

## Образование руд и минералов в вулканических областях

С. И. Набоко



Софья Ивановна Набоко, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией постмагматических процессов Института вулканологии ДВНЦ АН СССР. Специалист в области современного рудо- и минералообразования. Автор монографий: Вулканические эксгаляции и продукты их реакций. М., 1959; Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических районах. М., 1963 и др. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

Вулканические и связанные с ними гидротермальные процессы играют ведущую роль в геологической жизни нашей планеты: в формировании земной коры, преобразовании ее пород, рудообразовании.

В магматической стадии активности вулканов, когда они периодически извергают магму, основная часть летучих соединений металлов рассеивается в окружающей среде. Лишь изредка в благоприятных условиях, например в пещерах-ловушках в лаве-шлаке вокруг жерла, образуются зачаточные рудопроявления. Так, во время Большого трещинного Толбачикского извержения 1975—1976 гг. в лавовых нишах мы наблюдали образование миниатюрного медного рудопроявления.

В гидротермальной стадии активности вулканов, когда возникают кратерные озера и источники с термальными водами (представляющими собой разбавленные атмосферными водами конденсаты магматических газов), образование руд и минералов идет более интенсивно. При этом огромные массы эндогенных (глубинных) и выщелоченных из породы металлов выносятся кислыми водами в водные бассейны осадконакопления.

Когда вулканическая деятельность затухает, гидротермальная еще очень далека от своего финала. Гидротермальная

деятельность и активный вулканизм, по последним представлениям, порождены единым очагом магмообразования в верхней мантии и связаны с поверхностью Земли долгоживущими разломами в коре. Но гидротермальный процесс гораздо продолжительней активной жизни вулканов, предшествует ей и завершает ее. Подтверждением этого служит тот факт, что термальные источники значительно шире распространены на поверхности Земли. Например, на Камчатке в современную эпоху активны не более 30 вулканов, в то время как количество групп термальных источников превышает сотню. Кроме того, термальные воды характерны как для восточной зоны активного вулканизма, так и для центральной зоны Камчатки, где вулканизм уже миновал стадию активности.

Именно тем, что гидротермальные системы<sup>1</sup> находятся в активном состоянии десятки тысячелетий, и вызваны столь значительные по масштабам переработка горных пород, а также образование минералов и руд в местах разгрузки гидротермальных систем.

<sup>1</sup> Гидротермальными системами называют термоаномалии в верхней части областей современного вулканизма с гидротермальной активностью на поверхности Земли.



Паровые струи на участке кипящих источников, термальные воды которых обогащены металлами.  
Фото И. В. Вайнштейна.



Отложения аурипигмента.  
Фото И. В. Вайнштейна.

На участках, где гидротермальные растворы выходят на поверхность и вдоль термальных ручьев образуются обильные минеральные осадки, зачастую рудоносные. Часть же компонентов остается в растворенном состоянии и мигрирует с термальными водами из областей активных гидротермальных процессов. При резком изменении физико-химических параметров растворов, а это происходит при миграции термальных вод и слиянии их с водами озер и океанов, многие элементы и их соединения начинают выпадать в осадок. Особенно эффективен вынос микрокомпонентов с вулканических островов, где путь от истока термальных вод до бассейна накопления осадков достаточно короток.

Разнообразие химического состава термальных вод в областях активного вулканизма обусловлено главным образом дифференциацией глубинных, восходящих по разломам, гидротермальных растворов близ поверхности. Наиболее полно процессы приповерхностной дифференциации изучены на примере гидротермальной системы кальдеры Узон.

Гидротермальные растворы Узона, поступающие по разлому из области их глубинной генерации, имеют хлоридный щелочнометалльный состав. Они содержат сероводород, водород, угольную кислоту, азот, аммоний и углеводороды, а также обога-

щены мышьяком, сурьмой, ртутью, золотом, серебром, бором, литием, цезием, рубидием. Изменение состава глубинных вод в приповерхностной зоне вызвано их вскипанием и дегазацией с последующей конденсацией выделившегося пара. Одновременно глубинные гидротермальные растворы разбавляются грунтовыми и атмосферными водами, некоторые их компоненты, особенно сера, окисляются, кроме того, раствор взаимодействует с окружающими породами. Вся совокупность перечисленных процессов особенно интенсивно протекает в областях разгрузки перегретых вод с повышенным содержанием сероводорода.

Термальные воды в областях активного вулканизма совершают огромную работу по перемещению химических элементов. Только с одного вулкана Эбеко о-ва Парамушир ежедневно выносятся в океан около 700 т вещества, в том числе: 30 алюминия, 16 железа, 12 натрия, 6 калия, 23 кальция, 10 магния, 17 кремнезема, 148 хлора, 416 серной кислоты<sup>2</sup>. Помимо перечисленных элементов и соединений термальные воды выносят в океан значительные количества рудных элементов:

<sup>2</sup> Никитина Л. П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М., 1978.



Отложения реальгара.

Фото И. В. Вайнштейна.



Грязевые котлы с сульфидами железа.

Фото И. В. Вайнштейна.

мышьяка, сурьмы, ртути, свинца, марганца, меди, серебра.

Открытие на Камчатке в кальдере Узон сульфидного рудопроявления с железом, мышьяком, сурьмой и ртутью позволило ответить на вопросы об источнике металлов в гидротермах, условиях и формах их переноса и концентрации. Кальдера Узон — это огромная чаша диаметром около 12 км, покрытая озерами, грязевыми котлами, вулканчиками и пересеченная термальными ручьями. В одном из ее участков по краю ям с кипящей водой были обнаружены оранжевые каемки мышьяковистых соединений. Впоследствии на затопленной термальными водами площадке был вскрыт почти непрерывный желтооранжевый прослой, состоящий из реальгара ( $As_4S_4$ ), аурипигмента ( $As_2S_3$ ), антимонита ( $Sb_2S_3$ ) и самородной ртути. Еще позднее на выходах рудоносных термальных вод были обнаружены пузырьки нефти.

Мы пришли к выводу, что образование руд и нефти в кальдере Узон связано с глубинными перегретыми хлоридно-натриевыми гидротермальными растворами, которые поднимаются по разломам в коре. Однако споры о происхождении нефти, источниках металлов в термальных водах, формах переноса металлов, способах осаждения сульфидов продолжают и по сей день. Пока можно говорить лишь



Озерцо, образовавшееся во время извержения.

Фото В. Е. Гиппенрейтера.

о том, что такой тип гидротермальных рудопроявлений в областях активного вулканизма не связан собственно с активными вулканами, но порождается едиными глубинными процессами.



Кальдера Узон.

Фото В. Е. Гиппенрейтера.

В настоящее время в кальдере Узон начата автоматическая регистрация основных физико-химических параметров рудообразующих растворов, которые не могут не интересовать геологов, минералогов, геохимиков.

Помимо непосредственного изучения термальных вод на их выходах большие возможности для исследования гидротермальных процессов открылись перед геологами в результате бурения геотермальных скважин. Десятки километров керна геотермальных скважин были исследованы нами петрографическими, минералогическими и химическими методами. Кроме того, были отжаты поровые растворы из пород керна, отобраны для исследования глубинные пробы воды. В итоге проделанных работ в областях разгрузки гидротермальных систем Камчатки была выделена протяженная метасоматическая формация<sup>3</sup>. Разнообразие пород, составляющих

выделенную формацию, определяется тем, что в недрах гидротермальных систем существует несколько термодинамических зон.

Наиболее глубинная (абиссальная) зона генерации гидротерм пока недоступна для прямых исследований. Выше нее (в гипабиссальной зоне) существуют перегретые, с температурой до 300° С, водные растворы со слабокислой реакцией и застойным режимом поровых растворов в горных породах. В этой высокотемпературной среде происходит полное перерождение пород: место исходных минералов занимают альбит, хлорит, эпидот, кварц, кальцит, пирит и другие минералы, характерные для гидротермально измененных пород древних формаций пропилитов.

Выше, в субвулканических условиях глубинности, происходит вскипание растворов, их дегазация и отделение гидротермального пара. При этом гидротермальные растворы теряют углекислоту, охлаждаются

<sup>3</sup> Метасоматическая формация — совокупность пород, образовавшихся в результате изменения первичного химического и минералогического их состава с привнесом и выносом элементов.

ся и концентрируются. В существующей на этой глубине термодинамической и геохимической обстановке из раствора в породу поступают кремний, калий, литий, рубидий и другие элементы, т. е. образуются щелочные метасоматиты. Для подобных преобразований наиболее благоприятны водопроницаемые толщи пород и зоны разломов.

Еще выше, в условиях конденсации гидротермального пара, где горные породы растворяются близки к нейтральным, происходит замещение исходных минералов глинистыми (аргиллитизация) и цеолитами. Процессы аргиллитизации и цеолитизации наиболее активно протекают в пепловых туфах, представляющих собой водоупор, который столь необходим для существования гидротермальных систем с перегретыми водами.

На самую верхнюю часть разреза приходится зона интенсивной конденсации гидротермального пара и окисления вторичных термальных вод. Это зона максимального перерождения исходной породы, именно здесь выносятся из пород многие элементы и отлагаются рудные компоненты.

Таким образом, в недрах гидротермальных систем нами установлена гидрохимическая и метасоматическая зональность, проявляющаяся в разной степени изменения пород и в различных условиях образования руд и минералов.

Еще в самых первых образцах керна, полученных при бурении скважины на выходе термальных вод Паужетки<sup>4</sup>, нами было обнаружено значительное изменение пород и образование новых минералов, таких как кварц, кальцит, альбит, адуляр, эпидот, пренит, хлорит, слюда и другие. Прежде принято было считать, что подобные минералы не могут образовываться на таких малых глубинах.

Доказательством того, что мы имеем дело с современным процессом образования минералов под воздействием природных термальных растворов, стал эксперимент по получению новых минералов в самих геотермальных скважинах. В геотермальные скважины на Паужетке, Больше-Банном и Паратунском месторождениях на различные глубины (до 400 м) в проницаемых контейнерах были опущены эта-



Грязевой вулканчик и грязевые котлы на термальном поле кальдеры Узон.  
Фото И. В. Вайнштейна.

лонные образцы пород и минералов. После выдерживания их в продолжение года в закрытых скважинах при температурах 100, 130 и 190° С образцы извлекались для дальнейших исследований. За такой короткий срок породы и минералы изменялись; успевали образоваться альбит, адуляр, кристобалит, кварц, ломонит, анальцит, пирит, гематит, гидрогетит, монтмориллонит, гидрослюда, т. е. те минералы, которые были обнаружены нами в кернах пород, извлеченного при бурении этих скважин.

Таким образом, в областях активно вулканизма и связанной с ним гидротермальной деятельности геологи имеют редкую возможность исследовать закономерности современных процессов образования минералов. Правда, эти закономерности отражают условия формирования лишь определенной группы гидротермальных рудных месторождений, однако, знание их имеет существенное значение, поскольку позволяет распознавать такого типа месторождения в древних вулканических формациях.

<sup>4</sup> С 1966 г. на термальных водах Паужетки работает первая в СССР геотермальная электростанция.