эндогенных



процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 55-56.

10. Еремин О.В., Русаль О.С., Бычинский В.А., Чудненко К.В., Фомичев С.В., Кренев В.А. Расчет стандартных термодинамических потенциалов сульфатов и гидрокосульфатов алюминия // Журнал неорганической химии, 2015, Т. 60, № 8, С. 1048-1055.

11. Королева О.Н., Бычинский В.А., Тупицын А.А., Штенберг М.В., Кренев В.А., Фомичев С.В. Физико-химическая модель как метод расчета и согласования термодинамических свойств структурных единиц щелочно-силикатных расплавов // Журнал неорганической химии, 2015, Т. 60, № 9, С. 1211-1217.

12. Ощепкова А.В., Бычинский В.А. Моделирование минерального состава Байкальских осадков как метод оценки геологических событий региона // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 119-121.

13. Перепечко Ю.В., Сорокин К.Э., Чудненко К.В., Шарапов В.Н. Динамика теплопереноса в компактируемых проницаемых зонах континентальной литосферы над астенотлинзами // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 121-123.

14. Шарапов В.Н., Чудненко К.В., Томиленко А.А. О физико-химической динамике карбонатизации пород литосферной мантии под кратоном Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2015, т. 56, № 5. С. 890-905.

15. Шарапов В.Н., Кузнецов Г.В., Томиленко А.А., Чудненко К.В. Развитие метасоматической зональности в породах мантийного клина над очагами базитовых магм // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 194-196.

16. Шестаков С.А. Возможности облегченного интерфейса создания физико-химических моделей // Международный студенческий научный вестник, 2015, № 4-4, С. 687.

17. Штенберг М.В., Королева О.Н., Бычинский В.А. Физико-химическая модель как метод расчета и согласования термодинамических свойств структурных единиц силикатных систем // В сб.: На стыке наук. Физико-химическая серия III Международная научная Интернет-конференция. ИП Синяев Д. Н., Казань, 2015. С. 130-132.

### Список использованных источников

1. Амузинский В.А., Москвитин С.Г., Павлова Л.А. Твердый раствор предельной концентрации ртути в самородном золоте // Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск, 1992, с. 50-64.
2. Берзон Р.О., Брызгалов И.А., Конышев В.О. и др. Геологическое строение, минеральный состав и условия формирования золото-ртутного месторождения Кючюс (Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений, 1999, т. 41, № 6, с. 485-506.
3. Киргинцев А.Н., Трушников Л.Н., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Л.: Химия, 1972. 248 с.
4. Конышев В.О. Модель золоторудного поля в структурах тектоно-магматической активизации, месторождение Кючюс // Руды и металлы, 1995, № 4. С.52-64.
5. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения – Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2010. – 287 с.
6. Pattison D.R.M. Petrogenetic significance of orthopyroxene-free garnet + clinopyroxene + plagioclase + quartz-bearing metabasites with respect to the amphibolite and granulite facies // J. Metamorph. Geol. 2003. V. 21. P. 21–34.
7. Stuve J.M., Ferrante M.J. Low-temperature heat capacities and high-temperature enthalpies of chiolite ( $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ ) // Report of investigation N 8442. Washington: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1980. 8 p.
8. Taylor D., Bassett H. The system  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  // J. Chem. Soc., 1952, p. 4431-4442.