

А. М. ОВЧИННИКОВ

**О ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ  
ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

В настоящее время в СССР и в зарубежных странах накопился обширный материал по современным вулканам, связанным с ними вулканическим эксгаляциям и по гидротермальным явлениям вблизи действующих очагов вулканов, который позволяет несколько шире подойти к изучению гидротермальных процессов. В качестве примера интересной работы, обобщающей материалы Лаборатории вулканологии Академии наук СССР, можно привести сводную монографию С. И. Набоко, посвященную изучению вулканических эксгаляций и продуктов их реакций (1959). Особо следует отметить работу академика А. Н. Заварицкого, посвященную изучению Тифлиских терм (1936), в которой были высказаны ценные соображения о происхождении терм и о их связи с процессами вулканизма<sup>1</sup>. Большую работу по систематизации материала, касающегося современных гидротерм Камчатско-Курильской вулканической области, провел В. В. Иванов (1957, 1959). Однако геологическую структуру и гидрогеологические условия многих районов действующих вулканов нельзя считать еще достаточно изученными в связи с трудностями разведки таких районов и сравнительно небольшим объемом буровых работ. С точки зрения современной гидрогеологии участки вулканов следует рассматривать как своеобразные сложные бассейны подземных вод, находящиеся в условиях магматогенного геотермического режима и имеющие во всех случаях двухэтажное строение: нижний этаж — цоколь, сложенный осадочными, изверженными или метаморфическими породами, часто дислоцированный, и верхний этаж — рыхлые вулканические накопления и потоки современных или неогеновых, древнечетвертичных излияний<sup>2</sup>. Обычно верхний этаж приподнят, эродирован и имеет довольно большую мощность зоны аэрации. Многие процессы в жерлах вулканов протекают в этой зоне, которой свойственна окислительная обстановка. Это накладывает резкий отпечаток на все геохимические процессы, протекающие в верхнем этаже бассейнов вулканических областей.

Нижний этаж находится в условиях восстановительной или метаморфической обстановки и представляет различного рода водонапорные системы, местами имеющие характер артезианских бассейнов и скло-

<sup>1</sup>А. Н. Заварицкий. К вопросу о генезисе Тифлиских терм. Труды Геологич. ин-та, том V, М., 1936.

<sup>2</sup>Буровые работы на Паужетских термах (Камчатка), в связи со строительством первой ГЭС на природном тепле, дали интересный материал по гидрогеологии одного из бассейнов вулканических областей.

нов. Любое вулканическое извержение вовлекает в свою сферу подземные воды бассейнов, и без гидрогеологической оценки этих бассейнов нельзя правильно решить вопрос об условиях миграции химических элементов и их балансе. Изучение вулканических эксгаляций и гидротермальных проявлений без анализа динамики и режима вод, условий миграций и концентрации элементов в подземных водах не может дать ясной картины о формировании месторождений полезных ископаемых в районах вулканических очагов.

Автор имел возможность ранее высказать свою точку зрения на природу гидротермальных процессов, исходя из рассмотрения гидрогеологических условий вулканических областей на основе личных наблюдений и ознакомления с литературными данными (Овчинников, 1957). Эта точка зрения подверглась широкому обсуждению и нашла поддержку не только у гидрогеологов, но и у многих специалистов, изучающих рудные гидротермальные месторождения. Вместе с тем нельзя сказать, что достигнуто взаимное понимание гидрогеологических условий и процессов вулканизма специалистами различных отраслей геологии. К этому нужно добавить, что полноценных гидрогеологических работ в районах современных вулканов не производилось и центр тяжести исследования гидротерм приходился на гидрохимические исследования. Весьма характерна статья Д. Уайта (1959), посвященная термальным источникам и эпитермальным месторождениям на примере некоторых месторождений США, Новой Зеландии, которая по существу дает только сравнительный описательный материал. Автор указанной статьи в заключение справедливо отмечает, что геологи, по-видимому, имеют упрощенное представление о происхождении и природе рудоносных растворов и что в составе растворов могут участвовать воды различного происхождения (атмосферного, морского и т. д.).

Ценные сведения о природе гидротермальных растворов приведены в известной капитальной работе А. Г. Бетехтина, Ф. И. Вольфсона, А. Н. Заварицкого, Д. С. Коржинского, О. Д. Левицкого, В. А. Николаева (1953), посвященной основным проблемам происхождения магматических месторождений, но она, к сожалению, недостаточно учитывает достижения советской гидрогеологии.

Для изучения гидротермальных процессов следует привлекать материал не только по районам действующих вулканов, но и по районам четвертичного и третичного вулканизма, где активные извержения прекратились, но где сохранились следы интенсивной гидротермальной деятельности и продолжают изливаться на поверхность газлирующие теплые и горячие воды, выносящие ценные элементы.

Автор в 1958 г. изучал очень интересный район Словацкого Рудогорья, расположенный к югу от горной системы Татр, подробно ознакомился с некоторыми интересными участками Чешского массива (район Карловы Вары) и еще ранее имел возможность изучать многочисленные минеральные воды Кавказа, Карпат и Эльбурса (Иран). Многие участки этих районов были подробно разведаны буровыми скважинами и сопоставление собранных данных с имеющимися материалами по районам современного вулканизма позволяет высказать некоторые соображения о направлении гидрогеологических работ в целях всестороннего изучения гидротермальных процессов и современных гидротерм.

Вкратце напомним те выводы, к которым мы пришли еще несколько лет тому назад в отношении гидротермальных процессов (Овчинников, 1957).

1. Гидротермальные процессы, создающие рудные залежи, протекают в сложных гидрогеологических условиях, в пределах водонапорных систем артезианского типа в обстановке метаморфизма горных пород

при внедрении магматических масс. Этим подчеркивается важное обстоятельство, что современная гидрогеология не исключает участие магматических процессов в формировании гидротермальных растворов, т. е. не приписывает им просто «вадозовое» происхождение. Гидротермы представляют восходящие газовые, обычно насыщенные углекислотой ионно-молекулярные растворы, заключающие макро- и микроэлементы, состав которых и соотношение изотопов различных элементов вполне могут быть изучены современными физико-химическими методами.

2. В гидротермальных процессах участвуют подземные воды различного происхождения, причем пропорции смешиваемых вод меняются в ходе геологической истории и в зависимости от глубины внедрения интрузии. На первых стадиях, в глубоких частях большинства впадин и краевых прогибов, в гидротермальные процессы вовлекаются древние седиментационные воды (чаще морского генезиса) хлоридно-кальциево-натриевого и хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого составов. На следующих стадиях на меньших глубинах происходит смена менее минерализованными водами атмосферного происхождения, преимущественно сульфатного и гидрокарбонатного составов. Когда вулканические явления прекращаются, весь верхний этаж вулканических областей чаще всего представляет коллекторы пресных гидрокарбонатных вод (что хорошо можно видеть в Армении). В сфере магматических очагов и метаморфизма подземные воды насыщены углекислотой, к которой выше примешиваются газы воздушного происхождения (азот, кислород и др.). При наличии в цоколе вулканов нефтегазоносных свит часто можно обнаружить в составе газов гидротерм метан (например, на Камчатке). Для нас несомненна большая роль сероводородных (сульфидных) вод в осаждении многих металлов и в образовании залежей сульфидных руд. Такие воды формируются только на участках скоплений нефти или других битумов в результате микробиологических процессов. Следовательно, источник серы, создающий при гидротермальных процессах залежи сульфидных руд, находится не в магматическом очаге, а в окружающих свитах, где имеются или ранее имелись скопления битумов. На это справедливо обращает внимание А. И. Германов (1958, 1969), которому принадлежат интересные работы, связанные с рассмотрением гидротермальных процессов с гидрогеологических позиций.

3. Гидротермальные процессы, которые могут дать ценные залежи полезных ископаемых, протекают вследствие длительной и довольно интенсивной миграции подземных вод, происходящей в результате создания напора у земной поверхности на выступающих частях водонапорных систем, передающегося на всю систему. В пределах этих систем на более пониженных участках создаются очаги разгрузки напорных вод. К этим очагам разгрузки направлено движение гидротермальных растворов и химических элементов, выпадающих из растворов при изменении термодинамических условий на благоприятных в геологическом отношении участках (зона разломов и т. д.). Следовательно, *гидротермальные месторождения — древние очаги разгрузки напорных вод.* При отсутствии таких очагов происходит рассеивание элементов и залежей не образуется.

4. Изучение гидротермальных процессов требует применения *палеогидрогеологического* анализа, так как эти процессы протекают в различные стадии формирования структуры и внедрения магматических масс. Необходимо изучать закономерности распределения древних и современных очагов разгрузки напорных вод. Типы разгрузок могут быть самыми различными (эрозионные, структурные,

барьерные). Они могут быть локальными и линейными. Надо принимать во внимание направление линейных очагов разгрузок и соотношение с направлением складчатости и расположением вулканических очагов (продольные, поперечные, диагональные).

5. На известной глубине подземные воды находятся в перегретом состоянии и даже в надкритическом состоянии, и при температурах 200—300° представляют жидкие растворы. Поэтому на глубине ни выделение свободного газа, ни парообразование невозможно. Газ не имеет самостоятельного давления и не может рассматриваться как движущая сила для гидротермальных растворов. Мы уже отметили, что движение этих растворов подчиняется законам подземной гидравлики и лишь несколько усложняется в результате сложных термодинамических условий в верхней части каналов, по которым поднимаются растворы.

Следовательно, с гидрогеологической точки зрения периоды бурных вулканических извержений, хотя и сопровождаются обычно выделением большого количества водяных паров и выходом сероводородно-углекислых фумарол и гидросольфатар, менее продуктивны с точки зрения образования рудных залежей, чем длительно протекающие гидротермальные процессы между вспышками вулканической деятельности или в периоды после затухания вулканической деятельности. Самыми благоприятными для гидротермальных процессов являются интрузии, проникающие в водонапорные системы со сложной гидрогеохимической зональностью. Я бы добавил, что с гидрогеологической точки зрения, большую роль должны играть скорее не большие, а малые интрузии.

Достаточно взглянуть на строение наиболее ценных залежей свинца, цинка и других металлов<sup>3</sup>, чтобы убедиться, что эти залежи образовались не в вулканических аппаратах, а в очагах разгрузки древних водонапорных систем (рис. 1). Это не исключает того положения, что при вулканических извержениях может происходить образование скоплений интересных минералов, а в некоторых случаях накопление элементов в окружающих бассейнах. В отдельных случаях могут образоваться довольно крупные залежи, но часто такие скопления, в результате поднятий и дальнейших процессов эрозии, бывают полностью уничтоженными.

При полноценном анализе гидротермальных процессов необходимо ясно представлять:

1. Гидрогеологические условия района в полном смысле этого слова, т. е. строение бассейна подземных вод, питающих тот или иной очаг разгрузки, его размеры и форму соотношения областей питания и распространения водоносных горизонтов.

2. Каждый генетический тип вод, участвующий в гидротермах, должен быть охарактеризован определенными коэффициентами и показателями, и должна быть установлена пропорция смеси вод различных типов (см. табл. 1).

3. Гидрогеохимическая зональность подземных вод данного бассейна должна быть установлена точно, так как не во всех бассейнах наблюдается «классическая» схема перехода вод от слабоминерализованных гидрокарбонатных к высокоминерализованным хлоридно-кальциево-натриевым водам. В горноскладчатых районах местами наблюдается обратное соотношение гидрогеохимических зон.

<sup>3</sup> В частности, приведенных в работе А. А. Амирасланова «Основные типы место-рождений свинца и цинка». М., Госгеолгиздат, 1957.

## Сравнительная характеристика основных генетических типов подземных вод

Показатели для основных типов вод	Инфильтрационные воды атмосферного происхождения (выпадающие осадки, просачивание речных вод и т. д.)	Седиментационные воды (измененные воды древних водоемов: морских, озерных и т. п.)	(Возрожденные воды, выделяющиеся при нагревании из минералов и пород)
Химический состав исходных вод	Средний состав вод рек земного шара: $M_{0,5} \frac{HCO_3^3 SO_4^4 Cl_{10}}{Ca_{61} Mg_{18} Na_{12}}$	Состав воды океана: $M_{35} \frac{Cl_{90} SO_4^4}{Na_{78} Mg_{18} Ca_5}$	Конституционная вода: $H^+$ , $OH^-$ или $H_3O^+$ ; кристаллизационная, цеолитная, сорбированная ( $H_2O$ ) <sub>n</sub>
Некоторые характерные компоненты	$Fe^{++}$ , $Fe^{+++}$ , $F^+$ , Rn и др.	$Br^-$ , $J^-$ , $NH_4^+$ , Rn и др.	$H_2SiO_3$ , As, В и др.
Состав растворенных и свободно выделяющихся газов	$N_2$ , $O_2$ , $CO_2$ , Ar и др. (газы воздушного происхождения)	$CH_4$ , тяжелые углеводороды, $N_2$ , $CO_2$ и др. (газы биохимического происхождения)	$H_2S$ , $CO_2$ и кислые газы очагов вулканов (газы метаморфического происхождения). В очагах извержений — вулканические газы
Коэффициенты пропорциональностей	$\frac{rNa}{rCl} = 1,8$ (для вод рек), $\frac{Cl}{Br} = 300-800, \frac{Ca}{Sr} = 200$	$\frac{rNa}{rCl} = 0,85$ (для вод океана; для подземных вод этот коэффициент может изменяться) $\frac{Cl}{Br} < 800, \frac{Ca}{Sr} = 33$	Для гейзеров Камчатки: $\frac{rNa}{rCl} = 1,1,$ $\frac{Cl}{Br} = 291$
Процессы формирования химического состава	Выщелачивание, растворение (разрушение кристаллической решетки и переход веществ из твердого состояния в жидкое)	Вытеснение сформировавшихся вод с измененным составом, вследствие обмена катионов и микробиологических процессов; смешение с инфильтрационными водами	Переход из связанного состояния в свободное, дегидратация с последующим смешением вод различных типов. Насыщение вулканическими газами вблизи очага интрузии
Характерные представители	Большинство пресных, гидрокарбонатных вод; сульфатные воды, связанные с гипсами, хлоридные воды соляных залежей	Воды глубоких частей структур, нефтяных месторождений, хлоридно-кальциево-натриевого и хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого состава	Воды районов современного вулканизма; в чистом виде не встречаются; воды гейзеров — кремнистые, хлоридно-натриевые. Фумарольные термы — очень кислые, сульфатные

4. Модуль подземного стока водонапорной системы, представляющий количество подземных вод в литрах в секунду, стекающих с одного километра площади бассейна. Чем больше бассейн и чем меньше очагов разгрузки имеется в бассейне, тем более крупное скопление элементов может образоваться в очаге разгрузки. Если в бассейне имеются распыленные очаги разгрузки — промышленные месторождения вряд ли могут образоваться; данный элемент в этом случае в водах будет находиться в пределах «фона», характерного для всего гидрогеологического района.

5. Модуль обогащения, т. е. количество данного элемента (рудного), который находится в растворе и выносится с площади

бассейна  $1 \text{ км}^2$  в  $1 \text{ сек}$ . Например, если в растворе данный элемент находится в количестве  $1 \text{ мг/л}$ , то при модуле подземного стока  $1 \text{ л/сек}$  на  $\text{км}^2$  модуль обогащения равен  $1 \text{ мг/л сек с км}^2$ . При площади бассейна в  $1000 \text{ км}^2$  в сутки, при одном локализованном очаге разгрузки в последнем будет откладываться  $86,4 \text{ кг}$  рудного вещества в сутки, а в год около  $32 \text{ т}$ .

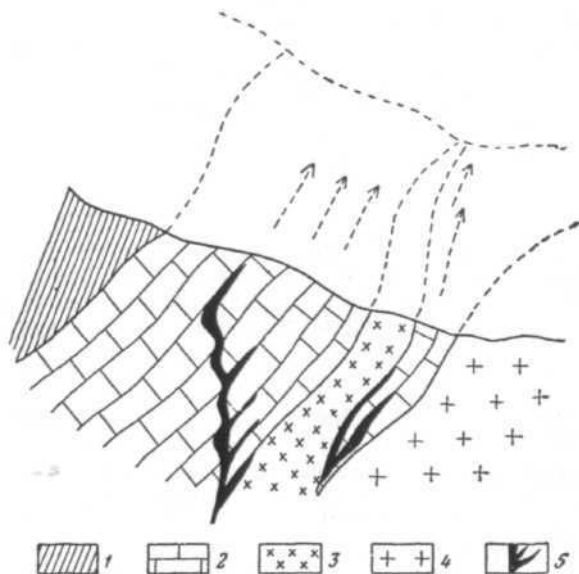


Рис. 1 Схема типичного месторождения свинца и цинка в скарнах (древний очаг разгрузки напорных вод гидротерм)

1 — плотные туфогенные породы, 2 — известняки, доломиты (водобильный комплекс), 3 — гранит-порфир, 4 — интрузия гранодиорита, 5 — рудные тела, пунктир — предполагаемое направление движения гидротермальных растворов в очаге разгрузки и древний рельеф

6. Геотермические условия и распределение изотерм в пределах бассейна. Следует учесть, что в пределах водонапорных систем это распределение зависит от движения вод и теплопроводности пород. Тепловые аномалии наблюдаются в местах разгрузки восходящих вод и в сферах неостывших интрузий.

7. Состав растворенных и свободно выделяющихся газов, газонасыщенность (в мл/л, газовый фактор, т. е. отношение объема газов к единице объема воды), упругость газов. На основе изучения соотношения газов следует стремиться определять возраст воды. Как известно, В. П. Савченко предложил использовать при определении возраста вод отношение гелия к аргону. Опыт показал, что полученный возраст является весьма ориентировочным, но при уточнении данных о содержании радиоактивных элементов, пористости, вычислении пропорции смеси вод можно получить вполне приемлемые результаты. По природным газам, в том числе газам вулканических областей, в последнее время были опубликованы интересные работы К. П. Флоренского (1956).

Если все вышеприведенные требования соблюдать и осуществлять тщательный структурный и литологический анализы района, применять методы геофизики и гидрогеохимии, можно получить необходимый материал по изучению гидротермальных процессов.

Палеогеогеологический анализ заключается в изучении древних растворов, прочитывающих осадочные породы, которые могут составлять цоколь вулканов. Для этой цели должен применяться мощный пресс для отжатия этих растворов. Необходимо составление палеогеогеологических карт, на которых следует показать распределение древних областей питания, напора и разгрузки, предполагаемую гидрогеохимическую зональность, особенно на период формирования залежи. Одновременно все это должно сопоставляться с составом современных гидротерм, осадками этих гидротерм и с определением возраста. Ценный материал в руки исследователей дает изучение остатков древних растворов, заключенных в минералах. Кстати сказать, имеющиеся данные по этим растворам подтверждают многие положения автора.

В настоящее время имеется полная возможность не только изучать природные гидротермальные процессы, но и моделировать их в лаборатории. В этом отношении весьма интересны экспериментальные работы Н. И. Хитарова и его сотрудников (1955, 1956, 1958). Но все эти эксперименты должны учитывать гидрогеологическую обстановку района, палеогеогеологию и особенно гидродинамическую сетку движения подземных вод в пределах водонапорной системы, в которой протекают гидротермальные процессы. Мне думается, что будет полезно применять для решения задач и методы электрогидродинамических аналогий, как это уже давно предложил академик Н. Н. Павловский для решения задач динамики подземных вод на участках гидротехнических сооружений, а сейчас применяется для бассейнов подземных вод.

В заключение я должен отметить, что мы должны стремиться устранить крупные разногласия в понимании гидротермальных процессов, вызванные недостаточным использованием достижений тех или иных отраслей геологической науки. Специалисты, изучающие гидротермальные процессы, не должны ограничивать себя схематическими представлениями о подземных водах, которые сложились главным образом на основе старых работ преимущественно иностранных авторов, и лучше использовать достижения советской гидрогеологии, которая далеко ушла вперед. Нужно уметь производить необходимые гидрогеохимические исследования, правильно интерпретировать ионный и газовый состав подземных вод и знать основные положения подземной гидравлики. Для полноценного изучения гидротермальных процессов следует организационно обеспечить комплексную совместную работу специалистов вулканологов, гидрогеологов, геохимиков и петрографов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Белякова Е. Е. Миграция металлов в подземных и поверхностных водах Верхнекайрактинского района в Центральном Казахстане. Геохимия, № 2, 1968.
- Бетехтин А. Г., Волыфсон Ф. И., Заваричкин А. Н., Коржинский Д. О., Левицкий О. Д., Николаев В. А. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во АН СОСР, 1953.
- Бугельский Ю. Ю. Некоторые особенности миграции цинка, свинца и меди в грунтовых водах полиметаллических месторождений Центрального Казахстана. Геология, № 1, 1967.
- Виноградов В. И. О миграции молибдена в зоне гипергенеза. Геохимия, № 2, 1957.
- Влодавец В. И. О паро-гидросольфатарных месторождениях в вулканических областях Италии. М., Изд-во АН СССР, сер. геол., № 5, 1955.
- Германов А. И. О возможной гидрогеохимической причине образования подзоны выщелачивания. Геохимия, № 1, 1956.
- Гонсовская Г. А. К вопросу о «ювенильности» Камчатских терм. Геолог. сборники Львовск. геол. об-ва, № 2—3, 1956.
- Иванов В. В. Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир. Геохимия, № 1, 1957.

- И в а н о в В. В. Основные стадии гидротермальной деятельности вулканов Камчатки и Курильских островов и связанные с ними типы термальных вод. Геохимия, № 5, 1958.
- К а л ю ж н ы й Вл. А. К результатам определения рН растворов жидких включений. Геохимия, № 1, 1957.
- К р а й н о в С. Р. О возможности применения гидрохимических исследований для решения некоторых металлогенических вопросов. Геохимия, № 5, 1957.
- М а л и н и н С. Д. Система  $H_2O-CO_2$  при высоких температурах и давлениях. Геохимия, № 3, 1959.
- М а л и н и н С. Д. Растворимость хлорида свинца в воде, в жидкой и паровой фазах. Геохимия, № 1, 1957.
- Набоко С. И., Сильниченко В. Г. Образование силикагеля на сольфатах вулкана Головнина на острове Кунашир. Геохимия, № 3, 1957.
- Набоко С. И. Случай газового фторметасоматоза при активном вулканизме. Геохимия, № 5, 1957.
- О в ч и н к о в А. М. Гидрогеологические условия гидротермальных процессов. Бюлл. Моск. об-ва испыт. природы, серия геологии, т. XXXII, 1957.
- Ф л о р е н с к и й К. П. О соотношениях инертных газов и азота в природных газах. Геохимия, № 3, 1956.
- Ф л о р е н с к и й К. П. Классификация природных газов по признакам, диагностирующим их происхождение. «Геохимия», № 8, 1956.
- Х и т а р о в П. И., Малинин С. Д. О равновесных фазовых отношениях в системе  $H_2O-CO_2$ . Геохимия, № 7, 1958.
- Х и т а р о в Н. И., Лебедев Е. Б., Рентгартен Е. В., Арсеньева Р. В. Сравнительная характеристика растворимости воды в базальтовом и гранитном расплавах. Геохимия, № 5, 1959.
- Х и т а р о в Н. И. Четырехсотградусная изотерма системы  $H_2O-SiO_2$  в пределах давления до 4000 кг/см<sup>2</sup>. Геохимия, № 1, 1956.
- Х и т а р о в Н. И. и Рентгартен Е. В. К геохимии углекислоты в гранитных интрузиях. Геохимия, № 2, 1956.
- Х и т а р о в Н. И. и Малинин С. Д. Экспериментальная характеристика части системы  $H_2O-CO_2$ . Геохимия, № 3, 1956.
- Х и т а р о в Н. И., Москалюк А. А. Экспериментальные данные к вопросам генезиса свинцового оруденения. Сов. геология, № 43, 1955.
- Труды Всес. научно-иссл. ин-та пьезооптич. минеральн. сырья (ВНИИП), т. I, вып. 2. Исследования минералообразующих растворов (по включениям). М., 1957.
- Труды Лабор. вулканол. АН СССР, вып. 13, 1958 (молодой вулканизм).