

Я. И. ОЛЬШАНСКИЙ

## О БОЛЬШОЙ ТЕКУЧЕСТИ СУЛЬФИДНЫХ РАСПЛАВОВ И ВОЗМОЖНОМ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ЗНАЧЕНИИ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

(Представлено академиком И. Ф. Григорьевым 14 VIII 1948)

При экспериментальном изучении сульфидно-силикатных систем (1) нам пришлось столкнуться с чрезвычайно высокой подвижностью сульфидных расплавов. Поясним это несколькими примерами.

При плавлении FeS в железном тигле наблюдалось быстрое поверхностное течение сульфида по железной стенке, в результате чего тигель (диаметр 18 мм), содержащий 10 г FeS при температуре 1250—1300° С, опорожнялся в течение 20—40 мин. Для проверки были приняты специальные опыты, которые не оставили сомнения в том, что вытекание жидкости не связано с пороками или разъеданием стенок, а происходит по поверхности железа через верхний край тигля. Течение не прекращается и в том случае, когда поверхность сульфида закрыта слоем расплавленного силиката.

Физическая сущность этого явления заключается в следующем.

Благодаря малому поверхностному натяжению на границе между твердым железом и расплавленным сульфидом последний растекается, образуя тонкую жидкостную пленку на всей внутренней и внешней поверхности тигля. Течение жидкости происходит в этой пленке смачивания под действием силы тяжести. Большая скорость течения заставляет предположить, что передвижение жидкости (после того как пленка уже образовалась) происходит не за счет диффузионных процессов, а благодаря упругим свойствам пленки, которая может, повидимому, передвигаться как эластичная лента. Действительно, химический анализ стенок тигля с затвердевшим на ней сульфидом показал, что толщина пленки не превышает 0,003 мм. Фактическая толщина пленки, вероятно, значительно меньше, так как химическим анализом был определен сульфид, заполнявший все неровности железной поверхности. Зная толщину сульфидной пленки и объем жидкости, вытекшей из тигля, можно было определить линейную скорость течения. Расчеты дали величину порядка 0,4 см/сек., что значительно превышает скорость диффузионных процессов в жидкостях.

Такое же поверхностное течение расплава имеет место и при плавлении сульфидно-силикатных смесей в тиглях из кварцевого стекла, но только в присутствии небольшого количества силикатов натрия (достаточно 1%). При этом по кварцевым стенкам течет уже не сульфид, а сульфидно-силикатный расплав, содержащий в некоторых случаях до 40—50% сульфида.

В результате поверхностного течения, если одновременно не совершаются какие-либо другие процессы, может происходить перемещение жидкого сульфида только с высокого уровня на более низкий. В тех случаях, однако, когда жидкий сульфид претерпевает какие-либо изме-

нения, сопровождающиеся выделением энергии, течение может сопровождаться и поднятием сульфида.

Поднятие сульфидного расплава с низкого на более высокий уровень может происходить, например, в следующих трех случаях:

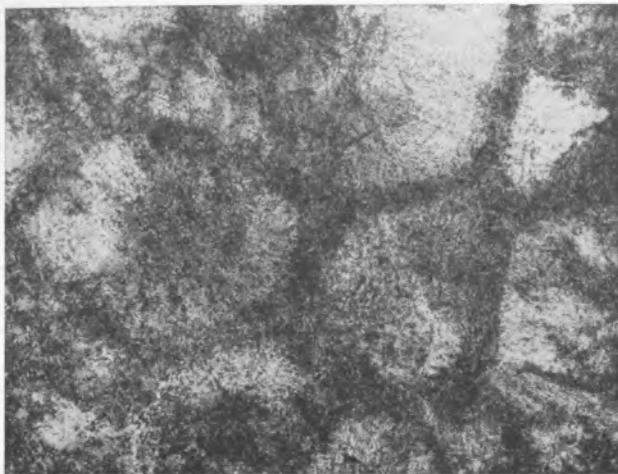


Рис. 1. Закристаллизовавшееся кварцевое стекло, пропитанное сульфидом,  $\times 600$

1. Если поднимающийся расплав пропитывает какое-либо пористое тело. Тогда процесс совершается за счет энергии смачивания. Это явление неоднократно наблюдалось экспериментально. Сульфидный расплав быстро пропитывает пористые пластинки из спекшегося кварца, динаса, шамота, окиси магния и т. д. Кварцевое стекло под влиянием сульфидного расплава, содержащего окислы, кристаллизуется, а образовавшиеся при этом микроскопические трещинки наполняются сульфидом. На рис. 1 показана микрофотография шлифа закристаллизовавшегося кварцевого стекла, пропитанного сульфидом. Во всех этих случаях сульфид может подниматься на значительную высоту.

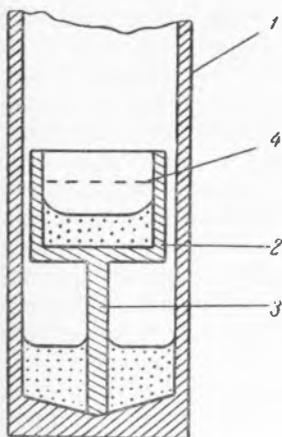


Рис. 2

2. Поднимающийся сульфид растворяется в какой-либо жидкости, например в силикатном расплаве; процесс совершается за счет энергии растворения. Это удалось проверить экспериментально (рис. 2). В железный тигель 1 помещался другой тигель меньшего размера 2, снабженный железной ножкой для того, чтобы малый тигель был несколько выше дна большого тигля. Малый тигель наполнялся измельченным фаялитом ( $Fe_2SO_4$ ); на дно наружного тигля помещалось 5—10 г

сульфида железа. Весь прибор нагревался 1—2 часа при  $1300^\circ C$  в атмосфере чистого азота. При этой температуре как фаялит, так и сульфид полностью расплавляются; последний тонкой пленкой смачивает все железные стенки. Пленка, покрывающая внутреннюю поверхность малого тигля, непрерывно смывается, так как расплавленный фаялит является довольно хорошим растворителем сульфида. Процесс поднятия сульфида с одновременным растворением его продолжается до тех пор,

пока не образуется насыщенный раствор сульфида в силикате. Действительно, анализы силикатного расплава из малого тигля после опытов показали присутствие в нем 15% FeS, что и дает концентрацию насыщенного FeS фаялитового расплава в присутствии твердого металлического железа\*.

В описанном опыте наблюдалось интересное явление, подтверждающее приведенное объяснение. В железном тигле находится, конечно, не чистый расплавленный FeS, а насыщенный раствор железа в последнем. Состав жидкости при 1300°, согласно диаграмме плавкости системы Fe — FeS, 60,3% FeS, 39,7% Fe. Эта жидкость и течет по поверхности железа. В расплавленном силикате растворяется, однако, только FeS, а избыточное железо, присутствующее в сульфидном расплаве, при этом кристаллизуется. Первые кристаллы железа начинают расти в месте соприкосновения силикатного расплава с сульфидной пленкой (точка 4 на рис. 2) так, что на внутренней поверхности малого тигля образуется поясок металлического железа. Дальнейший рост кристаллов приводит к образованию железной диафрагмы, так как соприкосновение сульфидной пленки и силикатного расплава (также хорошо смачивающего железа) происходит все время на внутреннем обресе растущего железного пояса. В результате этого, в некоторых случаях, малый железный тигель полностью затягивается железной диафрагмой (показана на рис. 2 пунктиром), прекращающей дальнейшее поступление сульфида. Факт кристаллизации металлического железа на стенках малого тигля не оставляет сомнений в том, что проникновение сульфида в силикатный расплав могло происходить только благодаря поверхностному течению сульфидно-железной жидкости.

Следует отметить, что роль железной поверхности при течении по ней сульфида аналогична полупроницаемой перегородке, пропускающей один компонент и не пропускающей других. Достаточно соединить с помощью железной поверхности два сосуда, содержащих сульфидно-силикатные расплавы разных концентраций, чтобы началось выравнивание концентраций (или, вернее, активностей) сульфидов путем перетекания последних по поверхности смачивания. Для практической реализации такого выравнивания концентраций (активностей) необходима настолько высокая концентрация хотя бы одного из расплавов, чтобы из него мог выделиться сульфид для образования жидкостной пленки. Это условие будет выполнено, когда концентрация сульфида в одном из расплавов будет близка к насыщенной.

Так как поверхностное течение наблюдалось не только по железу, но и на кварцевом стекле, то можно предположить, что те же явления могут происходить и при наличии других поверхностей, хорошо смачиваемых сульфидным расплавом.

3. Не исключается возможность сочетания таких условий, при которых поднятие сульфида будет сопровождаться одновременным затвердеванием его на более высоком уровне.

Таким образом, свойства расплавов, содержащих FeS, таковы, что возможна разнообразная миграция сульфидов при сравнительно невысоких температурах. Температура плавления FeS в присутствии других сульфидов и окислов может снижаться до 800—900° и все описанные выше явления могут, следовательно, происходить при этих температурах.

Этим, может быть, следует объяснить многообразие форм, в которых встречаются природные сульфиды: от массивных залежей до импрегнированных горных пород.

---

\* Присутствие металлического железа сильно понижает растворимость FeS в расплавленном силикате, так как образуется сплав сульфида с железом. Указанная концентрация (15%) фактически отвечает не растворимости FeS, а распределению его между силикатным и сульфидно-железным расплавом.

Миграция сульфидов, обусловленная большой текучестью, может происходить без участия одностороннего давления, связанного с тектонической активностью, и не требует для своего объяснения предположений о воздействии различного рода растворов и т. д.

Необходимо подчеркнуть, что высокая текучесть сульфидов наблюдалась всегда не у чистого FeS, а у расплавов, содержавших примеси: Fe — при течении по железной стенке, FeO (возможно, и другие окислы и даже силикаты) — при течении по силикатной поверхности или при пропитывании пористых керамических тел. Значение высокой текучести сульфидных расплавов для понимания геологических процессов несколько, однако, от этого не уменьшается, так как сульфидную магму не следует представлять себе в виде чистых расплавленных сульфидов. Как показали экспериментальные исследования, расплавленные сульфиды, в особенности богатые серой, являются хорошими растворителями окислов и даже силикатов. Появление в природе чисто сульфидных расплавов поэтому совершенно невероятно. В связи с этим сульфидная магма должна рассматриваться как активный химический агент, и проникновение ее в горные породы может сопровождаться существенными изменениями последних.

Сейчас еще трудно говорить о значении описанных явлений при образовании того или иного конкретного месторождения. Несомненно, однако, что высокая текучесть рудной магмы и связанные с этим возможности миграции и накопления сульфидов должны учитываться геологами при попытках объяснить происхождение сульфидных месторождений магматического характера.

Поступило  
9 VIII 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Я. И. Ольшанский, ДАН, 58, 2005 (1947); 59, 513 (1948).