

В. В. АВЕРЬЕВ, С. И. НАБОКО и член-корреспондент АН СССР Б. И. ПИЙП

### СОВРЕМЕННЫЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ В ОБЛАСТЯХ АКТИВНОГО ВУЛКАНИЗМА

Для областей активного вулканизма характерно широкое развитие гидротермальных процессов, следствием которых является современный гидротермальный метаморфизм вулканогенных пород.

Гидротермальные процессы в этих областях приурочены: 1) к аппаратам вулканов с современным газопроявлением (<sup>2</sup>); 2) к местам разгрузки глубинных гидротерм, часто разобщенных с аппаратами вулканов.

В настоящей статье мы остановимся на втором типе гидротермального процесса.

В последние годы такие мощные современные месторождения гидротерм, как Вайракей в Новой Зеландии и Паужетские на Камчатке, разведуются глубокими буровыми скважинами с целью их энергетического использования. Благодаря этому появилась возможность изучения структуры очагов разгрузки гидротерм, их химической дифференциации и глубинного гидротермального метаморфизма пород. Гидротермы упомянутых месторождений имеют близкий химический состав и принадлежат к определенному типу: минерализация их не более 4 г/л, состав натрово-хлоридный, они обогащены кремневой и борной кислотами, содержат углекислоту, сероводород и азот. Их аналогами являются широко известные гейзеры Камчатки и Исландии, источники Йеллоустонского парка и ряд других. Температура гидротерм на глубине сотен метров достигает в отдельных случаях, как, например, в Новой Зеландии, 265°. Метаморфизм вулканогенных пород на упомянутых месторождениях имеет близкий характер и выражается в фельдшпатизации, цеолитизации и аргиллизации пород.

Излагаемые соображения основаны на результатах изучения гидротерм Паужетского месторождения на Камчатке с учетом данных по месторождению Вайракей в Новой Зеландии, которое посетил один из авторов.

Паужетские гидротермы приурочены к троговой впадине с амплитудой опускания свыше 1000 м, заполненной вулканокластикой верхнетретично-четвертичного возраста. Очаг разгрузки гидротерм находится у подножья вулcano-тектонического поднятия Камбального хребта, возникшего в центре трога в четвертичное время. С этим поднятием связывается нагрев подземных вод и обогащение их эндогенными эксгаляциями. Очаг нагрева и ближайшие действующие вулканы — Кошелева и Камбальный — удалены от места разгрузки гидротерм на расстояние нескольких километров.

По основным динамическим показателям паужетские гидротермы относятся к водам артезианского типа. В глубоких зонах очагов разгрузки гидротермы существуют только в жидкой фазе, что обусловлено высоким пластовым давлением. Так, на Паужетском месторождении максимальной температуре 190°, определенной на глубине 270 м, соответствует пластовое давление, равное 28 атм., что на 15 атм. выше давления насыщенного пара. Влияние температуры на движение гидротерм в таких условиях сказывается в снижении вязкости в 10—15 раз по сравнению с холодной водой, что значительно облегчает циркуляцию гидротерм по порам пород.

Воздействие температурного фактора ярко проявляется при приближении гидротерм к поверхности Земли. В этих условиях в связи со снижением давления получают развитие процессы парообразования. Средний уровень

парообразования на Паужетской термальной площадке находится на 120 м ниже поверхности Земли. На месторождении Вайракей, где температура достигает 265°, парообразование происходит еще глубже — на 300 м и более. В крупных трещинах пар образуется значительно ниже среднего положения указанных уровней. Таким образом, в верхней зоне очагов разгрузки глубинных гидротерм, измеряемой сотнями метров, наравне с жидкой водой существует также паровая фаза.

С особенностями динамики гидротерм, обусловленными парообразованием, тесно связаны процессы их химической дифференциации и изменения щелочности — кислотности. В глубоких зонах очагов разгрузки гидротермы характеризуются слабокислой реакцией. Это обусловлено наличием в их составе растворенного  $\text{CO}_2$ . Концентрация  $\text{CO}_2$  в гидротермах Паужетки и Вайракей достигает на глубине 70 м 250 мг/л, что соответствует ~ рН 6. В зоне парообразования  $\text{CO}_2$ , а также  $\text{H}_2\text{S}$  и другие газы практически полностью переходят в паровую фазу, и растворы приобретают слабо щелочной характер (рН 8—9). Паровая фаза по химическому составу резко отличается от натрово-хлоридной воды, от которой она отделилась, (табл. 1). Растворы, образующиеся в поверхностной зоне при конденсации пара в ходе химической эволюции, становятся кислыми, существенно сульфатными, за счет окисления сероводорода.

Параллельно с изменениями химизма в зоне парообразования происходит резкое падение температуры, которая при выходе гидротерм на поверхность снижается до 100°. Всё вместе взятое позволяет выделить в очагах разгрузки высокотемпературных гидротерм три термодинамические зоны, а именно: зону существования гидротерм в жидкой фазе, зону парообразования и зону конденсации пара. Каждая из выделенных зон, как было показано выше, характеризуется специфическими гидрохимическими чертами.

Изменение кислотности — щелочности гидротерм и их состава, являющиеся функцией глубинности, определяет вертикальную метасоматическую зональность в метаморфизме пород, а резкое различие в составе воды и конденсата пара — специфичность минералообразования. По характеру изменений в породах намечаются три зоны — аргиллитован, цеолитовая и пропилитовая, в общем совпадающие с термодинамическими зонами.

По данным бурения, на Паужетском месторождении гидротермальному метаморфизму подверглись туфы дацитов и андезитов, имеющие различную структуру и гранулометрический состав. Наиболее интенсивное минералообразование развивается в пористых литокластических туфах. В плотных кристаллокластических туфах дацита новообразование минералов незначительно и развито преимущественно по трещинкам и в пустотах.

Самая верхняя — зона аргиллизации — имеет мощность около 3 м. На поверхности образуются красные глины, состоящие из каолинита и лимонита, под ними голубые глины, обогащенные сульфидами железа. В обоих случаях часто сохраняется структура первоначальной породы. Аргиллизация пород происходит под воздействием кислых конденсационных сульфатных растворов и выражается в интенсивном выщелачивании с выносом из породы Na, K, Ca и Mg и концентрации в ней Al и Fe. Верхний горизонт глин обогащен Ti и Mn, нижний — несколько Mg, вероятно за счет примеси к каолиниту монтмориллонита.

В зоне цеолитизации (30—250 м) широкое развитие имеют ломонтит и адуляр и меньшее — кальцит, хлорит и гипс. Основная масса минералов развивается по цементу. Плаггиоклаз частично замещается адуляром, в большей части оставаясь свежим. При адуляризации плаггиоклаза образуется кальцит. Гематит в зоне цеолитизации замещен мушкетовитом, одновременно с этим перерабатывается магнетит. По периферии зерен ильменита развивается лейкоксен; пирит редок. Цеолитизация на глубинах 30—250 м происходит под воздействием ошелаченных в результате парообразования натрово-хлоридных растворов с температурой 100—190°.

При образовании цеолитов химическое изменение породы весьма незна-

чительно с привнесом в основной воды. Калиевый метасоматоз ( $K_2O$  в измененной породе до 5% вместо 1% в свежей) с образованием адуляра возникает в интервале 150—30 м, где происходит резкое падение температуры (с 190 до 120°) ошелаченных растворов. Интенсивность обогащения пород калием стоит в обратной зависимости от глубинности и температуры.

Адуляризация плагиоклаза вместо альбитизации на Паужетке вызвана, вероятно, более сильным понижением растворимости хлорида калия по сравнению с хлоридом натрия при падении температуры раствора, что относительно повышает коэффициент активности калия (<sup>1</sup>).

С глубины 240 м количество ломонтита уменьшается, почти исчезает адуляр, широкое развитие приобретает хлорит и кальцит и спорадически встречаются гидрослюда, гипс, цеолиты, халцедон. Во всей зоне резко возрастает количество пирита, гематит замещен мушкетовитом, ильменит нацело лейкоксенизирован; наблюдаются новообразования анатаза, брукита и реже рутила. Породы приобретают зеленоватый оттенок. Такой характер современного гидротермального метаморфизма мы определяем как пропилитизацию.

На Паужетке в каждом литологическом комплексе пропилитизация имеет свои особенности (см. табл. 2). Этому способствует также некоторое изменение в химическом составе гидротерм в глубоких зонах (см. табл. 1). В целом же пропилитизация на глубине 250—800 м протекает под воздействием слабокислых (рН ~6) хлоридных вод с небольшим количеством сульфатов, содержащих в растворе  $CO_2$  и  $H_2S$  и имеющих температуру 150—190°.

Таблица 1

Состав воды и конденсата с различных глубин скважины на Паужетском месторождении (в граммах на литр)

	Поверхность, поровый раствор	Глуб. 120—132 м		Глуб. 300—400 м		Глуб. 300—800 м, вода
		вода	конденс.	вода	конденс.	
$H^+$	0,0016					
$NH_4^+$	—	0,0007	0,0100	0,0007	0,0030	0,0007
$Na^+ + K^+$	0,0351	0,0766	0,0229	0,0308	0,0200	0,8326
$Ca^{2+}$	0,3382	0,0532	0,0040	0,1192	0,0012	0,1578
$Mg^{2+}$	0,0567	0,0049	0,0042	0,0070	—	0,0046
$R_2O_3$	Оч.-мн.	—	—	—	—	—
Сумма . . .		1,0354	0,0411	1,0667	0,0242	0,9057
$Cl^-$	1,0500	1,5400	0,0420	1,4700	0,0158	1,2806
$SO_4^{2-}$	8,4600	0,0550	0,0122	0,1642	0,0048	0,3629
$HCO_3^-$	—	0,0180	0,0366	0,0121	0,0237	0,0134
$CO_3^{2-}$	—	0,0244	—	0,0708	0,0060	0,0204
Сумма . . .		9,6410	1,5370	1,7171	0,0503	1,6770
$H_2SiO_3$	0,4200	0,1377	0,0021	0,1703	0,0015	0,1474
$HBO_2$	0,0066	0,1150	Нет	0,1265	Нет отн.	0,1107
$CO_2$	—	Нет	0,0248	—	—	—
Общая минерализация		2,9000	0,13	3,0766	0,0760	2,9308
Гидрохимическая формула	$M = \frac{SO_4}{R_2O_3}$	$M_{120-132} = \frac{Cl_{120}}{Na_{120}}$	$M_{250-300} = \frac{Cl_{250} \cdot HCO_3^4}{Na_{250} \cdot NH_{250}^4}$	$M_3 = \frac{Cl_{300}}{Na_{300}}$	$M_{300-400} = \frac{Cl_{300} \cdot HCO_3^4}{Na_{300} \cdot NH_{300}^4}$	$M_{250-800} = \frac{Cl_{250}}{(Na+K)_{250}}$
рН	1,97	8,1	6,0	—	—	—

В химическом отношении и пропилитовой зоне происходит резкое обогащение пород серой, углекислотой и водой и локальное — кремнием, кальцием и железом.

На месторождении Вайракей гидротермальное минераллообразование имеет отличные от Паужетки черты. Сверху вниз следуют морденит, ломонтит, вайрацит (кальциевый аналог анальцима), альбит с кальцитом по плагиоклазу, адуляр и в основании зоны — гидрослюды. Образование адуляра в Новой Зеландии имеет значительно большее развитие, чем на Паужетке, и приурочено к большим глубинам (210—270 м), где температура достигает 200—213°; это обусловлено более глубоким парообразованием.

Таблица 2

Состав гидротермально измененных пород на Паужетском месторождении

Компоненты	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	38,00	60,80	58,96	51,30	63,20	54,00
TiO <sub>2</sub>	1,32	0,67	0,84	0,93	0,56	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,30	15,44	16,46	15,38	15,37	14,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,13	2,33	2,75	5,00	2,27	2,10
FeO	0,55	2,52	2,51	4,60	1,63	2,52
MnO	0,78	0,09	0,14	—	0,15	0,17
MgO	0,15	1,83	2,45	2,50	3,70	3,34
CaO	0,94	4,33	5,12	6,12	5,03	9,25
Na <sub>2</sub> O	0,17	2,06	2,50	1,10	4,41	2,48
K <sub>2</sub> O	0,12	4,55	1,99	1,11	2,45	2,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	0,15	—	0,11	—
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	—	0,61	0,81	0,30	0,10	1,07
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	12,13	3,93	5,18	6,03	1,26	4,10
CO <sub>2</sub>	—	0,17	0,10	2,97	0,30	6,55
S	0,15	0,30	0,15	2,54	0,13	1,70
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,38	—	—	—	—	—
Сумма . . . . .	100,12	100,02	100,11	99,88	100,68	104,25

- 1— Поверхность Земли; каолинит из зоны аргиллизации; аналитик — Е. П. Рябчикина.  
 2— интервал 45 — 47 м; туф дацита с новообразованиями адуляра и ломонтита из верхней зоны цеолитизации; аналитик — В. П. Эрман.  
 3— интервал 225 — 234 м; туф дацита с новообразованием ломонтита из нижней зоны цеолитизации; аналитик — В. П. Эрман.  
 4— интервал 317 — 325 м; туф андезита с новообразованиями хлорита, кальцита и пирита из верхней зоны пропилитизации; аналитик — Е. П. Рябчикина.  
 5— интервал 382 — 390 м; кристаллокластический туф дацита, плотный, слабо измененный с новообразованиями в пустотах хлорита, кальцита, цеолитов; аналитик — В. П. Эрман.  
 6— интервал 624 — 630 м; туф андезита с новообразованиями хлорита, кальцита, гидрослюды, пирита из нижней зоны пропилитизации.

Описанный выше гидротермальный метаморфизм в областях современного вулканизма, сходный с околорудным метаморфизмом вулканических толщ в Трансильвании, Закарпатье и других вулканических районах и проявляющийся в пропилитизации, цеолитизации, адуляризации и аргиллизации, протекает в местах разгрузки подземных вод, активизированных высоким нагревом и растворением эндогенных эксгалций, в общем весьма незначительной минерализации (до 0,4%) с газами CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и др.

В связи с тем что очаги разгрузки глубинных гидротерм находятся в значительном удалении от очагов их нагрева (что зависит от гидрогеологических условий), формации гидротермально измененных пород могут быть территориально разобшенными с аппаратами вулканов.

Приуроченность гидротерм к троговым впадинам, заполненным в длительное геологическое время вулканокластикой, обуславливает большие мощности гидротермально измененных пород. Обогащение гидротерм сероводородом обеспечивает высаживание из слабо концентрированных растворов сульфидов с обогащением ими гидротермально измененных пород.

Лаборатория вулканологии  
Академии наук СССР

Поступило  
26 XI 1960

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Д. С. Коржинский, ДАН, 133, 1194 (1960). - С. И. Набоко. Тр. Лаб вулканологии АН СССР, в. 16 (1959).