

Параметры гидротермальных флюидов и их изменения в процессах рудообразования

Наумов Г.Б.¹, Миронова О.Ф.²

¹ГГМ РАН, naumov@sgm.tu; ²ГЕОХИ РАН, Москва, Россия, olgamironova@grokh.ru

Parameters of hydrothermal fluids and their variation in the process of ore formation

Naumov G.B.¹, Mironova O.F.²

¹SGM RAS, naumov@sgm.tu; ²GEOKHI RAS, Moscow, Russia, olgamironova@grokh.ru

Summary. Results of analysis of thermodynamic parameters of fluid inclusions in hydrothermal process (n = 4500) are presented. It is demonstrated that the area of formation of ore deposits is zeolite and muscovite-hornfels facies of metamorphism with maximum of T = 250-500°C and P = 1-0.5 kbar. The role of thermobaric gradients and geterogenisation of fluidal solutions in the ore formation is demonstrated.

1. Длительная история изучения флюидных включений в минералах, начавшаяся с точных наблюдений Генри Сорби, впервые обратившего внимание на жидкие включения в минералах и показавшего (1858), что по ним можно судить о температуре образования минералов (термометрический метод), накопила к настоящему времени богатый фактический материал.

Систематический сбор таких количественных эмпирических фактов, полученных на основе изучения флюидных включений в минералах, начал в ГЕОХИ с 1965 года трудами В.Б. Наумова и в настоящее время продолжает формироваться в виде базы данных (в системе PARADOX) по физическим параметрам и химическому составу природных флюидов в минералах различных геологических объектов. В базу включаются все оригинальные данные по изучению включений, полученные в институте и

опубликованные в литературе. Особенно интенсивно эти исследования ведутся последние 10-15 лет в связи с широким развитием аналитических методов и их успешным применением. Анализ этих данных позволяет получить много интересных результатов.

2. В базу данных к настоящему времени занесено более 18 тыс. замеров солености флюидов, на основании которых можно сказать, что подавляющее большинство эндогенных рудных месторождений формируется с участием водной фазы с растворенными в ней солями. Среди последних преобладает NaCl, реже KCl, CaCl₂ и др.

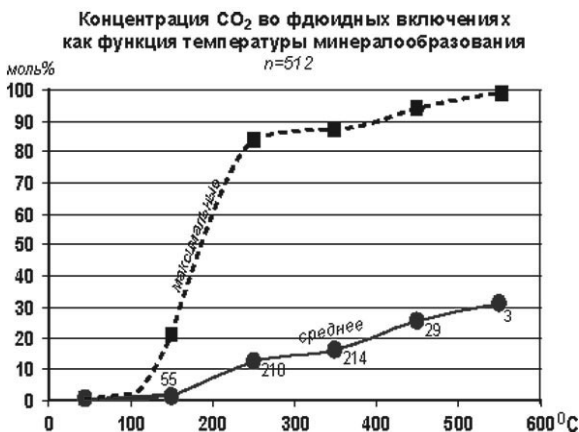


Рис. 1. Средние и максимальные значения содержаний CO₂ во включениях. Цифры при кривой – объемы выборок по интервалам 100°C.

Fig. 1. Mean (circles) and maximal (squares) CO₂ contents in inclusions. Figures on curves show numbers of analyze within 100°C intervals.

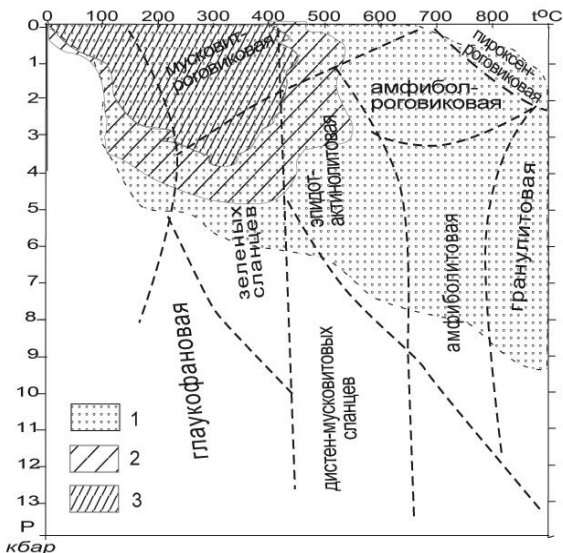


Рис.2. Положение полей гидротермальной деятельности (1), спорадического (2) и устойчивого (3) гидротермального рудообразования, наложенное на диаграмму фаций.

Fig. 2. Position of hydrothermal activity fields (1), sporadic (2), and (3) sustainable, in T (°C)–P(bar) space superimposed onto metamorphic facies.

темперские определения концентрации в них углекислоты и одновременно данные по температурам и давлениям, можно проследить изменение содержания CO_2 по температурным интервалам (рис.1) показывает, что в температурном интервале ниже 100°C среднее содержание составляет всего 0.5 мас.%. Однако с повышением температуры эта величина устойчиво растет, достигая в температурном интервале $500\text{--}600^\circ\text{C}$ 31.2 мас. %. Максимально наблюдавшиеся величины растут еще быстрее. Уже в интервале $200\text{--}300^\circ\text{C}$ максимальные значения CO_2 превышают 80%, а дальше приближаются к 100 %. Такие высокие содержания углекислоты могут быть связаны с процессами декарбонизации осадочных пород в процессах прогрессивного метаморфизма, при котором, по данным А.Б. Ронова и др., содержание карбонатной углекислоты уменьшается на математический порядок (от 7.68 до 0.8).

3. Термобарическое поле формирования гидротермальных образований, построенное на базе 4525 замеров сопряженных пар T и P образования индивидуальных включений, наложенное на диаграмму фаций метаморфизма, отчетливо тяготеет к верхним областям поля пород земной коры (рис. 2), а область формирования рудных скоплений занимает еще более ограниченное поле.

Более половины (54.5%) всех значений ограничены параметрами $P=3$ кбар. и $T=300^\circ\text{C}$, а в область $P=3$ кбар. и $T=500^\circ\text{C}$ укладываются 94.4% всех зафиксированных случаев. Максимум частот падает на значения $T=250\pm 50^\circ\text{C}$, $P=1/2\pm 0.5$ кбар, что очень близко к максимуму полученному для гидротермального минералообразования ($T=200\pm 100^\circ\text{C}$ и $P=0.75\pm 0.5$ кбар).

4. Для того, чтобы перейти от гипсометрических параметров к физико-химическим полезно воспользоваться вспомогательной величиной – термобарическим градиентом (величиной изменения давления на единицу изменения температуры).

После H_2O вторым по массе легко подвижным компонентом является углекислота, часто образующая самостоятельную жидкую фазу, не только соизмеримую по объему с водной фазой, но порой и превышающую ее. Доля других газовых компонентов (CH_4 , N_2 , H_2S , углеводороды и др.) значительно ниже. На основании базы данных по химическому составу летучих компонентов, включающей более 5 тыс. анализов, охарактеризована область гидротермальных образований и рудных месторождений. По химическому составу флюиды этих двух областей близки между собой.

Для 1065 флюидных включений в минералах гидротермальных образований, где имеются непосредственные аналитические

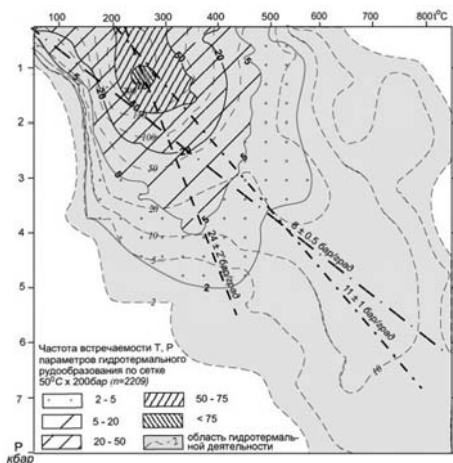


Рис.3. Изолинии частоты встречаемости Т и Р гидротермального рудообразования на фоне гидротермального минералообразования.

Fig. 3. Isoleths of P-T parameters occurrences for hydrothermal ore formation.

Средний термобарический градиент процессов рудообразования приобретает еще более крутое положение, по сравнению с общим градиентом гидротермального минералообразования, и составляет 24 ± 2 бар/град (рис. 3). Это показывает, что в процессах формирования рудных месторождений перепады давлений оказывается еще более существенным фактором, чем для процессов гидротермального минералообразования в целом.

5. Сопоставление данных по термобарическим градиентам с физико-химическими закономерностями поведения растворов электролитов при повышенных температурах и давлениях позволяет понять причины этой закономерности. Химические свойства водных растворов в градиентном термобарическом поле не остаются постоянными, а закономерно изменяются в соответствии с изменением констант диссоциации присутствующих во флюиде кислот, оснований и комплексных ассоциатов (рис. 4). Максимальное влияние этих параметров на химизм растворов падает на интервал $200 \pm 100^\circ\text{C}$ (для разных соединений положение максимума колеблется в этих пределах). Примечательно, что в этот же интервал попадает и максимум параметров рудообразования. При более высоких значениях параметров Т и Р их влияние на константы диссоциации постепенно уменьшается, диссоциация электролитов постепенно сходит на нет.

6. Если изменение температуры, особенно ее понижение, происходит достаточно плавно (в соответствии с теплопроводностью вмещающей среды), то изменении давления может меняться скачкообразно. Контрастное изменение давлений гидротермальных растворов, особенно при наличии растворенных газовых компонентов может приводить к их «вскипанию» - отделению газовой фазы. Эти явления фиксируются серией флюидных включений с одинаковыми температурами гомогенизации, но разным соотношением фаз. Визуальные наблюдения показывают резкое доминирование жидкого состояния исходного минералообразующей флюидной фазы. Количество наблюдений собственно газовой фазы не превышает 1%. В 15% случаев наблюдаются сингенетичные жидкие и газовые включения. Это показывает, что в момент их формирования происходило разделение единого флюида на две самостоятельные фазы – происходила гетерогенизация

Взяв за основу усредненную литостатическую нагрузку вышележащих толщ и величину среднего термического градиента ($30-33$ град/км), мы получаем средний термобарический градиент земной коры 8.5 ± 0.5 бар/град.

Для поля гидротермальной деятельности средняя линия термобарических градиентов может быть рассчитана как тренд наименьших градиентов. Она имеет более крутое положение 11 ± 1 бар/град, и смещена в область более высоких температур на $\sim 180 \pm 50^\circ\text{C}$ (рис. 3). Сравнение этих двух величин показывает, что гидротермальная деятельность наиболее интенсивно развивается при повышенных температурах, по сравнению со средним термическим полем земной коры, а увеличение наклона кривой градиентов показывает, что перепады давлений в этой области природных процессов выше, чем средние по земной коре.

единого флюида – и каждая из образовавшихся фаз фиксируется в индивидуальных включениях.

Расслоение исходной гомогенной фазы происходит в том случае, когда система находилась вблизи линии равновесия раствор – газ. Для системы $H_2O-NaCl$ такое расслоение может происходить только при относительно низких давлениях и высоких температурах. При более высоких давлениях (выше 1 *кбар*) и температурах ниже $650^{\circ}C$ в системе может появляться твердая, но не газовая фаза. Линии фазового равновесия в системе H_2O-CO_2 , где расслоение может происходить в значительно более низком интервале температур и давлений, но не беспредельно, а только при параметрах ниже критических. При более высоких значениях T и P система будет находиться в надкритическом состоянии, – останется гомогенной. Вскипание водно-углекислого раствора наоборот, приобретает существенное значение при давлениях ниже 1000 *бар*. Для более сложных по составу флюидов, включающих и другие газы, и растворенные компоненты эти границы могут расширяться, однако, учитывая преобладающий состав флюидов намеченные границы должны доминировать в природных процессах

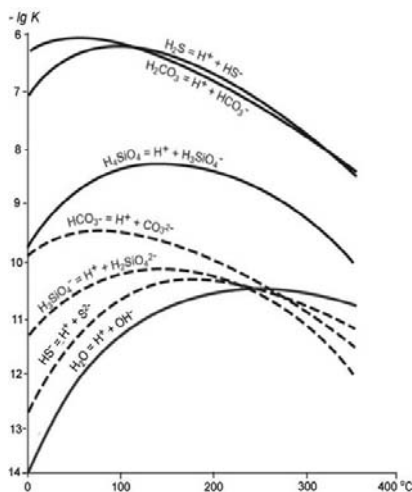


Рис.4. Температурные изменения констант диссоциации некоторых соединений.

Fig. 4. Dissociation constants of some compounds as function of temperature.

Явления гетерогенизации (вскипания) гидротермальных растворов могут на локальных участках кардинально менять химические характеристики растворов в жильных полостях по сравнению с химическими свойствами поровых растворов вмещающих пород, активизируя взаимодействие между ними.

Они не исключают роль иных факторов рудоконтроля, таких как литологический, смешения растворов и т.п., совместное действие которых приводит к появлению аномальных скопления тех или иных компонентов в природных условиях. Их осознанный учет будет способствовать дальнейшему развитию теории эндогенного рудообразования и повышению эффективности поисковых и разведочных работ.

7. Рассмотренные материалы позволяют количественно оценить параметры гидротермального минерало- и рудообразования, понять причины тяготения месторождения к верхним горизонтам земной