



УДК 550.41.553.3 (491.4)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ СУБМАРИННОЙ РАЗГРУЗКИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

С.М.СУДАРИКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены основные методы и проанализированы результаты моделирования геохимических процессов в зоне субмаринной разгрузки гидротермальных растворов срединно-океанических хребтов. Исходные материалы для моделирования были получены в нескольких морских экспедициях, в том числе в русско-французской экспедиции *SERPENTINE* на научно-исследовательском судне «*Pourquoi Pas?*» (2007 г.). Подтверждением данных полевых наблюдений, лабораторных экспериментов и теоретических построений служат результаты анализа регрессионной модели смешения гидротермальных растворов и морской воды. Проведена верификация модели и оценено качество химического анализа, определена степень и характер участия компонентов раствора в гидротермальном процессе, рассчитан состав конечных растворов на основе обратного прогнозирования концентрации элемента по характеру регрессии, подготовлены данные для термодинамического моделирования. Регрессионная модель формирования кислотно-основных свойств и хлоридности рудообразующих гидротерм подтверждает работоспособность модели двойной диффузионной конвекции формирования состава гидротермальных растворов. Дифференциация растворов по концентрациям хлорид-иона в зависимости от температуры и водородного показателя pH в рамках этой модели связывается с фазовыми превращениями и смешением флюидов двух конвекционных ячеек, одна из которых является зоной циркуляции рассола. Для проведения компьютерного термодинамического моделирования созданы гидро-геохимическая и физико-химическая модели зоны гидротермальной разгрузки. Верификация модели проведена по изменению концентраций марганца в гидротермальном плюме. Преобладающими формами миграции марганца в плюме являются Mn^{2+} , $MnCl^+$, $MnCl_2$. В геохимической структуре плюма выделено две зоны: 1) высоких температур (350-100 °C) с преобладанием хлоридных комплексов – восходящий плюм; 2) низких температур (100-2 °C) с доминированием формы переноса в виде свободного двухвалентного иона – латеральный плюм. Сульфатный комплекс наблюдается в незначительных количествах (1,5 %) в латеральном плюме, гидроксидный – устойчив при температуре 325-125 °C и может наблюдаться только в восходящем плюме. Результаты моделирования практически полностью соответствуют натурным наблюдениям. Верификация термодинамической модели свидетельствует о ее работоспособности и позволяет перейти к следующему этапу исследований – изучению характера геохимического рассеяния основных рудных компонентов гидротермальных растворов Fe, Cu, Zn и др.

Ключевые слова: срединно-океанический хребет, регрессионная модель, термодинамическое моделирование, гидротермальный раствор, формы миграции

Как цитировать эту статью: Судариков С.М. Моделирование геохимических процессов в зоне субмаринной разгрузки гидротермальных растворов // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 284-291. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.284

Введение. Со времени открытия активной гидротермальной деятельности на срединно-океанических хребтах (1977 г., глубоководный обитаемый аппарат «Элвин», Галапагосский рифт) изучение металлоносных гидротермальных растворов, формирующих скопления глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС), которые обогащены Cu, Zn, Pb, Ag, Au, а также рядом других редких химических элементов, на дне Мирового океана (далее Океан), стало важной составной частью исследований международного научного сообщества в области морской геологии. С точки зрения прикладной океанографии при поисках активных гидротермальных полей весьма перспективным оказалось изучение структуры придонных вод, геохимических и гидрофизических особенностей ореолов рассеяния – гидротермальных плюмов вблизи черных курильщиков [1, 2, 4, 6, 7, 9].

Глубоководные гидротермальные источники на дне Океана в последнее время вызывают большой практический интерес. Это подтверждается подписанным в октябре 2012 г. контрактом между Российской Федерацией и Международным органом по морскому дну (МОМД ООН). Россия стала обладательницей эксклюзивных прав на изучение и дальнейшее освоение месторождения ГПС в пределах российского разведочного района (РРР-ГПС) в Срединно-Атлантическом хребте (САХ) (12°48'36"–20°54'36"с.ш.) [5, 7].

Начинающееся освоение океанских минеральных ресурсов предполагает необходимость совершенствования методов исследований гидротермальных источников, в том числе и для повышения эффективности поисковых работ. Одним из важных направлений исследований для решения этой задачи является моделирование геохимических процессов в системе гидротермальный флюид – океанская вода. На границе смешения этих природных растворов в придонных слоях



происходит формирование гидротермальных плюмов – важнейших объектов изучения при поисках участков современного океанского рудообразования. Гидротермальные плюмы – это комплексные ореолы рассеяния, которые характеризуются аномальными температурой и количеством взвешенных компонентов (мутностью), колебаниями плотности, Eh, pH и других параметров [7, 17, 18].

При совершенствовании методов поисков гидротермальных источников необходимо обратить внимание на изучение водной миграции рудных компонентов и элементов – геохимических реперов в гидротермальных плюмах, так как именно они являются основным индикатором современной гидротермальной деятельности на океаническом дне [5, 8].

Основные черты геолого-геохимической модели субокеанической гидротермальной системы. Возможность существования гидротермальной конвекционной системы следует из наличия источника тепла – магматической камеры, обеспечивающей конвекцию морской воды, а также трещиноватых магматических пород как проницаемой среды. Результаты натурных наблюдений, экспериментальных исследований и модельных расчетов служат основой представлений о формировании океанских терм [1, 2, 4, 6].

Высокотемпературная метаморфизация морской воды, поглощаемой на флангах гидротермальных систем, приводит к образованию в недрах субмаринных структур бессульфатных и лишенных магния вод. Принято считать, что эти воды являются исходными для формирующихся на поверхности дна горячих источников и называются конечными растворами (КР) или «end members» [2, 3, 6, 10, 13, 20].

По мере прохождения горячего флюида через толщу магматических пород происходит их выщелачивание и вынос на поверхность растворенных элементов (Li, K, Rb, Ca, Cu, Fe, Mn, Zn, Pb, Co, Ni, As и др.). Таким образом, рудообразующий флюид в зоне разгрузки гидротермальной конвекционной системы – это продукт взаимодействия разогретой океанской воды с породами, слагающими океанскую кору.

Физическое (экспериментальное) моделирование гидротермального рудообразования в Океане и натурные данные. Концепция формирования гидротерм срединно-океанических хребтов (СОХ) за счет высокотемпературного взаимодействия морской воды с породами в недрах гидротермальных систем базируется в первую очередь на многочисленных данных лабораторного моделирования, обзор которых был приведен в 1983 г. М.Моттлом [17]. Эксперименты по нагреванию морской воды и ее взаимодействию с базальтами при условиях, воспроизводящих природные, показали, что снижение pH раствора, связанное с поглощением породой Mg, ведет к выщелачиванию ряда элементов (в том числе рудных) и формированию флюида, весьма близкого по составу к природным гидротермам.

В результате лабораторных экспериментов было установлено, что при разогреве морской воды с базальтом до 300 °C раствор становится кислым ($\text{pH} = 2\div 4$) и восстановленным. Это приводит к резкому увеличению концентрации в флюиде таких металлов, как Fe и Mn. В свою очередь, образованию H^+ способствует осаждение из океанской воды Mg в составе вторичных силикатов или минеральной ассоциации, включающей MgSO_4 и $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Океанская вода теряет магний и сульфат-ион и обогащается металлами и Si. Величина pH раствора определяет интенсивность растворения металлов и формирование рудоносного флюида.

Натурные наблюдения, в целом, подтверждают результаты физического моделирования. В то же время наблюдаются вариации состава гидротерм как при сравнении различных регионов, так и в пределах одних и тех же гидротермальных полей [2, 6, 7, 20].

Синтез результатов физического моделирования и натурных наблюдений приводит к выводу о том, что наиболее приемлемый вариант объяснения различий в минерализации рудообразующих растворов дает модель двойной диффузионной конвекции [2, 12]. Предполагается существование вблизи магматического очага под основной конвекционной ячейкой зоны циркуляции раствора, формирующегося за счет дифференциации морской воды на контакте с магмой в моменты резкого раскрытия трещин. Фазовые превращения и смешение флюидов двух конвекционных ячеек в настоящее время наилучшим образом объясняют многообразие наблюдаемых процессов.

Регрессионная модель смешения рудообразующих гидротерм и морской воды. Подтверждением результатов полевых наблюдений, лабораторных экспериментов и теоретических построений служат результаты анализа регрессионной модели смешения гидротермальных рас-

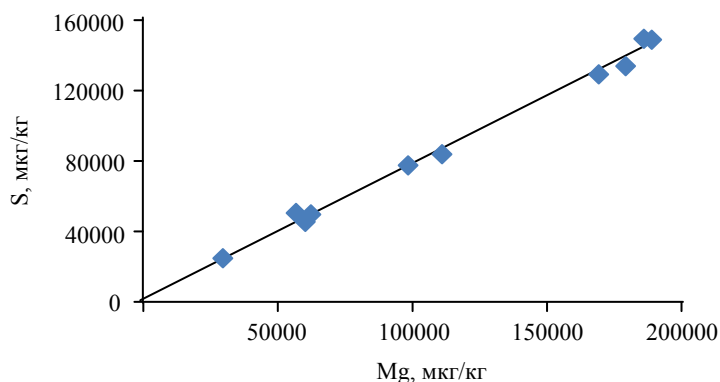


Рис. 1. Характер зависимости концентрации [S] от [Mg] для гидротермальных растворов нескольких участков САХ по данным экспедиции *SERPENTINE*, 2007 [14]

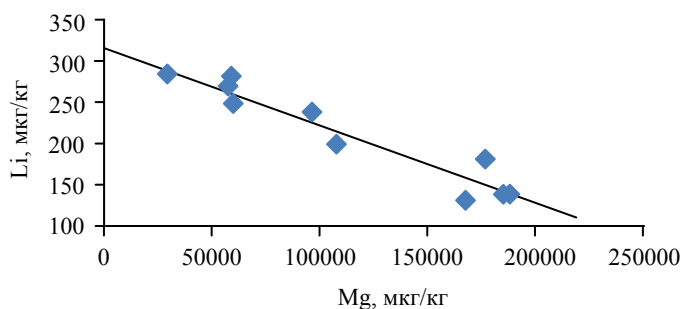


Рис. 2. Характер зависимости концентрации [Li] от [Mg] для гидротермальных растворов САХ (14°45' с.ш.) по данным экспедиции *DiversExpedition*, 2001 [19]

творов и морской воды в зоне разгрузки. Концентрации компонентов в конечных растворах соответствуют нулевой концентрации Mg и определяются по графикам и уравнениям регрессий каждого из элементов по концентрациям магния ($[\text{элемент}]/[\text{Mg}]$). Например, исходная точка линии тренда $[\text{SO}_4]/[\text{Mg}]$ указывает на нулевые концентрации как сульфат-иона, так и магния в конечных гидротермальных растворах (рис.1) Начало линии тренда в точке с нулевой концентрацией S указывает на преобладание сульфат-иона в системе. Форма графика отвечает теоретическим представлениям и подтверждает качество лабораторного анализа. Это соответствует результатам физического моделирования, что позволяет говорить о возможности верификации регрессионной модели по независимым экспериментальным данным. Каждая точка наблюдения на графике соответствует определенной концентрации магния, отражающей степень смешения гидротермального раствора с морской водой.

Анализ регрессионной модели позволяет решать следующие задачи.

1. По графику $[\text{S}]/[\text{Mg}]$ производится верификация модели на соответствие результатам физического моделирования и проверяется качество проведенного химического анализа (рис.1). По степени отклонения концентрации серы от нулевых значений можно судить о возможном наличии в системе других форм миграции серы, например в виде H_2S .

2. Определение источника поступления элемента в гидротермальный раствор. Отсутствие магния в КР позволяет использовать результаты регрессий $[\text{элемент}]/[\text{Mg}]$ для выделения групп элементов по степени участия в гидротермальных процессах. Положительный тренд по [Mg] указывает на поступление элемента из морской воды, поскольку концентрация таких элементов уменьшается с увеличением доли гидротермальной составляющей и уменьшением доли морской воды так же, как и у магния В первую группу входят Mg, SO_4 , U, Mo и др. Отрицательный тренд указывает на накопление элемента в растворе в результате гидротермальных преобразований. Вторая группа включает H_2S , Ca, SiO_2 , Li, Rb, Mn, Fe, Zn и другие элементы [2, 6] (рис.2). Наклон линии тренда указывает на отрицательную корреляцию Li с Mg и отражает степень смешения гидротермального раствора с морской водой. Концентрация Li в КР составила 317 мкг/дм^3 .

3. Расчет концентраций КР – обратное прогнозирование концентрации элемента по линии тренда (уравнению регрессии). Регрессионные модели смешения являются основой для расчета концентраций элементов в конечных гидротермальных растворах, прошедших полный цикл преобразований при максимальных значениях температуры и давления в недрах гидротермальной системы. Пересчитанные концентрации позволяют сравнивать составы всех КР субмаринных горячих источников, исключая эффект разбавления растворов морской водой на путях миграции и в зонах разгрузки. Результаты анализа позволяют уточнить состав растворов изученных гидротермальных полей (рис.2). Расчетные концентрации конечных гидротермальных растворов могут быть использованы также для термодинамического моделирования.

Регрессионная модель формирования кислотно-основных свойств и хлорности рудообразующих гидротерм Океана. Условный состав КР с использованием регрессионной модели широко используется для сопоставления состава гидротермальных растворов различных участ-

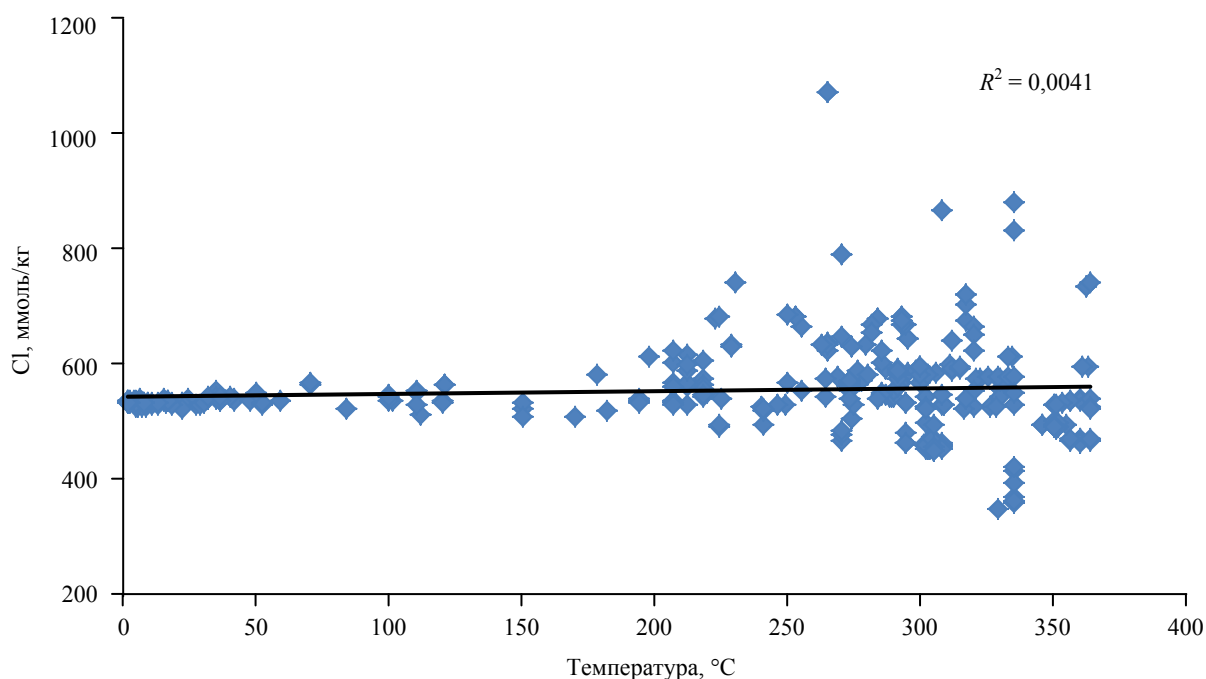


Рис.3. Зависимость $[Cl^-]$ от температуры по данным опробования гидротермальных растворов Океана

ков при исключении влияния разбавления флюидов морской водой. Однако к глобальным геохимическим построениям на основе таких расчетных данных следует относиться с осторожностью. Колебания состава гидротермальных растворов могут быть связаны не только с разбавлением морской водой, но, в значительно большей степени, и с крайне неравновесным характером гидротермальной системы. Прямыми наблюдениями доказаны наличия фазовых преобразований растворов в зонах разгрузки, формирование кратеров в результате «гидротермальных взрывов». Инструментально подтверждены колебания состава гидротерм в устьях источников [1, 7].

Регрессионные модели, построенные для достаточно большого объема данных, позволяют нивелировать вариации состава, возникающие из-за нестабильности физико-химических условий, а также отдельные погрешности опробования и химического анализа, выявляя главные тенденции формирования состава растворов и взаимосвязи между ключевыми показателями. В последующем анализе использовались все доступные на сегодняшний день первичные аналитические данные без пересчета на КР из собственных и известных мировых баз данных [2, 6, 7, 20], в том числе собранные М.Моттлом и доступные на сайте <http://earthchem.org/featured/mott> (Mottl, M.J. (2012), VentDB: Mid-Ocean Ridge Hydrothermal Vent Chemistry Data Collection in the EarthChem Library).

Результаты моделирования говорят о выраженной тенденции увеличения концентрации Cl^- -иона в океанских гидротермальных растворах с повышением температуры (рис.3). В различных диапазонах температуры эта связь проявляется по-разному. До 60 °C хлорность раствора соответствует стандарту для морской воды. При более высоких значениях температуры (до 180 °C) наблюдаются как повышенные, так и пониженные концентрации Cl^- с преобладанием последних. Наиболее высокие отклонения от значений $[Cl^-]$ для придонных вод Океана наблюдаются в термах с температурой выше 180 °C.

Анализ регрессионной модели, связывающей концентрации хлорид-иона и кислотность гидротермальных растворов Океана, показывает, что эти параметры характеризуются отрицательной зависимостью (рис.4). Наиболее высокие $[Cl^-]$, значительно превышающие нормальные для морской воды, наблюдаются в кислых растворах с $pH = 2,3 \div 6,0$. Для этого же диапазона характерны заметные, но не столь значимые отклонения и в другую сторону. Данные регрессионного моделирования подтверждают работоспособность модели двойной диффузионной конвекции, обсуждавшейся ранее. Дифференциация растворов по концентрациям хлорид-иона в зависимости от температуры и pH в рамках этой модели связывается с фазовыми превращениями и смешением флюидов двух конвекционных ячеек, одна из которых является зоной циркуляции рассола.

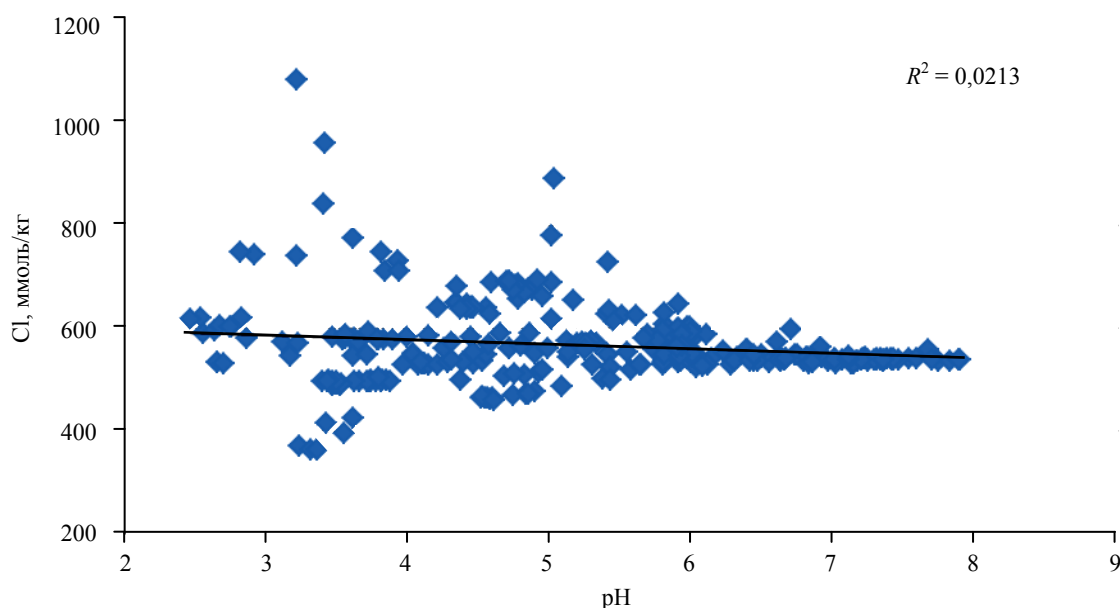


Рис.4. Зависимость $[Cl^-]$ от pH в гидротермальных растворах Океана

С другой стороны, разгрузка распресненных вод также наблюдалась нами в реальном времени и подтверждается аналитическими данными [7].

Следует добавить, что значение pH раствора определяет интенсивность выщелачивания металлов из вмещающих пород и формирование рудоносного флюида. Вторым после кислотности параметром вод, играющим важную роль в переносе металлов, является содержание хлорид-иона, обычно связанное с общей минерализацией [2, 6].

Результаты корреляционного анализа также свидетельствуют о высоких значимых отрицательных коэффициентах парной корреляции для $[Cl^-]$ и pH [5, 7]. Перенос металлов преимущественно в форме хлоридных комплексов при высокой температуре раствора подтверждается результатами проведенного нами термодинамического моделирования.

Компьютерное термодинамическое моделирование процессов смешения в зоне разгрузки гидротермальных растворов. Теоретическое обоснование и методика термодинамического моделирования различных геохимических процессов, в том числе и океанского гидротермального рудогенеза, имеют довольно продолжительную историю [3, 10-13, 16]. Гидрогеохимическая модель зоны гидротермальной разгрузки разрабатывалась С.М.Судариковым и М.В.Змиевским с 2010 г. Компьютерное моделирование проводилось М.В.Змиевским на базе Института геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН в лаборатории моделирования гидрохимических и гидротермальных процессов с помощью программного пакета HCh [10, 11]. Исходные материалы для моделирования были получены С.М.Судариковым и Ж.-Л.Шарлю в нескольких экспедициях, в том числе в процессе совместной работы в русско-французской экспедиции *SERPENTINE* на научно-исследовательском судне «Pourquoi Pas?» [14, 15].

В процессе подготовки к термодинамическому моделированию была создана гидрогеохимическая модель, условно включающая две стадии. Первая стадия отвечает процессам подповерхностного смешения гидротермальных растворов и морской воды, вторая – процессам, протекающим после разгрузки в гидротермальных ореолах рассеяния (плюмах). В данной работе рассматриваются результаты моделирования на второй стадии преобразований.

При создании физико-химической модели с помощью литературных и аналитических данных были заданы такие параметры, как температура и давление. При этом давление задано как постоянная величина – 300 атм (30 МПа), что соответствует давлению на глубине нахождения источников – около 3 км. Температура задавалась как изменяющийся параметр. Физико-химическая модель включает в себя жидкие, твердые и газовые фазы. Количество возможно существующих в системе растворенных форм миграции различных элементов – 152.

Начальная температура исследуемого участка гидротермальной системы 352 °С (температура раствора, замеренная в устье источника), конечная 2 °С (температура придонных вод). Всего в программу было заложено 50 шагов смешения с изменением температуры на 7 °С. На основе эмпирических и литературных данных было задано изменение соотношения смешивающихся растворов по специально разработанной формуле с учетом количества гидротермального раствора, количества морской воды, номера шага смешения [5, 8].

Верификацию модели наиболее целесообразно проводить по изменению концентраций марганца. Поведение гидротермального марганца в плюмах изучено достаточно детально [2, 7, 18, 19]. Ореолы рассеяния марганца являются одними из основных поисковых признаков современного гидротермального рудообразования. Растворенный марганец образует наиболее протяженные ореолы рассеяния в зонах разгрузки благодаря своим геохимическим (миграционным) особенностям. Двухвалентный марганец весьма устойчив в окислительной обстановке океанских придонных вод. Кроме того, марганец не формирует сульфидных минералов в зонах океанской разгрузки гидротерм. Поэтому рудообразование не влияет на концентрации различных форм миграции этого элемента в гидротермальных растворах и плюмах, благодаря чему результаты моделирования изменения растворенных форм в плюмах по этому элементу представляются наиболее достоверными.

Анализ полученных результатов позволяет говорить о том, что преобладающими формами миграции марганца в плюме являются Mn^{2+} , $MnCl^+$, $MnCl_2$ (рис.5). При этом в геохимической структуре плюма можно выделить две зоны: 1) высоких температур (350-100 °С) с преобладанием хлоридных комплексов; 2) низких температур (100-2 °С) с доминированием формы переноса в виде свободного двухвалентного иона.

Первую зону можно условно ассоциировать с восходящим плюмом с повышенной турбулентностью, вторую – с латеральным плюмом, в пределах которого марганец в форме двухвалентного свободного иона может переноситься на десятки километров [18, 19]. Можно отметить заметное присутствие также сульфатного и гидроксидного комплексов (рис.6). Сульфатный комплекс сохраняет незначительное присутствие (1,5 %) в латеральном плюме, а гидроксидный характерен для температур 325-125 °С и может наблюдаться только в восходящем плюме. Эти соединения отнесены к «второстепенным» формам миграции.

Влияние остальных рассматривавшихся форм переноса Mn (например, карбонатных) представляется ничтожным (< 0,5 %), и они отнесены к «несущественным» (рис.7).

Приведенные результаты свидетельствуют о практически полном соответствии данных моделирования натурным наблюдениям. В частности, большая часть второстепенных и несущественных форм миграции марганца с падением температуры уходят из раствора и участвуют в

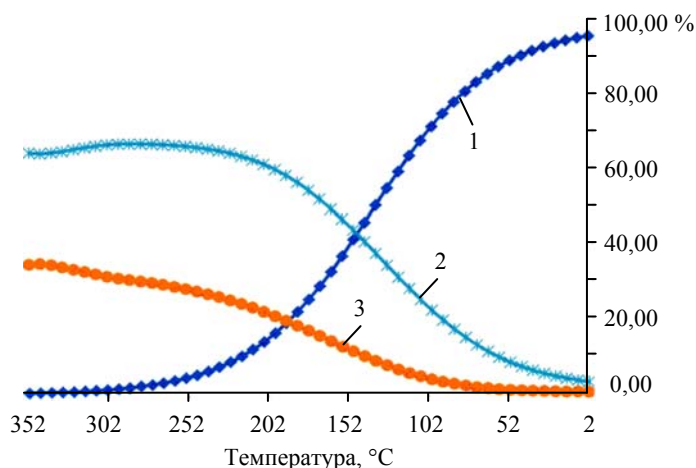


Рис.5. Изменение соотношений основных форм водной миграции марганца в гидротермальном плюме с изменением температуры и степени разбавления флюида морской водой
1 – $MnCl^{2+}$, 2 – $MnCl^+$, 3 – $MnCl_2^0$

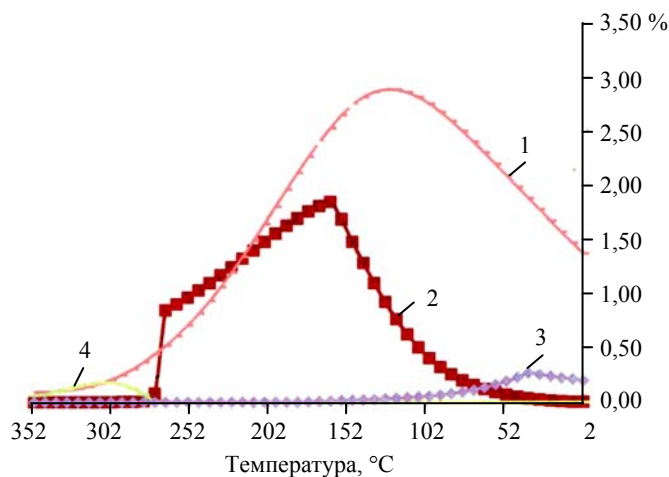


Рис.6. Изменение соотношений второстепенных форм водной миграции марганца в гидротермальном плюме с изменением температуры и степени разбавления флюида морской водой
1 – $MnSO_4^0$, 2 – $MnOH^+$, 3 – $MnCO_3^0$, 4 – $MnHSO_4^+$

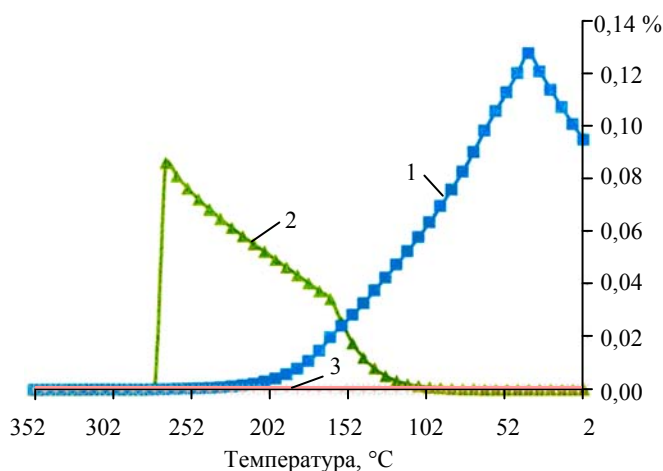


Рис.7. Изменение соотношений несущественных форм водной миграции марганца в гидротермальном плюме с изменением температуры и степени разбавления флюида морской водой

1 – MnHCO_3^+ , 2 – MnO^0 , 3 – суммарное содержание

MnHCO_3^+ , MnO^0 , MnO_2^{2-} , MnHS^+ , Mn^{3+} , MnO_4^- , MnO_4^{2-}

формировании гидротермальных марганцевых корок, широко распространенных в зонах разгрузки гидротермальных растворов [2, 4, 6, 17, 20].

Верификация термодинамической модели свидетельствует о ее работоспособности и позволяет перейти к следующему этапу исследований – изучению характера геохимического рассеяния основных рудных компонентов гидротермальных растворов Fe, Cu, Zn и др. Выявление ведущих форм миграции рудообразующих элементов необходимо для совершенствования конструкции ион-селективных датчиков, применяемых в процессе исследования микрокомпонентного состава придонных вод *in situ*. При проведении гидрогеохимических поисков гидротермальных источников на океаническом дне по соотношению различных форм миграции в плюме можно будет судить о положении зоны разгрузки.

Проведенные исследования в перспективе могут повысить эффективность поисков скоплений массивных сульфидных руд на дне Океана.

Заключение. Рассмотрены основные методы и проанализированы результаты моделирования геохимических процессов в зоне субмаринной разгрузки гидротермальных растворов Океана. Исходные материалы для моделирования были получены С.М.Судариковым и Ж.-Л.Шарлю в нескольких экспедициях, в том числе в процессе совместной работы в русско-французской экспедиции *SERPENTINE* на научно-исследовательском судне «Pourquoi Pas?» (2007 г.).

Проанализированы результаты физического (экспериментального) моделирования гидротермального рудообразования в Океане и натурные данные. Подтверждением данных полевых наблюдений, лабораторных экспериментов и теоретических построений служат результаты анализа регрессионной модели смешения гидротермальных растворов и морской воды в зоне разгрузки. Проведенный анализ позволил: провести верификацию модели и проверить качество химического анализа; определить источник поступления элемента в гидротермальный раствор (степень и характер участия компонентов раствора в гидротермальном процессе); провести расчет концентраций КР – обратное прогнозирование концентрации элемента по линии тренда (уравнению регрессии); на основе расчетных концентраций конечных гидротермальных растворов подготовить данные для термодинамического моделирования.

Регрессионная модель формирования кислотно-основных свойств и хлорности рудообразующих гидротерм Океана подтверждает работоспособность модели двойной диффузионной конвекции формирования состава гидротермальных растворов. Дифференциация растворов по концентрациям хлорид-иона в зависимости от температуры и pH в рамках этой модели связывается с фазовыми превращениями и смешением флюидов двух конвекционных ячеек, одна из которых является зоной циркуляции рассола.

Для проведения компьютерного термодинамического моделирования процессов смешения гидротермальных растворов с морской водой созданы гидрогеохимическая и физико-химическая модели зоны гидротермальной разгрузки. Верификация модели проведена по изменению концентраций марганца в системе: восходящий плюм – плюм с нейтральной плавучестью. Анализ полученных результатов позволяет говорить о том, что преобладающими формами миграции марганца в плюме являются Mn^{2+} , MnCl^+ , MnCl_2 . В геохимической структуре плюма выделено две зоны: 1) высоких значений температуры (350-100 °C) с преобладанием хлоридных комплексов; 2) низких значений температуры (100-2 °C) с доминированием формы переноса в виде свободного двухвалентного иона.

Первая зона условно ассоциирована с восходящим плюмом повышенной турбулентности, вторая – с латеральным плюмом, в пределах которого двухвалентный марганец может переноситься



ситься на десятки километров. Сульфатный комплекс наблюдается в незначительных количествах (1,5 %) в латеральном плюме, гидроксидный – устойчив при температуре 325-125 °С и может наблюдаться только в восходящем плюме. Эти соединения отнесены к второстепенным формам миграции.

Приведенные результаты свидетельствуют о практически полном соответствии данных моделирования натурным наблюдениям. Верификация термодинамической модели свидетельствует о ее работоспособности и позволяет перейти к следующему этапу исследований – изучению характера геохимического рассеяния основных рудных компонентов гидротермальных растворов Fe, Cu, Zn и др.

Выявление ведущих форм миграции рудообразующих элементов необходимо для совершенствования конструкции ион-селективных датчиков, применяемых в процессе исследования микрокомпонентного состава придонных вод *in situ*. При проведении гидрогеохимических поисков сульфидной минерализации на океаническом дне по соотношению различных форм миграции в плюме можно будет судить о положении гидротермального источника. Проведенные исследования в перспективе могут повысить эффективность поисков скоплений массивных сульфидных руд на дне Океана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов Ю.А. Гидротермальные рудопроявления рифтов Срединно-Атлантического хребта. М.: Научный мир, 1997. 167 с.
2. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана / Под ред. И.С.Грамберга. СПб: Недра, 1992. 278 с.
3. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 304 с.
4. Рона П. Гидротермальная минерализация областей спрединга в океане. М.: Мир, 1986. 159 с.
5. Судариков С.М. Геохимия рудообразующих гидротермальных флюидов Мирового океана / С.М.Судариков, М.В.Змиевский // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 5-15.
6. Судариков С.М. Гидроминеральные проявления в Океане // Геодинамика и рудогенез Мирового океана / Науч. ред. акад. И.С.Грамберг. СПб: ВНИИОкеангеология, 1999. С. 62-72.
7. Судариков С.М. Гидротермальные ореолы рассеяния в природных водах Срединно-Атлантического хребта / С.М.Судариков, Д.В.Каминский, Е.В.Наркевский. СПб: ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С.Грамберга», 2014. 161 с.
8. Судариков С.М. Исследования форм миграции рудных элементов в гидротермальных растворах Срединно-Атлантического хребта / С.М.Судариков, М.В.Змиевский // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2016. № 3. С. 31-35.
9. Судариков С.М. Формирование состава гидротермальных растворов в гидрогеологических массивах ультраосновных пород Срединно-Атлантического хребта / С.М.Судариков, М.В.Кривицкая // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 68-71.
10. Шваров Ю.В. О термодинамических моделях реальных растворов // Геохимия. 2007. № 6. С. 670-679.
11. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемые Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898-903.
12. Bischoff J.L. Phase separation in seafloor geothermal systems by layered double-diffusive convection / J.L.Bischoff, R.J.Rosenbauer // J. Geol. 1989. Vol. 97. P. 613-623.
13. Bowers T.S. Chemical evolution of mid-ocean ridge hot springs / T.S.Bowers, K.L.Von Damm, J.M.Edmond // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1985. Vol. 49 (19/20) P. 2239-2252.
14. High hydrogen and abiotic hydrocarbons from new ultramafic hydrothermal sites between 12° N and 15° N on the Mid-Atlantic Ridge. Results of the Serpentine cruise (March 2007) / J.-L.Charlou, J.-P.Donval, C.Konn, D.Birot, S.Sudarikov, P.Jean-Baptiste // EOS, Transactions of the American Geophysical Union. 2007. Vol. 88. 52 p.
15. High Production and Fluxes of H₂ and CH₄ and Evidence of Abiotic Hydrocarbon Synthesis by Serpentinization in Ultramafic-Hosted Hydrothermal Systems on the Mid-Atlantic Ridge. Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges / J.-L.Charlou, J.-P.Donval, C.Konn, H.Ondreas, Y.Fouquet // Geophysical Monograph Series 188. American Geophysical Union. 2010. P. 265-295.
16. Garrels R.M. Solutions, Minerals and Equilibria / R.M.Garrels, C.L.Christ // New York: Harper & Row, 1965. 368 p.
17. Mottl M.J. Metabasalts, axial hot springs and the structure of hydrothermal systems at mid-ocean ridges // Geol. Soc. Amer. Bull. 1983. Vol. 94. N 2. P. 161-180.
18. Sudarikov S.M. Structure of hydrothermal plumes at the Logatchev vent field, 14°45' N, Mid-Atlantic Ridge: evidence from geochemical and geophysical data / S.M.Sudarikov, A.B.Roumiantsev // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. Vol. 101. P. 245-252.
19. Sudarikov S.M. Hydrothermal Plumes along the Mid-Atlantic Ridge: Preliminary Results of the CTD Investigations During the DIVERS Expedition (July 2001) / S.M.Sudarikov, E.Zhirnov // InterRidge News. 2001. 10 (2). 33-36.
20. Von Damm K. Seafloor hydrothermal activity: black smoker chemistry and chimneys // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1990. Vol. 18. P. 173-204.

Автор С.М.Судариков, д-р геол.-минерал. наук, профессор, sergei_sudarikov@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 31.10.2016.