

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-ОСАДОЧНОГО РУДНОГО ТЕЛА

Д.В.Гричук

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Геологический факультет, кафедра геохимии

Проблема участия магматических флюидов – одна из наиболее интригующих в геохимии гидротермально-осадочного рудогенеза. Открытия современных гидротерм на дне океана в островных дугах, образующих во многих случаях рудные постройки промышленных масштабов со значительными запасами Cu, Zn, Fe и Ag определяют актуальность этой проблемы не только для теории, но и геологической практики. Золотоносность глубоководных сульфидов привлекает большое внимание морских геологов [1]. Труднодоступность объектов, находящихся на значительных глубинах для детального изучения определяет интерес в использовании для анализа процессов рудообразования метода термодинамического моделирования. Цель данной работы – путем построения и исследования термодинамической модели подводной гидротермальной системы определить роль магматического флюида в формировании золотоносности образующихся руд.

Для этой цели нами была использована методика моделирования гидротермально-осадочного рудного тела, растущего на поверхности дна моря [2, 3]. Модель подводной гидротермальной системы представляла проточный ступенчатый реактор, включающий нисходящую ветвь конвекции, подрудный канал и зону рудоотложения (рис. 1). В нисходящей ветви нагревающаяся морская вода реагирует с вмещающими породами и обогащается рудными металлами. Магматический газ (если его поступление учитывалось в данном варианте расчета) добавляется в основание подрудного канала. В зоне рудоотложения моделировался рост рудного тела за счет охлаждения питающего раствора и смешения его с морской водой. Эволюция системы во времени достигалась пропусканием через проточный ступенчатый реактор последовательных порций раствора. При этом учитывалось разрастание зоны метасоматизированных пород в нисходящей ветви [4].

Специфика рассматриваемой модели заключается в расчете комбинированной – тепловой и физико-химической модели растущего рудного тела [2]. Рудное тело в тепловой модели аппроксимировано полушарием с центром в точке поступления рудообразующего раствора. Рудообразующий раствор фильтруется через рудное тело к его поверхности и изливается в придонную воду (рис. 2). Теплоперенос внутри рудного тела происходит конвективно - за счет течения раствора, и кондуктивно - за счет теплопроводности твердого

вещества. Потеря тепла во внешнюю среду происходит посредством излияния профильтрованного через тело раствора и теплоотдачи с поверхности тела. В работе [2] было получено аналитическое решение тепловой задачи, на основе которого определяются параметры проточного ступенчатого реактора при расчете термодинамической модели.

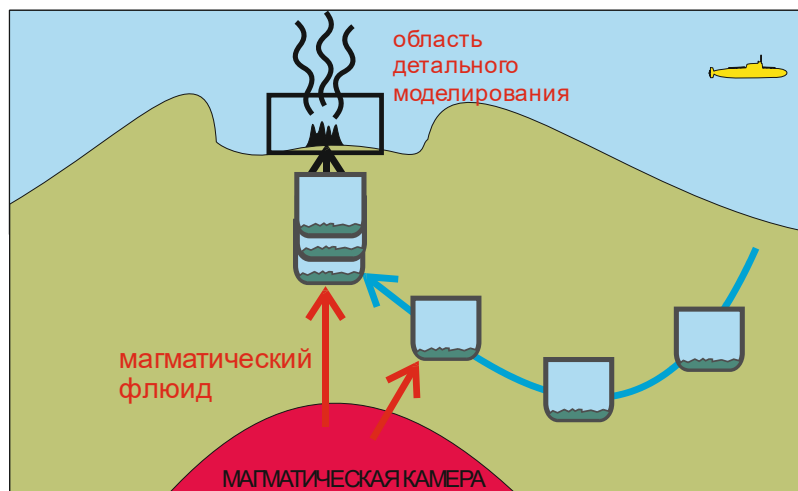


Рис. 1. Принципиальная схема модели конвективной гидротермальной системы с участием магматических флюидов.

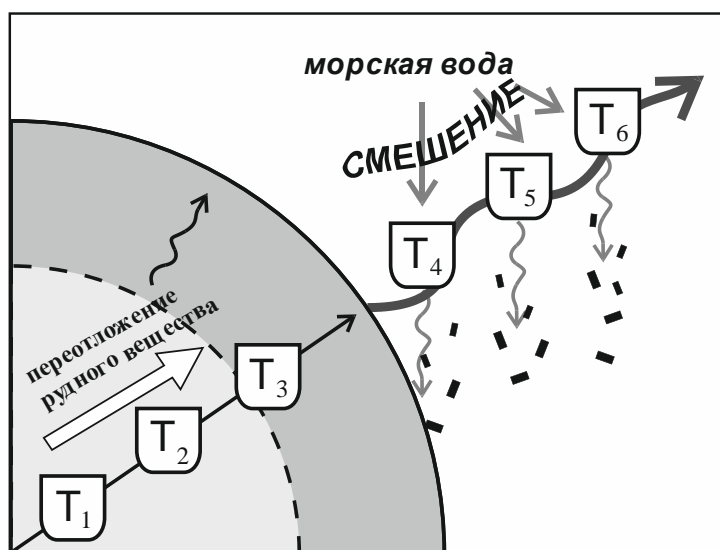


Рис. 2. Схема динамики вещества при моделировании растущего рудного тела.

Термодинамическая модель зоны рудоотложения включает две составляющие. Первая описывает процессы отложения и замещения вещества при фильтрации раствора внутри рудного тела, вторая - отложение вещества на поверхности тела при смешении истекающих растворов с окружающей морской водой (рис. 2). Гидротермальный раствор, фильтрующийся через рудное тело к более холодной периферии, осаждает рудное вещество, и масса тела увеличивается путем «разрастания изнутри» (в природе это соответствует заполнению каналов внутри рудной постройки с последующими гидроразрывами и брекчированием руд). Особенностью ступенчатого реактора для зоны рудоотложения является то, что границы температурных ступеней со временем

перемещаются в пространстве вследствие разрастания рудного тела. В результате вещество, отложенное при некоторой температуре, оказывается затем в область более высоких температур, что может вызвать метасоматическое замещение ранее отложенного рудного вещества и приводит к формированию зонального рудного тела. Осадок, образующийся при смешении гидротермального раствора, истекающего из рудного тела, с морской водой, присоединяется к рудному телу, увеличивая его массу.

Задание в модели такой динамики процесса стало возможно в пакете HCh благодаря технологии «открытости сверху» [5]: расчет тепловой задачи и массопереноса проводился с помощью специально разработанного макроса в Microsoft Excel, который обращался для расчета равновесий на ступенях реактора к пакету HCh. Подробно методика расчета модели изложена в [3], где описаны расчеты аналогичной модели для главных металлов глубоководных массивных сульфидных руд – Fe, Cu, Zn. Поведение Au в такой модели ранее не рассматривалось из-за недостаточной определенности термодинамических свойств растворенных форм золота.

Расчеты проводились для 16-элементной химической системы H-O-K-Na-Ca-Mg-Fe-Al-Si-C-S-Cl-Cu-Zn-Pb-Au в интервалах температур 70-370°C и давлений 200-500 бар. Рассчитываемые мультисистемы включали 57 возможных минералов и водный раствор, содержащий 85 простых и комплексных ионов и молекул. Термодинамические свойства веществ взяты из банка данных UNITHERM (по состоянию на 2018 г.), термодинамические свойства комплексов золота ( $\text{AuOH}^\circ$ ,  $\text{AuCl}_2^-$ ,  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ ,  $\text{AuHS}(\text{H}_2\text{S})^\circ$ ), были нами уточнены путем обработки экспериментальных данных [6]. Параметры динамики модели: дебит системы 100 кг/с, шаг по времени (порции раствора)  $10^8$  с (~3 года).

В качестве вмещающих пород в вариантах расчетов взяты андезиты и риолиты, что соответствует вулканам островных дуг. Суммарное отношение порода/вода в нисходящей ветви для первой порции раствора задано равным 1 кг породы/1кг р-ра, и снижалось в последующих шагах расчета пропорционально  $1/\sqrt{n}$ , где  $n$  – номер порции раствора [4]. Состав магматических газов принят по данным для вулкана Кудрявый [7, 8] с поправкой на давление дегазации [3]. Содержания Au в породе и магматическом флюиде взяты равными  $3 \times 10^{-8}$  и  $1.2 \times 10^{-8}$  моль/кг (что соответствует 6 ppb и 2.4 ppb). Рассчитывались варианты модели с питанием только морской водой («конвективная модель») и с различной долей магматического флюида («комбинированная модель»).

#### Результаты моделирования.

Расчеты показали, что нагретая морская вода в нисходящей ветви системы эффективно извлекает золото из вмещающих пород. За счет этого при заданном П/В с первой порцией раствора в канал поступает золота  $3 \times 10^{-8}$  моль/кг, что больше, чем

содержание его в магматическом растворе. Однако со временем это поступление уменьшается из-за промывки нисходящей ветви (до  $3 \times 10^{-9}$  моль/кг в 50-й порции).

В подрудном канале золото в твердой фазе не фиксируется во всех рассчитанных вариантах модели, и в зону рудоотложения раствор поступает с значительным недосыщением по кристаллическому Au.

В модели с конвективным питанием (т.е. только морской водой) формируется пирит-ангидрит-кремнистое рудное тело с небольшим количеством сульфидов цветных металлов (халькопирит, борнит, сфалерит, галенит) и примесью алюмосиликатов (хлорит, тальк, пирофиллит). По мере роста оно постепенно приобретает зональное строение (за счет переотложения вещества) с преобладанием ангидрита в центральной части и обогащением пиритом на периферии. Халькопирит и борнит присутствуют в средних зонах, отвечающих температурам 300-240°C, а сфалерит и галенит – в периферических. При заданном дебите гидротермальной системы на 50-м шаге расчета (~150 лет) рудное тело достигает массы около 185 тыс. т, при валовом содержании (в %) Zn 2.3, Cu 0.8, Pb 0.75.

Золото начинает накапливаться в модельном рудном теле с 4-й порции раствора, когда температура поверхности рудного тела снижается ниже 220°C. Далее оно накапливается в периферической части рудного тела в практически одинаковом интервале температурных зон – от 240 до 200°C (рис. 3а). При этом, поскольку тело разрастается со временем, область отложения Au смещается от центра тела, т.е. золото переотлагается к периферии (рис. 3б). Максимальная концентрация золота достигается в узкой зоне, и со временем (к 20-й порции раствора) стабилизируется на величинах около 40 г/т.

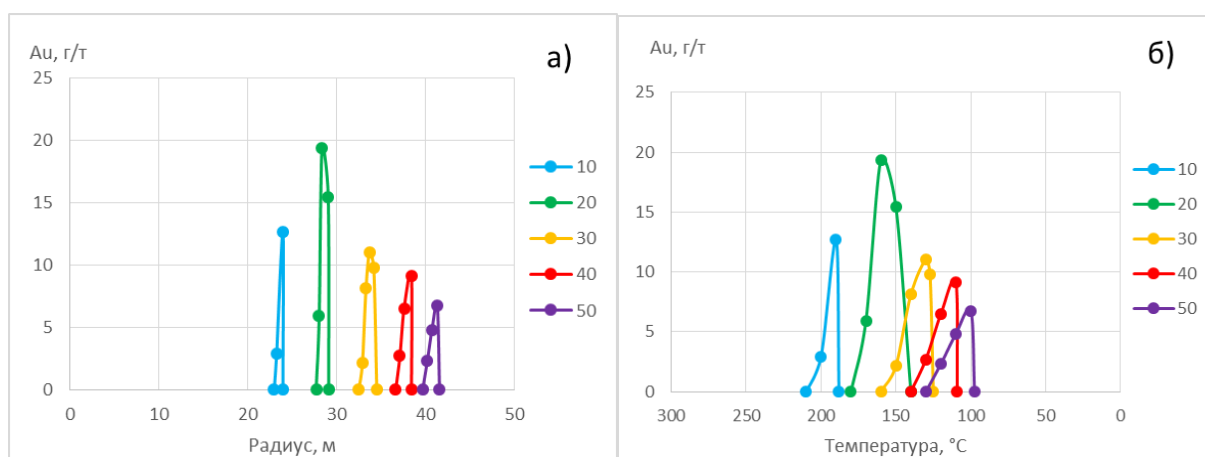


Рис. 3. Распределение золота (г/т) в веществе растущего рудного тела. Конвективная модель (питание только морской водой), риолитовый субстрат. а) по температурным зонам; б) по радиусу рудного тела. Цветом показаны порции раствора. Крайняя правая точка на каждой кривой отвечает поверхности тела.

Характерное распределение золота в объеме рудного тела для системы с комбинированным питанием показано на рис. 4. Оно отличается от вышеописанного. Хотя

золото присутствует так же в узкой области на периферии рудного тела, но оно не привязано к определенной температурной зоне (рис. 4а). По рис. 4б видно, что накопление золота происходит на поверхности рудного тела, в значительной мере за счет осадков, оседающих на тело при смешении высачивающегося гидротермального раствора с окружающей морской водой. Оказываясь внутри растущей постройки, золото быстро растворяется и переотлагается на ее поверхность.

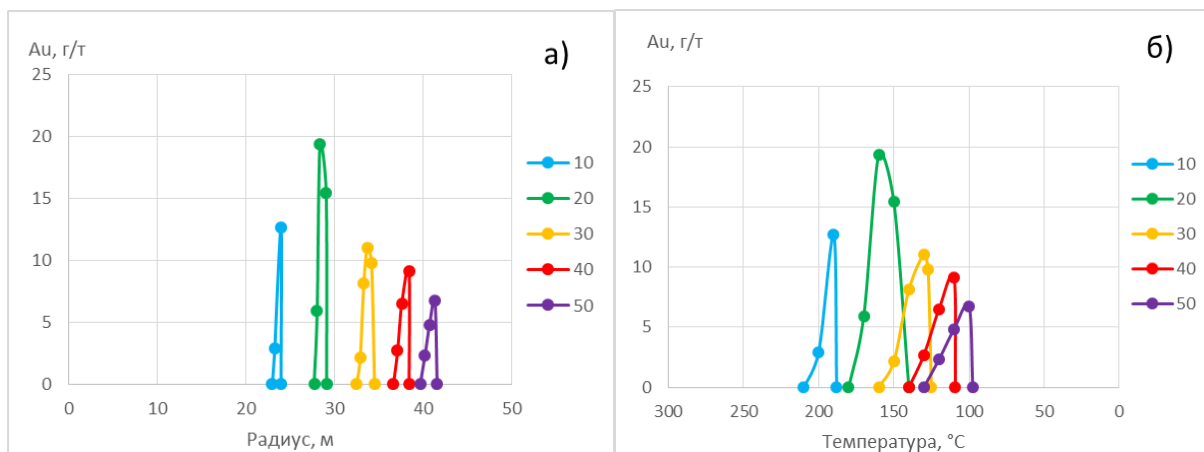


Рис. Д4. Распределение золота (г/т) в веществе растущего рудного тела. Комбинированная модель с 2% магматического флюида в питании гидротермальной системы, риолитовый субстрат. а) по температурным зонам; б) по радиусу рудного тела.

Суммарное накопление Au в рудном теле показано на рис. 5. Наибольшие количества золота в модельном рудном теле получены при питании морской водой. Даже небольшая добавка магматического флюида снижает количество отложенного золота, и при доле флюида более 3% оно не фиксируется в рудной постройке. Как показал анализ результатов, главной причиной этого является высокая кислотность магматического флюида, возникающая при его охлаждении ( $pH_T \sim 1$ ). При такой кислотности золото (как и цветные металлы) остается в растворе и выносятся за пределы рудного тела.

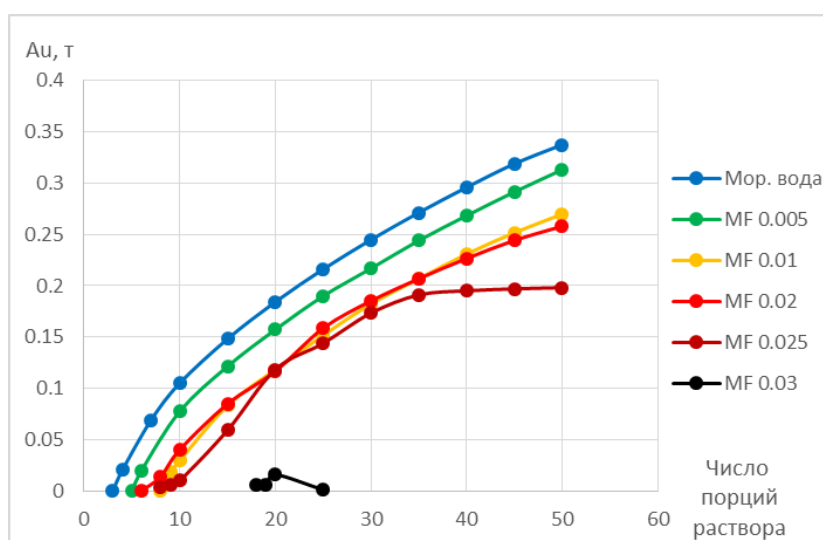


Рис. 5. Накопление Au в растущем рудном теле в зависимости от характера питания системы. Мор.вода – конвективная система, MF – доля магматического флюида.

#### Выводы:

1. В нисходящей ветви конвекции нагретая морская вода способна полностью извлекать Au из вмещающих пород. Достигаемые при этом уровни содержания Au соответствуют концентрациям его в газах вулканических фумарол. Поступающие в восходящую ветвь конвекции флюиды характеризуются сильным дефицитом насыщения по самородному золоту.

2. При росте придонного рудного тела Au перераспределяется в его периферическую часть, где формируется подвижный геохимический барьер. В конвективных системах с морским питанием отложение Au происходит в интервале  $T$  240-210°C внутри постройки.

3. Участие магматического флюида в питании системы оказывает негативное влияние на отложение золота из-за его высокой кислотности. При доле флюида более 3% золото полностью выносится из рудного тела. Присутствие Au в рудном теле в системах с комбинированным питанием определяется в основном его осаждением при смешении гидротермального раствора с придонной водой на поверхности тела.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00244.*

#### Литература:

1. Petersen S., Krätschell A., Augustin N., Jamieson J., Hein J.R., Hannington M.D. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. // *Marine Policy*, 2016, vol.70, 175-187.
2. Гричук Д.В., Абрамова Е.Е., Тутубалин А.В. Термодинамическая модель субмаринного рудообразования в рециклинговой гидротермальной системе. // *Геология рудных месторождений*, 1998, № 1, 3-19.
3. Grichuk D.V. Thermodynamic model of ore-forming processes in a submarine island-arc hydrothermal system. // *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, no. 13, 1069–1100.
4. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М., Научный мир, 2000, 304 с.
5. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемые Windows. // *Геохимия*, 2008, № 8, 898-903.
6. Stefánsson A., Seward T.M. Gold(I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500°C at 500 bar. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, vol. 68, no. 20, 4121-4143.
7. Taran Y.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I. Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril islands. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 9, 1749-1761.
8. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V, Mokhov A.V., Trubkin N.V., Gorbacheva S.A. Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: Evidence from the active Kudryavy volcano, Kurile Islands. // *Mineralium Deposita*, 2006, vol. 40, no. 8, 828–848.