

Г. М. В Л А С О В

**ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ СЕРЫ
И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ
БЛИЗПОВЕРХНОСТНОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ**

В течение последних десяти лет Дальневосточным и Камчатским геологическими управлениями было обследовано с различной детальностью более 40 современных и древних вулканов Камчатки и Курильских островов. В работах принимали участие геологи В. В. Бочкарев, Г. М. Власов, В. М. Никольский, А. К. Маркиц, Р. Е. Остроумов, Н. И. Массеров, Ю. В. Жегалов и др. Полученные материалы представляют интерес не только в части концентраций серы, но и в отношении познания процессов рудообразования на небольших глубинах.

Известные серные месторождения Камчатки и Курильских островов могут быть разделены на четыре генетических типа:

- 1) поверхностные отложения серы у фумарол и источников;
- 2) серные потоки;
- 3) кратерно-озерные отложения;
- 4) метасоматические месторождения.

1. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ СЕРЫ

Сера в кратерах и на склонах действующих вулканов отлагается из газов или сернистых вод. Обычно оба способа комбинируются друг с другом. Тем не менее образования серы из растворов и газов имеют характерные особенности и, чтобы отщепить их, полезно рассмотреть отдельно гидротермальные и сублимационные отложения серы.

а) Поверхностные отложения серы источниками

Существенное значение при отложении серы имеют минеральные источники трех групп: сульфатные термы, сульфатно-хлоридные термы, холодные сульфатные, сероводородные источники.

Фумарольный характер сульфатных терм Камчатки и Курильских островов не вызывает сомнений. Часто можно наблюдать, как на одном и том же разломе фумаролы сменяются при обилии вадозовых вод горячими сульфатными (обычно сульфатно-щелочными) источниками. Характерно, что температура и горячих вод и паров фумарол вдоль подобных разломов обычно близка к 100°.

Еще отчетливее ювенильный характер эмапаций проявляется в сульфатно-хлоридных термах. Наибольшие количества хлора содержатся

в кратерных водах вулканов, образованных в значительной своей части за счет конденсации вулканических газов и паров.

Что касается третьего типа минеральных источников, с которыми связаны отложения серы — холодных сероводородных, то вадозовый характер этих вод бесспорен. Эти источники выходят на крутых склонах котловин, центральная часть которых занята фумарольными полями. Выходы вод обычно бывают в тех местах, где по гидрогеологическим соображениям должны вытекать грунтовые воды. Дебит этих источников стоит в прямой связи с атмосферными осадками. Опускание базиса эрозии вызывает опускание зеркала грунтовых вод, а вместе с ним и уровня выхода холодных сероводородных источников. Все это показывает, что рассматриваемые минеральные воды представляют поверхностные воды, насыщающиеся при своей фильтрации сероводородом из холодных газовых струй.

Выпадение серы у устьев минеральных источников связано главным образом с окислением сероводорода. Сера из вод источников отлагается в виде желтовато-серого, аморфного или скрыто-кристаллического осадка, часто вместе с опалом, алушитом и сажеподобной разновидностью марказита (близкой к гидротроилиту). Характерно, что сульфиды железа отлагаются в значительных количествах лишь на некотором расстоянии от поверхности, при недостатке кислорода. В пористых породах, например в крупнообломочном делювии, это расстояние достигает 3—4 м, в плотных породах интервал отложения самородной серы сужается до 1—1,5 м. Благодаря этому на поверхностных месторождениях серы наблюдается отчетливая зональность, проявленная смесью самородной серы на глубине марказитом.

Для серных руд, отложенных на поверхности источниками, характерна скорлуповато-пачечная текстура, с чередованием тонких, до 1 мм, бледно-желтых серных и серовато-желтых, еще более тонких, серно-опаловых слоев. Пачечные текстуры наиболее резко проявляются в рудах, отложенных из холодных источников, деятельность которых почти прекращается в зимнее время. В пачечных же рудах, связанных с горячими источниками, тонкая скорлуповатость в рудах обычно отсутствует. Можно поэтому с большой долей вероятности полагать, что слообразование в пачечных рудах отражает сезонную ритмичность отложения.

В котловинах с крутыми бортами, в которых делювиальный материал постоянно засыпает выходы источников, отложение серы происходит в первую очередь в виде цемента, заполняющего промежутки между обломками, а затем распространяется метасоматически и на обломки. В итоге получаются своеобразные руды с агломеративной текстурой.

б) Поверхностные отложения серы из газов

При исследовании фумарол мы встретились с затруднениями, вызванными отсутствием достаточно четкой терминологии в отношении вулканических газовых струй. Одни исследователи предлагают строго разграничивать фумаролы, сольфатары и мофетты, другие используют наименование фумаролы как термин свободного пользования для вулканических газовых струй различного состава и температуры. Необходимость такого общего термина в первоначальную стадию изучения вулканических газовых струй (когда состав газов еще не известен) очевидна. Поэтому нами наименование фумаролы принимается в общем смысле, а дальнейшее подразделение фумарол на хлорные, серные и углекислые делается, по примеру других исследователей, в зависимости от преобладающего состава газов и их температуры. Газы хлорных фумарол обычно имеют у поверхности температуру в пределах 500—200°, серные — 200—80°, углекислые — 100—20°. Все фумаролы, кроме того, целесообразно разделять на сухие,

отличающиеся малым содержанием водяного пара или его отсутствием, и сырые с большим количеством паров, иногда составляющим до 90% и более от всех выделений. Сухие газы чаще имеют или очень высокую (более 200, до 500° и более) или очень низкую температуру (15—30°).

Отложение серы у фумарол связано как с окислением сероводорода и реакциями между сероводородом и сернистым газом, так и с конденсацией серных паров. В противоположность патечно-скорлуповатой сере, образующейся из сернистых вод, сера из газов и паров осаждается в виде прекрасных агрегатов моноклиньных или ромбических кристаллов. В зависимости от условий охлаждения получается та или иная окраска серы: лимонно-желтая, оранжевая, коричневая. Интерес к разноцветным модификациям серы определяется возможностью использования их в качестве геологического термометра. Зеленая окраска серы чаще вызывается примесями железа в виде тонкораспыленных сульфидов.

Распределение серы и сульфидов железа у фумарол подчиняется той же зональности, которую мы отметили для гидротермальных отложений серы: сера слагает поверхностную корку, обычно подстилаемую сульфидами железа. Но мощность верхней зоны со свободной серой здесь значительно меньше, чем в случае отложения серы водами, и составляет десятки см, редко достигая 1 м.

В фумарольных отложениях нередко наблюдается тонкое чередование слоев серы и сульфидов железа, благодаря которому фумарольные бугры в поперечном разрезе похожи на разрезы древесных стволов с годичными кольцами. Это обусловлено интересным явлением, именно — пульсацией при отложении серы и сульфидов железа: при увеличении активности фумарол нижняя сульфидная зона приподнимается и накладывается на верхнюю серную — образуется сульфидный слой, при опускании верхней поверхности сульфидной зоны формируется серный слой. Изучение таких концентрически-полосчатых разрезов фумарол может дать представление о режиме фумарол.

2. СЕРНЫЕ ПОТОКИ

Пульсирующей деятельностью фумарол обуславливается на некоторых действующих вулканах излияние из фумарол небольших серных потоков. Потоки эти образуются при увеличении активности фумарол, когда происходит разогревание и частичное расплавление ранее отложившейся у фумарол серы. В начальный момент разогревания фумарол, перед излиянием серного потока, количество выбрасываемой с газами капельно-жидкой серы настолько увеличивается, что округлые зерна серы скопляются у фумарол на значительной площади. Они покрываются расплавленной серой при излиянии потока. При многократном повторении этого процесса получается ритмическое повторение слоев округлых зерен серы и серных потоков. Число подобных ритмов может исчисляться десятками. По ним можно судить о режиме деятельности фумарол и вулкана, на котором фумаролы расположены.

Для текстуры расплавленной серы очень характерны крупные призматические псевдоморфозы ромбической серы по моноклиньной, ориентированные перпендикулярно поверхности охлаждения. Длина призматических серных кристаллов в потоках иногда достигает десятков см. При излиянии расплавленной серы в воду или на влажное дно образуются пузыристые текстуры серной массы.

3. КРАТЕРНО-ОЗЕРНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Кратерные депрессии действующих вулканов часто бывают заполнены горячими озерами. Питаются кратерные озера водой как за счет атмосфер-

ных осадков, так и конденсационными водами паров и гидротерм, выходящих на дне. Воды озер обычно относятся к сульфатно-хлоридным термам, особенностью которых является сильная минерализация и большое содержание хлора. Температура воды вблизи донных fumarol достигает 90° , в удалении от fumarol она быстро падает до $70-60^{\circ}$ и ниже.

Отложение серы в кратерных озерах связано главным образом с неполным окислением сероводорода. Вместе с серой в различных количествах выпадают черные сульфиды железа и белый ил, состоящий из опала с той или иной примесью алунита и гипса. Спектральные анализы устанавливают присутствие в слоистой сере микропримесей: марганца, титана, циркония, меди, никеля, кобальта, ванадия, хрома, олова, бария, стронция и др. элементов.

Сера, во всяком случае часть ее, выпадает в виде геля. Лишь пластичным состоянием серных комочков можно объяснить образование в кратерных озерах оригинальной «чечевичной» серы. Это мелкие, не более 1 мм в поперечнике, дисковидные зерна самородной серы. Силой поднимавшихся со дна озера газов коагулировавшие комочки серы выбрасывались к поверхности озера, ударялись о поверхность воды и сплющивались, приобретая более плоскую форму.

Общая мощность кратерно-озерных толщ нередко достигает 100 м. В этих толщах хорошо выражена ритмичность. Каждый из ритмов, от нескольких метров до 15—20 м, включает слой вулканических бомб (соответствующий периодам извержения) и вышележащую толщу более тонких озерных осадков, представляющих отложения в стадию fumarольной деятельности вулкана. Серные залежи обычно венчают толщи озерных отложений в каждом ритме и подстилаются илистыми осадками, обогащенными сульфидами железа. Таким образом, и здесь проявлена зональность отложений самородной серы и сульфидов железа. В крупных ритмах такого характера выделяются ритмы второго порядка, выраженные идущей снизу вверх сменой грубообломочного материала более тонким. Тонкая (в мм и долях мм) слоистость руд, обычно волнистая, отражает сезонную ритмичность: черные слои отложились зимой, светлые, более мощные и содержащие примесь обломков опала и измененных пород, — осенью и весной.

Сохранение слоистых серных залежей в кратерах вулканов, на первый взгляд, кажется удивительным. Этому способствует одно любопытное явление, широко распространенное в вулканических областях, именно — последовательное перемещение, «шагание», вулканов и кратеров вдоль разломов. Можно привести много примеров цепей вулканов и кратеров, в которых более ранний уже не проявляет признаков активности, другой находится в стадии fumarольной деятельности, третий — в расцвете вулканических сил, четвертый, представляющий обычно шлаковый конус, только начинает формироваться как вулкан и т. д. Это явление, видимо, связано с закупоркой продуктами вулканических извержений выводных каналов вулкана, почему лавы и газы пробивают себе новые пути вдоль трещины. В связи с последовательным перемещением кратеров получается, что слоистые серные залежи в кратерах вулканов, находящихся в fumarольной стадии, насыщаются вулканическим материалом, изверженным из соседнего кратера, находящегося в стадии эксплозионной деятельности.

4. МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Особый интерес к этим месторождениям вызван многими обстоятельствами. На метасоматических месторождениях прежде всего можно изучать продукты очень недавней гидротермальной деятельности. Важно,

что метасоматические месторождения созданы процессами, промежуточными по глубине между поверхностным вулканизмом и глубинными процессами рудообразования. Плодотворность учета поверхностных вулканических явлений при выяснении картины рудообразования доказана А. Г. Бетехтиным (1954). На метасоматических серных месторождениях имеется возможность, до некоторой степени, проверить теорию рудообразования А. Г. Бетехтипа. Закономерности, установленные А. Г. Бетехтиным для глубинной и самой поверхностной зон рудообразования, в случае их правильности, должны проявиться и в промежуточной зоне, соответствующей метасоматическим месторождениям. Метасоматические серные месторождения, как будет видно из дальнейшего, относятся к формации вторичных кварцитов. Конечно, все особенности этой формации гораздо легче изучить на ее молодых, неогеновых представителях, чем на древних, палеозойских, образованиях Казахстана. В понимании же этой формации пока много спорного.

Метасоматические серные месторождения располагаются на сильно эродированных неогеново-древнечетвертичных вулканах и вдоль разломов, проходящих вблизи вулканов. Характерно, что подобные вулканы обычно оказываются первыми в рядах шагающих вдоль разломов вулканов, о которых упоминалось выше. Вулканам, где паходятся метасоматические серные месторождения, свойственны и другие особенности, из которых прежде всего бросается в глаза очень большой масштаб изменений пород. Площади яркоокрашенных измененных пород в эрозионных кальдерах, обычно располагающихся на месте древних вулканов, составляют многие квадратные километры, нередко десятки. Другой характерной особенностью описываемых вулканов является обычное залегание под ними диоритовых и граио-диоритовых интрузий, обнажающихся в наиболее глубоких эрозионных врезках. Интрузивные породы имеют состав, близкий к составу андезитовых лав, изливавшихся из вулкана, и через порфиновые фации связаны с ними постепенными переходами. Еще одной характерной особенностью древних вулканов с залегающими под ними периферическими магматическими очагами является длительная деятельность их, продолжающаяся со времени складкообразовательных процессов в конце неогена, когда сформировались периферические очаги. Она проявляется и сейчас слабым движением фумарол и горячеключевой деятельностью на некоторых вулканах.

Метасоматические серные залежи, обнажающиеся у размытых вулканов, сложены своеобразными породами, состоящими главным образом из серы и кварца (или опала), часто с примесью рутила, названными нами серными кварцитами. Они образовались на глубине в несколько сотен, а в некоторых случаях — десятков метров от поверхности, вдоль разломов, по которым поднимались растворы и газы. Реликтовые структуры в рудах указывают на метасоматический характер процессов рудообразования. В серных кварцитах нередко наблюдаются остатки колломорфных текстур, чередующиеся с тончайшими слоями опала, серы и иногда сульфидами железа. Но чаще руды раскристаллизованы и сложены мелкокристаллическим кварцем и серой, причем сера распределяется в виде оригинального сетевидного агрегата между кварцевыми зернами. Такие сетевидные текстуры получились вследствие того, что при переходе в кварц опал терял воду, растрескивался, и сера при образовании кварцевых кристаллов была вытолкнута в образовавшиеся трещины сокращения.

Различные комбинации тектонических, литологических и прочих факторов вызывают очень большое разнообразие форм метасоматических серных залежей. Чаще они представляют неправильные массивные тела, четкообразно располагающиеся вдоль разломов. Очень распространены трубообразные тела, распространение которых по вертикали можно про-

следить в обнажениях на 100—120 м. При избирательном замещении слоев рыхлого пирокластического материала форма рудных тел приближается к пластовой. Часто наблюдаются комбинации трубообразных тел серных кварцитов и пластообразных стратиграфических залежей. Трубообразные тела отмечают главные пути поднимавшихся гидротерм, а пластообразные залежи соответствуют горизонтам пористых и благоприятных для замещения пород, вдоль которых растворы инфильтрировали в стороны.

Залежи серных кварцитов залегают среди больших масс измененных пород. Благодаря большой прочности серные кварциты выделены эрозией в виде высоких скалистых возвышенностей, протягивающихся вдоль разломов.

Желтовато-серые скалы серных кварцитов окаймляются зоной (шириной до 300—400 м) каолинизированных и алунизированных пород, выделяющихся своей ярко-белой окраской. Граница между серными кварцитами и этими породами очень резкая.

В зоне белых каолинизированных пород местами наблюдается дифференциация измененных пород по минералогическому составу. В ней обособляются породы, с одной стороны, обогащенные алунином, с другой — серицитовые породы. Алунитовые породы развиты преимущественно во внутренней части зоны каолинизации (у контактов с серными кварцитами), серицитолиты — во внешней части этой зоны.

Самое наружное окаймление серных кварцитов составляют бурые хлоритизированные и пиритизированные породы, резко сменяющие породы зоны каолинизации. При удалении от разломов бурые измененные породы постепенно, через десятки или сотни метров, а иногда и через несколько километров, переходят в неизменные вулканические породы.

Таким образом, на метасоматических серных месторождениях наблюдается, в общем виде, следующая последовательность пород (от внутренних зон к внешним): серные кварциты, алуниты, каолинизированные породы, серицитолиты, пропилиты. Эта последовательность повторяет зональность, описанную Н. И. Наконником для так называемых вторичных кварцитов (1954). Если учесть, что в зонах измененных пород с метасоматическими серными месторождениями уже встречены такие характерные для вторичных кварцитов минералы, как диаспор, лазулит, аугелит и др., то можно говорить, что в древних эродированных вулканах развиты образования, если не тождественные вторичным кварцитам, то очень сходные с ними.

Описанная выше горизонтальная, площадная зональность отчетливо проявляется и в трубообразных структурах, обычно сопровождающих главные серные залежи.

Там, где эрозионный врез достаточно глубок, но где эрозией не уничтожена верхняя часть залежей серных кварцитов, на метасоматических серных месторождениях обнаруживается и вертикальная зональность. Верхняя часть рудных выходов сложена бледно-желтыми бессульфидными серными рудами с поразительно постоянным содержанием серы в пределах 33—34%. В нижней части распространены желтовато-серые руды со значительным содержанием марказита и примесью пирита; количество последнее увеличивается вниз. Следовательно, вертикальная зональность, выраженная идущей сверху вниз сменой самородной серы сульфидами, проявляется на всех типах вулканических серных месторождений, от поверхностных отложений серы до метасоматических залежей. Граница между зонами с самородной серой и с сульфидами соответствует границе окислительной и восстановительной зон. Значительным увеличением мощности отложений самородной серы в гидротермальных месторождениях прекрасно подчеркивается роль воды как окислителя.

Теоретически можно предполагать, что на глубине должна наблюдаться смена пород, отражающих образование в кислой среде, породами, образовавшимися в щелочных условиях. Такая смена отмечается по геотермическим буровым скважинам на вулканах Исландии и Новой Зеландии (Steiner, 1953). Наиболее глубокие из этих скважин вскрывают под алунизированными породами измененные породы с новообразованиями цеолитов, адуляра. Наблюдения В. С. Соболева на древних карпатских вулканах также показывают, что алунизированные породы на глубине сменяются измененными породами с адуляром, что свидетельствует о щелочном характере глубинных растворов (Соболев и Фишкина, 1953). Замена на глубине измененных пород, образованных с участием серной кислоты, породами со значительным содержанием кальцита и цеолитов наблюдается и в некоторых районах Среднего Камчатского хребта.

Вертикальной зональностью объясняется нередко наблюдающееся на метасоматических серных месторождениях частичное замещение серы сульфидами железа. Японские исследователи связывают это с отложением основной массы сульфидов в последние стадии минерализации (Власов, 1948). Однако это заключение плохо согласуется с частым участием (в нижних частях месторождений) сульфидов железа в тонких коломорфных слоях вместе с серой и опалом. Очевидно, что главная масса сульфидов железа у границы серной и сульфидной зон отложилась одновременно с серой и опалом. Но в том случае, когда по трещине начинала идти новая порция раствора, физико-химические условия рудоотложения на время и в коротком вертикальном интервале могли нарушиться, и часть уже отложившейся серы могла заместиться сульфидами железа; сульфидная зона при этом как бы приподнималась и накладывалась на верхнюю зону самородной серы. Сходное явление мы уже отмечали для фумарольных отложений серы, и оно лучше объясняет наблюдающиеся на метасоматических месторождениях явления, чем мнение об отставании во времени отложения сульфидов по отношению к сере.

Как образовались метасоматические серные месторождения с характерной зональностью измененных пород?

В японской геологической литературе, несмотря на то, что метасоматические месторождения в Японии широко используются промышленностью, достаточно удовлетворительной картины образования этих месторождений не дается и о зональности измененных пород даже не упоминается. Подробно разбирая вопрос о последовательности минералообразования на серных месторождениях во времени, японские исследователи упустили из вида более практически важную последовательность минералообразования в пространстве.

Химические анализы показывают образование кварцитов внутренней зоны в результате гидротермально-кислотного выщелачивания всех составных частей пород, кроме кремнезема и устойчивой в кислой среде двуокиси титана, наблюдающейся в виде рутила.

Труднее восстановить картину совместного отложения опала и серы, притом в постоянной пропорции 2 : 1, характерной для верхних горизонтов месторождений.

Большую помощь в объяснении генезиса метасоматических серных месторождений оказали нам работы о режиме серы и кислорода в рудообразующих растворах А. Г. Бетехтина (1954). Теоретические представления А. Г. Бетехтина хорошо объясняют и образование серных кварцитов, и причину возникновения вертикальной зональности на серных месторождениях.

Из-за растворения и диссоциации сероводорода в охлаждающихся по мере приближения к поверхности рудоносных растворах, эти растворы все более и более обогащаются серой. Одновременно увеличение кисло-

родного потенциала при движении растворов вверх обуславливает возрастание степени окисления серы. Обогащение растворов серой вызывает выпадение из них сначала малосернистых, а затем многосернистых сульфидов, в том числе пирита и марказита. Совместное отложение последних, как это хорошо описано в литературе, соответствует примерно моменту перехода растворов от щелочного состояния к кислому, причем образование пирита более характерно для слабо щелочных сред, марказита — для кислых. Поэтому пирит более развит в нижних зонах метасоматических серных месторождений, марказит — в верхних.‡

При дальнейшем окислении ионов серы и переходе ее в электрически нейтральный атом серы, создаются благоприятные условия отложения самородной серы и, как пишет А. Г. Бетехтин (1954), «...существенно ограничиваются условия образования сульфидов». Этот этап соответствует образованию серных кварцитов. |

В еще более окислительной обстановке сульфиды железа оказываются уже неустойчивыми образованиями, чем и определяется верхняя граница их распространения. Сера в этих условиях существует уже в виде четырехвалентного катиона S^{4+} . В такой форме она входит в сернистый газ SO_2 . Получающиеся при этом растворы SO_2 в воде и при дополнительном окислении серы сернистая и серная кислоты сильно воздействуют на породы и разлагают их. В анион серной кислоты $(SO_4)^{2-}$ сера входит уже в виде шестивалентного катиона S^{6+} , как продукт ее высшего окисления. Сильно окислительная поперхностная обстановка, в которой существует катион S^{6+} , уже неблагоприятна для накопления самородной серы; в ней, наоборот, должно происходить разрушение масс самородной серы, что и имеет место в действительности.

Тонкие коломорфные текстуры неметаморфизованных серных кварцитов в верхних горизонтах серных месторождений, с чередованием «слоев» опала и серы, указывают на их совместное отложение из коллоидных растворов. Причина постоянства в бессульфидных серных рудах содержания серы и кремнезема (в отношении 1 : 2) пока остается неясной. Возможно, это явление связано с сорбцией серы коллоидами кремнезема.

Образование на метасоматических серных месторождениях горизонтальных зон с резкими границами обусловлено изменениями состава растворов, инфильтрующихся в стороны от подводящего канала-разлома и взаимодействующих с окружающими породами. В объяснении зональности измененных пород нам, помимо работ Н. И. Наковника (1954), очень помогли представления Д. С. Коржинского.

Внутренняя зона серных кварцитов, отделенная от соседней зоны каолинизации резким фронтом замещения, представляет, как говорилось ранее, зону интенсивного серно-кислотного выщелачивания. Единственным устойчивым минералом в сильнокислотных условиях зоны, если не считать рутила, оказался опал. Все прочие продукты разложения пород выносились растворами, за исключением небольшой части Al_2O_3 , которая, вместе с сульфатным анионом, вошла в состав алуниита, распространенного в серных кварцитах, главным образом в виде прожилков. Главная же масса алуниита, из-за резкой смены физико-химических условий осадилась у первого фронта замещения рядом с серными кварцитами.

В зоне каолинизации действовали уже частично нейтрализованные растворы, и в слабо кислотных условиях зоны каолинит представлял уже устойчивый минерал. Как показывают химические анализы каолинизированных пород, главными процессами в зоне каолинизации являлись вынос щелочей, значительное уменьшение содержания окислов железа, магния и кальция при относительно небольшом уменьшении содержания кремнезема. Большая часть подвижных щелочей выносилась растворами

в самую внешнюю часть зоны каолинизации и осаждалась в форме серицитолитов у второго фронта замещения (рядом с пропилитами) после полной или почти полной нейтрализации растворов.

Внешняя зона измененных пород, для которой характерны пропилитовые изменения, представляла арену деятельности уже полностью нейтрализованных и даже слабо щелочных растворов.

Таким образом, факты, наблюдаемые на разрушенных древних вулканах Камчатки и Курильских островов, хорошо согласуются с мнением А. Г. Бетехтина о характере рудообразующих растворов и с предположенным Н. И. Наковником сольфатарно-гидротермальным генезисом вторичных кварцитов (во всяком случае — их внешних фаций).

Образование метасоматических серных месторождений вблизи поверхности является следствием установленной А. Г. Бетехтиным закономерности — обогащения гидротермальных растворов серой по мере приближения к поверхности земли.

Отложения с самородной серой представляют самую верхнюю часть гидротермальных месторождений, размытую на большинстве древних сульфидных месторождений. С другой стороны, они обнажаются в самых нижних частях эрозионных срезов древнечетвертичных вулканов, в которые, к сожалению, редко заглядывают рудники и вулканологи. Первые обычно игнорируют эффузивы, как бесплодные образования, вторых больше привлекают эффектные поверхностные проявления современного вулканизма. Неудивительно, при этих условиях, что распространенным является мнение о редкости гидротермальной серы, хотя в Японии давно уже известны многочисленные гидротермально-метасоматические серные месторождения, а недавно подобные месторождения были обнаружены и на советском Дальнем Востоке. Возможно, что и среди казахстанских массивов вторичных кварцитов имеются породы, некогда содержавшие самородную гидротермальную серу.

Главнейшими особенностями обстановки, в которой формировались вторичные кварциты, определившими характерные черты этих образований, были: близость подхода горячих, первоначально щелочных, растворов и газов к поверхности; сильная, вследствие охлаждения растворов, диссоциация сероводорода; высокая степень окисления серы; образование кислых растворов. Растворы, взаимодействуя с породами, постепенно нейтрализовались и образовывали метасоматические серии пород от кварцитов до серицитолитов и пропилитов.

Изменения глубинных щелочных растворов в приповерхностной обстановке в кислые, а затем, при взаимодействии с окружающими породами, опять в щелочные просто объясняют противоречия, с которыми столкнулись американские исследователи при решении вопроса о взаимоотношении во времени кислых и щелочных вулканических вод.

Бунсен (Bunsen, 1847), Аллен (Allen, 1923) и Хегю (Hague 1891), основываясь на большой сумме фактов, доказывали, что первичные воды вулканов кислые, а затем кислые воды при взаимодействии с окружающими породами постепенно становились щелочными. Парк приводил в пользу обратного взаимоотношения неопровержимый аргумент, именно — переход вниз по глубоким скважинам в вулканических районах пород, измененных кислыми растворами в более глубоких горизонтах в породы, изменения которых связаны с щелочными растворами (Day and Allen, 1925). По-видимому, правы и те и другие исследователи: из глубин шли щелочные растворы, у поверхности переходившие в кислые, а затем опять в щелочные.

В молодых вулканических областях можно надеяться на решение многих неясных вопросов образования вторичных кварцитов (и рудообразования вообще). Одним из таких главнейших вопросов является причина

закономерных изменений состава вулканических газогидротерм во времени.

Помимо нейтрализации кислых растворов изменение состава вторичных кварцитов и их зональность определяются, как отмечает Н. И. Наковник, и другими явлениями; последовательной сменой при вулканических процессах реагентов различного состава «Сначала,— пишет Н. И. Наковник, — преобладало поступление галоидоводородов, отчасти бороводородов и паров воды с примесью H_2S и SO_2 , затем серных газов и главным образом SO_3 с парами воды и, наконец, CO_2 и паров воды (Наковник, 1954, стр. 96). Существование такой закономерности постепенного изменения состава вулканических продуктов не вызывает сомнений и неоднократно отмечалось вулканологами на молодых вулканах. Причины же этой закономерности в достаточной степени не выяснены. Изменения состава продуктов, выделяемых вулканами, обычно сопровождаются падением температуры газовых и паровых струй. Можно поэтому догадываться, что в первый этап вулканической газотермальной деятельности слишком высокая температура вулканических продуктов обуславливала небольшую химическую активность сероводорода. Повышение растворимости сероводорода с охлаждением растворов, его диссоциация, окисление серы видимо определили характерные особенности средней, сернистой, стадии поствулканической деятельности. Окончательное охлаждение растворов в третьем этапе, слабое поступление ювенильных продуктов при затухании вулканических процессов вызвали преобладающую роль углекислоты в этом этапе.

Можно полагать, что состав реагентов в последнем этапе в значительной степени определялся взаимодействием поднимающихся слабых растворов с окружающими породами и вадозовыми водами, быстрой их нейтрализацией и насыщением углекислотой. На возможность этого указывает эволюция минерального состава вод источников, выходящих вдоль разломов, протягивающихся через действующие вулканы. В прикратерной части вулканов в таких случаях развиты сульфатно-щелочные термы, обычно с большим содержанием хлора. При удалении от вулканов выходящие по одному и тому же разлому минеральные воды характеризуются, наряду с уменьшением минерализации, постепенным увеличением содержания углекислоты и уменьшением содержания сульфатных и хлор анионов. Такая картина, например, установлена В. М. Никольским для источников, выходящих по разлому у Мутновского вулкана. В Быстринском районе на Срединном Камчатском хребте Ю. В. Жегалов и Ю. В. Макаров наблюдали у разрушенных древних вулканов изменения пород, вызванные кислыми растворами, а в отдалении от вулканов, на разломах, проходящих через них, карбонатизированные измененные породы с цеолитами. Деятельность холодных минеральных источников в Срединном хребте продолжается и сейчас.

Если отвлечься от деталей, то в Курило-Камчатском регионе можно выделить районы, преобладающий состав вулканических продуктов в которых отражает этапность вулканических процессов. Активные вулканы Восточного вулканического пояса и Курильских островов характеризуются высокотемпературными фумаролами, выделяющими большие количества хлора и бора. На древних вулканах Срединного Камчатского хребта и Курильских островов хорошо выражен недавний «сернистый» этап. В настоящее время область древнего вулканизма Срединного хребта вошла в «углекислый» этап.

Таким образом, этапы поствулканической, газогидротермальной деятельности являются важнейшей геохимической закономерностью, обуславливающей зональность минеральных продуктов не только в пределах отдельных месторождений, но и в пределах крупных районов.

В объяснении этой закономерности, как и вообще в развитии теории гидротермального рудообразования, многим могли бы помочь гидрогеологи. К сожалению, среди советских гидрогеологов последнее время начинает проявляться тенденция игнорирования вулканических процессов при объяснении генезиса минеральных вод. Некоторые видные гидрогеологи высказывают положения о поверхностном происхождении вод и минерального состава большинства минеральных источников даже в областях современного вулканизма. Например, все камчатские хлоридно-щелочные термы, по заключению сотрудников Всесоюзного института курортологии, находятся в генетической связи с морскими третичными толщами. Между тем хлор в минеральных водах вулканических районов является преимущественно ювенильным, что доказывается резким увеличением его содержания в кратерах вулканов. Кроме Курило-Камчатского района в этом отношении можно сослаться на данные Аллена и других исследователей по вулканам Северной Америки и Исландии (Allen, 1923; Borth, 1950; Day and Allen, 1925). Сотрудники Института курортологии ставят под вопрос ювенильное происхождение сероводорода, выделяющегося из вод горячих источников при их выходе на поверхность; происхождение этого сероводорода курортологи склонны связать с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий.

Отрыв некоторыми гидрогеологами самой верхней оболочки земли от ее недр отчетливо выражен в объяснении ими эволюции и гидрохимической зональности минеральных вод.

Расширяя зону циркуляции поверхностных вод на многие километры и даже десятки километров в глубину земли, гидрогеологи устанавливают в этой зоне вертикальную гидрохимическую зональность, выраженную в нижних горизонтах образованием растворов, обогащенных анионом Cl , в средних — анионом SO_4 , а в верхних — анионом HCO_3 . При этом с глубиной увеличивается минерализация растворов, и в нижней, хлоридной, зоне содержится значительное количество металлов (Германов, 1953). Подобная гидрохимическая зональность объясняется гидрогеологами этапностью формирования минеральных вод, которые, по мере просачивания с поверхности на глубину, приобретают сначала гидрокарбонатный, затем сульфатный, а потом хлоридный состав. Хлоридные воды, таким образом, получают в конечном этапе концентрации и метаморфизма поверхностных вод (Сули, 1948).

На подобных взглядах зиждется метафизическая теория погребенных морских вод. Объясняя образование гидрохимической зональности внешней оболочки земли без участия глубинных продуктов, гидрогеологи доходят до отрицания магматогенного рудообразования. Примером может являться гидрогеологическая теория рудообразования А. И. Германова (1953), по мнению которого сера сульфидов руд заимствована из осадочных пород. Несостоятельность теории Германова доказывается уже тем, что, по исследованиям А. П. Виноградова, вулканическая сера и сера сульфидов рудных жил родственны по изотопическому составу и резко отличаются от сульфатной серы осадочных пород (Виноградов, 1954).

Следует обратить внимание на то, что гидрохимическая зональность, устанавливаемая гидрогеологами, повторяет особенности геохимии зон рудообразования. В глубинной зоне металлы находятся в растворах в виде хлоридов (Бетехтин, 1954), при приближении к поверхности главную роль начинает играть сера, в достаточно окислительной обстановке переходящая в сульфатную форму. В поверхностных условиях, после нейтрализации растворов, обычно развиваются карбонаты.

Бросается в глаза также сходство гидрохимической зональности с закономерной сменой во времени вулканических эффузий различного состава. Вертикальным зонам гидрогеологов с хлором, серой и уголекислотой

соответствует смена во времени выделений вулканами сначала больших масс хлора, затем серы и потом уголекислоты. Видимо, уровни гидрохимических зон не остаются постоянными, а поднимаются и опускаются, и эти колебания определяются, конечно, не условиями циркуляции надозовых вод, а вулканическими процессами. При сильном вулканизме верхняя граница зоны с хлором и другими галоидами достигает поверхности земли, и они в больших массах выделяются на поверхности. При некотором ослаблении вулканизма верхняя поверхность зоны с хлором понижается и выше ее развивается «серная оболочка» — фумаролы начинают выделять сернистые газы. При угасании вулканизма выше серной зоны появляется уголекислая, которая проявляется на поверхности уголекислыми фумаролами.

В областях с давно угасшим вулканизмом нижняя граница уголекислой зоны опускается на большую глубину, и границы между зонами несколько стабилизируются. Последнее обстоятельство и явилось причиной заключения гидрогеологов о подмеченной ими (на платформах и в областях с давно угасшей вулканической деятельностью) связи гидрохимической колонки не с постоянно меняющимся фактором вулканизма, а с относительно постоянными, при данной геологической структуре, условиями циркуляции подземных вод. Между тем ясно, что гидрохимическая зональность отражает какие-то более глубокие связи между внутренней и внешней частями земли и обусловлена как поверхностными, так и глубинными процессами, в том числе вулканизмом.

Недоучет гидрогеологами вулканических процессов объясняется тем, что учение о подземных водах развилось, в значительной степени, при работах в нефтеносных областях. Построив химическую классификацию минеральных вод, многие гидрогеологи стали ее применять для объяснения генезиса минеральных вод иных в геологических отношениях районов, не учитывая конкретную геологическую обстановку. Имеется много исторических примеров, показывающих, что отрыв от геологической «почвы», построение теорий генезиса преимущественно на химических признаках приводило к ошибочным выводам даже крупнейших ученых. Можно указать карбидную теорию образования нефти Д. И. Менделеева и теорию генезиса нефти Стадникова.

Сходные химические продукты могут образоваться в различных геологических обстановках. Источником сульфатных анионов в подземных водах нефтеносных областей и платформ являются, преимущественно, сульфаты, залегающие в осадочных толщах (гипс, ангидрит и др.). Сульфатный анион в водах вулканических районов представляет результат высшего окисления серы, входящей в состав ювенильного сероводорода. Преимущественно хлоридный состав морских вод связан с накоплением в течение многих миллионов лет в морских бассейнах наиболее легко растворимых хлористых солей, выносимых с суши водными потоками, и, отчасти, — продуктов вулканических подводных извержений. Хлоридные минеральные воды больших глубин, поднимающиеся в вулканических районах к поверхности по разломам, представляют в значительной своей части ювенильные образования, «отработанные рудоносные растворы» (Бетехтин, 1954), а не погребенные морские воды. Десульфирование сульфатно-натровых вод, превращение их в гидрокарбонатно-натровые воды вблизи поверхности в невулканических районах происходит обычно при участии углеводородных соединений, находящихся в осадочных толщах. Смена сульфатных терм гидрокарбонатными на вулканах связана с замиранием вулканической деятельности, нейтрализацией кислых растворов и насыщением их карбонатами при инфильтрации охлажденных растворов через вулканические породы.

При этих условиях, конечно, нельзя втискивать минеральные воды вулканических районов в рамки генетической классификации минеральных

вод, разработанной в нефтеносных районах. Мы стоим сейчас перед фактом, что гидрогеологическая теория генезиса минеральных вод, по существу превратившаяся в химическую теорию генезиса вод, не помогает геологам при выяснении генезиса рудных месторождений, а нередко, наоборот, уводит их в сторону от решения проблемы рудообразования.

Ошибки гидрогеологов в объяснении генезиса минеральных вод вулканических районов и в толковании процессов рудообразования обусловлены главным образом тем, что гидрогеологи работают над этими вопросами оторванно от геологов-рудников, вулканологов и геохимиков. При этих условиях можно опасаться беспочвенных споров между вулканологами, некоторые из которых могут отстаивать в основном ювенильный характер вод горячих минеральных источников, и гидрогеологами, которые защищают преимущественно вадозовый характер этих вод и их минеральной нагрузки. Спор этот слишком стар, а вопрос спора слишком труден, чтобы его можно было решить без получения дополнительных данных. Вопрос может быть решен только при координации усилий геологов различных специальностей. Гидрогеологи в вопросе генезиса минеральных вод могут очень помочь выяснением характеристики осадков, условий стока и фильтрации вод. В руках геохимиков имеется такое сильное средство, как изотопный анализ. Вулканологи, владея большим материалом о составе вулканических вод и газов, могут дать критерии для выделения несомненно ювенильных образований, установить связи вод различного состава с различными геологическими обстановками и различными фазами вулканической деятельности. Рудники, изучающие продукты, отложенные гидротермами на глубине, имеют возможность дать представления о процессах, происходивших в глубинах, недоступных для непосредственных наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

- Бетехтин А. Г. О природе гидротермальных рудообразующих растворов. Сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1954.
- Виноградов А. П. Геохимия изотопов. «Изв. АН СССР», сер. геол., № 3, 1954.
- Власов Г. М. Вулканические серные месторождения Японии (реферат). «Тр. Лабор. вулканологии и Камч. вулк. станции», вып. 6, 1948.
- Германов А. И. О возможном участии подаемных вод в гидротермальном рудообразовании. «Изв. АН СССР», сер. геол., № 6, 1953.
- Коржинский Д. С. Очерк метасоматических процессов. Сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд. АН СССР, 1954.
- Наковник Н. И. Вторичные кварциты, их фации, генезис и практическое значение. Сб. «Измененные околорудные породы и их поисковое значение». «Тр. ВСЕГЕИ», 1954.
- Сулин В. А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод. Изд-во АН СССР, 1948.
- Соболев В. С., Фишкина М. И. Метасоматическая зональность и процессы образования анулита. «Минер. сборник Львовского геол. об-ва», № 7, 1953.
- Allen E. T. Hot springs of Yellowstone national park. Washington, 1923.
- Wirth F. W. Volcanic geology. Hot springs and geisers of Iceland, 1950.
- Bunsen R. Hot springs of Iceland, 1947.
- Day A. L. and Allen E. T. The volcanic activity and hot springs of Lassen Peak. Washington, 1925.
- Hague A. Origin of the thermal waters of the Yellowstone Park, 1891.
- Steiner A. Hydrothermal rock alteration at Waitakei, New Zealand. «Economic Geology», v. 48, № 1, 1953.