

307

*А. И. Мещеряков*

# ПРИРОДА РУДООБРАЗУЮЩЕГО ФЛЮИДА

Статья Л. Грейтона  
и дискуссия по ней

ГОСГЕОЛИЗДАТ  
1946



### О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
48	10. снизу	проходящих	проводящих	Издательства
52	14 „	, NaJNa Br	, NaJ, NaBr	Типографии
53	2 сверху	KCl Ni aCl,	KCl и NaCl	„
57	2 „	H <sub>2</sub> O — K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O — K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> — SiO <sub>2</sub>	Автора
59	19 снизу	KCl KJ	KCl, KJ	Типографии
61	17 „	кристобалита!	кристобалита!	Издательства
82	7 „	что в	что Al в	Типографии
92	3 „	, что Лалагуа	, что в Лалагуа,	Издательства
116	4 „	formation )Должено на годовом собрании (Сoc.	formation. Должено на годовом собраний Soc.	„
146	6 „	граммах.	диаграммах	„

Зак. № 6616. Природа рудообразующего флюида

# NATURE OF THE ORE-FORMING FLUID

L. C. GRATON

Economic Geology, Suppl. to No. 2, 1940

## DISCUSSION

Earl Ingerson and G. W. Morey, C. N. Fenner, W. James Bichan and T. S. Lovering  
Economic Geology, 1940, Nos. 6 and 7; 1941, Nos. 2 and 3

# ПРИРОДА РУДООБРАЗУЮЩЕГО

ФЛЮИДА 550.4+549 +553 1/2  
Г 79

СТАТЬЯ Л. ГРЕЙТОНА И ДИСКУССИЯ ПО НЕЙ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО Н. И. БЕРЛИНГА

Под редакцией и с предисловием  
академика А. Н. ЗАВАРИЦКОГО

220



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
КОМИТЕТА ПО ДЕЛАМ ГЕОЛОГИИ ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

МОСКВА 1946 ЛЕНИНГРАД

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	5
<i>Л. Грейтон.</i> Природа рудообразующего флюида . . . . .	7
Краткое содержание . . . . .	7
Введение . . . . .	8
Общепризнанные представления . . . . .	18
Спорные вопросы . . . . .	20
Вводные замечания . . . . .	20
Возрастные соотношения . . . . .	21
Механизм выделения . . . . .	25
Состояние и состав . . . . .	28
Кислый газ . . . . .	28
Кипение ниже критической температуры . . . . .	28
Критические явления в газовой фазе . . . . .	30
Новая конденсация газа . . . . .	31
Количественные соотношения между пегматитом и рудой . . . . .	33
Границы проявления действия газовой фазы по вертикали . . . . .	35
Границы проявления действия жидкой фазы по вертикали . . . . .	38
Приобретение флюилом вновь щелочных свойств . . . . .	39
Гидротермальная переработка щелочами . . . . .	44
Сравнительная активность газа и жидкости . . . . .	47
Растворимость в газах . . . . .	50
Роль галоидов . . . . .	67
Относительная летучесть . . . . .	73
Извлечение щелочей из боковых пород . . . . .	87
Постоянство карбонатов . . . . .	93
Перенос сульфидов . . . . .	95
Гранитизация . . . . .	97
Взгляды Шеллера и Ресса . . . . .	99
Причины отложения минерального вещества . . . . .	101
Движущая сила . . . . .	105
Общая проблема . . . . .	105
Свойства газов (или жидкостей) на глубине . . . . .	106
Газ от магмы до поверхности . . . . .	108
Смесь жидкости и газа от магматической камеры до поверхности . . . . .	109
Газ вниз, жидкость—от газа до поверхности . . . . .	112
Место кипения . . . . .	113
Выжимающее давление, вызванное столбом вышележащих пород . . . . .	115
Жидкость от магматической камеры до поверхности . . . . .	117
Происхождение обособленного щелочного рудного жидкого раствора . . . . .	119
Пояснение понятий „газ“ и „кислый“ . . . . .	123
Заключение . . . . .	128
 Дискуссия	
<i>Э. Ингерсон и Дж. Мори</i> . . . . .	147
<i>К. Н. Феннер</i> . . . . .	158
<i>В. Джемс Бичэн</i> . . . . .	176
<i>Т. Леверинг</i> . . . . .	181

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Работа Л. Грейтона, одного из крупнейших американских ученых, занимающихся изучением рудных месторождений, предлагаемая теперь в русском переводе вниманию советских читателей, появилась за год до Отечественной войны. Она была написана в связи с опубликованием около 10 лет тому назад ряда статей виднейших петрологов, геологов и специалистов по изучению рудных месторождений в посвященном пятидесятилетнему юбилею В. Линдгрена сборнике, который был также переведен на русский язык. В этих статьях разбирались важнейшие и вместе с тем трудные вопросы относительно образования рудных месторождений.

Грейтон, сопоставляя различные взгляды, высказанные авторами статей в сборнике Линдгрена, противопоставляет два направления, одно из которых, по его мнению, характерно для исследователей-геологов, другое — скорее для физико-химиков, занимающихся проблемами петрологии и металлогении. Можно подметить и несколько другую сторону в различии исходных позиций исследователей. Одни исходят из детального изучения минералогии и структур месторождений, т. е. из результатов природных процессов, и путем логического рассмотрения этих фактических данных стремятся выразить природу процессов; другие опираются прежде всего на наше знание особенностей процесса, как общих, вытекающих из основных принципов физической химии, так и конкретных, доступных нашему наблюдению в природе, в проявлениях вулканической деятельности.

Тщательное наблюдение фактов, их систематизация и анализ, основанный как на приложении для их объяснения общих законов физической химии, так и на знании особенностей явлений, происходящих в природе на наших глазах, являются ключом к решению сложных вопросов металлогении, которые волновали и волнуют всех геологов и петрологов, изучающих месторождения полезных ископаемых.

Грейтон в работе «Природа рудообразующего флюида» поставил своей целью дать оценку современным знаниям и теориям относительно природы той подвижной среды, которая выносит рудное вещество из магмы и отлагает его в рудных месторождениях. Природа этой подвижной среды, этого раствора, пожалуй,— самое важное в теориях генезиса рудных месторождений, но вместе с тем мы здесь встречаемся с одной из самых трудных проблем металлогении. Понятно, что работа Грейтона была встречена при ее появлении с живейшим интересом и вызвала очень содержательную дискуссию как в форме специальных статей, посвященных данному вопросу, так и отдельных высказываний, рассеянных в ряде работ. Важнейшие из таких статей помещены в этой книге как дополнение к работе Грейтона.

Надо надеяться, что появление работы Грейтона на русском языке послужит импульсом для продолжения дискуссии по затронутым в ней вопросам со стороны советских ученых и исследователей рудных месторождений, а также рудничных геологов, изучающих эти месторождения в повседневной работе. Наблюдения и обнаруженные в наших месторождениях новые факты, которые будут сообщены участниками этой дискуссии как доводы в подтверждение или опровержение различных представлений, несомненно, будут содействовать разъяснению сложных явлений природы.

*А. Заварицкий*

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Исходя из положений и выводов Феннера, Боуэна, Росса и Шеллера в сборнике, посвященном В. Линдгрэну<sup>2</sup>, настоящая статья дает оценку современным знаниям и теоретическим обобщениям в части происхождения, состояния, состава, миграции и воздействия той подвижной среды, которая выносит минералообразующие материалы из магмы и отлагает их в виде гипогенных эпигенетических руд. Имеется в виду рассмотреть в свете физико-химических обобщений и геологических фактов и предположений последовательный ход событий и изменение условий рудообразующего флюида от магмы до земной поверхности. Доказывается, что существующие разноречивые и непримиримые гипотезы создают путаницу на такой стадии развития науки, когда, наоборот, следовало бы ожидать внесения большей ясности. Отыскиваются и намечаются причины, которые привели к такому положению.

Основные выводы относительно образования, природы и движения рудного флюида сжато резюмированы на стр. 131—139. Происхождение его из нормальной магмы путем кипения рассматривается как количественно маловажный фактор. Источник, способ независимого выделения и движущая вверх сила имеются налицо для горячей щелочной жидкости, представляющей позднемагматическую выжимку. Она, как предполагают, является главным агентом гипогенного рудообразования. Дается объяснение для тех подчиненных случаев, когда на сравнительно небольшой глубине проявляется действие кислоты и может возникнуть заслуживающая внимания газовая фаза. Подчеркивается глубокий контраст между нормальными условиями, существующими на глубине, где происходит дифференциация магмы и возникают зачатки рудных концентраций, и особыми поверхностными условиями, в которых только и возможны наблюдения в ограниченных пределах над магмой в действии и при которых такие более редкие компоненты, как рудные металлы, неизбежно рассеиваются.

При рассмотрении магматического процесса с более широкой точки зрения, мы приходим к выводу, что ограничения для критического состояния вместе с давлениями, вызванными вышележащими породами, делают невероятным, чтобы в нормальной магматической полости существовала имеющая большое значение газовая фаза. Но если она и существует, то газ, как доказывается, значительно уступает жидкости в способности к переносу растворимых минеральных веществ

<sup>1</sup> Econ. Geol., 35, 1940, Suppl. to No. 2, стр. 197—358. В сокращенном виде представлено в Association of Volcanology, International Union of Geodesy and Geophysics, VII th General Assembly, Washington, Sept. 1939. Настоящая статья опубликована под руководством Committee on Experimental Geology and Geophysical Research, Harvard University.

<sup>2</sup> Геология рудных месторождений Западных Штатов США. Сборник, посвященный В. Линдгрэну. Перевод Н. И. Влодавец и В. А. Пэк под ред. проф. И. Ф. Григорьева, 1937.

как в пределах магмы, так и вне ее; образование же значительных количеств газообразных минералообразующих эманаций признается невероятным. Пневматолит рассматривается, следовательно, как явление ограниченного значения вне непосредственной близости к земной поверхности. Петрологам бросается упрек в вольном и неуместном употреблении выражения «газы, присутствующие в магме», не только применительно к дифференциации и другим химическим проявлениям, но также и к механическим и термическим явлениям, вплоть до вулканических взрывов.

## ВВЕДЕНИЕ

При развитии и постепенном признании гипотезы магматического происхождения для огромного семейства эпигенетических рудных месторождений много внимания уделялось, естественно, отдельным этапам этой обобщающей гипотезы и связанным с ней частным вопросам, среди которых основными являются: источник, состав и состояние агента переноса; механизм и приуроченность во времени процесса выделения из главного магматического тела металлов и сопровождающих их веществ; движущая сила, способная осуществить перенос; условия и причины осаждения минералов и сопутствующее ему изменение боковых пород, вызываемое движущимся флюидом.

Эти темы неоспоримо и неизбежно должны быть отнесены к области геологии; в то же время одно их перечисление уже доказывает, что они являются равным образом и физическими, и химическими проблемами. Неудивительно поэтому, что в прошлом попытки геологов-исследователей дать последовательное и приемлемое объяснение генезиса руд на основании своих собственных наблюдений слишком часто роковым образом терпели крушение из-за недостаточной подготовленности в области физики и химии. С другой стороны, те компетентные физики или химики, которым случалось заинтересоваться этими вопросами (а также тесно связанными с ними явлениями вулканов, фумарол и горячих источников), выдвигали объяснения, хотя и интересные и движущие мысль вперед, но с точки зрения приложения к геологии и соответствия ее запросам не способные пока разрешить эти вопросы удовлетворительным образом. Неоснованность и противоречивость толкований происхождения, природы, поведения во времени и подъема рудообразующего флюида еще не изжиты.

Вследствие этого, когда Комитет по сборнику, посвященному В. Линдгрэну<sup>1</sup>, поставил перед собой задачу дать книгу, отражающую передовые мысли по рудным месторождениям в Америке, крайне уместно было обращение его к двум сотрудникам Геофизической лаборатории в Вашингтоне и к двум специалистам из Геологической службы США с просьбой взять на себя составление раздела, посвященного физико-химическому рассмотрению проблемы образования руд. Феннер, Боузи, Росс и Шеллер, составившие главу III этого сборника, вполне оправдали надежды Комитета. Не-

<sup>1</sup> Ore Deposits of the Western States, New-York, 1933. В переводе на русский язык под редакцией проф. И. Ф. Григорьева: Геология рудных месторождений Западных Штатов США. 1937, ОНТИ НКТП. К сожалению, перевод как раз этих глав не лишен некоторых неточностей. *Ред.*

сомненно, эта выдающаяся глава замечательного сборника не может не оказать сильного влияния на дальнейшее развитие идей относительно образования руд. Автор настоящей статьи склонен считать ее наиболее полезным вкладом по этому предмету со времени выхода в свет в 1906 г. известной работы Линдгрена о зависимости рудоотложения от физических условий. Несмотря на сложный характер заключений, вся глава заслуживает внимательного изучения со стороны геологов, так как в ней лучше, чем в каком-нибудь другом отдельном источнике, приводятся в обобщенном и удобном для пользования виде многочисленные физико-химические положения и взаимоотношения применительно к гипогенному рудообразованию.

Разочаровывает, однако, отсутствие коллективно разработанной, объединенной и законченной теории образования гипогенных руд, стоящей на уровне современных представлений в области физико-химических явлений. Индивидуально написанные части скорее направляют мысль по пути дискуссии, не будучи в состоянии вызвать единодушную по существу точки зрения и общих выводов. Несомненно, что полная, гармоничная и приемлемая для большинства теория образования руд магматического происхождения остается делом будущего.

Однако представляется желательным выяснить, в какой мере эта группа выдающихся статей приблизила нас к желаемой цели? Каковы те вопросы, по которым авторы в основном придерживаются единого мнения? Какие из основных элементов вызывают разногласия? Какие из противоречивых мнений являются более обоснованными, имея в виду дальнейшее движение вопроса — как это могло случиться, что выявились столь многочисленные разногласия между выдающимися исследователями на таком позднем этапе развития изучения руд и магм?

Если бы разногласия возникли между Россом и Шеллером, которые подходят к своей задаче с узко геологической точки зрения, это могло бы быть приписано вынужденно спекулятивному характеру усиленного геологического размышления над событиями и процессами, недоступными нам во времени или пространстве, или недостаточного пока еще проявления в геологии определенности и количественной точности, которые сами собой разумеются в более точных науках. Однако, хотя Росс и Шеллер и имеют дело с несколько разными темами — рудами и пегматитами, они, как кажется, существенно не расходятся во взглядах на характер основных процессов и условий. И тот и другой считают, что преобладающим агентом переноса и отложения является богатая щелочами жидкость позднемагматического происхождения.

С другой стороны, Боуэн и Феннер, которые подходят с узко физико-химической точки зрения к одной и той же теме — генезису гипогенных руд, приходят к выводам, в сущности настолько же противоречащим друг другу, как и заключения Росса и Шеллера.

Вместе с тем, у Боуэна и Феннера имеется достаточно общих положений, чтобы вызвать у многих впечатление взаимной поддержки в независимо полученных ими выводах, что вынос руд-

ных материалов из магматических источников осуществляется при помощи кислых газов, позднее конденсирующихся в жидкости, первоначально кислые, но переходящие иногда в щелочные. Различия и противоречия в ходе мыслей, приведших этих двух исследователей к таким широким единодушным заключениям, многими из читателей, повидимому, не были замечены, или же были признаны второстепенными и не заслуживающими внимания. Геолог становится невероятно робок, когда сталкивается с физико-химическими доводами; получается впечатление, что единственный факт из области химии и физики, по его мнению, может полностью опрокинуть ряд геологических фактов; он не решается поэтому открыть дискуссию, пользуясь при этом в качестве главного оружия накопившимися у него фактическими данными по геологии. В данном случае, помимо того, в манере Феннера и Боуэна привлекать себе на помощь физическую химию столько свежести и авторитетности, что мнение читателя оказывается у них в плену, в ущерб неоспоримым, но осторожно и терпимо изложенным доводам и логическим заключениям Росса. Это усугубляется еще всеобщим признанием достижений как Феннера, так и Боуэна, в области приложения физической химии к другой, тесно примыкающей фазе магматической активности, а именно, к петрогенетической дифференциации.

Позднее другими авторами были описаны некоторые случаи и представлены обобщения, которые будто бы подтверждают кислотную природу рудного флюида. К наиболее исчерпывающим и глубоким работам относится статья Шмедемана (Schmedeman)<sup>1</sup> о химизме рудных растворов.

Когда вышел в свет сборник, посвященный Линдгрёну, я предполагал, что вскоре появятся многочисленные протесты и критические отзывы, направленные против защищаемого Боуэном и Феннером вывода о преобладании кислот и газов при формировании руд. Однако в течение шести лет со времени издания сборника в порядке полемики почти ничего не было опубликовано, кроме неубедительной, но мастерски разработанной позиции Росса<sup>2</sup>, несколько двусмысленно выраженного сомнения со стороны Линдгрёна<sup>3</sup> относительно настойчивости Боуэна в его выводе, что кислая жидкость, образовавшаяся путем конденсации из кислого газа, является носителем руд, и попытки Бовдича (Bowditch) и автора настоящей статьи<sup>4</sup> объяснить, каким образом нормальная щелочная жидкость магматического происхождения при особых условиях может вблизи поверхности превратиться в кислоту, а временами даже в пар. В течение этого промежуточного периода относительного покоя мысли обмен мнениями наиболее серьезных исследователей рудных месторождений в горных округах многих стран по-

<sup>1</sup> Econ. Geol., 33, 1938, 785—817.

<sup>2</sup> Origin of the deposits of the Ducktown type. U. S. Geol. Surv., Prof. Pap. 179, 1935, особенно стр. 44—62.

<sup>3</sup> Succession of minerals and temperatures of formation in ore deposits of magmatic affiliations. A. I. M. E. Trans., 126, 1937, 359.

<sup>4</sup> Alkaline and acid solutions in hypogene zoning at Cerro de Pasco. Econ. Geol., 31, 1936, 674—698.

казал растущее влияние путаницы понятий и некритического отношения к этим вопросам. Короче говоря, получается впечатление, что многие геологи готовы подписываться под гипотезой кислотно-газового механизма и вытекающими отсюда последствиями без достаточного критического анализа выдвинутых положений и доводов.

Тщательное изучение статьи Феннера и Боуэна вскрывает такие различия между защищаемыми ими тезисами, что в части наиболее ответственных выводов признать обоих правыми невозможно. Но так как обе эти точки зрения не могут быть справедливы одновременно, естественно, возникает вопрос, верны ли основные положения каждого из них, или, другими словами, играют ли кислоты и газы господствующую роль при обычных процессах образования гипогенных руд, или нет.

В настоящей статье делается попытка критически разобрать доводы в пользу обеих гипотез — и кислого газа, и щелочной жидкости. Ввиду полного охвата главой III сборника Линдгрена основных характеристик рудоносного флюида, что не имело прецедента, в качестве исходного материала для дискуссии, естественно, берутся названные статьи; но при этом используется также и значительное количество соответствующих данных, ставших доступными за истекший период, особенно же данных из неиссякаемого источника информации — Геофизической лаборатории. Ввиду того, что глава III содержит основные выводы, исключаящие друг друга, в настоящей статье, с целью обобщения независимых разделов упомянутой работы и выделения положений, представляющихся наиболее обоснованными, приходится отчасти прибегать к разрушительным операциям; однако все усилия прилагаются к тому, чтобы не пренебречь и конструктивной стороной, для чего либы поддерживаются существующие взгляды, либо выдвигаются некоторые дискуссионные темы.

Естественно, что большое внимание было мной уделено геологическому обоснованию. Я вполне отдаю себе отчет в том, что, пытаясь опереться на физико-химические соображения, я подвергаю себя большой опасности впасть в произвольные ошибки и поэтому обращаюсь к специалистам в этой области с просьбой указать нам, геологам, авторам и читателям, простой путь следования логике этой науки.

Несмотря на желание сохранить за дискуссией характер безличного обсуждения спорных вопросов научного значения, неоднократное упоминание имен было неизбежно при передаче взглядов того или другого из четырех авторов главы III. Номера страниц в прямых скобках, следующие за цитатой или помещенные в тексте, относятся к страницам сборника Линдгрена<sup>1</sup>. Подробная статья Росса в Prof. Pap. 179 обозначается для краткости «Росс, Loc. cit., стр. . . .», а обзор Феннера<sup>2</sup> этой статьи Росса — «Феннер, Loc. cit., стр. . . .».

<sup>1</sup> В русском переводном издании. *Ред.*

<sup>2</sup> Econ. Geol., 30, 1935, 928—936.

Возможны два различных подхода к обсуждению общих проблем. В первом случае удар направляется против выдвигаемого объяснения одной из крупных тем в его наиболее уязвимой точке, в надежде покончить с ним таким образом с первого удара, в то же время приводится наиболее убедительный довод в пользу иной точки зрения, в расчете достичь наверняка ее признания. Другой метод предполагает разбор по данной теме всех более существенных доводов как за, так и против, на том основании, что с таким исчерпывающим подходом, повидимому, легче приблизиться к истине в том или ином вопросе. Например, выводы, полученные на основании опытов в котле Бенсона, относительно ничтожного содержания растворимых веществ в надкритическом паре (см. стр. 64) и расчеты д-ра Кистяковского (Kistiakowsky) исключительно малых парциальных давлений паров галоидных соединений большинства металлов и кремния в магме (изложенные на стр. 82) могут считаться настолько вескими для уничтожения всей концепции переноса рудных материалов в газовой фазе, что, казалось бы, дальнейшая аргументация против нее не нужна и неуместна. Но задача сводится не столько к тому, чтобы подтвердить или опровергнуть возможность самого переноса в газовой фазе, сколько к тому, чтобы изучить и взвесить все более важные стороны и последствия такой концепции, включая природу изменений боковой породы, судьбу и значение карбонатов, перенос сульфидов, роль галоидов и т. п. Все это вопросы первостепенной важности в проблеме гипогенного генезиса руд; поэтому, несмотря на то, что это значительно увеличивает объем статьи, в ней все же принят такой более содержательный метод обсуждения.

Раньше, чем перейти к подробному изложению спорных вопросов, целесообразно дать точное определение значения некоторых употребляемых здесь терминов и привести кое-какие из основных предпосылок, принятых в этой статье.

Газ употребляется в обычном, широком смысле для обозначения одного из трех основных состояний материи. Здесь не делается различия между газом и паром ни в смысле противопоставления состояния вещества соответственно выше и ниже критической температуры или перегретого и насыщенного пара, ни в каком-нибудь другом смысле. Попытка провести такое различие в системах, точные условия которых так мало известны, привела бы, вероятно, только к путанице. С таким общим применением, повидимому, согласны также и Феннер, и Боуэн, которые говорят о «газе», конденсирующемся в жидкость [стр. 91], о «газовых» пузырях, поднимающихся через жидкость [стр. 136], о «паре» в надкритическом состоянии [стр. 81] и т. д. Относительно ограничений в применении понятия «газ» см. ниже под словом «летучее».

Флюид употребляется в тех случаях, когда требуется охватить как газообразное, так и жидкое состояние, а также, когда по соображениям целесообразности или вследствие недостаточной осведомленности требуется менее ответственный термин.

Летучее, термин, применяемый то как прилагательное, то как существительное, обозначает способность к улетучиванию в условиях, возможных в геологической обстановке. Применение этого термина не обозначает, что вещество, к которому он относится, обязательно в это время находится в газообразном состоянии. Такое применение ставит это слово в один ряд с терминами, указывающими на способность, как, например, плавкий, растворимый, сжимаемый и т. д.; при этом условии устраняется большинство возражений, выдвинутых против этого термина. Следовательно,  $H_2O$ ,  $F$ ,  $Cl$  и т. д. рассматриваются как летучие, независимо от того, встречаются ли они в данном случае в газовой или жидкой, или даже в твердой фазе, если только условия разложения не чересчур необычны. Составная часть газа, как бы низка ни была присущая ей самой летучесть (например  $SiO_2$  или  $Fe_3O_4$ ), должна в таком состоянии рассматриваться как неотделимая часть «летучего». Летучая составная часть может быть растворена в жидкости или включена в качестве неотделимой части в твердое вещество, но непосредственно до такого растворения или включения она могла существовать в виде газа; она может также снова выделяться из жидкого или твердого состояния и в таком случае немедленно принимает форму газа. Но говорить об этом летучем компоненте как о газе в то время, когда он представляет неотделимую часть жидкости или твердого вещества, было бы неточно и прежде всего могло бы ввести в заблуждение, ибо летучий компонент сам мог бы быть жидкостью раньше, чем перейти в растворенное состояние или в состав твердого вещества, и он мог бы выделиться в виде жидкости, а не газа. (При таком нецелесообразном способе выражения пришлось бы говорить о высоком содержании «газа» в фруктовой воде.) Подобного серьезного смешения понятий, дающего повод к ошибкам, можно избежать, обозначая вещество всегда как летучее, за исключением тех случаев, когда оно действительно находится в состоянии газа.

Магма применяется мной всегда для обозначения жидкой фазы, в противоположность твердому продукту, в который она может быть превращена. При таком применении термин, однако, достаточно эластичен, чтобы охватить не только расплав, в его первоначальном состоянии, но и тот последовательно изменяющийся состав жидкости, который обязан своим возникновением кристаллизации породообразующих минералов, т. е. по крайней мере до стадии разделения, дающего «нормальный» пегматит. Когда же дифференциация заходит так далеко, что продукт кристаллизации из жидкости уже не может быть назван изверженной породой (включая сюда и «нормальный» пегматит), то в таком случае вполне возможно, что основной причиной жидкого состояния будет уже не действие тепла, а действие растворителя<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> См. определение и мнение Росса (Econ. Geol., 23, 1928, 866—868), а также критерий, указываемый Боуэном, в подстрочном примечании к стр. 34 настоящей статьи.

Пневматолитический употребляется в соответствии с удачным определением Феннера [81—82], делающим ударение на действие газовой фазы, безразлично, выше или ниже критической температуры, и рассматривающим магму как источник (или, по крайней мере, главный источник) газа.

Гидротермальный применяется многими геологами в общем смысле слова для обозначения месторождений, по классификации Линдгрена относящихся к гипотермальным, мезотермальным, и т. д., без обязательного строгого учета, находился ли отлагавший их богатый водой горячий флюид в состоянии газа или жидкости. Легко могли бы возникнуть недоразумения, если бы была сделана попытка отказаться от такого широкого определения и ограничить термин теми случаями, при которых преобладает жидкое состояние. Более широкое применение санкционируется, кроме того, и аналогией с другими производными того же слова *hydrous*, значение которых не связывают с их физическим состоянием, например, по-английски *hydrous vapor*—водяной пар, кристаллогидрат—*hydrated crystal* и т. д. Но подобно тому, как могут существовать широкое и узкое значения для многих других терминов, так право на существование имеет и гидротермальный в узком значении—горячей, существенно состоящей из воды, жидкости. На последующих страницах из контекста будет ясно, когда имеется в виду общий и когда ограниченный смысл слова. В узком смысле термин «гидротермальный» фактически является антитезой пневматолитического, так как теперь признается всеми, что  $H_2O$ , повидимому, преобладает в обоих случаях.

Гидротермальный флюид в смысле жидкости начинается там, где кончается магма; другими словами, когда магма настолько обогащается летучими и настолько истощается в отношении пирогенетических компонентов, что прекращается ее кристаллизация в виде изверженной породы или нормального пегматита, она перестает быть магмой и становится гидротермальной жидкостью, твердый продукт которой представляет собой минеральное отложение или, если он находится в рассеянном состоянии,— изменение породы.

Кислый обозначает, что жидкая или газообразная фаза, которую это слово характеризует, дает кислую реакцию в обычном значении концентрации водородных ионов (см. также ниже слово щелочной). Такая кислая реакция может быть обусловлена слабыми кислотами, если только сильные основания не преобладают. Но из того, как Боуэн и Феннер пользуются термином «кислый» в сборнике Линдгрена, следует, что они обычно имеют в виду присутствие сильных (галоидных) кислот. Шмедеман<sup>1</sup>, руководствуясь теми же основными взглядами, включает сюда одну или больше из сильных кислот —  $HCl$ ,  $HF$  или  $H_2SO_4$ . Насколько возможно, я присоединяюсь к их способу применения этого термина и стараюсь оговаривать встречающиеся отклонения.

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 787.

Щелочной, антитеза кислого, обозначает, что материал, к которому относится термин, дает щелочную<sup>1</sup> реакцию в обычном смысле. Кислотообразующие группы элементов, если они присутствуют, играют подчиненную роль благодаря значительному количеству основных компонентов, или их «крепости», или тому и другому одновременно. Но и для термина «кислый», и для термина «щелочной» их значение должно быть установлено в свете нашего недостаточного современного знания контроля и степени ионизации и, в частности, концентрации водородных ионов при условиях господствующих в магмах и близ них. Мы вынуждены поэтому полагаться главным образом на вероятность, что пове-

<sup>1</sup> В связи с докладом части этой статьи на собрании в Вашингтоне, правильность применяемого мною термина «щелочной» оспаривалась такими компетентными работниками в области физической химии, как Уэльс, Цнес, Шерер, Ингерсон, Росс и Шеллер. Д-р Росс, повидимому, отразил мнение оппонентов, указывая, что «богатый щелочами» или «щелочсодержащий» („alkalic“) заслуживает предпочтения перед «щелочной» («alkaline»), так как действительные соотношения рН на глубине нам неизвестны. Хорошо, пусть будет так; если физико-химики полагают, что под термином «щелочной» подразумевается больше, чем мы знаем, давайте впредь избегать применения этого термина. Но они обязаны были довести до общего сведения эту новую точку зрения, вместо того, чтобы внезапно обрушиться на бедного геолога, как если бы он непростительно нарушил давно установившийся обычай. Словом «щелочной» я пользуюсь только потому, что оно, по крайней мере до настоящего времени, было вполне общепринятым, притом в том смысле, который я ему придаю. И со своей стороны я полагаю, что оно сохранило это значение и сейчас. Этот термин неоднократно встречается не только в обсуждаемых нами статьях Феннера и Боуэна; эти авторы следуют лишь обычаю, установленному такими авторитетами, как цитируемые ниже.

«Если жидкая вода происходит непосредственно из магмы, нельзя себе представить, чтобы вода была какой-либо иной, а не щелочной, так как гидролиз щелочных силикатов, обогащающий жидкую фазу системы растворимыми гидроксидами, должен преобладать над кислотообразующими реакциями, благодаря значительно большим количествам щелочей, по сравнению с такими кислыми элементами, как сера и галоиды, в любой изверженной породе» (Dau and Allen, Jour. Geol., 32, 1924, 186).

«Ясно, что кислая вода не может переместиться на значительное расстояние, без того чтобы не превратиться в щелочную или нейтральную» (Lindgren, Mineral Deposits 3-е изд., 1928, 67).

«Горячие источники, которые геолог связывает с рудными месторождениями ... всегда щелочные» (Lindgren, Econ. Geol., 22, 1927, 191).

Сам Росс (Econ. Geol., 23, 1928, 882 и Prof. Paper 179, 1935, стр. 50) пользуется словом «щелоч-содержащий» („alkalic“) как точным эквивалентом понятия «щелочной» („alkaline“) у Дэй и Аллена, которое он затем разбирает. На моей стороне, к счастью, успешно выступил д-р Джиллели (Gilluly), указавший, что эти соображения по поводу терминов «щелочной» и, соответственно, «кислый» давно уже высказывались в литературе по рудным месторождениям и по сие время остаются спорным вопросом большой важности, пытаться обойти или разрешить который простой заменой или переопределением терминов бесполезно.

Очень досадно, что в присутствии стольких авторитетных физико-химиков время, отведенное на обсуждение моего доклада, было потрачено почти исключительно на такие технические частности терминологии, вместо возражений на некоторые из действительно основных и спорных вопросов. Особенно достойно сожаления, что ни д-р Феннер, ни д-р Боуэн не могли присутствовать.

дение в доступных опытам пределах не становится обратным в этих отличных и более резко выраженных условиях<sup>1</sup>.

Имея в виду возможность достаточно близкого знакомства с геологическими предпосылками тех физиков или химиков, которым придется читать эту статью, мне казалось уместным дать некоторые указания относительно пределов температур и давлений, при которых происходят выделение и работа рудных флюидов. Нижняя граница температуры и давления очевидно приурочена к верхней, выводной части системы каналов, ведущей вверх от магматического источника, и, следовательно, отвечает температурам пород у земной поверхности или несколько ниже и давлению около одной атмосферы. Верхняя граница варьирует в отдельных случаях и для температуры находится в зависимости от той температуры, при которой в исходной магме начинается серия процессов дифференциации магмы, в которую входит и выделение рудных флюидов; в отношении давления граница зависит от глубины (считая от существовавшей в то время поверхности), на которой протекают эти процессы в магме. Если исходную магму рассматривать как сравнительно близкую по составу к гранитной (точнее кварцево-монцитовой или гранодиоритовой), что представляется правдоподобным, судя по «гидротермальным» рудным скоплениям, то начальный интервал температур, вероятно, находится в пределах от 900 до 1100 или 1200° С. Если же рудный флюид обособляется, как полагает большинство геологов, в пегматитовую стадию кристаллизации и дифференциации или вскоре после нее, температура должна быть более низкой. Так как кварц большинства пегматитов принадлежит к низкотемпературной модификации, но в некоторых случаях представлен высокотемпературной формой, надо полагать, что постмагматическое обособление рудного флюида начинается при температуре, немного более низкой, чем та, при которой имеет место инверсия кварца из высоко- в низкотемпературную модификацию, т. е. 573° С при одной атмосфере, 644° С при 3000 атмосфер и (по расчетам) 832° С при 9000 атмосфер, что, по данным Гибсона (R. E. Gibson)<sup>2</sup> отвечает мертвому грузу давления столба пород на магматическое тело, находящееся на глубине 0 км, 10 км и 30 км соответственно. Повидимому, нет причин, исключающих возможность магматических процессов, в том

<sup>1</sup> Мори и Ингресон (The pneumatolytic and hydrothermal alteration and synthesis of silicates. Econ. Geol., 32, 1937, suppl., стр. 607—761) на стр. 626 пишут:

«В общем очень мало известно относительно условий ионизации в водных растворах при температурах выше примерно 300° С. Все опыты, которые были до сих пор известны, показывают, что возрастание температуры сопровождается убыванием степени ионизации, которая для разных солей того же ионного типа стремится приблизиться к одной и той же величине. Практически ничего не известно относительно гидролитической диссоциации силикатов при таких температурах».

<sup>2</sup> The influence of pressure on the high-low inversion of quartz. Jour. Phys. Chem., 32, 1928, 1205. См. также подстрочное примечание на стр. 74 настоящей статьи относительно непригодности температуры инверсии кварца в качестве постоянной точки «геологического термометра».

числе и образования рудного флюида, на такой значительной глубине, как 30 км; давление же на магматическую систему на глубине от нескольких километров до таких крайних случаев, как, скажем, 30 км, повидимому, не может быть намного меньше, чем вес вышележащего столба пород, так как даже если бы магма (образуя дайки) или рудный флюид (образуя жилы) передвигались от магматической камеры вдоль трещин, общее сопротивление трения вдоль путей-каналов, с неизбежной большой потерей давления по мере движения вверх, независимо от потерь в самой верхней части системы, вероятно удерживало бы давление на магматическое тело в пределах, незначительно отклоняющихся от давления в замкнутой системе. Давления, превышающие вес столба пород, могут существовать в магме, приуроченной к плотным породам, в той мере, в какой вышележащие горные породы в состоянии противостоят направленному вверх напряжению. Это может быть чем-то вроде обратной функции величины протяжения пород кровли, т. е. горизонтального диаметра магматического тела. Такая тенденция фактора сопротивления способствовать увеличению максимального возможного давления, несомненно, будет меньшей на небольших глубинах, чем на значительных.

Исходя из предположения, что рудный флюид содержит сравнительно низкий процент растворенных веществ, которые могут отлагаться, образуя минералы, неоднократно приходится напоминать на последующих страницах тот факт, что для образования жилы твердого минерала пути-каналы, содержащие в настоящее время жильную породу, должны были быть заняты и заполнены рудным флюидом не один, а бесконечное множество раз, причем каждая новая порция флюида отлагала свою небольшую долю твердого минерального вещества, прежде чем она перемещалась под напором последующих порций. Аналогичный эквивалентный большой общий объем реагирующего флюида, по сравнению с объемом затронутой породы, требуется в тех случаях, когда замещение, а не заполнение открытых полостей, является способом осаждения. Последующие указания на необходимость длительного течения рудного флюида относятся к этим условиям.

От своих коллег в Харварде, с которыми обсуждались разнообразные стороны изложенных здесь вопросов, я получил много полезных и руководящих указаний. Особенно я обязан д-ру Берчу (Francis Birch), адъюнкт-профессору геофизики и доктору Дэну (E. V. Dane), младшему научному сотруднику кафедры геофизики, за помощь в области физики, далее за полезные указания по вопросам химии д-ру Бенедикту (Manson Benedict), ныне научному сотруднику кафедры геофизики, и д-ру Кистьяковскому (G. V. Kistiakowsky), профессору физической химии, а за критическую оценку геологических перспектив — моим коллегам проф. Гибсону (Russel Gibson) и Мак-Лафлину (D. H. Mc Laughlin), ни один из них, однако, не несет ответственности за ошибки и другие недочеты в этой статье.



## ОБЩЕПРИЗНАННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В главе III сборника, посвященного Линдгрёну, нет сводки тех вопросов, по которым сходятся мнения авторов, и тех, по которым имеются разногласия. Многочисленность расхождений, повидимому, можно считать причиной, удержавшей Росса от включения такой сводки в свое в остальном превосходное общее введение к главе. Между тем, представляется чрезвычайно желательным выделить и рассмотреть положения, по которым составители главы сходятся в существенных чертах.

1. Ни у одного из четырех авторов не замечается и намек на сомнение в том, что металлы гипогенных руд поставляются магмой в период ее деятельности. Известное прежнее представление о выщелачивании из вполне выкристаллизовавшегося, но еще горячего изверженного тела игнорируется.

2. Точно так же все четыре автора довольствуются, повидимому, предположением о преимущественно магматическом источнике флюидных агентов гипогенного рудообразования. В связи с выдвинутой в прошлом членами Геофизической лаборатории идеей о подчиненном количестве магматической воды в горячих источниках, по сравнению с метеорной, и их предположениями, что ненасыщенная, по их мнению, магма могла благодаря просачиванию извне и впитыванию усваивать поверхностную воду, которая позже выделялась при более высоком давлении при ретроградном (при «второй точке») кипении, интересно было убедиться в том, что в данном случае авторы, говоря о рудообразовании, не настаивают на такой зависимости от внешних источников. Феннер обсуждает пути, по которым магма может получать извне воду<sup>1</sup>, и в заключении по этому вопросу, видимо, так подытоживает свое мнение относительно отложенных руд:

---

<sup>1</sup> Известную капиллярную гипотезу Добре, относительно которой другими было высказано мнение, что она, вероятно, не может быть сохранена как объяснение общего механизма, Феннер рассматривает как единственный и ограниченный путь, при котором подобная схема может быть в действии в геологическом масштабе, но он отвергает и это [стр. 74] по причине, которая и другим, вероятно, покажется убедительной в той же мере, как и ему, а именно — неправдоподобности испарения на глубине (см. также ниже, стр. 31). Он рассматривает три других возможных способа, но они, повидимому, мало удовлетворяют его. Указывая на некоторые возникающие в связи с ними трудности, Феннер, повидимому, не причисляет к числу последних предполагаемое существование на глубине обширного пористого пласта, предусматриваемого в двух из этих случаев. Между тем, неудача в одном рудном районе за другим при попытках обнаружить что-либо, соответствующее намечаемому обширному пористым пластам или резервуарам накопления, послужила одной из основных причин крушения старой гипотезы происхождения руд рассматриваемого здесь типа непосредственно из «метеорной воды», как это представлял себе, например, Ван Хайз (Van Hise).

В связи с этим представляет интерес также недавняя статья Горансона (Goranson. Silicat-water systems: the „osmotic pressure“ of silicate melts. *Am. Min.* 22, 1937, 485—490). Если давление у основания высокого вертикального столба подземных вод, насыщающих вмещающие породы, вместо принимаемого им идеального «давления, эквивалентного его собственному напору», изменится до неизмеримо меньшего давления, которое, судя по наблюдениям в глубоких руд-

«Представляется невозможным в достаточной степени объяснить участием поверхностных вод многие явления абиссальных плутонических магм, в которых отмечается присутствие больших количеств летучих веществ» [стр. 74].

Далее он говорит более определенно:

«В самых верхних частях канала, на расстоянии нескольких десятков или сотни метров от поверхности метеорные воды могут смешиваться с водами магматического происхождения» [стр. 86].

Боуэн, хотя и допускает кое-где намеки на поступление извне летучих, повидимому, считает возможным отказаться от предположения о присутствии и влиянии немагматических вод, но с оговоркой, что в некоторых случаях магматические растворы, после того как они завершили главную свою работу, «... достигают поверхности и, смешиваясь с водами метеорной циркуляции, образуют горячие источники» [стр. 142].

Росс и Шеллер, очевидно, не находят оснований для упоминания о немагматических летучих.

3. Единодушное мнение, подразумеваемое или явно высказанное, имеется по поводу относительного обилия растворителя в составе рудоносного флюида, т. е. что флюид этот сравнительно разбавленный. Для обширного семейства «гидротермальных» руд не отмечается ни необходимости, ни подтверждения того, что указывало бы на что-либо близкое к условиям концентрации и характеру, которые вкладываются в понятие «рудная магма».

4. Все согласны с тем, что руды рассматриваемого здесь обширного семейства в известных нам условиях представляют результат воздействия горячих жидких растворов и являются, следовательно, гидротермальными растворами в узком значении слова (Боуэн и Феннер придерживаются того мнения, что гидротермальной стадии предшествовала важная стадия пневматолита).

5. Подразумевается (скорее, чем высказывается), что немалая движущая сила, необходимая для переноса рудного флюида от источника до места разгрузки, возникает в магме или передается ей. Пользовавшееся в свое время вниманием мнение, что соответствующая подъемная сила могла возникнуть благодаря разнице в весе между горячим и холодным столбами подземной воды, игнорируется.

6. Коллоидальному состоянию уделяется в статьях мало внимания. Боуэн рассматривает его попутно, в качестве возможного средства переноса части кремнекислоты, но не из магмы, а из окружающих пород, подвергающихся действию кислоты. Росс поддерживает это положение, не считая его обязательным, при обсуждениях, фактически имеет место для подземных вод на глубине, то из его таблицы следовало бы, что подземные воды в состоянии войти в силикатный расплав и стать частью его (альбит-вода) благодаря только осмотическим силам, в том случае, если содержание первичной или «ювенильной» воды в расплаве было достаточно низким. Действительно, так как в глубоких рудниках древние плотные породы на глубине 5000 футов (т. е. 1,5 км) и больше почти не содержат воды, чисто академическим становится рассуждение о поглощении подземных вод магмами, залегающими на таких глубинах, что давление, обусловленное лежащими выше породами, достигает тысяч атмосфер.

нии явления резко очерченных стенок кварцевых тел; однако в своей расширенной статье (op. cit., стр. 58, 60) он высказывает мнение о невероятности коллоидального переноса для рассматриваемого типа месторождений.

Ввиду того, что каждая из перечисленных важных тем была в недавнем прошлом или является сейчас предметом спора, единодушное, в основном, мнение по ним таких авторитетных четырех специалистов, пытающихся дать оценку их вероятности с физико-химической точки зрения, крайне показательно; сознание, что их выводы гармонируют с господствующими идеями, несмотря на то, что они исходят из геологических показаний, дает определенное удовлетворение.

Но если эти немногочисленные темы, по которым достигнуто по существу единодушное мнение, сравнить со списком, приводимым во втором разделе этой статьи, чувство удовлетворения сменяется разочарованием. Правда, важная тема об источнике рудоносных флюидов снимается со списка спорных вопросов, также частично вносится ясность в отношении состава, состояния и способа выделения флюидного реагента, однако резкое расхождение точек зрения по остальным вопросам настолько существенно, что заслуживает самого тщательного изучения.

## СПОРНЫЕ ВОПРОСЫ

### ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При любой попытке разобраться в индивидуальных точках зрения по отношению к нерешенным еще вопросам, следует иметь в виду два соображения.

Во-первых, по непосредственным наблюдениям в районах современной вулканической или термальной деятельности, сопровождаемым соответствующими геологическими выводами, мы знаем, что существуют как жидкие, так и газообразные эманации, что как на поверхности, так и под землей одни из них кислые, другие щелочные, что некоторые флюиды покидают расплавленную магму раньше, чем она кристаллизуется, а некоторые выделяются в связи с массовой лирогенной кристаллизацией. Нелогично было бы поэтому занять какую-либо позицию, полностью отрицающую противоположное мнение. В каждом случае решение, которое следует принять, требует надлежащего взвешивания и надлежащей оценки того или другого довода. Задачей является не установление того единственного пути, следуя которому, вероятно, могло протекать образование гипогенных руд, а определение, какие процессы и условия среди множества факторов, повидимому, господствуют чаще всего и проявляются сильнее всего, а потому могут рассматриваться как показательные для нормального или характерного способа образования руд.

Во-вторых, надо признать, что различные вопросы, относящиеся к состоянию, составу, возрастным соотношениям и механизму выделения, гораздо теснее переплетаются, чем это может казаться, если судить по независимости, с какой могут трактоваться отдельные вопросы. Таким образом, исследователь, по ка-

ким-либо побуждениям делающий вывод о выделении рудообразующего флюида в начальную стадию магматического процесса, тем самым в какой-то мере принимает на себя ответственность и за решение всех остальных вопросов; ибо, судя по нашему каждодневному опыту, раннее выделение, повидимому, легче рассматривать как выделение в виде газовой фазы, чем второй, специальной жидкой фазы. Это в свою очередь наводит на предположение, что механизмом выделения и движущей силы при переносе является давление пара, а также, что флюид вероятно обладал кислой реакцией, судя по тому, что кислотообразующие компоненты отличаются гораздо более высокой летучестью, чем дающие щелочную реакцию; наконец, отсюда напрашивается вывод о значительном участии галоидных элементов, так как только галоиды большинства металлов обладают летучестью, в какой-то мере представляющей интерес для защитников идеи переноса в газовой фазе. Если исследователь приходит к выводу, что, скажем, флюиды отличаются щелочным характером, то, надо полагать, он будет придерживаться того мнения, что они преимущественно жидкие, что их выделение приурочено к поздней стадии магматического цикла и что движущая сила для переноса их либо не зависит от давления пара, либо связана с образованием путем кипения лишь того минимального объема газа, который совершенно необходим для выброса преобладающей жидкости. При рассмотрении позиции, которую тот или иной автор занимает в отношении этих вопросов, следует помнить, что кажущаяся последовательность всей цепи доводов может быть лишь особым видом подбора аргументов *ad hoc* и не может считаться доказательством справедливости высказываемых положений от начала до конца.

### ВОЗРАСТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Упомянутая только что зависимость, связывающая между собой отдельные подлежащие рассмотрению вопросы, исключает возможность заниматься одними, не касаясь в значительной степени и других, что неизбежно приводит к некоторым повторениям. По той же причине не приходится говорить о логической или естественной последовательности в обсуждении этих тем. Можно поэтому начать с вопроса о времени в магматическом цикле, когда рудоносный флюид покидает главное тело магматического материала.

Шеллеру, посвятившему свою статью пегматитам и, в частности, так называемым сложным или «особым» пегматитам, образование которых связывается с гидротермальной переработкой, явно незачем было задерживаться на вопросе о приуроченности во времени по отношению к общему магматическому эпизоду, имея в виду, что пегматиты в большом числе случаев определенно секут значительно преобладающие по объему «материнские» породы и во всяком случае рассматриваются теперь почти всеми как представители позднематматической стадии<sup>1</sup>. Не делает

<sup>1</sup> Все же Шеллер дает очень полезные разъяснения относительно той ситуации, которая создалась в 1925 г., когда впервые ясно была понята сложная

Шеллер и попытки поставить в связь «гидротермальный процесс» сложных пегматитов с образованием обычных руд. Но список минералов, которые он упоминает для этой гидротермальной стадии, например, кварц, слюды, альбит, гранаты, турмалин, топаз, карбонаты, касситерит и сульфиды, дает право говорить о многом, что может служить указанием на заметный параллелизм, по меньшей мере, между этой поздней гидротермальной стадией в пегматитах и тем семейством рудных месторождений, которым так много внимания уделяют Боуэн, Феннер и Росс,— гидротермальным рудам, как обычно их называют.

Росс утверждает, что рудным месторождениям типа Дактаун предшествовало внедрение аплита и пегматита, вероятно образовавшихся из позднего, богатого летучими жидкого остаточного расплава, получающегося при дифференциации магмы; та же магма, по его мнению, дала и руды [стр. 144—145]; (см. также Prof. Paper 179, стр. 24—25).

Боуэн также предполагает, что рудоносный флюид произошел из остаточного пегматитового расплава кристаллизующейся магмы [стр. 130—132]. Однако, как будет видно из дальнейшего, приняв механизм Боуэна, мы должны были бы признать, что руды образовались фактически одновременно с пегматитами, тогда как наблюдения показывают, что они являются несколько более поздним образованием.

Таким образом, если (не без основания) включить сюда Шеллера, три из четырех авторов приурочивают образование гидротермальных руд к отрезку времени, близкому к концу магматической деятельности и следующему не только за важнейшей кристаллизацией основных изверженных масс, но и за сегрегацией (и, по мнению Росса и Шеллера, кристаллизацией) пегматитовой фракции. Такого общего представления о последовательности и распределении во времени вне сомнения придерживается большинство исследователей, изучавших рудообразование в геологическом аспекте.

С другой стороны, Феннер, хотя и признает происхождение рудных флюидов «до известной степени» из остаточных пегматитовых расплавов, рассматривает этот путь как подчиненный более раннему выкипанию «газов, непосредственно выделяющихся из магмы» [стр. 83]. Газы, отогнанные таким путем и проникшие в стенки, окружающие расплавленную магму, по мнению Феннера, содержат и переносят рудоносные материалы. Он говорит: «Точка зрения [автора] такова, что наиболее подходящими агентами для

---

природа некоторых пегматитов. В относящихся к тому времени дискуссиях часто встречались ссылки на разные «периоды» и на какой-нибудь процесс, наложенный на более ранний, из чего легко может быть выведено заключение, что эти два процесса были независимы и только случайно совпали пространственно. По поводу этих двух фаз активности, проявляющихся в сложных пегматитах, Шеллер говорит:

«Здесь следует подчеркнуть, что хотя магматический и более поздний гидротермальный процессы замещения обладают индивидуальными особенностями и образуют различный ряд минеральных ассоциаций, они являются двумя очень близко связанными ступенями одного общего процесса» [стр. 162].

первичного выделения материала из магмы и переноса его в окружающие породы являются газообразные эманации» [стр. 111].

«...выделение газов, вероятно, начинается сразу при поднятии plutонической магмы в более высокие горизонты и продолжается во время кристаллизации» [стр. 82].

«...период максимального рудоотложения может наступить после отвердения, по крайней мере, внешней оболочки интрузии... Из этого можно сделать вывод, во-первых, что процессы минерализации начинают уже действовать в то время, когда магма еще находится по существу в жидком состоянии, хотя она могла уже образовать твердую оболочку и содержать взвешенные кристаллы, и, во-вторых, что газы, поднимающиеся через эту жидкость, скорее являются первичными агентами переноса металлических соединений в вышележащую породу, чем более поздние гидротермальные растворы» [стр. 79].

Повидимому, это может только обозначать, что рудообразующие элементы отложились до образования пегматитов или, по крайней мере, большинства пегматитов; к тому же выводу приводит и общий контекст Феннера. Между тем, подобное представление о возрастных соотношениях, как будто, совсем не согласуется с геологическими фактами<sup>1</sup>. С целью выявления наиболее обычных возрастных соотношений, несколько лет тому назад Г. Яцевич (Gratian Jatsevitch), в то время окончивший Харвардский университет, любезно взял на себя просмотр литературы по горным районам в разных частях земного шара, описанным компетентными геологами. Им установлено, что в районах, где присутствуют и руды и пегматиты, руды признаются более молодыми образованиями в столь резко преобладающем числе случаев, что либо зарождаются сомнения в полноценности доказательств в пользу обратной последовательности, либо возникает предположение, что эта необычная последовательность является результатом особых или необычных условий, вплоть до пересечения руд пегматитами из более поздней, самостоятельной магмы. Одно эти наблюдения уже кажутся достаточными, чтобы поставить под сомнение, если не опровергнуть, намечаемые Феннером возрастные соотношения и способ выделения. Но имеются и другие аргументы против них.

Даже если принять в расчет намечаемый эффект динамической концентрации газа (см. ниже стр. 78—79), схема Феннера ранней дестилляции непосредственно из исходной магмы почти несомненно допускает меньшие возможности для высокоспециализированного отбора и отделения более редких элементов, характерных для любых рудных месторождений, чем сегрегация рудного флюида как относительно поздней выжимки или остатка от всей ортотектической и пегматитовой кристаллизации.

Если бы Феннер был прав, рудный флюид должен был бы выделяться практически в момент наивысшего развития тепловой и химической энергии магмы, а образовавшийся таким образом

<sup>1</sup> См. Лафлин и Беер, сборник Линдгрена, стр. 59—60, и Эммонс, там же, стр. 324—325.

флюид, если бы состав его отвечал намеченному Феннером, составил бы наиболее сильно действующий реактив из всего, что в состоянии дать магматическая система, реактив, «весьма отличный по составу от первоначальной магмы» [стр. 82] и несомненно несоизмеримо более сильный, чем остающийся силикатный расплав. Можно было бы ожидать поэтому, что многие магмы, особенно заключенные на больших глубинах в плотных породах, должны быть окружены примыкающей зоной интенсивного изменения пород, обусловленной сильным воздействием просачивающегося наружу газового реактива. Действительно, известно немало участков, которые по положению, протяжению и степени изменения могли бы отвечать такой картине. Однако эти явления крупного масштаба относятся к гранитизации, а потому, как будет показано ниже, чрезвычайно ослабляют предположения Феннера, вместо того, чтобы подкрепить их.

Преимуществом концепции Феннера относительно времени и способа выделения рудного флюида является то, что она позволяет дать объяснение, ранее отсутствовавшее, для наблюдающейся тенденции к скоплению рудных месторождений в большем числе в пределах и вблизи «куполов» и других периферических частей интрузивных тел, чем в центральных и более глубоких их участках. Однако это в достаточной мере общее и неопределенное явление<sup>1</sup>, получившее приемлемое, но не обязательное и не единственно возможное объяснение (см. стр. 121) ранним выделением газа, повидимому, недостаточно для устранения более специфических трудностей, охарактеризованных выше, как, например, ореолы гранитизации и возрастные соотношения руд и пегматитов.

Позднее, в обзоре более детальной статьи Росса, Феннер изменил свой первоначальный взгляд на возрастные соотношения. После упоминания ранней, высокотемпературной стадии внедрения магмы он говорит:

«...большинство рудных месторождений, повидимому, произошло из магм в несколько более позднюю стадию, когда кристаллизация интрузии продвинулась дальше вперед, а летучие компоненты и металлы концентрировались в сокращенном остатке, что привело к увеличению давления пара, их содержащего. Благодаря этому возросла и тенденция газов к выделению и газы приобрели способность к преодолению большего сопротивления в боковых породах»<sup>2</sup>.

Это свидетельствует, повидимому, о том, что за промежуток времени после изложения взглядов в сборнике Линдгрена Феннер изменил свое мнение в сторону представлений Боуэна о возраст-

<sup>1</sup> Д-р Мур (E. S. Moore) намекает на внушительное число примеров, в которых рудные растворы подымались вдоль крыльев значительных синклиналей, из чего он заключает, что по крайней мере в этих случаях влияние магматических куполов, повидимому, не проявляется (Genetic relations of gold deposits and igneous rocks in the Canadian shield. Soc. Econ. Geol., Minneapolis Meeting, Dec. 1939).

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 932.

ных взаимоотношениях и общем остаточном-жидком механизме. Но так как детальной разработки этой измененной точки зрения Феннера (если она действительно изменена) не имеется, мы в настоящей статье в дальнейшем будем исходить из взглядов Феннера в том виде, как они отражены в сборнике Линдгрена.

### МЕХАНИЗМ ВЫДЕЛЕНИЯ

Шеллер не останавливается на вопросе, каким путем пегматитовый расплав обособляется от основной массы магматического материала, считая этот расплав конечным продуктом магматической дифференциации. Равным образом им особо не рассматривается и вопрос о происхождении гидротермального флюида, вызывающего более поздние реакции замещения в минералах простых пегматитов.

Можно сделать вывод, что Росс рассматривает гидротермальный агент, который переносит и отлагает руды и жильные минералы, попросту как более резко дифференцированный и специализированный расплав, более поздний, чем пегматитовый, но выделившийся, повидимому, аналогичным способом [стр. 149—151]. Несколько подробнее он высказывается по этому поводу в более ранней ценной работе, в которой наиболее специфичной является следующая его мысль:

«...прогрессирующая кристаллизация исходной магмы постепенно, путем непрерывного ряда процессов, привела к концентрации минерализаторов и образованию богатого водой раствора. Простого удаления этого раствора под действием давления от места возникновения достаточно для придания ему характера раствора, образующего жилы, вызывающего замещение горных пород и образование руд<sup>1</sup>.

Боуэн и Феннер полагают, что особый рудоносный флюид образуется как таковой из уже существующего магматического расплава при кипении. Для Феннера таким исходным расплавом является сама существенно не измененная магма; для Боуэна — это пегматитовый остаточный расплав, по его заключению, щелочной [стр. 131].

Оба автора намечают мало деталей механизма выделения газа; все же, судя по тому немногому, что дано, повидимому, легче представить себе концепцию, выдвигаемую Феннером, чем объяснения Боуэна. Идея раннего выделения, в то время, когда основная масса магмы находится преимущественно еще в жидком состоянии, не позволяет рассчитывать на значительное повышение до дистилляции содержания летучих сверх присутствовавших с самого начала. Температура магматического расплава бесспорно ниже его критической температуры; в сущности он прежде сохранил в себе в растворенном виде те летучие, которые, по предположению автора, теперь удаляются кипением. Так как приток тепла к магме после ее внедрения невероятен, кипение должно

<sup>1</sup> Physico-chemical factors controlling magmatic differentiation and vein formation. Econ. Geol., 23, 1928, 878.

стать возможным или, скажем, будет обусловлено уменьшением давления в системе, вероятнее всего, благодаря расширению системы вследствие проникновения части ее вещества в окружающие породы. Все это говорит за то, что кипение, которое имеет в виду Фернер, скорее (или даже исключительно) нормальное, чем ретроградное. Отделяющиеся от жидкости пузырьки газа могут при этом на большом протяжении подниматься через более высокие порции того же жидкого расплава, не претерпевая изменений и не вступая в реакции, если только температура остается подходящей. При большом объеме еще жидкой магмы (и, может быть, в присутствии тонкого слоя магмы, уже выкристаллизовавшейся) идея Фернера, повидимому, верно указывает путь отделения восходящих газовых пузырей и проникновения их в виде отдельной и отчетливой фазы в любые пустоты, имеющиеся в вышеуказанных породах. Это, повидимому, условие, которое должно быть принято во внимание при объяснении образования большей части эпигенетических руд. Иначе говоря, должна иметь место обильная селективная миграция фракции, отвечающей рудному флюиду, с отделением ее от остального магматического материала.

С другой стороны, механизм выделения Боуэна определенно связывается с «вторым», или ретроградным, кипением пегматитового расплава [стр. 135—136]. Здесь неизбежны три состояния фаз — кристаллы, жидкость и газ. Жидкость и газ будут оставаться в равновесии, пока они находятся в окружении кристаллов; но если бы газ поднялся до такого участка, где жидкость лишена кристаллов, то не только могли бы вступить в реакцию газ (кислый) и жидкость (щелочная), но могло бы иметь место и обратное поглощение и растворение газа жидкостью. Ссылка Боуэна на газовые пузырьки, поднимающиеся в жидкости, должна поэтому оставить неясное представление как о механике, так и о химизме процессов разделения и образования специального рудоносного флюида. Кроме того, «система» Боуэна приурочена к встречающимся в породах трещинам, карманам и разломам, в которых локализован пегматитовый расплав, а эти пространства, если первоначально они даже и были довольно обширными, с ростом пегматитовых кристаллов должны в большей или меньшей мере заполняться, чтобы привести к ретроградному кипению. Если пегматитовая кристаллизация и связанное с ней кипение начинаются в самой верхней части столба пегматитового расплава, где температура боковых пород, естественно, наиболее низкая, распространение кристаллизации и кипения на более глубокие части расплава, встретится с затрудненным селективным отделением газа от остающейся жидкости благодаря присутствию более или менее сильно развитой пробки или фильтра из кристаллов, уже образовавшихся вверху, ввиду того, что в узких пространствах успешное отделение газа от жидкости затруднено<sup>1</sup>. С другой сто-

<sup>1</sup> Это затруднение в отделении газа будет еще усилено вследствие возрастания его плотности и вязкости при высоком давлении, господствующем здесь, (см. ниже стр. 106—107).

роны, если равновесие между температурой и давлением таково, что кристаллизация и сопровождающее ее кипение начинаются где-то на большой глубине в столбе пегматитового расплава, причем ничто не препятствует свободному восходящему движению газовых пузырьков через вышележащую часть расплава, существенно свободную от кристаллов, возникает, как уже было упомянуто, предположение, что газ вновь соединится с преимущественно щелочной жидкостью и будет поглощен ею, причем обогатит ее летучими, снизит ее точку застывания и ограничит кристаллизацию на глубине больше, чем в вершине столба расплава, т. е., другими словами, не возникнет обособленной и химически отличающейся газовой фазы в качестве носителя руд. Повидимому, именно это в действительности имеет в виду Боуэн, как будет показано ниже. Во всяком случае, не удастся получить ясного впечатления, представляет ли себе Боуэн самостоятельное газовое вещество объема, безраздельно (временно) занимающее значительную часть канала, или мыслит ли он себе этот газ всегда только в виде пузырьков, рассеянных по всей существующей все время жидкости. Разница между этими двумя случаями, вероятно, имеет решающее значение, как видно будет из последующего. Другое затруднение в механизме Боуэна, вызываемое необходимостью непрерывности потока, целесообразнее обсудить в связи с составом.

Наше современное схематическое представление о всех этих процессах, протекающих на больших глубинах, не позволяет предъявить к авторам требования обязательно представлять при обсуждении вопросов выделения рудоносного флюида из магмы точную и исчерпывающую формулировку и описание процесса или в противном случае отказываться от изложения своих соображений. Но в рассматриваемом случае выдвигаемый двумя авторами общий способ выделения или произведет выгодное впечатление или не произведет его, в зависимости от того, будет ли точный механизм хорошо обоснован или покажется мало вероятным. В концепции Феннера процесс выделения кажется лучше продуманным и более последовательным, а также и более простым, чем у Боуэна; но этим преимуществам противостоит у него неверная концепция возрастных взаимоотношений. Если в последние внести исправления, что, повидимому, теперь уже сделано Феннером (см. выше), должен быть изменен и намеченный им механизм, который, вероятно, будет более близко напоминать неудовлетворительную картину, набросанную Боуэном.

Приходится во всяком случае признать, что процесс кипения, сопровождающийся появлением ясно выраженной поверхности раздела на обширном ли пространстве или узко местного значения, между исходной жидкостью и образующимся газом, бесспорно создает благоприятные условия для резкого разделения на разные составы. И в какой бы мере эти две фазы ни были обособлены, занимая при этом значительные объемы и взаимно исключая друг друга, описываемый механизм нуждается в приемлемом объяснении в части наблюдающегося поразительного контраста между

характером руд, с одной стороны, и изверженных пород или пегматитов, — с другой, а также и локализации руд. Несмотря на некоторые недостатки, это, несомненно, убедительный довод в пользу представления о кипении, так как ни Росс, ни Шеллер, и вообще никто больше не выдвигал с полной ясностью столь же простого и действенного способа выделения и сегрегации особого рудного флюида в виде жидкости. Если бы остальные последствия выделения в виде газа были столь же благоприятными и так же легко поддавались обоснованию, разногласия относительно природы и состояния рудоносного флюида, вероятно, давно уже были бы устранены. При современном же положении вещей каждый, кто поддерживает предположение о жидком состоянии, должен представить надлежащий механизм выделения рудного флюида из главной магмы или из какого-нибудь промежуточного магматического производного, как, например, пегматитового расплава; защитники же выделения в виде газа при кипении должны успешно справиться с многочисленными трудностями, которые влечет за собой концепция о газообразном состоянии. Пока не будет выполнено одно или другое из этих требований, мы не можем рассчитывать на удовлетворительную теорию рудообразования.

### СОСТОЯНИЕ И СОСТАВ<sup>1</sup>

**Кислый газ.** Боуэн и Феннер, соглашающиеся в том, что рудный флюид отделяется от щелочной жидкости первоначально в виде газа, сходятся и в том, что газ этот кислый. Помимо того, что кислые растворы и кислые газы можно наблюдать на поверхности в районах терм и что воздействие предположительно кислых реактивов сказывается на некоторых гипогенных рудах, основная причина, по которой эти авторы приписывают флюиду кислотные свойства, повидимому, заключается в их убеждении, что он газообразный, так как процесс кипения немедленно должен привести к решительному разделению на сильно летучие и слабо летучие компоненты, а первые из них, очень вероятно, обладают кислой реакцией. Однако геологические данные, свидетельствующие о проявлении их кислотных свойств на глубине, очень скудны.

**Кипение ниже критической температуры.** Убеждение, что рудный флюид в том виде, в каком он первоначально был выделен, представлял собой газ, предположительно основывается отчасти на наблюдающемся выделении в атмосферу обильных газов в районах действующих терм и вулканов, отчасти на уже упоминавшейся привлекательности, которую таит в себе идея кипения как средства выделения, главным же образом, может быть, на убеждении, что давление и концентрации на глубине недостаточны, чтобы воспрепятствовать кипению при господствующей там температуре. Не в пример Ниггли, ни Феннер, ни Боуэн не при-

<sup>1</sup> К сожалению, тесные взаимоотношения, существующие между состоянием и составом, создают трудности в самостоятельной трактовке этих крайне важных факторов и приводят к тому, что подзаголовки не всегда точно соответствуют помещенному под ними содержанию.

влекают критических явлений для объяснения развития газовой фазы из ранее существовавшей жидкой, так как оба они полагают, что образовавшийся газ и остающаяся жидкость существуют одновременно и отличаются друг от друга резко разнящимся составом. Более определенно высказывается Феннер. Разбираясь в вопросе, что происходит во время кристаллизации магмы, сопровождающейся прогрессирующим обогащением жидкости летучими, он говорит:

«Сомнительно, пересекает ли нисходящая кривая критических температур (которая для первичной магмы должна равняться нескольким тысячам градусов) нисходящую кривую действительных температур (кривую растворимости). Я полагаю, что в действительности имеется очень много фактов, говорящих против такой возможности» [стр. 114].

И оба они, Феннер и Боуэн, ссылаются на Мори (Morey)<sup>1</sup>, который, повидимому, первый ввел здоровые физико-химические ограничения в произвольные до того времени измышления относительно критических явлений в геологических флюидах.

Однако вывод, что вскипание возможно вследствие соответствующего соотношения давления и температуры, повидимому, основывается на догадках или на личном предпочтении автора в большей мере, чем на установленных данных относительно действительного соотношения температура—давление—состав на этих глубинах на стадии рудообразования. Пожалуй, нет достаточных оснований, чтобы оспаривать и вывод тех исследователей, которые предпочитают противоположное решение задачи, а именно, что давление по отношению к температуре и составу достаточно, чтобы воспрепятствовать вскипанию или, по крайней мере, свести его роль до малозначущей. Поскольку же проницаемость вмещающих пород в разных местах вокруг одной и той же магматической массы и вокруг разных магматических тел, повидимому, изменяется в широких пределах, что должно сказаться и на величине давления, то можно думать, что при общем рассмотрении соотношения температура—давление—состав пришлось бы иметь дело с двумя категориями случаев: когда вскипание имеет существенное значение и когда оно его не имеет. Боуэн косвенно признает возможность таких альтернатив, говоря:

«Повидимому, пегматитовый расплав неизбежно вскипает и н о г д а даже на более значительных глубинах [стр. 131, выделено Грейтом].

Но останавливается он только на этом случае «иногда» и обходит молчанием пегматиты, образовавшиеся из расплавов, почти

<sup>1</sup> Relation of crystallization to the water content and vapor pressure of water in a cooling magma. Jour. Geol., 32, 1924, 294—295. Мори говорит: «Критические явления никогда не обнаруживаются у насыщенных растворов, образованных охлаждающейся магмой, и критическая кривая этих жидкостей никогда не пересекается кривой растворимости». По существу те же взгляды высказывались им раньше (The development of pressure in magmas as a result of crystallization. Jour. Wash. Acad. Sci., 12, 1922, 226). Другие цитаты из Мори, имеющие отношение к рассматриваемым вопросам, приведены на последующих страницах настоящей статьи.

или вовсе не подвергавшихся вскипанию. Может ли быть, что по его представлениям так мало выкипает чего-то другого, кроме воды, что пегматиты этих двух категорий должны быть существенно идентичными? Если так, должно было бы существовать на свете гораздо больше пегматита, чем руды, что, повидимому, не подтверждается известными фактами. Во всяком случае, окончательное заключение Боуэна таково: «Явление кипения имеет важнейшее значение в связи с образованием рудных месторождений» [стр. 131]. Феннер тоже допускает возможность случаев, когда кипение не имеет места, однако, повидимому, только при тех крайних и идеальных условиях, когда «...во время охлаждения и кристаллизации плутоническая магма находилась между газонепроницаемыми стенками» [стр. 114].

**Критические явления в газовой фазе.** Убеждение Феннера и Боуэна, что жидкость ко времени выделения газа находится в состоянии ниже ее критической температуры, отнюдь еще не обозначает, что выделившийся газ тоже должен находиться в состоянии ниже его критической температуры. Феннер отмечает, что для воды критическая температура будет снижена в случае примеси компонентов с более низкой критической температурой, как, например,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{HCl}$ ; компоненты же, дающие рудные и жильные минералы, обладая «высокими критическими температурами, стремятся увеличить критическую температуру смеси, но так как их количества очень малы по сравнению с первой, ранее указанной группой компонентов, то результаты их влияния вряд ли велики» [стр. 80].

«...мы можем быть уверенными, что главная масса летучих веществ, выделяющихся при плутонических интрузиях, будет состоять из водяного пара в состоянии значительно выше его критической температуры» [стр. 114, выделено в обеих цитатах Грейтоном]<sup>1</sup>.

Таким образом, Феннер, как будто, допускает, что его летучая фаза отличается сравнительно незначительным содержанием компонентов, участвующих в формировании руд и жильной породы, даже если они присутствуют в виде столь благоприятствующих этому галоидных соединений. Повидимому, это подтверждается и имеющимися экспериментальными данными. Надо думать, что или этот газообразный агент мало пригоден для формирования крупных рудных месторождений или же поистине поражающие количества (по весу)  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$  и т. д. должны были пройти через участки, где в отдельных рудных жилах отложены десятки и сотни миллионов тонн материала магматического происхождения.

В противоположность тому, что сказано относительно критической температуры в только что приведенной цитате, показательно заключение Феннера по поводу судьбы поверхностных вод, для которых мыслимо проникновение их на значительную глубину в соответствии с капиллярной гипотезой Добрэ:

<sup>1</sup> Перевод некоторых цитат из русского издания сборника Линдгрена уточнен. *Ред.*

«Вода, постепенно опускающаяся в более горячие области, будет растворять все больше и больше силикатного материала, вследствие чего давление ее пара уменьшится, критическая температура возрастет... Паровая фаза может образоваться в небольшом масштабе или может и вовсе не образоваться» [стр. 73].

Такое положение вещей должно, по мнению Феннера, сохраниться на всем пути вплоть до контакта с магмой, т. е. иметь место и при температуре магмы. Это представляется нам справедливым выводом. Но если «паровая фаза может образоваться в небольшом масштабе или может и вовсе не образоваться» из богатого летучими силикатного расплава, то почему должно иметь место обильное выделение воды при кипении из бедного летучими силикатного расплава по другую сторону того же контакта, т. е. из самой магмы, находящейся, по мнению Феннера, под значительно большим давлением? Разве Феннер не привел здесь совершенно неоспоримых доводов против критического состояния в магматическом экстракте и против интенсивного кипения глубокой магмы?

В отличие от Феннера, Боуэн, повидимому, считает выкипающие газы находящимися в состоянии ниже их критической температуры или, в лучшем случае, лишь немного выше, судя по следующим его словам:

«...пар, образовавшийся в какой-нибудь точке, будет перемещаться только на небольшое расстояние до тех пор, пока не попадет в более холодную обстановку, где он частично или полностью конденсируется» [стр. 136].

Весь наш опыт говорит за то, что с повышением температуры возрастает летучесть. То, что Боуэн, видимо, принимает для газа более низкую температуру, чем Феннер, обозначает, что газ Боуэна должен содержать сравнительно еще меньше летучих при преимущественно низкой температуре составных частей руд и жильных минералов, чем незначительное их количество в газе Феннера.

**Новая конденсация газа.** Как Феннер, так и Боуэн считают, что кислый газ, образующийся при предполагаемом кипении щелочного расплава, выше по каналу на известном расстоянии от места выделения может в некоторых случаях конденсироваться с образованием кислых растворов [стр. 84, 91; 136, 138]. Вероятные причины предполагаемой ими конденсации изложены в дальнейшем.

Боуэн, повидимому, мало верит в способность флюида к реальному и значительному химическому воздействию, пока он находится в газообразном состоянии. Он приходит к выводу, что руды и сопровождающие их минералы отлагаются только тогда, когда кислый газ поднимется на достаточно далекое расстояние от места кипения, чтобы благодаря охлаждению конденсироваться, образуя жидкий кислый раствор. Боуэн говорит:

«...вероятно эти кислые растворы являются главными агентами контактового метаморфизма, образования жил, замещения и метасоматизма вообще» [стр. 136].

И далее:

«... такие кислые растворы, вероятно, являются главными агентами переноса рудообразующих материалов» [стр. 141].

Не в пример Феннеру, Боуэн, повидимому, приходит к выводу, что газ, образовавшийся в какой-нибудь точке благодаря кипению, «будет перемещаться только на небольшое расстояние до тех пор, пока не попадет в более холодную обстановку, где он частично или полностью конденсируется» в жидкость [стр. 136]. Следовательно, он считает коротким отрезок пути, занятый газом, и здесь, по его мнению, процессы минералообразования проявляются лишь слабо.

Не исключено, что Боуэн вообще не предусматривает существования действительно свободной от жидкости и заполненной газом части канала между щелочным пегматитовым расплавом внизу и кислым рудоносным раствором сверху. Некоторые его замечания говорят скорее за то, что, по его мнению, мы имеем здесь дело с единым столбом жидкости, прерываемым только газовыми пузырями, которые, подымаясь сквозь пегматитовый расплав, постепенно сгущаясь и сливаясь с ним кверху, приводят к постепенной замене пегматитового (щелочного) состава внизу совершенно иным (кислым) составом рудного флюида кверху, с промежуточными составами в переходной зоне. Это означало бы количественное преобладание жидкой фазы везде и всегда. Если это действительно то, что имеет в виду Боуэн, то его предположения могли бы помочь объяснить те случаи, когда пегматиты переходят в кварцевые жилы. Но если это основной способ происхождения рудообразующего флюида, то физическая близость между пегматитами и рудами и, в частности, включение рассеянных пегматитовых кристаллов ранних стадий образования в жилах, казалось бы, должны быть гораздо более обычными, чем это наблюдается на самом деле.

В резком контрасте с Боуэном, Феннер приписывает настолько крупное значение способности газа к переносу растворимых минеральных веществ и к химическому воздействию, что конденсация его не является непосредственной необходимостью. Он считает, что «газовое состояние, вероятно, сохраняется на большом расстоянии, особенно по главным каналам движения» [стр. 86].

Феннер предполагает, что именно на этом большом отрезке, в то время как флюид находится в газообразном состоянии, происходит первоначально в основной своей массе осаждение как составных частей, вынесенных флюидом из магмы, так и тех других составляющих, которые возникли благодаря реакции между флюидом и застывшими породами, по которым она подымалась [стр. 86, 111]. По Феннеру, следовательно, большая часть переноса минерального вещества выполняется п н е в м а т о л и з о м. Конденсация же газов, хотя она и играет существенную роль в дальнейших его построениях, не принимается им во внимание в эту раннюю стадию отложения и химических воздействий. При этих условиях показательно, что на всем «большом расстоянии», на котором, по мнению Феннера, сохраняется газовая фаза, флюид остается кислым и что в конце концов он конденсируется в кислый раствор. Для

этого или степень кислотности флюида при выделении из магмы должна была быть чрезвычайно высока или флюид быстро «изолировался» от щелочьсодержащих боковых пород каналов движения путем извлечения щелочи из тонкого слоя боковой породы и превращения его в инертную «изоляцию», или, наконец, газ, несмотря на свою кислотность, оказывал настолько слабое воздействие на боковую породу, что он оставался кислым, несмотря на непрерывающееся соприкосновение с ней на «большом расстоянии». Любая из этих альтернатив или была бы пагубна для положений Фейнера или находилась бы в противоречии с геологическими фактами. В частности, последние две альтернативы имели бы своим следствием незначительное изменение породы под воздействием газа и, повидимому, исключали бы возможность более широкого осаждения минерального вещества из газа как при взаимодействии с боковой породой, так и благодаря нейтрализации кислотности флюида.

**Количественные соотношения между пегматитом и рудой.** Такие предположения, как только что приведенные взгляды Боуэна, встречаются еще и с другими трудностями. Согласно взглядам Боуэна, не существует физически обособленного и отчетливого рудного флюида, а имеется только постепенное изменение состава в непрерывном столбе жидкости, вызванное своего рода внутренним переносом при помощи поднимающихся газовых пузырьков, извлекающих некоторые компоненты из пегматитового расплава внизу и способствующих их накоплению в жидкости ближе к поверхности. Вся жидкость первоначально была щелочной и пегматитовой по своей природе; те кислотообразующие элементы, которые содержались в ней, присутствовали в столь незначительном количестве, что подавлялись элементами противоположного характера; содержание же летучих при низкой температуре компонентов, увлеченных газовыми пузырьками (и способных к образованию руд), должно было быть чрезвычайно низким. В то же время подразумевается, что такой газовый перенос в состоянии был в конечном счете превратить лежащую выше часть пегматитового расплава в резко отличную от него смесь: кислую вместо щелочной, богатую летучими вместо сравнительно бедной ими, и такого состава, что из нее могла образоваться руда вместо пегматита. Чтобы вызвать настолько крупные различия в составе, какие наблюдаются между застывшими пегматитами и большинством застывших руд, огромные массы пегматитового расплава должны были лишиться таких малых своих компонентов, как летучие металлы и т. п., с тем, чтобы дать сравнительно незначительные массы особого рудного флюида. Это означало бы, что в каком-нибудь горнопромышленном районе, для которого освещена вся геологическая обстановка, пегматиты должны были бы значительно преобладать над рудами, даже если бы каждое пегматитовое тело дало некоторое количество руды. В связи с тем, что каждый пегматит является пегматитом, тогда как рудами являются только те немногие минеральные скопления, которые случайно сравнительно богаты промышленно ценными металлами, повидимому даже там, где эрозия вскрыла более глубокие зоны, не

удаётся найти статистического или выведенного из общих наблюдений подтверждения необычных соотношений пегматита и руды, которые должны были бы проистекать из такого особого способа образования рудного флюида.

Не вносит существенного улучшения в такую ситуацию и противоположная интерпретация механизма Боуэна, а именно, предположение, что рудоносная газовая фаза до конденсации полностью отделилась от пегматитового расплава и затем на некотором расстоянии выше снова конденсировалась в предполагаемый кислый рудный раствор, так как и в этом случае отношение осаждаемого рудного материала к количеству выкристаллизовавшегося пегматита было бы чрезвычайно низким.

При обеих альтернативах образование рудоносного флюида в виде фракции первоначального пегматитового расплава наталкивается еще на другое препятствие количественного порядка. Соответствующие соображения лучше всего могут быть изложены, если временно ограничиться рассмотрением намечаемого процесса в том виде, в каком он протекает в отдельной вертикальной трещине, заполненной первоначально исходным пегматитовым расплавом. Механизм Боуэна при обеих альтернативах очень легко привел бы к тем результатам, которые им предусматриваются, если бы этот вертикальный столб жидкости был стационарным. В таком случае мы могли бы ожидать встретить в качестве конечного твердого продукта нормальную пегматитовую дайку, занимающую большую часть вертикального протяжения данной трещины, и лежащий выше сравнительно небольшой участок, занятый рудой, с промежуточной полосой, либо а) содержащей материал, промежуточный между пегматитом и рудой, либо б) преимущественно незаполненной, так как она была бы занята только газом — в зависимости от того, будет ли принята альтернатива непрерывного столба жидкости с газовыми пузырьками или верхнего и нижнего столбов жидкости, разделенных газом. И в том и в другом случае, несомненно, создалось бы впечатление, что разнообразные горизонты, ныне вскрытые эрозией, и разрезы в глубоких рудниках должны были бы отобразить гораздо больше проявления того или иного из этих результатов, чем было встречено на самом деле.

Но даже и такая концепция стационарного положения в пределах трещин не может быть поддержана. Для того, чтобы наблюдающиеся значительные вертикальные протяжения на глубину жил, плотно заполненных рудой, привести в соответствие с широко принятым теперь мнением о разбавленности рудоносного флюида (т. е. преобладание растворителя над наличными растворенными веществами), необходимо считаться с продолжительным током раствора (кислый раствор Боуэна) вдоль рудоносной части трещины. Очевидно, что такое течение жидкости<sup>1</sup> не может иметь

<sup>1</sup> В другой работе Боуэн отчетливо выразил это требование продолжительного тока рудоносного флюида и его отличие в этом отношении от породообразующей магмы: «Требуется большое количество жидкости, циркулирующей по жиле, чтобы отложить сравнительно небольшое количество кварца. Такие жид-

места в рудоносной части трещины, если оно не сопровождается аналогичным течением в более глубокой части — части, где, согласно Боуэну, жидкость носит пегматитовый характер. Словом, сам пегматитовый расплав должен течь вверх. Если бы такое течение продолжалось длительное время (т. е. столько времени, сколько нужно для отложения всей массы руды из сравнительно разбавленного рудного флюида), пегматитовый расплав, который при застывании должен дать пегматит, заполнил бы трещину почти на всем или даже на всем ее вертикальном протяжении, причем обособленный рудный флюид (если он вообще в состоянии был образоваться в сколько-нибудь значительных размерах) в основном был бы вытеснен и рассеян, а рудообразование было бы очень ограниченным или отсутствовало бы вовсе.

Короче говоря, концепция условно принимаемого рудного флюида в качестве особой — и неизбежно подчиненной — фракции, произошедшей непосредственно из пегматитового расплава, представляется нам со всех точек зрения противоречащей количественному балансу<sup>1</sup>. Единственной приемлемой лазейкой, как будто, является возможность, что исходный, так называемый пегматитовый расплав гораздо богаче металлами и другими отчетливо рудообразующими элементами, чем кто-либо намечал до сих пор. Если бы состав этой жидкости был таков, что она могла бы давать, скажем, пегматит и руду в равных количествах, было бы легче объяснить наблюдающиеся факты и соотношения. Но в таком случае, казалось бы, мы вправе были бы ожидать встретить хотя бы отдельные примеры, когда жидкость не подвергалась предполагаемому разделению или дроблению, и единичные хотя бы случаи смешанных жил или даек, составленных поровну из пегматита и рудного материала в тесной смеси. Такие примеры встречены, повидимому, не были.

**Границы проявления действия газовой фазы по вертикали.** Упомянутыми различиями во взглядах этих двух авторов на химические способности газов объясняется, вероятно, что Феннер готов допустить и допускает движение газов и их активность на значительном вертикальном протяжении до того, как они снова конденсируются, в то время как Боуэн склоняется к конденсации близ места кипения. Доводы, которыми каждый из авторов обосновывает свои выводы, мало убедительны; все же создается впечатление, что Феннер несколько ближе подходит к вероятным результатам, чем Боуэн. Если кипение происходит во внушительных размерах на глубине, — а размеры его должны быть внушительными, чтобы объяснить значительную величину рудных тел, — более вероятным представляется, что большая часть образовавшегося

кости ни с какой точки зрения не могут считаться магмами в том смысле, в каком обыкновенно понимают этот термин, так как такое применение его имело бы в виду жидкость, которая в один прием путем инъекции в трещину с последующим застыванием в состоянии заполнить трещину твердой породой» (The evolution of the igneous rocks, 1928, 131).

<sup>1</sup> Может быть, за исключением некоторых руд олова, вольфрама и молибдена, очень тесно связанных с пегматитом (L andes K. K. Pegmatites and hydrothermal veins. Am. Min., 22, 1937, 559).

при кипении газа, может быть после некоторой конденсации в верхней части проводящих каналов в начальную стадию, еще до их нагрева, сохранится в виде газа на всем пути вплоть до поверхности (как должно случиться по мнению Феннера) [стр. 86], или, по крайней мере, до ближайшей к поверхности, богатой разломами зоны, где проницаемость настолько велика, что сравнительно легко может иметь место смешение с холодной грунтовой водой.

Для того, чтобы вообще объяснить конденсацию, Феннеру приходится, очевидно, допускать каналы с затрудненным, а следовательно, медленным течением [стр. 86], так как в противном случае доступ тепла магматического происхождения к стенкам каналов вызвал бы их нагрев до температуры, исключающей возможность конденсации газа. Но если принять во внимание высокую температуру, при которой, согласно и Феннеру и Боуэну, выделяется флюид, высокую удельную теплоту пара (и еще более высокую жидкой воды) по сравнению с удельной теплотой породы и низкую теплопроводность последней, то приходишь к убеждению, что движение действительно должно было быть очень медленным для того, чтобы тепло, принесенное снизу к какой-нибудь точке вдоль проводящего канала, поступало бы медленнее, чем выносятся тепло наружу из канала через боковые породы.

Следует помнить, что при столь низкой концентрации растворимых веществ, какую примерно большинство из нас считает вероятной, независимо от того, совершается ли перенос в виде газа или в виде жидкости, бесчисленное количество объемов горячего флюида должно пройти по какому-либо участку проводящего канала раньше, чем будет закончено отложение там одного объема твердого материала. Много флюида протечет через то или иное место, основательно нагревая стенки, раньше, чем отложение минерального вещества выйдет из начальной стадии; новый же приток материала несет с собой новый запас тепла; поэтому вполне вероятно, что после такого нагрева боковая порода в любой точке проводящего канала только тогда начнет охлаждаться, когда приток флюида сократится до единичных капель, будь то в связи с окончательным истощением источника, или с завершающимся заполнением канала отложенными минералами, или с вмешательством каких-нибудь структурных нарушений в более глубоких частях канала, например закупоркой или отклонением приводящих путей. И только тогда, когда боковая порода остынет до температуры конденсации флюида (при существующем давлении) и будет в состоянии, кроме того, отводить скрытую теплоту конденсации, газ может быть превращен в жидкость. Похоже на то, что такой результат может быть достигнут только при замирании всего процесса в данном проводящем канале вследствие истощения или каких-то необычных явлений<sup>1</sup>. Все эти соображения грубо могут

<sup>1</sup> За исключением, понятно, тех близких к поверхности участков, где повышенная проницаемость пород делает возможным рассеяние флюида на значительно большей специфической поверхности ненагретой породы и влечет за собой ненормально быструю потерю тепла.

быть представлены в следующем виде: конденсация в данном месте требует, чтобы там был небольшой приток тепла, что возможно лишь при небольшом притоке флюида, а последнее, в свою очередь, влечет за собой незначительное отложение рудной массы; следовательно, отложение руд в крупном масштабе не может быть одновременным с конденсацией.

Надо еще помнить, что по мере того как флюид неизбежно теряет тепло при своем восходящем движении, он переходит в область более низких давлений. Кроме того, обычным является, что флюид при подъеме теряет больше растворимых веществ, чем приобретает, а это повышает давление его пара. Последние два обстоятельства естественно понижают точку кипения, и их совместное действие может во многих, если не в большинстве случаев, уравновесить тенденцию к конденсации благодаря потере тепла при передвижении вверх.

Попытка приблизиться к разрешению проблемы путем допущений относительно количества вовлеченного в оборот тепла тоже как будто склоняет чашу весов в пользу предположения, что вес газа, испаряющегося при кипении с одного фута жидкости по вертикали, на любом горизонте будет больше, чем может конденсироваться снова благодаря потере тепла с фута боковых пород выше по вертикали вдоль проводящего канала. Если этот расчет правилен, одного непрерывающегося кипения было бы достаточно, чтобы заполнить газом всю находящуюся выше часть канала и поддерживать ее затем в таком заполненном виде.

Наконец, предположение Боуэна о конденсации на сравнительно близком расстоянии от места кипения страдает еще тем недостатком, что кипение, по его мнению, происходит при второй точке кипения, в то время как последующая конденсация должна иметь место при первой точке кипения, которая, несомненно, будет более низкой, возможно гораздо более низкой. Вместе с тем ретроградное кипение отнюдь не влияет на неизбежное поглощение скрытой теплоты при конденсации. Трудно себе представить, чтобы все это тепло могло быть поглощено на коротком протяжении канала, которое намечает Боуэн.

Мысль о конденсации, без доказательств принимаемая Феннером и Боуэном, в качестве явления, характеризующего процесс рудообразования, представляется нам покоящейся на недостаточно прочных основаниях. Гораздо более вероятным является, что кипение, после того как оно началось в значительных размерах, привело бы к заполнению газом проводящего канала почти или даже вплоть до поверхности и поддерживало бы его в таком наполненном газом состоянии до тех пор, пока фактически не иссякли бы запасы испаряемого материала у источника<sup>1</sup>. Но в таком случае возникает вопрос: к чему приводит кипение, если оно не сопровождается последующей конденсацией, и где можно наблюдать результаты такого процесса? В общей сложности тысячи кубических миль горных пород на территориях, благоприятных для таких

<sup>1</sup> Ср. с Karapiti Blowhole на стр. 65.

общих процессов, и на самых разнообразных глубинах очень тщательно изучены рудничными геологами. Не остались ли незамеченными ими те места, где горячие кислые газы пробили себе дорогу, не конденсируясь? Или таких мест не было вне непосредственной близости к существовавшей тогда поверхности?

**Границы проявления действия жидкой фазы по вертикали.** Как было уже указано, надо полагать, что пегматитовый расплав в своем движении вверх вытеснит из системы проводящих каналов все то количество кислого раствора Боуэна, которое могло образоваться в качестве такового. Это должно было бы отразиться пагубным образом на отложении в крупном масштабе руд из этого раствора в проводящих каналах.

С другой стороны, механизм Феннера, согласно которому кипение происходит на больших глубинах в магматическом очаге, допускает конденсацию на любом горизонте, где может быть встречено подходящее равновесие между температурой и давлением. Феннер представляет себе, что конденсация происходила первоначально где-то высоко в проводящих каналах, т. е. на «значительном расстоянии» вверх от места кипения. Таким образом возникает огромный заполненный газом промежуток, в пределах которого, по его мнению, выполнялась основная часть работы по рудоотложению. Однако Феннер приходит к выводу, что «как только со временем плутоническое тело, являющееся источником газов, охлаждается, горизонт, на котором пневматолитическое состояние выделившегося материала уступает место гидротермальному состоянию, понижается и в конце концов оказывается на уровне самого магматического источника» [стр. 86—87].

Такое представление о понижении уровня конденсации, являясь обязательным в законченной гипотезе Феннера, все же кажется крайне неправдоподобным. Понижение уровня ясно зависит от соотношения между теплом, поднимающимся от магмы, и теплом, теряемым в стенках канала. Кое-что относительно вероятного решения этого вопроса уже было сказано на стр. 36. Но здесь важно отметить, что Феннеру приходится в конечном счете приписывать этой конденсированной жидкости значительную работу на всем пути вниз до магматического очага, а в таком случае не должно было прекращаться обильное выделение способного к конденсации газа из самого очага и, одновременно, столь же обильного тепла при температуре, не уступающей температуре магматической кристаллизации. Кроме того, проводящие каналы, уже хорошо нагретые, должны были оставаться достаточно свободными, чтобы допускать подъем реагирующего вещества, необходимого для осуществления ряда преобразований, которые, как мы увидим, по мнению Феннера, глубоко затрагивают уже отложившийся рудный материал. При этих обстоятельствах кажется совершенно невероятным, по тем самым соображениям теплового баланса, которые признаются Феннером [стр. 86], чтобы глубоко в каналах конденсация могла иметь место. Вряд ли возможно, чтобы в то время, когда происходит выкипание из магмы, где-нибудь вблизи магматического очага существовали температуры, подходящие для кон-

денсации, если только весь этот участок не охладился до температуры, значительно более низкой, чем температура магматической кристаллизации. А в таком случае не было бы и преобразуемого материала, который мог бы претерпеть предполагаемую конденсацию или вызвать предполагаемые «превращения». Ибо магма, как таковая, была бы тогда «мертва».

**Приобретение флюидом вновь щелочных свойств.** И Феннер и Боуэн полагают, что после того, как кислый газ конденсировался, кислый раствор вступает в реакцию с щелочесодержащими породами вдоль проводящего канала, постепенно нейтрализуется и может стать щелочным [стр. 91—92; 141]. К числу доводов, подтверждающих их предположения о таком превращении в щелочной раствор, можно отнести наблюдающиеся выходы горячих щелочных вод в богатых термами районах и, вероятно, прежде всего — установленный факт широкого распространения серицита и аналогичных изменений в боковых породах, примыкающих к минералоносным каналам, ибо Феннер и Боуэн, несомненно, согласны с тем, что «там, где образовался серицит, воды можно считать щелочными»<sup>1</sup>.

Боуэн, повидимому, придерживается того мнения, что подобное превращение кислого раствора в щелочной происходит выше места, где была отложена большая часть руды; это результат явления *ex postfacto*, заключительный бесплодный акт в эволюции раствора; поэтому в основном<sup>2</sup> Боуэна не интересуют растворы после того, как они утратили свой кислый характер, и в его толковании они попросту заканчивают свой путь, выходя на поверхность в виде щелочных горячих источников. Но такое представление потребовало бы, чтобы вертикальный отрезок, на котором раствор приобретает щелочной характер, являлся бы участком, бедным рудой или совсем не содержащим руд, т. е., чтобы рудоносные части жил всегда лежали под безрудным участком. Факты, повидимому, неуводлетворительны для этого вывода. Такое предположение означало бы далее, что область серицитизации должна лежать выше области рудообразования, в то время как на самом деле серицит является типичным спутником руд, сохраняющим эту роль на всем протяжении их развития.

Напротив, Феннер, как будет видно из дальнейшего, делает гораздо более важные выводы относительно растворов, преобразованных в щелочные, и полагает, что последние могут быть активными в позднюю стадию практически на всем протяжении по вертикали системы проводящих каналов.

Если бы флюид, исходящий из магмы, первоначально был кислым, то движение его сквозь щелочесодержащие породы несомненно сопровождалось бы тенденцией к превращению его в щелочной, причем если бы путь через эти породы (т. е. опять-таки ще-

<sup>1</sup> Day and Allen. Volcanic activity and hot springs of Lassen Peak. 1925, 141.

<sup>2</sup> Среди немногих исключений Боуэн признает ртутные руды, как образовавшиеся близ поверхности из перерожденных щелочных растворов [стр. 141—142].

лочьсодержащие) был достаточно длинен и обеспечивал достаточную близость, то флюид несомненно стал бы щелочным. Вопрос сводится к тому, вероятна ли такая выдержанная близость взаимоотношений. В целом этот вывод представляется весьма невероятным.

Среди наиболее убедительных, особо выдвигаемых Феннером доводов в пользу кислых флюидов на первом месте стоит частый выход их на поверхность и их выщелачивающее действие на смежные стенки выходных отверстий в районах развития вулканических явлений и терм. Разве не очевидно, что ныне истекающий флюид обладает кислой реакцией только потому, что более ранними порциями истекающего кислого флюида непосредственно прилегающие стенки канала были настолько основательно выщелочены, с выносом щелочей, что в настоящее время флюид не имеет свободного доступа к неизменным, все еще содержащим щелочи более удаленным частям окружающих горных пород.

Вряд ли может оспариваться вывод, что извлечение щелочей будет наиболее быстрым и успешным при воздействии самых первых порций кислого раствора, движущегося по данному отрезку проводящего канала, так как в это время наиболее легкий доступ флюида к еще девственной породе. Эти первые порции могут поэтому полностью утратить свою кислотность и стать щелочными. Последующие же порции вынуждены будут течь по каналам, которые чем дальше, тем более полно «изолируются» от содержащихся в породе щелочей благодаря возрастающей толщине прослойки уже выщелоченной породы. Нейтрализация кислотности для каждой последующей порции флюида будет поэтому становиться менее полной, а в непродолжительном времени из всего протекающего объема доступ к щелочам сохранится только для совсем подчиненной доли, слишком подчиненной, чтобы нейтрализовать кислотность флюида в целом. Короче говоря, в данном проводящем канале степень выноса щелочей из окружающей породы непрекращающимся потоком флюида должна непрерывно убывать. Но так как течение, как было уже указано, должно продолжаться длительное время для того, чтобы привести к образованию рудных месторождений, то отсюда приходится сделать вывод, что нейтрализация кислоты и замена ее щелочью может иметь место только для подчиненной, наиболее ранней части всей массы флюида, в то время как большая часть флюида, если он кислый<sup>1</sup> с самого начала, останется кислой на всем пути до выхода на поверхность. Следовательно, такой количественный разбор говорит против вероятности приобретения первоначально кислым флюидом щелочного характера в качестве общего и существенного явления.

Но, далее, если даже и допустить приобретение щелочных свойств, невероятным кажется, чтобы флюид мог стать настолько

<sup>1</sup> Это положение не имело бы столь универсального значения, если бы нейтрализация кислоты была достигнута воздействием на известняк и полным его растворением вместо замещения таких силикатов щелочных металлов, как полевошпат, слюда и т. п.

сильно щелочным, чтобы отдавать щелочи обратно породе в виде серицита, парагонита, алуинита и т. д. Если флюид стал щелочным, как отмечается, вследствие извлечения щелочей из полевых шпатов, слюд и тому подобных минералов боковых пород (как выражение стремления флюида притти в равновесие с породой), то нельзя предполагать без всяких доказательств, что флюид будет в состоянии изменить свое прежнее поведение на противоположное и начать отлагать щелочи в порядке иного проявления химической активности при стремлении достичь равновесия с тождественными полевыми шпатами и сходными минералами. Для того, чтобы стали возможны подобные реакции, флюид в месте отложения должен был бы находиться в существенно иных условиях, чем те, которые господствуют в месте выщелачивания. Потеря тепла, давления и растворенных веществ — обычная участь этих растворов — вряд ли создает такие резко различные условия. Если бы дело касалось попросту кристаллизации щелочьсодержащего минерала в открытой полости канала в связи с тем, что убывающая температура довела концентрацию этого соединения до насыщенного состояния, осаждение щелочей можно было бы рассматривать как возможное. Адуляр при образовании иногда выполняет полости в эпитермальных жилах и отложениях горячих источников и предположительно может быть поставлен в связь с подобными условиями, так же как иногда и альбит на глубине. Но большая часть щелочей, фактически выпадающих из рудного флюида, входит в состав нового минерала (т. е. серицита), образующегося путем замещения породообразующих минералов — либо первоначальных минералов, либо тех продуктов замещения, которые образовались при предполагаемом кислом воздействии. Этим, кроме того, подчеркивается, что поведение флюида, как мы его себе представляем, принимает прямо противоположное направление, что делает подобное поведение совсем невероятным. К тому же серицит или аналогичные щелочные материалы, как общее правило, представляют результат замещения не минералов, образовавшихся при предшествующем кислом воздействии, а минералов — преимущественно полевых шпатов и слюд — первоначальной боковой породы.

Предположение, достаточно не обоснованное, что раствор, обогатившийся щелочами из окружающей породы, может затем выделять такие минералы замещения, как серицит, в свете физико-химических возможностей, кажется весьма слабым. Задача представить доказательства этого предположения выпадает на долю тех, кто поддерживает такой вывод. В то же время ни одна теория гипогенного рудообразования не может иметь действительно широкого приложения или рассчитывать на распространение в широких кругах, если она не в состоянии удовлетворительно объяснить тип изменения пород, представленный серицитизацией. В классическом исследовании Линдгрена об изменениях, вызываемых гидротермальными растворами, его вывод таков:

«Наиболее выдающимся минералом, образованным метасоматическими процессами, является калийсодержащая слюда (мусковит,

серицит, циннвальдит и многие другие родственные минеральные виды)»<sup>1</sup>.

Если трудно поддерживать предположение, что кислые первоначально флюиды могут затем становиться в основном щелочными или могут образовывать щелочьсодержащие минералы замещения, подобные серициту, то еще труднее найти доводы в пользу предположения Феннера, что уровень, на котором происходит превращение раствора в щелочной, первоначально расположенный на сравнительно большой высоте в проводящем канале, постепенно опускается, вплоть до магматического очага, так что в поздние стадии канал весь заполнен щелочным раствором, активно проявляющимся в образовании важного «ряда превращений». Действительно, Феннер заставляет все еще кислый флюид, выделившийся из магмы, приобретать щелочные свойства за счет боковых пород на глубинах, на которых, по его мнению, за продолжительный предшествующий промежуток времени перемещался поток кислого флюида. Стенки каналов на глубине должны были, следовательно, лишиться щелочей на сравнительно большом расстоянии от самого проводящего канала; между тем, движением именно по этим проводящим каналам в таком лишенном щелочей окружении Феннер объясняет превращение флюида на большой глубине в щелочной, а тем самым и переработку ранее образовавшихся предполагаемых отложений из кислого газа.

Единственным способом спасти от провала эту идею опускающегося уровня перехода в щелочное состояние, повидимому, могло бы быть приложение вывода Боуэна к предпосылкам Феннера относительно того, что имело место в проводящем канале до такого процесса извлечения щелочей. Напомним, что, по мнению Феннера, весь канал, за исключением самой верхней его части, первоначально был занят кислым газом и что именно к этому времени относится внесение большей части рудного материала магматического происхождения. Далее напомним, что в оценке Боуэна газ обладает очень ограниченной способностью к выполнению работы замещения. Он говорит, например:

«Пар, образующийся... при кристаллизации магмы... , насыщен всеми кристаллами (силикатами) магмы до тех пор, пока остается в парообразном состоянии. Даже другие силикаты, кристаллизовавшиеся не из магмы, он может непосредственно растворить лишь в очень слабой степени» [стр. 138].

Обдуманно комбинируя отдельные части этих двух точек зрения, можно совместно с Феннером прийти к заключению, что первоначально газ заполнял проводящий канал, и совместно с Боуэном — что в то время, когда газ занимал канал, почти или даже вовсе не имел места вынос щелочей из силикатов боковой породы. Но после того как газ конденсировался, — а это допускают оба автора, — кислый жидкий раствор мог выщелачивать щелочи из стенок. В таком случае, однако, начальную, газовую фазу рудоотложения Феннера казалось бы более правильным ограничить пре-

<sup>1</sup> Metasomatic processes in fissure veins. A. I. M. E. Trans. 30. 1900, 690.

имущественно кристаллизацией в открытых полостях, а все явления выщелачивания и замещения приурочить к более позднему времени. С этим Феннер, повидимому, несогласен; например, смотри его мнение [стр. 99; 104—105, 107] относительно роли пневматолитических процессов в метасоматизме и общем контактовом метаморфизме. Но и помимо этого затруднения оставалась бы еще упомянутая малая вероятность того, чтобы щелочной могла стать какая бы то ни было часть вновь конденсировавшейся жидкости, кроме самых первых ее порций, так как вынос щелочей постепенно должен был изолировать проводящие каналы от неизменной вмещающей породы.

Наконец, казалось бы, что при любой из предложенных схем, при течении флюида, в общем направленном вверх, в наиболее глубоких частях проводящего канала неизбежно должен иметь место только вынос щелочей, в то время как область отложения щелочей должна быть расположена выше. Несомненно, если вынос щелочей кислым флюидом существует, он должен проявляться сильнее на глубине, где начальная концентрация кислоты самая высокая и температура, давление и степень диффузии наиболее значительны. Таким образом, можно рассчитывать встретить, особенно в глубинных областях, стенки каналов со следами кислотного воздействия и выноса щелочей, почти или совсем без наложенного, затемняющего картину привноса щелочей. Такие места должны быть особенно близко расположены к магме (или к пегматиту). Где удавалось наблюдать подобные участки и каковы характерные для него минералы? На самом деле, случаи, когда гипогенное кислотное воздействие на боковые породы не вызывает сомнений, встречаются главным образом в менее глубокой гидротермальной зоне (см. на стр. 92 соображения относительно оловянных руд).

Предположение, что кислый первоначально флюид приобретает щелочной характер и после этого оказывает воздействие, соответствующее его свойствам как щелочного реактива, сталкивается, повидимому, с многочисленными и серьезными трудностями. Автору кажется более вероятным, что прав Росс, когда он пишет:

«Большие количества серицита, образующиеся в коренной породе, в которой первоначально было очень мало калия, показывают, что породы, пронизанные выделившимися растворами, не являются соответствующим источником калия и что только кристаллизующаяся магма могла снабдить серицит соответствующими количествами калия» [стр. 151].

Действительно, происхождение щелочей из магмы не встречает возражений со стороны Боуэна и Феннера. Но их убеждение в том, что выделяющийся из магмы флюид является газом, сильнейшим образом ограничивает содержание щелочей в этом флюиде, а убеждение, что газ отличается кислой реакцией, препятствует допущению, что щелочи магматического происхождения в состоянии совершить ту работу, которую приписывают щелочному флюиду. По этой причине они приходят к выводу, что подобная работа, отрицать которую не приходится, должна быть приписана выше-

лоченной из окружающих пород щелочи. Чтобы придать этому выводу правдоподобность, им приходится предположить, что реактив представляет собой жидкость, а исходя из этого, они находят удобным признать, что газ снова конденсируется в жидкость. Это остроумно придумано, но не является ли это уклончивым ответом, решением по частному вопросу, в высшей степени неправдоподобным, и при всем том бесплодным?

**Гидротермальная переработка щелочами.** Боуэн, повидимому, довольствуется тем, что рассматривает руды как продукт отложения из кислого жидкого раствора, образовавшегося путем конденсации предполагаемого кислого газа. Все его построение должно или оказаться правильным или отпасть, в зависимости от результатов проверки этого основного положения. Напротив, Феннер, повидимому, имеет более отчетливое представление о том, как выглядят в действительности и что представляют собой руды и прилегающие к ним породы. Он, как будто, знает, что продукты отложения из кислых газов, как он их намечает, вероятно не будут напоминать типичную, среднюю руду и что сходство не увеличится после переработки кислым жидким раствором, который, по его предположению, образуется благодаря конденсации газа. Так, он предполагает, что материалы в том виде, в каком они отложены кислым газом, «существуют только в начале ряда превращений» [стр. 86]. Зная, что для руд, как они проявляют себя в действительности, «жидкое состояние преобладает, по крайней мере в последние стадии образования жил» [стр. 86], и зная, что обычно руды не обнаруживают воздействия кислых реактивов, Феннер, как было уже упомянуто, прибегает к превращению горячей кислой жидкости в горячую щелочную жидкость, которой приписываются последние штрихи в формировании руды, как видно из следующего:

«В продолжение этого длинного периода отложенные газами соединения металлов оказываются в гидротермальной обстановке, при которой происходят новые реакции. Возможно, что в это время много предварительно отложенного материала переносится к более высоким горизонтам, и в целом получается впечатление образования в водном растворе» [стр. 87].

«В эту стадию горячий раствор щелочных карбонатов и сульфидов вступает в ряд новых реакций, в которых участвуют как ранее отложенные сульфиды и окиси и все то, что было принесено в циркуляционные каналы предшествующими процессами, так и минералы вмещающих пород. Горячий щелочной раствор является вполне подходящим для такого действия... Вполне установлена их пригодность в качестве среды для перекристаллизации силикатов и карбонатов. Образование минеральных жил в том виде, как мы их наблюдаем, обычно объясняется, вероятно с достаточным основанием, действием такого рода растворов...» [стр. 92]. (В обеих цитатах выделено Грейтоном)

Здесь, оказывается, Феннер с энтузиазмом высказывается в пользу взаимоотношений и процессов, которые, казалось бы, да-

леко идут навстречу устранению многих трудностей, возникающих в связи с признанием жидких щелочных растворов единственными рудообразующими агентами. Как будто, он не находит никаких физико-химических доводов, говорящих против способности подобных жидких щелочных растворов выполнять все задачи переноса, растворения, изменения боковых пород, отложения и обменных реакций, которые находят свое выражение в гипогенных рудах в том виде, как мы их наблюдаем. Но разве не ясно, что лучшим его доводом в пользу существования этих поздних щелочных гидротермальных проявлений служат геологические доказательства, связанные с ныне доступными наблюдениям рудами? Было бы логичным поэтому обратиться к геологическим показателям и для подтверждения воображаемых более ранних фаз кислого газа и кислой жидкости.

Раньше чем заняться поисками таких доказательств, установим наш объектив на несколько большую резкость. Глубокое убеждение Феннера, что рудный флюид должен был произойти из магмы в виде кислого газа, толкает его на измышление более ранней рудной залежи, которая должна была быть резко отлична от руд «в том виде, как мы их наблюдаем». Всякие сомнения относительно представления Феннера о значении и глубине процесса переработки первоначальных отложений кислого газа щелочными жидкостями исчезают при ознакомлении с тем, что он говорит по этому поводу в своем содержательном обзоре более детальной работы Юсса по месторождениям типа Дактаун:

«...материал, первоначально отложенный из паровой фазы, в конечном счете окажется в гидротермальной обстановке, под влиянием которой он будет перенесен и видоизменен примерно так же, как это происходит при вторичном обогащении, когда супергенные процессы налагаются на гипогенные»<sup>1</sup>.

Между тем замечательной особенностью руд, обогащенных супергенными процессами, является возможность видеть продукты обоих процессов, наложенные одни на другие, отмечать отчетливые различия между ними и проследить на бесчисленных примерах все переходы от более или менее полного обогащения неизмененного родоначального гипогена. Разве не бесспорно, что независимо от того, хорошо ли изучен в физико-химическом отношении процесс обогащения и представляется ли он обоснованным или шатким, лучшим доводом в пользу процесса для нас все же будут показания геологических наблюдений, а не цепь заключений, выведенных из интерпретации вероятных физико-химических закономерностей? В намерения автора отнюдь не входит дискредитировать подобные физико-химические рассуждения, ему хотелось бы только, чтобы они и проистекающие из них выводы рассматривались в правильной перспективе.

Разве не вполне уместен поэтому вопрос, были ли установлены столь же убедительные геологические доказательства, как и те, которые делают неоспоримым вторичное обогащение, для «срав-

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 932.

нимого» превращения более ранних отложений кислым газом в более поздние руды «в том виде, как мы их наблюдаем»? Среди миллионов и миллионов тонн гипогенных руд, осмотренных, анализированных и микроскопически изученных, не накопилось ли к настоящему моменту значительное число показательных примеров, подтверждающих или хотя бы слегка подсказывающих процесс изменения, как его понимает Феннер, если он действительно пользовался приписываемым ему Феннером широким распространением и общим приложением? Но это предположение не оправдывается. Предполагается, что стадия гидротермальной, щелочной переработки, по Феннеру, протекает при менее напряженных условиях, чем стадия, в которой преобладал кислый газ [стр. 86—87]. Кажется вероятным поэтому, что намечаемая щелочная переработка менее основательна и распространяется на меньшее расстояние от центрального проводящего канала в глубь боковых пород, чем это могло иметь место для более интенсивных проявлений кислого газа. Соответственно мы могли бы рассчитывать встретить во многих случаях центральный участок в пределах и вблизи проводящего канала, где проявилась щелочная переработка, и в большем отдалении по обе стороны — область кислого воздействия, до которой не простиралась и никогда не могла бы простираться менее интенсивная щелочная переработка. Особенно заметно это должно быть на глубине.

Что руды и непосредственно примыкающие к ним стенки постепенно перерабатывались, по мере того как менялись условия в течение длинного периода рудообразования, становится все более очевидным. Но в огромном большинстве таких случаев не обнаружено было ничего, что в современном понимании могло бы быть отнесено к проявлениям раннего кислого реактива. Несомненно, имеется значительное число рудных месторождений, испытавших на себе воздействие гипогенных кислот, которые оставили свои неоспоримые следы. В нескольких из этих случаев исследователи высказывали мнение, что продукты кислого реактива предшествовали образованию более обычных продуктов, которые большинством исследователей приписывались щелочным агентам; а среди этих примеров описаны и такие случаи, когда кислотное воздействие приурочено к краям, а щелочное ограничивается ближайшими к проводящему каналу участками. Объяснение для этих случаев дается ниже. Но во всех месторождениях с одновременными проявлениями и кислых и щелочных воздействий, с которыми мне пришлось ознакомиться, и во всем материале по таким месторождениям, который мне удалось найти в литературе, кислотное воздействие следует за щелочным в огромном большинстве случаев. Такая последовательность, наблюдаемая как в рудных месторождениях, так и в районах распространения терм, сочетается с обычным пространственным распределением: щелочной эффект по краям, кислотный эффект в центральной части. Даже относительно выходов на поверхность Дэй (A. L. Day), после рассмотрения примеров замещения щелочных вод водами кислого состава, говорит следующее:

«В литературе не удалось найти указаний на бесспорные полевые наблюдения, свидетельствующие об обратном переходе (кислого в щелочной), не наблюдались они и в поле»<sup>1</sup>.

Очевидно, что эта обычно наблюдаемая последовательность щелочной — кислый не согласуется с последовательностью кислый — щелочной, принятой в сборнике Линдгрена для рудного флюида как Феннером, так и Боуэном, равно как и с их основной концепцией (выделение кислого газа из магматического очага), из которой вытекает их представление о последовательности.

**Сравнительная активность газа и жидкости.** В доказательство моего вводного замечания относительно кажущегося, но не действительного согласия между Боуэном и Феннером, уместно будет здесь указать, сколь различно они пользуются в качестве доказательства физико-химическими фактами и принципами по вопросу исключительного значения, обосновывая ими свои несовпадающие точки зрения.

Если сравнить первый полный абзац на стр. 99 статьи Феннера в сборнике Линдгрена с абзацем, переходящим со стр. 137 на стр. 138 статьи Боуэна, то станет ясным, насколько щедр Феннер и насколько скуп Боуэн, наделяя газ способностью к совершению важной геолого-химической работы. И тот и другой имеют в виду газ, выделяющийся при кипении кристаллизующегося расплава. Феннер уподобляет способность газа во многих отношениях способности жидкости и, повидимому, удовлетворяется этим в качестве обоснования важной задачи привноса, отложения, химического изменения и выноса минерального вещества, предусматриваемых его положениями. Далее, из всего, что здесь совершается, он, повидимому, мало относит на долю кислой жидкости, в которую, как он полагает, позднее конденсируется кислый газ. Боуэн, наоборот, подчеркивает ограничения, которым подвергается флюид пока он остается газом, но утверждает:

«Одним уже процессом конденсации в жидкость вещества, находившиеся до того в парообразном состоянии, были избавлены от «власти прошлого», от ограничений, которые налагал на них способ их образования путем насыщения раствора».

Длинная фраза, извлечением из которой является приведенная цитата, может навести рудничного геолога, непривычного к утонченностям метафор, на мысль, что существуют какие-то таинственные свойства, придающие жидкостям большую химическую силу, чем газам. Может быть это и верно (см. на стр. 83 соображения относительно растворяющей способности жидкой воды). Но в существовании и проявлении этого различия действительности, несомненно, нет ничего магического или нового. Объяснение можно найти в словах самого Боуэна [стр. 138], когда он говорит, что «газ насыщен кристаллами», но что жидкость, получающаяся при конденсации этого газа, «не будет насыщена теми же кристаллами». Словом, крайне сложная аргументация Боуэна по этому поводу просто сводится к существенному выводу, что газ в а

<sup>1</sup> The hot-spring problem. G. S. A. Bull., 50, 1939, 331.

фаза менее эффективна в качестве растворителя и может содержать меньше растворенного вещества, чем жидкая фаза того же состава.

Делая вывод, что кислый газ конденсируется в кислую жидкость, Боуэн исходит также из этой ограниченной способности газовой фазы выносить растворимые минеральные вещества из магмы или извлекать их из твердых пород. Относительно жидких кислых растворов (представляющих конденсат кислых газов), которые он рассматривает как главные действующие силы процессов огложения руд и минерализации вообще, Боуэн говорит:

«Многие характерные действия этих растворов, вероятно, не могли быть произведены... газами (пневматолитически)» [стр. 137].

«Присутствия в этой фазе Са и Mg — главных породообразующих элементов — мы едва ли можем ожидать» [стр. 134].

«Газы не могут переносить известь» [ст. 139].

«Образовавшиеся вышеуказанным способом кислые растворы способны вновь приобрести практически все компоненты даже наиболее основных магм» [стр. 141].

Что может обозначать здесь «вновь приобрести» (reacquiring), если не согласие Боуэна с тем, что газовая фаза до ее конденсации в жидкость могла содержать только немного этих компонентов, но после того как образовалась жидкая фаза «вышеуказанным способом», эти компоненты могли быть вновь приобретены благодаря увеличившейся растворяющей способности жидкости? Но вновь приобрести их из магмы растворы, очевидно, могли бы лишь в том случае, если бы жидкая фаза характеризовалась такой же родственной близостью с магмой, какую он приписывает газовой фазе. Так как кипение происходит в одном месте, а последующая конденсация в другом, значительно удаленном, у жидкости мало возможностей извлечь из магмы больше, чем уже извлечено газом. Словом, жидкая фаза — более поздний продукт конденсации газа — может содержать лишь немного больше или не больше материала магматического происхождения, чем сама газовая фаза. Настойчивая ссылка Боуэна на большую активность кислой жидкости по сравнению с кислым газом справедлива только при иных обстоятельствах, чем те, которые изображает его схема механизма. Кислая жидкость, вместо того, чтобы быть «избавленной от влаги прошлого», когда ее вещество находилось в состоянии газа, неизбежно подпадает под эту власть, если она рождается путем конденсации. Что касается способности к воздействию на боковые породы вдоль проходящих каналов, кислая жидкость предположительно значительно более действенна, чем соответствующий газ до конденсации. Но в качестве средства переноса материала, образовавшегося из магмы, конденсированная кислая жидкость так же ограничена своим составом и концентрацией, как и кислый газ. Это справедливо по отношению к механизмам обоих авторов — и Боуэна и Феннера.

Подобным же образом многочисленные намеки Боуэна на преимущества кислых (жидких) растворов перед растворами щелочного характера лишаются своей силы благодаря тому факту, что кислые

жидкости, которые он рассматривает, «имеют весьма сложный состав, но важными их компонентами, вероятно, являются сульфиды и окислы тяжелых металлов» [стр. 139]. Это, несомненно, не кислые жидкости умеренной концентрации и ограниченного состава, характеризующиеся летучестью металлических соединений и происшедшие путем конденсации из кислого газа. У Боуэна была бы твердая почва под ногами в его выводах относительно выноса из магмы только в том случае, если бы он противопоставил состав щелочной жидкости составу своего кислого газа. Так как Боуэн постоянно подчеркивает ограниченную способность газа, последовательное приложение его выводов, повидимому, заставило бы искать источник большей части рудного материала в пересеченных вышележащих породах, а не в магме. Таким образом, мы имели бы современную, особую разновидность латеральной секреции!

Даже Феннер, рассматривающий газовую фазу как господствующее средство переноса как из магмы, так и из вышележащих пород, вынужден признать тот крайне важный факт, что жидкая фаза является гораздо более совершенным растворителем, чем газ. Так, например, он ссылается [стр. 88—89] на единственное важное различие между жидкостью и газом (в равновесии с кристаллами) — способность одной фазы отлагать совершенно иные относительные массы минералов, чем те исчезающе малые количества, которые отлагаются другой фазой, и растворимость минералообразующих элементов в одной фазе при нерастворимости их в другой. Его способ изложения таков, что нигде не встречается указания, какая именно фаза «одна» и какая «другая», но из контекста в некоторых местах, а также из более определенного утверждения Боуэна становится ясным, что «нерастворимость» и «исчезающе малые количества», перешедшие в раствор или отложившиеся, наверное относятся к газу, а не к жидкости.

Способность газовой фазы удерживать и переносить минералообразующие растворимые вещества, очевидно, является одним из наиболее спорных вопросов во всей цепи умозаключений по поводу генезиса гипогенных руд; поэтому, хотя и не вызывает сомнения, что точки зрения Боуэна и Феннера ставят газовую фазу в качестве носителя руд количественно в более невыгодное положение, чем жидкую фазу, представляется целесообразным убедиться с возможной полнотой, насколько глубоко это различие.

Перенос в газовой фазе как средство выноса химического материала от источника снабжения, жидкого (т. е. магмы) или твердого (т. е. изменяемых боковых пород), может совершаться двумя путями, как ясно указано Ингерсоном:

1. В виде летучих компонентов, т. е. компонентов, представляющих газы при господствующих условиях температуры и давления.

2. В виде газовых растворов и летучих компонентов в летучих растворителях<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Relation of critical and supercritical phenomena of solutions to geologic processes. Econ. Geol., 29, 1934, 454.

Целесообразнее рассмотреть эти два пути независимо друг от друга, так как нам точно не известны их взаимоотношения. Ввиду того, что экспериментальные данные значительно более скудны по растворимости в газах, чем по относительной летучести, и что как Боуэн, так и Феннер уделяют внимание почти только последней, желательнее рассмотреть здесь вопросы растворимости в газах и, поскольку это возможно, подвести твердое основание под этот спорный вопрос, раньше чем обратиться к относительной летучести.

**Растворимость в газах.** Очевидно, что обсуждение данной темы, являющейся частью проблемы переноса в газовой фазе легко летучего материала в магме и выноса его из магмы, было бы бесполезным, если фактически газовая фаза не может образоваться в исходной жидкости или непосредственно над ней, независимо от того, является ли таким источником сама исходная магма или какие-нибудь более поздние остаточные расплавы или магмы. Поскольку давления в магматической камере и над ней могут быть высокими, возможность существования газовой фазы, естественно, упирается в критические явления как в исходной жидкости, так и в газе, который выделился или может быть выделен.

Еще другая причина побуждает нас заняться рассмотрением критических явлений. Каждодневный опыт и обычная лабораторная практика учат нас, что легко летучие компоненты обладают ничтожной растворимостью в газообразных растворителях, как на это указывает, например, количественное, как правило, отделение путем «выпаривания досуха». Но в критической точке состав жидкости и газа идентичен. И хотя мы имеем дело с температурами, превышающими критическую температуру основного летучего компонента — воды, возможность нахождения в газовой фазе растворенных легколетучих веществ должна быть рассмотрена. Последующее изложение представляет попытку неспециалиста разобраться в этом вопросе.

Соображения из области термодинамики и правила фаз показывают, что для насыщенных растворов «нелетучего» растворимого в летучем растворителе можно различать по отношению к критическим явлениям два случая<sup>1</sup>:

I. Для растворов нелетучих веществ, обладающих сравнительно хорошей растворимостью в жидком растворителе, кривая критических температур для разных концентраций расположена настолько выше кривой растворимости, что критические явления не проявляются.

II. Для раствора нелетучих веществ, растворимость которых в жидком растворителе вообще незначительна или во всяком случае резко снижается при температуре, близкой к критической температуре чистого растворителя, критическая точка<sup>2</sup> самого раствора лишь немного превышает критическую температуру чистого растворителя, так что концентрация растворенного в газовой фазе

<sup>1</sup> См. Morey and Ingerson, loc. cit., стр. 613.

<sup>2</sup> Точнее, первая или нижняя «критическая конечная точка» (см. Morey and Ingerson, loc. cit., стр. 614).

вещества в сущности тождественна с крайне незначительной концентрацией, характеризовавшей жидкую фазу непосредственно перед тем, как было достигнуто критическое состояние в растворе. Многие вещества этой категории случая II отличаются низкой растворимостью при любой температуре, но некоторые из них обна- руживают при температурах, значительно более низких, чем критическая, существенную растворимость, убывающую при нагревании. Так как нас здесь интересуют в первую очередь процессы в магме и поблизости к ней, где температуры, несомненно, должны быть лишь немного ниже критической температуры воды, все растворимые вещества случая II могут рассматриваться как обладающие незначительной растворимостью, и как таковые они и будут обозначаться здесь в дальнейшем.

Поскольку дело касается водных растворов, содержащих в виде растворимого (или растворимых) одну (или несколько) из преобладающих составных частей магмы, как, например,  $\text{SiO}_2$  и разнообразные минералообразующие молекулы силикатов, эти растворы, несомненно, будут насыщены в отношении таких растворимых веществ, по крайней мере с того времени, когда каждая дан- ная молекула начнет выкристаллизовываться с образованием пи- рогенных минералов; поэтому два приведенных случая поведения действительно распространяются на подобные геологические рас- творы.

В случае I, касающемся сравнительно хорошо растворимых в жидком растворителе веществ, отсутствие критических явлений обозначает, во-первых, что при достаточном давлении газовая фаза вообще исключена; поэтому, если признавать возможным пере- нос подобных растворимых веществ в газовой фазе, приходится предполагать настолько низкое давление, чтобы оно, при данной температуре, оправдало образование газовой фазы. Каково будет действительное давление в магматической системе (при той или иной температуре), вероятно, зависит главным образом от глубины и, во всяком случае, навряд ли может быть в настоящее время опреде- лено нами с достоверностью. Не без оснований мы можем предпо- лагать, что образование руд может быть приурочено к телам ма- теринской магмы, залегающим так близко к поверхности, что дей- ствующие ограниченные давления недостаточны для того, чтобы подавить выделение газовой фазы из субкритических растворов. Но, с другой стороны, с полным основанием можно вывести за- ключение, что для этих растворов отложение руд может происходить из материнской магмы и на такой глубине, где существование га- зовой фазы в магме или в контакте с ней исключено. Мы хотим объяснить отложение руд в обстановке как малых, так и больших глубин, поэтому мы почти бесспорно должны считаться, как с од- ним из случаев, с отложением руды без участия газовой фазы. Если это может иметь место на глубине, т. е. если выделение руд- ного флюида в жидком состоянии здесь возможно, то тот же са- мый механизм может объяснить отложение руд и из менее глу- боких магм.

Во-вторых, отсутствие критических явлений в случае I имеет

отношение к содержанию растворимых веществ в газовой фазе даже и тогда, когда давление делает возможным выделение газа. В системах растворов, в которых растворитель должен быть отнесен к летучим (т. е.  $H_2O$ ), растворенные же материалы в чистом виде обладают ничтожной летучестью в пределах встречающихся здесь температур, с точки зрения термодинамики, повидимому, существуют достаточные основания для общего вывода, что концентрация растворимого в газовой фазе совершенно иного, более низкого порядка, чем в жидкой фазе, за исключением непосредственной близости к критической точке раствора. Именно эти взаимоотношения делают «выпаривание досуха» количественно приемлемым способом отделения растворимого от растворителя в условиях, определенно являющихся субкритическими. Все же большая часть таких разделений производится при температуре кипения и при давлении около одной атмосферы. Что получилось бы, если бы давление, а следовательно, и точка кипения были значительно выше?

К счастью, в последнее время были выполнены экспериментальные работы, с применением аппаратуры и методики, повидимому, не вызывающих сомнений; эти работы охватили условия температуры, давления пара и концентрации в водных растворах случая I, при температурах и давлениях, значительно превосходящих критические величины для чистой воды<sup>1</sup>. Для  $KCl$  и  $H_2O$  Бенедикт не только подтвердил отличительную для случая I черту — отсутствие критических явлений, но мог также определенно высказаться в пользу вывода, что газовая фаза этой системы даже при температурах  $500-600^\circ C$  и под давлением, превышающим критическое давление для чистой воды, не содержит определяемых количеств растворенного  $KCl$ <sup>2</sup>. Далее он нашел, что даже и более высокие температуры, вероятно, не изменили бы этого результата, по крайней мере, раньше чем будет достигнута точка кипения чистого  $KCl$ , и что увеличение давления привело бы только к предотвращению образования газовой фазы вообще.

Впоследствии Кивил повторил опыт с  $KCl$  и подтвердил данные и выводы Бенедикта. Он изучил аналогичные системы для  $H_2O$  соответственно с  $NaCl$ ,  $KJ$ ,  $NaJNa$   $Br$  и  $Ca(NO_3)_2$ , в пределах температур до  $645^\circ C$  и давлений до 389 атмосфер, установив для всех них принадлежность к той же категории случая I, что и  $KCl$ ; поэтому можно, повидимому, считать не вызывающим сомнений, что отсутствие критических явлений и, в сущности, отсутствие растворенных веществ в газовой фазе действительно является чертой, характерной для насыщенных растворов класса веществ, относящихся к случаю I. Таким образом, то, что дал повседневный опыт и показали работы с выпаривательными приборами, полностью подтверждается для этого класса растворов.

<sup>1</sup> Benedict M. Properties of saturated aqueous solutions of potassium chloride at temperatures above  $250^\circ C$ . Jour. Geol., 47, 1939, 252—276; в частности, см. стр. 272. Также Keevil N. B., результаты еще не опубликованы.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 272.

Следует еще подчеркнуть, что некоторые из растворимых веществ, представленных в этих опытах, в особенности  $KCl$  и  $NaCl$ , имеют непосредственное отношение к нашей частной проблеме, так как, надо думать, они принадлежат к числу наиболее важных легко растворимых соединений, присутствующих в исходном жидком растворе магматического происхождения. Газовая фаза не может служить средством разделения и переноса для подобного рода растворяемых веществ в насыщенном растворе.

В случае II, касающемся веществ с относительно незначительной растворимостью в жидком растворителе или с растворимостью, заметно понижающейся с возрастанием температуры, теоретические представления относительно критических явлений (две критические конечные точки) не были подтверждены строго проверенными опытами над всем рядом неорганических систем, аналогичных существующим в магматических камерах. Тем не менее, положительные результаты опытов с органическими веществами и полная применимость теории к неорганическим растворам случая I уже побудили признать теорию и для неорганических растворов случая II. Затем Кивил исследовал тем же методом, которым пользовался Бенедикт, нижнюю половину диаграммы температура — давление для систем  $H_2O-Na_2CO_3$  и  $H_2O-Na_2SO_4$ , у которых растворимость с возрастанием температуры понижается. В обоих случаях незадолго до того, как была достигнута критическая температура  $H_2O$ , количество растворимого в растворе упало практически до нуля, и начиная с этого момента соотношения температура—давление—объем были неотличимы от таковых для чистой воды. Эти данные, поскольку из них можно делать выводы, подтверждают то, что следовало ожидать для случая II, исходя из теоретических соображений, — что критические явления имеют место, но что газовая фаза, как выше, так и ниже критической точки, содержит в лучшем случае неопределимо малые количества растворимого вещества.

Как  $Na_2CO_3$ , так и  $Na_2SO_4$  представляют собой соединения, присутствие которых в магматическом или позднем магматическом расплаве вполне мыслимо. С точки зрения рудных флюидов нас интересуют все обычные основания, как то: щелочи, щелочные земли, железо и алюминий. Но особенно близко нас касаются силикаты, и прежде всего  $SiO_2$ , так как этот окисел по своему значению в гипогенном переносе руд, вероятно, стоит далеко впереди всех остальных компонентов и любая гипотеза по генезису руд понесет серьезный урон или будет даже обречена, если она не в состоянии удовлетворительно объяснить происхождение обильной  $SiO_2$  из магматического расплава.

В связи с большим минералогическим и геологическим значением силикатов среди минералов было проведено много экспериментальных работ по их синтезу и превращению, и каждый, естественно, вправе ожидать, что открытия в области химии здесь особенно обильны. Однако Мори и Ингерсон в своем неопубликованном сборе

экспериментальных работ с системами силикатов, содержащими много летучих (в противоположность вязким расплавам с убогим содержанием летучих), вынуждены признать, что «в огромном большинстве опубликованных отчетов... работа носила случайный характер»<sup>1</sup>, «все имеющиеся данные..., к сожалению, не дают нам практически надежных количественных указаний»<sup>2</sup> и подчеркивают, как много мер предосторожности должно быть принято для того, чтобы экспериментальная работа дала показательные и надежные результаты.

Их превосходная сводка по работам других исследователей все же лишь в редких случаях содержит индивидуальную критическую оценку<sup>3</sup>.

Зато в общем вступительном разделе изложены собственные их идеи. Согласованная точка зрения этих двух исследователей особенно

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 627.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 636.

<sup>3</sup> Опыты, непосредственно относящиеся к вопросу о переносе кремнекислоты в газовой фазе, резюмированы Мори и Ингерсоном в пунктах 111, 115, 116, 118, 129, 130, 136, 138, 146, 147 и 149. Несовместимость результатов отдельных работ, явные противоречия в некоторых статьях, ограниченность количественных данных и сомнительность условий постановки опытов, давших результаты, в которых сообщается о действительно существенных количествах перемещенной кремнекислоты, служат достаточным основанием для общего отзыва Мори и Ингерсона о ненадежности полученных данных, а также и для их вывода, более подробно рассмотренного в последующем, что перенос мало растворимых минералов в газовой фазе незначителен. В отдельной статье, приведенной у Мори и Ингерсона под № 118, Мори подвергает критике случаи 111, 115 и 116. Надо надеяться, что он же или кто-либо другой из крупных экспериментаторов, даст оценку большинства прочих примеров из приведенной выше группы. Тем временем да будет дозволено неспециалисту высказать несколько замечаний.

а) Предупреждение Мори о недопустимости чрезмерного объема жидкой фазы в бомбе не везде еще принимается во внимание, что ведет к обесцениванию результатов.

б) Есть что-то неясное, а потому возбуждающее подозрение в несоответствии между количеством перенесенного материала и длительностью опыта. Мори заявляет: «Если разница в весе вызвана переносом  $\text{SiO}_2$  в паровой фазе... величина переноса должна была бы быть пропорциональна времени» (Am. Geophys. Union Trans., 13 th Ann. Meeting, 1932, 270).

в) В целом ряде опытов кремнекислота, содержащаяся в нижнем тигле внутри бомбы, вначале покрытая жидкой водой, по мнению экспериментаторов, после исчезновения жидкой фазы мигрировала в газовую фазу и соединилась с основным окислом, содержащимся в верхнем тигле. Среди употреблявшихся оснований значились окислы Ca, Mg, Ba, Pb, Cu<sup>+</sup>, Fe<sup>+</sup>, Fe<sup>++</sup>, Al, Zn, Cd. Во всех опытах этого рода, за исключением опыта самого Мори, сообщается о нахождении в верхнем тигле соединения (часто обычный силикат), представляющего комбинацию основания с  $\text{SiO}_2$ , но ни в одном случае не сообщается о переносе основания и соединения его с  $\text{SiO}_2$  в нижнем тигле. Это, надо думать, или указывает на то, что эти различные основания значительно менее растворимы (хотя и активны) в надкритическом паре, чем это предполагается для  $\text{SiO}_2$ , или же приводит к некоторым сомнениям относительно надежности опыта. Тот факт, что миграция, по видимому, всегда направлена от нижнего тигля к верхнему, дает основание для подозрения, что могло иметь место некоторое механическое перемещение вверх  $\text{SiO}_2$  (например благодаря брызгам), когда кипящая жидкость постепенно доводилась до критического состояния. Почему бы не поместить сухую  $\text{SiO}_2$  и основные окислы в отдельные тигли и установить тот и другой выше предельного высокого уровня жидкости? Если растворимость в газовой фазе есть реальный факт, не должно было бы возникать необходимости в предварительном помещении  $\text{SiO}_2$  в жидкий раствор.

показательна потому, что до настоящего сотрудничества они независимо друг от друга высказывали совершенно противоположные точки зрения на значение критических явлений в магматических флюидах, включая и такие растворы, которые играют существенную роль в образовании руд, а потому мнения, по которым ими достигнуто единодушие, должны были бы покоиться на особенно широких и прочных основаниях. Следуя позиции Мори, изложение которой дано в цитате, приведенной выше в подстрочном примечании к стр. 29, Ингерсон цитирует Мори, Феннера и Росса в доказательство того, что критические явления не играют роли в магме, и добавляет:

«Эта точка зрения, вероятно, правильная для магмы, но критические явления могут иметь очень крупное значение, отражаясь на поведении эманаций, выделившихся из магмы»<sup>1</sup>.

Затем он выдвигает аргументы в подтверждение взгляда о наличии критических явлений в геологических растворах, однако эти аргументы как будто утверждают (в только что приведенной цитате он это, повидимому, отрицает), что образующие и содержащие руду материалы уже в самой магме и выделяясь из нее находятся в надкритическом состоянии. Дело в том, что он особо подчеркивает газообразное состояние рудного флюида, экспериментальные же данные, которые он приводит для объяснения состава этого газа и его происхождения из исходного жидкого раствора, свидетельствуют о критических явлениях в этом растворе.

Можно ожидать, что в совместной статье двух исследователей в чем-нибудь проявится различие во взглядах каждого из них. Это действительно имеет место, и, по мнению автора настоящей статьи, единственным недостатком этой во всех отношениях крайне ценной работы является попытка примирить взгляды и выводы, которые, повидимому, несовместимы. Например, после слегка смягчающей вводной фразы и с несколькими оставляющими лазейку изменениями они повторяют почти дословно положение Мори, приведенные на стр. 29, со следующим основным выводом:

«Вероятно, что критические явления никогда не обнаруживаются у насыщенных растворов, образованных охлаждающейся магмой»<sup>2</sup>.

Затем они добавляют:

«Однако эманации, рассматриваемые как отдельная система, когда они выделяются из магмы, обычно находятся, вероятно, в надкритическом состоянии (имеется в виду статья Ингерсона), хотя первоначальная система (магма и пар) никогда не обнаруживала критических явлений. Этот факт может иметь крупное геологическое значение, так как такие сильно сжатые газы (преимущественно вода) могут служить растворителями для нелетучих веществ, обеспечивая тем самым механизм переноса материала от магмы без необходимости прибегать к предположению о существовании действительно летучих соединений»<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 454. Выделено Грейтоном.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 619.

<sup>3</sup> Loc. cit., стр. 620. Текст в первой скобке — пояснения Грейтона.

Если бы эманации сами по себе были в надкритическом состоянии и, следовательно, представляли собой газ, они могли бы быть выделены из субкритической магмы только в случае соблюдения все того же уже рассмотренного выше гадательного предположения — при настолько низком давлении в системе, чтобы из магмы могла выкипать газовая фаза. В своей первоначальной статье Морин вполне недвусмысленно пришел к обратному выводу, который для всех случаев, кроме магм, определенно залегающих на небольшой глубине, представляется мне гораздо более вероятным решением. Следует напомнить, что его статья являлась частью сборника, посвященного горячим источникам, и что в его намерения явно входило показать, что подобные воды горячих источников, поскольку происхождение их магматическое, на всем своем пути от магмы находятся в состоянии жидкости. Заканчивает он следующими словами:

«К тому времени, когда остаточные магматические растворы охлаждаются до температуры ниже критической температуры воды, большая часть материнской магмы выкристаллизовывается. При дальнейшем охлаждении водный раствор становится все более и более разбавленным, вплоть до конечной стадии активности в виде горячих источников. Но не следует упускать из виду, что весь процесс охлаждения огненно-жидкой магмы, от начальных условий, когда магма существенно состоит из нелетучих веществ с небольшим лишь количеством воды, и до разбавленных растворов, выходящих на поверхность в виде горячих источников, есть процесс непрерывный. Если магма охлаждается под прочной корой, нелетучие вещества выкристаллизовываются из жидкого раствора, в котором содержание воды все увеличивается, причем в любой момент хода процесса налицо имеется жидкая фаза.

В течение всего времени охлаждения жидкий раствор обладает давлением пара, вначале быстро возрастающим до максимума, затем уменьшающимся; давление это, однако, никогда не отвечает давлению пара воды при той же температуре, а соответствует давлению водного раствора, в котором давление пара воды значительно понижено растворенным материалом. В природных магмах критические явления, вероятно, не играют никакой роли»<sup>1</sup>.

Но если бы даже давление в субкритической магматической системе допускало образование газа, возникло бы другое возможное затруднение: как заставить этот газ выполнять работу «крупного геологического значения». Очевидно, что в системе, подобной магме, которая сама находится в субкритическом состоянии, одна из фаз может состоять из газа с температурой, превышающей его собственную критическую температуру. Но можно ли с уверенностью принять, что подобный газ, выделяющийся при кипении из субкритического раствора совершенно иного состава (с которым он соревнуется по захвату растворимых веществ), будет обладать той же или хотя бы сходной способностью удерживать в растворе нелетучие вещества, какой отличался бы газ, образо-

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 295.

вавшийся при нагреве его собственного жидкого эквивалента до температуры выше его критической<sup>1</sup>. Без экспериментальной проверки лучше не брать на себя ответственность за предположение, будто количества растворенных веществ в этих двух случаях сравнимы между собой.

Мори и Ингерсон, несомненно, делают такое предположение, оправдывая его тем, что газы будут «очень сильно сжаты». По общему признанию, это обстоятельство могло бы отразиться в указанном ими направлении. Однако проф. Бриджмен (Bridgman) сообщает мне, что в своих опытах с надкритическими газами под высоким давлением (правда, большей частью при сравнительно низких температурах) он не встречал поводов для общего вывода, будто растворяющая способность газов в таком случае заметно увеличивается<sup>2</sup>. Проф. Берч и его сотрудники, которые работали с надкритическими газами при давлениях до 4000 атмосфер и температурах до 1000°С, сообщают об аналогичном поведении этих газов. Д-р Бенедикт и д-р Кивил нашли слабые следы воздействия на своей безупречной стальной бомбе при высшем пределе ее работы, однако остается недоказанным, было ли это обусловлено газом с растворенными в нем веществами или концентрированными жидкостями, и во всяком случае это температура привела к такому результату, а не давление<sup>3</sup>. Для системы  $\text{H}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  Мори пришел к выводу, что растворимость  $\text{SiO}_2$  в парообразной фазе не поддается оценке, т. е. близка к нулю, «независимо от величины общего давления»<sup>4</sup>.

Однако аргументы, подобные приведенным, быстро могут выйти из строя, а потому казалось бы более уместным от этих теоретических рассуждений перейти к экспериментальным данным, имеющимся по вопросу переноса газами. Мировым центром по изучению минеральных систем, особенно силикатов, является Геофизическая лаборатория. Следовательно, Мори и Ингерсон располагали богатым материалом по этому вопросу даже до их исчерпывающего систематического разбора литературы. Практически полным должен быть и их обзор положения в отношении изучения силикатов, вплоть до

<sup>1</sup> Во втором случае количество вещества, которое может перейти в раствор в газе, ограничивается только растворяющей способностью его летучего растворителя при существующих условиях; что же касается первого случая, т. е. выделения из магмы, то здесь количество растворенного в газе вещества ограничивается не только упомянутым фактором, но и параллельной тенденцией растворяемого вещества раствориться в сильно отличающейся магматической жидкости; другими словами, будет иметь место распределение или разделение растворяемого вещества между газообразным, летучим растворителем и жидким, нелетучим; газ будет в состоянии растворить только ту долю, которую он сумеет обеспечить за собой. Эта доля не может быть больше той, которая удерживалась бы газообразным растворителем при отсутствии конкуренции; почти наверняка она меньше, а может быть, даже значительно меньше.

<sup>2</sup> Bridgman. Handb. der Experiment. Phys., 1929, 8, ч. 2, стр. 400.

<sup>3</sup> Относительно незначительного влияния давления (1750—1850 атмосфер при 77°С) на растворимость кварца в жидкой воде см. G. Spezia (приводится Мори и Ингерсоном на стр. 661—662 под № 62, а также № 64).

<sup>4</sup> Morey and Fenner. The ternary system  $\text{H}_2\text{O}-\text{K}_2\text{SiO}_3$ . Am. Chem., Soc. Jour., 39, 1917, 1210.

момента сдачи в печать их рукописи в 1937 г.; работа не может не произвести внушительного впечатления. Основные их выводы из имеющихся экспериментальных работ относительно переноса в газовой фазе случая II приводятся ниже.

Касаясь вообще растворимых веществ случая II, Мори и Ингерсон говорят:

«Часто случается, что растворимость практически равна нулю в обеих (жидкой и газовой) фазах, и в таком случае (критическая) точка становится чисто академическим понятием»<sup>1</sup>.

В частности относительно силикатов и других минералов они констатируют:

«Растворимость минералов... настолько незначительна, что таким путем не удастся получить продукта в количестве, достаточном хотя бы для их идентификации»<sup>2</sup>.

«...установлено в итоге многочисленных опытов..., что растворимость многих силикатов в воде при температуре свыше 370° C<sup>3</sup> очень мала... Действительно, в большинстве случаев растворимость настолько ничтожна, что первая конечная критическая точка очень близка к критической точке самой воды; в общем разница выражается, вероятно, величиной порядка всего долей градуса»<sup>4</sup>.

Некоторое представление о рассматриваемой здесь «очень малой» растворимости может быть получено благодаря тому факту, что присутствие в летучем растворителе легко летучего растворенного вещества в небольшой концентрации повышает критическую температуру последнего пропорционально дробной части моля этого вещества в растворе. Поэтому, если мы обратимся к системе H<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub>, критическая температура компонентов которой составляет 374° C и несколько тысяч градусов, мы увидим, что содержания (в молях) SiO<sub>2</sub>, растворенной в H<sub>2</sub>O, которое повысило бы критическую температуру последней на величину «порядка всего долей градуса», отвечало бы тому, что Фернер назвал «ничтожно малые количества», а Мори — «приблизительно ноль»<sup>5</sup>.

Этим, очевидно, исчерпываются собранные Мори и Ингерсоном доводы в пользу признания важной роли критических явлений, по крайней мере в связи с процессом выноса кремнекислоты и большинства силикатов из магмы в виде газообразных выделений.

Имеется, однако, еще и другая сторона вопроса о критических явлениях, разобранный в более ранней статье Ингерсона, относящаяся к ненасыщенным растворам. Рассмотрим сперва их отношение к случаю II. Так как случай II касается растворов некоторых родов веществ и относится к критическим явлениям для насыщенных растворов, можно предполагать, что ненасыщенные растворы тех же веществ тоже заслуживают рассмотрения. Но поскольку

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 618—619. Добавления в скобках Грейтона.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 624.

<sup>3</sup> Критические константы для воды: 374° C; 218 атмосфер; объем 3197 см<sup>3</sup>/г, или уд. вес 0,313.

<sup>4</sup> Loc. cit., стр. 623.

<sup>5</sup> Morey and Fenner, loc. cit., стр. 1209.

характерной чертой случая II является то, что при ограниченной концентрации растворимого вещества в жидком растворителе растворимость этого вещества падает почти или совсем до нуля раньше, чем достигнута критическая температура, раствор всегда становится насыщенным раньше возникновения критических явлений; поэтому мы всегда имеем дело с простой категорией случая II для растворимых веществ этой группы. Короче говоря, повидимому нет надежды, даже если бы можно было начать с разбавленных растворов, извлечь из магмы газовый раствор, содержащий больше, чем ничтожно малые количества таких нерастворимых соединений, как  $\text{SiO}_2$  и большинство силикатов.

Остаются, следовательно, только те растворы, которые относятся к случаю I. Как мы видели, в насыщенном растворе эти вещества не обнаруживают критических явлений; критическая кривая лежит заметно выше (или даже много выше, смотря по особенностям данного случая) кривой растворимости. Таким образом, нет оснований ожидать, что растворы, не вполне насыщенные, неожиданно начнут обнаруживать критические явления. Как другой крайний случай, раствор настолько ненасыщенный, что в нем содержатся только следы растворимого вещества, несомненно, по своим свойствам настолько близок к чистой воде, что наличие критических явлений становится вполне вероятным. Надо думать, следовательно, что поскольку не проявится влияние какого-нибудь неизвестного фактора, критические явления возможны в разбавленных растворах этой группы растворимых веществ вплоть до некоторого верхнего предела концентрации при неполном еще насыщении. В связи с более высоким содержанием воды кривая критического давления для этих растворов расположена, вероятно, несколько выше кривой давления, отвечающего равновесию для насыщенных (трехфазных) систем.

Ингерсон<sup>1</sup> цитирует Шрёера (Schröer)<sup>2</sup>, который сообщает о критических явлений в умеренных концентрациях (предельно до 50% по весу, приблизительно) водных растворов  $\text{KCl}$  и  $\text{NaCl}$  соответственно, сопровождающихся повышениями критической температуры чистой воды на 25—38° С для более концентрированных растворов. Критические давления для этих растворов Шрёер не указывает.

Если исходить из того, что аппаратура и техника Шрёера надежны, мы можем вывести заключение, что для не слишком сильно концентрированных растворов некоторых веществ могут существовать надкритические газовые растворы, содержащие существенные количества легко летучих растворимых веществ<sup>3</sup>. Это звучит,

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 460.

<sup>2</sup> Untersuchungen über den kritischen Zustand. Ztschr. f. Phys. Chem., 129, стр. 79—110; 142, стр. 365—390.

<sup>3</sup> Гибсон (R. E. Gibson. On the effect of pressure on the solubility of solids in liquids. Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 67), установив, что растворимость  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaBr}$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и гидроокисей щелочей увеличивается при совместном действии давлений и температуры, делает отсюда вывод, что подобные свойства „поэтому типичны, и мы можем прийти к заключению, что при температурах свыше 60° С действне давления, сказывающееся в увеличении

как будто мы по меньшей мере оказались в выгодном положении по отношению к этим вопросам критического состояния и переноса в газовой фазе. Но раньше, чем проявить сверхэнтузиазм, рассмотрим, какие виды растворов вели бы себя таким образом. Это, прежде всего, только сравнительно хорошо растворимые в воде вещества. Тем самым сразу исключается большинство минерало- и рудообразующих соединений. Во-вторых, это должны быть такие растворяющиеся вещества, количество которых по отношению к инактивной магматической воде здесь недостаточно, чтобы привести к насыщенным или почти насыщенным растворам. Очень вероятно, что тем самым исключаются такие соединения типа «жидкого стекла», как  $K_2SiO_3$  и  $K_2Si_2O_5$  и соответствующие им соединения натрия. Ибо, хотя работы Мори и Фейнера<sup>1</sup> над калийной группой и Мори и Ингерсона<sup>2</sup> над натриевой группой этих соединений указывают, что данные по растворимости позволяют включить их в случай I<sup>3</sup>, представляется невероятным, чтобы в магме состава, отвечающего ряду гранит — кварцевый монцит — гранодиорит (к которой чаще всего приурочены гипогенные гидротермальные руды), находящаяся в ней вода содержала недостаточное общее количество этих растворимых силикатов, чтобы предупредить развитие критических явлений.

Таким образом, способность к переносу по этой надкритической схеме имеет какое-либо значение, повидимому, только для галоидных соединений щелочных металлов<sup>4</sup>, т. е. тех самых соединений, изучением которых был занят Шрёер. Как будет показано в разделе, озаглавленном «Относительная летучесть», относительное содержание этих галоидных солей в магме по сравнению с водой очень мало. Но независимо от этого, хотя им и может быть приписано, вследствие соответствующих реакций вдоль пути движения по каналам, участие в образовании таких жильных минералов, как адуляр, альбит, серицит и алунит, ни к кварцу, ни к метал-

---

растворимости рассмотренных нами труднорастворимых солей, проявляется легче при повышении температуры и нет оснований ожидать, что этот вывод будет нуждаться в изменениях при критической температуре<sup>5</sup>. В число рассмотренных труднорастворимых солей входят  $CaCO_3$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ,  $CaF_2$  и  $CaS$ .

<sup>1</sup> Тройная система  $H_2O-K_2SiO_3-SiO_2$ . Am. Chem. Soc. Jour. 39, 1917, 1175—1229.

<sup>2</sup> Система вода—бисиликат натрия. Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 217—225.

<sup>3</sup> Хитаров и Иванов (см. Мори и Ингерсон, № 149, стр. 741) проверили некоторые из работ Шрёера над  $KCl$  и нашли для ненасыщенных растворов  $Na_2SiO_3$  при содержании примерно до 15% весовых, критическую температуру в 402,1°С. Их данные говорят о быстром уменьшении скорости возрастания температуры с увеличением концентрации; смысл этого явления неясен. Давления не указываются.

<sup>4</sup> Если справедливы экстраполяции Гибсона, предсказывающие поведение некоторых легко растворимых соединений в отношении растворимости их в жидкостях при критических температурах, возможно участие еще небольших количеств этих соединений, например  $CaCO_3$ ,  $CaSO_4$ , и  $CaF_2$ , причем, с одной стороны, оно ограничивается пределами, до которых простирается их самостоятельное существование в магме, а с другой — действительной их растворимостью при критической температуре и выше нее.

ло содержащим рудным минералам они причастны быть не могли.

Следовательно, нет здесь и установленного средства переноса для огромных количеств кремнезема и железа, необходимых, чтобы осуществить контактовый метаморфизм известняка,—процесс, который многие, веруя в «воду выше критической температуры», приписывали пневматолитическому воздействию.

В связи с надежностью опытов, две серии их, относящиеся к случаю II, заслуживают более детального рассмотрения. Повторяя опыты, проведенные Ван-Ньювенбергом (Van Nieuwenberg) и Блумендалем (Blumendal)<sup>1</sup>, будто бы доказавшие значительный перенос кремнекислоты паром в надкритическом состоянии, Мори<sup>2</sup> нашел, что изучавшийся им образец  $\text{SiO}_2$  весом полграмма изменял свой вес в пределах от 0,1 до 0,5 мг, вместо 52,6 до 395 мг, о которых сообщают Ньювенберг и Блумендаль. Закономерных взаимоотношений между количеством перенесенного вещества и длительностью опытов для промежутков времени от 24 часов до 24 дней ему также установить не удалось. Он приходит к выводу, что полученные им результаты «не доказывают заметного переноса» паровой фазой; тем не менее, за одним исключением, «вероятно вызванным случайными причинами, во всех опытах наблюдалась убыль в весе кремнекислоты, и возможность некоторого переноса ее не исключена».

Это, повидимому, вполне совпадает с результатами опытов, позднее проведенных коллегами Мори—Грейгом, Мервином и Шефердом (Greig, Merwin, Shepherd)<sup>3</sup>. Наиболее показательные из них, неоднократно цитировавшиеся впоследствии, упоминаются Феннером [стр. 95] как свидетельствующие о газовом переносе кремнекислоты. Однако требуется тщательное рассмотрение деталей, раньше чем может быть принята возможность переноса из магмы. Было установлено, что большая часть переноса падает на интервал температуры от 1100 до 1200° С, причем отлагается материал в виде кристобалита! Не обнаружено никаких признаков переноса ниже 700° С, т. е. при температуре, более близкой к температуре образования руд и отложения кварца. Количество перенесенной кремнекислоты было достаточно для фотографирования и идентификации при значительном увеличении, но количественные определения не даны. Перенесенное вещество представляет суммарный эффект повторного действия раствора, циркулирующего в продолжение всего опыта. Авторы вполне сознают, что это не отвечает условиям, которые должны были бы существовать в естественной магматической системе во время осуждения и выделения летучей фазы. Однако эти оговорки, сделанные автором, как указано ниже, видимо, не нашли отражения в ряде цитат других лиц, в том числе и Феннера.

<sup>1</sup> См. пункты 111, 115 и 116 у Мори и Ингерсона.

<sup>2</sup> The volatility of silica with steam. Am. Geophys. Union Trans., 13th Ann. Meeting, 1932, 269—270.

<sup>3</sup> Notes on the volatile transport of silica, Am. Jour. Sci., 25, 1933, 61—73.

«Тот факт, что пар, участвующий в переносе, не расходуется в ходе процесса, а сохраняет способность воздействовать, делает возможным перенос значительного количества материала... Очевидно, что сравнимое по количеству перемещение материала не могло бы иметь места просто при передвижении газа с одного места на другое. В этом случае все количество перенесенной кремнекислоты отвечало бы количеству ее, действительно содержащемуся в паровой фазе в данный момент, т. е. количеству очень незначительному. Следовательно, нельзя ожидать, чтобы подобные летучие вещества, выделяющиеся из породы, при сравнимых условиях температуры и давления, будь то в лаборатории или в природе, в достоянии были унести особенно значительные (sic!) количества кремнекислоты»<sup>1</sup>.

Действительно, все опыты, проводившиеся в небольших бомбах или других небольших замкнутых системах в условиях, не вызывающих сомнений, указывают, повидимому, на крайне умеренный перенос кремнекислоты в газовой фазе. Между тем, даже такие количества, как находящиеся на грани измеряемости — в опытах Мори, или как не измерявшиеся, повидимому, Грейгом, Мервином и Шефердом, представляют, вероятно, несоизмеримо большие количества, чем может быть перенесено паром при простом передвижении его от исходного источника до места отложения. Если мы примем это во внимание, то убедимся, что пока мы вправе рассчитывать только на действительно ничтожный перенос  $\text{SiO}_2$ , растворенной в газообразной  $\text{H}_2\text{O}$ . То, что справедливо для  $\text{SiO}_2$ , в общих чертах, надо думать, справедливо и для других трудно растворимых молекул минералов.

Но так как кое-кто из приверженцев идеи газового переноса может настаивать на том, что масштаб и длительность этих опытов несоизмеримы с данными для магматических процессов, мы, к счастью, можем сослаться на опыты, проведенные в значительно более обширных масштабах в отношении объема и времени.

В крупных силовых установках, где обычно пользуются паром высокого давления (порядка 100 атмосфер) при температурах выше критической, испытываются серьезные затруднения вследствие накопления на лопастях турбины пристающей к ним корки минеральных солей из питающей воды. Эти отложения приходится удалять от времени до времени. Естественно, что причины и характер такого досадного явления, как вынос растворенных веществ из котла, подвергались изучению. Мой коллега Берри (С. Н. Berry), профессор прикладной механики, сообщил мне, что объяснение в общих чертах сводится к следующему. Крупные масштабы, в которых расходуется пар и, следовательно, питающая вода, вызывают повышенную скорость движения в самом котле, сопровождающуюся к тому же интенсивным кипением; быстрое же испарение приводит к тому, что остающаяся в котле вода заметно обогащается растворенными в ней минеральными веществами. Жидкие капельки этого раствора, так сказать, распыляются в стремительном потоке

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 71. Выделение и скобка Грейтона.

пара и механически увлекаются в перегреватель, где вода, образуя капельки, переходит в газ, оставляя ничтожные остатки растворенных веществ в виде неосязаемой пыли, в незначительной части оседающей на стенках трубок перегревателя, но в основной своей массе уносится в турбину и приходит в соприкосновение с лопастями. В турбине вследствие адиабатического расширения пар охлаждается, так что образуется некоторое количество влаги, которая, подобно воде при действии ее на обожженный цемент, тотчас же приводит к «схватыванию» пыли в твердую пленку, пристающую к предмету, о который она ударяется. Вводя распыленную дистиллированную воду в котел, где нагруженный капельками пар проходит в перегреватель, удавалось вполне успешно «промыть» пар и заметно уменьшать этим путем механический перенос дающих накипь компонентов. Образующаяся накипь периодически удаляется путем пропускания перегретого пара; в этом случае пар с более низкой температурой, идущий непосредственно из котла, конденсируется в достаточной мере в перегревателе и в турбине, чтобы растворить и удалить накипь в жидкой воде. Положение накипи в турбине, главным образом на участках, о которые ударяется пар, показывает, что мы не имеем здесь дела с осаждением веществ из раствора в газообразном состоянии при понижении температуры. Наоборот, оно, повидимому, дает бесспорное доказательство в крупном масштабе (до 500 т пара в час) того, что пар в надкритическом состоянии не может служить растворителем даже для таких ничтожных количеств легко летучих веществ, какие находятся в растворенном виде в питающей котел воде. На ряде установок температура пара, поступающего в турбину, субкритическая; в этих случаях наблюдаются те же явления, что и при надкритических температурах.

Пожалуй, наиболее убедительными среди всей массы опытов в этом направлении являются результаты опытов с котлом Бенсона, на что мое внимание направил д-р Дэн (E. V. Dane, jr.), который разрешил мне, не дожидаясь опубликования его отчета<sup>1</sup>, привести следующие места, заслуживающие внимания с геологической точки зрения. Говоря о серии экспериментальных определений, касающихся отложения в виде котельной накипи минеральных солей, содержание которых в питающей воде составляет 0,01%, он говорит:

«Заслуживает внимания, что содержание солей в струе при выходе из выводного клапана регулярно изменяется от  $\frac{1}{10}$ , как в питающей воде при температуре выше критической, до трехкратной концентрации по сравнению с питающей водой, когда котел охлаждался хотя бы на несколько градусов ниже критической точки. Ясно, что выше критической температуры и даже при надкритических давлениях, придающих газу плотность, столь близкую к плотности жидкости, разница в растворяющей способности между паром и водой для этих трудно растворимых веществ того же порядка, как и при одной атмосфере».

<sup>1</sup> «Котел Бенсона для изучения критического состояния как средство геологического эксперимента».

«Этот опыт особенно показателен в двух отношениях при суждении о поведении магматического раствора: а) масштаб опыта таков, что не оставляет сомнений (хотя и не исключает ошибок эксперимента) в характере результатов<sup>1</sup>, и б) система открытая, динамическая<sup>2</sup>, так как данное количество растворителя используется только один раз».

«Явления, наблюдающиеся в котле Бенсона, говорят не только о том, что пар в надкритическом состоянии—крайне слабый растворитель и является мало эффективной средой для переноса природных минеральных веществ в растворе. Они показывают, кроме того, что подобный газ не является растворителем для металла тонкостенных трубок котла, даже после многолетней службы».

Даже наилучшие из разобранных лабораторных опытов не могут считаться показательными для поведения магм ввиду крайней их химической простоты по сравнению со сложностью магм<sup>2</sup>. Например, предшествующий обзор экспериментальных работ показывает, что, скажем,  $KCl$ , или  $NaF$ , или  $K_2SiO_3$  могут, когда они в отдельности образуют не слишком концентрированный водный раствор, переходить в газовый раствор соответствующей концентрации при нагревании раствора выше его критической температуры; если же они находятся в чересчур концентрированном растворе, критические явления не наступают. Но если какой-либо один из растворимых компонентов случая I присутствует в растворе в концентрации, достаточно высокой, чтобы воспрепятствовать возникновению критических явлений по отношению к этому компоненту, тем самым исключается возможность критических явлений для всех растворенных веществ, независимо от того, принадлежат ли они к случаю I или к случаю II и какова их концентрация. Далее, если даже ни одно из растворенных веществ случая I не присутствует в концентрации, исключающей критические явления, в высшей степени вероятным будет то, что в системе равновесия между всеми летучими растворителями, с одной стороны, и всеми легко летучими растворенными веществами, с другой, богатый водой раствор, происходящий из столь сложного источника, как магма, будет отличаться таким составом, что совокупность растворенных веществ воспрепятству-

<sup>1</sup> Котел Бенсона, в котором испаряется 133 метрических тонны в час, работал в течение ряда лет. Если бы через подобную установку промышленного типа пропустить то же количество раствора в критическом состоянии, как в упомянутом выше опыте Дэна, это означало бы, что такой котел пропускает в секунду в 300 раз больше минерального раствора, чем был в состоянии обнаружить Мори после циркуляционного процесса, продолжавшегося несколько суток или больше.

<sup>2</sup> Д-р Дэн своевременно обращает внимание на то, что лабораторные опыты по переносу в паровой фазе с большим успехом могут проводиться в подобных динамических системах, чем в замкнутых бомбах.

<sup>3</sup> Большинство исследований над переносом  $SiO_2$  касалось систем, которые фактически являлись двухкомпонентными. Мори подчеркивает, что требуется не менее 9 компонентов для освещения условий образования изверженных пород и еще значительно больше компонентов в случае исследований рудообразования (The studies in silicate chemistry of the Geophysical Laboratory., Soc. Glass Techn., 20, 1936, 253).

ет возникновению критических явлений для всей системы. Я предполагаю, что это лишь неуклюжий способ неспециалиста выразить именно то, что имел в виду Мори, когда он писал:

«Остаточная магма неизменно будет содержать менее летучий материал, как бораты, фосфаты, кремнефториды и хлориды, в достаточном количестве, чтобы удержать в растворе более летучие компоненты, особенно воду. Другими словами, критические явления никогда не обнаружатся...»<sup>1</sup>

Как удачно было бы, если бы оказалось возможным провести опыт, в надлежащем масштабе и достаточно длительный, с материалом настолько сложного состава, чтобы его можно было сопоставить с магмой. Повидимому, последним, заключительным этапом подобного рода опыта, протекавшим в течение длительного времени (по легендарным преданиям маори, без изменений продолжается со времени их прихода, свыше 500 лет тому назад), является фумарола Karapiti Blowhole в южной части обширного района терм на Северном острове в Новой Зеландии, носящего название Rotorua. Из приблизительно круглого отверстия, диаметром около 12 дюймов, непрерывно с шумом вырывается вверх великодушный перистый столб пара. Выделение происходит под сравнительно высоким давлением и в определенно перегретом виде, т. е. нагретом выше точки кипения воды для данной высоты над уровнем моря. Газ в том виде, в каком он выделяется из земли, прозрачен, бесцветен и не обладает запахом. Здесь нет ни прерывности обыкновенного гейзера, ни примеси жидкой воды, как во многих фумаролах, ни наблюдаемых поблизости происшедших сравнительно недавно излияний, или близких к поверхности интрузий расплавленного материала, как это обычно бывает в местах нахождения «сухих» фумарол. За исключением небольшой кольцеобразной насыпи из зернистых обломков, представляющей скопление частиц горной породы, очевидно оторванных от стенок и механически выброшенных струей газа, нигде не наблюдается отложения материала — ни в непосредственной близости, ни в отдалении.

Анализ образца конденсированного газа (присутствующие всегда газы не определялись), выполненный Данном (L. R. Dunn) в Новозеландской правительственной лаборатории, по данным Грэнджа (L. E. Grange)<sup>2</sup>, следующий (в граммах на килограмм пара):

$H_2O$ —1000	$HBO_2$ —0,006
$H_2$ —0,04	$NH_3$ —0,003
$Cl$ —0	$CO_2$ —0,8

Реакция конденсированной воды нейтральная.

Вряд ли можно сомневаться, принимая во внимание состав и наблюдающиеся в районе явления, что это местонахождение тесно

<sup>1</sup> Loc. cit. (1924), стр. 294—295.

<sup>2</sup> Geology of the Rotorua-Taupo Subdivision. Geol. Surv. Branch. Bull. 37 (new series), 1937, 109.

связано с находящимся здесь на глубине магматическим очагом. Это наиболее мощная из фумарол в 130-километровой полосе термальной активности. Может быть, кто-нибудь даст объяснение, почему эта эманация, на всем своем пути от магмы находившаяся в состоянии пара, содержит и, повидимому, всегда содержала на этом уровне так мало минералобразующих компонентов и почему она не достигла еще стадии конденсации в жидкость. Какое-либо объяснение характера или происхождения этого явления было бы также желательным<sup>1</sup>.

В итоге рассмотрения вопроса относительно способности газа при высокой давлении и высокой температуре, как выше, так и ниже критической точки, к переносу легко летучих растворимых веществ, повидимому можно ограничиться выводом, что в основном прав был Мори в своей первой постановке вопроса, когда утверждал:

«Если магма охлаждается под прочным участком земной коры, нелетучие вещества кристаллизуются из жидкости, содержащей все более и более воды, и в любое время в ходе процесса имеется налицо жидкая фаза»<sup>2</sup>.

Такое положение справедливо не только по отношению к магматическому очагу, но и для всего пути вдоль канала передвижения этого позднемагматического раствора, до тех пор, пока при восходящем движении не начнет настолько быстрое падение давления, по сравнению с температурой, что наступает кипение. В этом случае сильно пониженная способность газа, по сравнению с жидким раствором, к переносу растворенных веществ, уже доставленных сюда, повлечет за собой при кипении, в соответствии с количеством кипящего вещества, поспешное и нераздельное осаждение этих веществ.

Как уже указывалось, Боуэн, повидимому, не признает такого особого рода газового переноса в виде «газового раствора» и по-

<sup>1</sup> Во всяком случае не выдерживает критики аргумент, высказанный несколько лет тому назад, что во всех подобных случаях, когда пар выделяется перегретым, хотя бы и в слабой степени, это свидетельствует о том, что на всем пути по проводящему каналу, начиная от магматического очага, он не приходил в соприкосновение с водой. Это предположение теоретически отнюдь не убедительно, так как и содержание растворенных веществ и давление в месте кипения, и то и другое совместно, повысили бы точку кипения и сделали бы возможным выход на поверхность пара, происходящего из богатого водой раствора и имеющего признаки «перегретого». Объяснение это натолкнулось бы и на губительный для него эмпирический факт, что как в округе Роторуа, так и в других местах, пар с температурой, более высокой, чем точка кипения чистой воды, для данной местности нередко является «влажным», так как содержит капельки жидкой воды (или богатого водой раствора), и что воды многих горячих источников обнаруживают в значительной степени перегрев. (Боуэн и Фернер, сознавая, повидимому, неубедительность этого довода, не пытаются воспользоваться им и не упоминают о нем в качестве аргумента в пользу их концепции о кипении в магме.) Поэтому в случае попытки использовать фактический материал по Карапиту для объяснения вопросов генезиса, было бы излишне и, очень возможно, неправильно исходить из предположения, что эта восходящая к земной поверхности масса пара не имеет соприкосновения с жидкой фазой, за исключением жидкой материнской магмы.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 295.

этому, как будто, полностью полагается на летучесть, присущую самому материалу, переносимому вместе с газом, как это полнее будет изложено в последующем. Феннер вначале останавливает свое внимание на этой идее, но затем, очевидно, также отказывается от нее в пользу концепции о присущей веществу летучести для объяснения способа газового переноса. Обсуждая условия, которые сопровождают критическое состояние в магмах, Феннер говорит:

«Для более водных остаточных растворов, происходящих из магмы, такие состояния теоретически возможны, но они не кажутся необходимыми, и едва ли правильно предполагать их существование, не имея определенных данных» [стр. 81].

Затем, процитировав вывод Мори 1924 г., что критическое состояние не достигается в самой магме, Феннер присоединяется к этому заключению:

«Я полагаю, что в действительности имеется очень много фактов, говорящих против такой возможности» [стр. 114].

Затем, приписывая основную роль летучести галоидных соединений, Феннер говорит:

«Часто предполагали существование несколько отличающегося процесса, состоящего в растворении нелетучего самого по себе минерального вещества в сильно нагретом водяном паре, как в водном растворе. Неизвестно, в какой мере этот процесс действительно имеет место, хотя имеются данные, что он является, возможно, одним из важных факторов. Ввиду небольшого количества данных, может быть лучше не подчеркивать эту возможность. Даже если водяной пар обладает таким растворяющим свойством, законы, относящиеся к улетучиванию и к реакциям между летучими веществами, не потерпят существенных изменений. Несколько меньшее значение придется тогда придавать галоидным соединениям и несколько большее — растворяющему действию водяного пара на минеральное вещество, а во всем остальном потребуются лишь небольшие изменения» [стр. 96].

**Роль галоидов.** Раньше чем вернуться к обсуждению вопроса о газовом переносе материала, летучего по своей природе, уместно будет рассмотреть предположение, каким образом эта летучесть достигается для минералообразующих элементов. Издавна установился обычай у химиков, занимающихся такими вопросами, как вулканы, фумаролы и горячие источники, приписывать бросающиеся в глаза химические явления, которые наблюдаются в этих условиях, прежде всего газам, хотя бы газы здесь были редки или отсутствовали, и в частности подчеркивать важную роль галоидных соединений. Затем, как правило, они считают предрешенным, что их толкование того, что наблюдается на поверхности, распространяется в полной мере и на то, что происходит на глубине. С такой оценкой роли галоидных соединений и их значения на всем пути вниз по проводящему каналу, повидимому, вполне согласны и Феннер и Боуэн. Феннер обосновывает это следующим образом:

«Галоидные соединения рассматриваются в этой статье как особенно важные для химизма магматических летучих, в виду присущей им летучести и вследствие имеющих определенных данных об их участии в образовании фумарольных отложений» [стр. 96].

С этим явно соглашается Боуэн, который следующим образом описывает вероятный состав своей газовой «фазы», как обусловленный относительной летучестью отдельных компонентов:

«Она будет состоять главным образом из водяного пара; следующие места в порядке убывающих количеств, вероятно, займут более летучие соли галоидов, галоидных кислот и других галоидных соединений, как  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{SiCl}_4$ ; следующими по количеству, вероятно, будут серная кислота,  $\text{H}_2\text{S}$  и такие сульфиды, которые имеют значительное давление паров, а за ними, может быть  $\text{B}_2\text{O}_3$  и его летучие соединения» [стр. 133].

Вместе с тем кажется ясным убеждение как Феннера, так и Боуэна, что летучесть сульфидов и сульфатов солей бора и карбонатов слишком низка или слишком определено ограничена несколькими металлами (например, мышьяком, сурьмой или сульфидами ртути), чтобы оправдывать веру в сколько-нибудь значительную зависимость от этих соединений при толковании процессов образования рудных месторождений вообще. Поэтому в своей вере в газовый перенос компонентов, не являющихся кислотами, они в действительности, как это заметно на протяжении всей статьи, опираются почти исключительно на соединения с галоидными элементами.

Кроме того, очевидно, хотя большая часть упоминаемых ими более летучих соединений, за исключением воды, обнаруживает кислую реакцию, говоря о кислых газах и кислых жидкостях, они подчеркивают прежде всего роль галоидных кислот и, несмотря на то, что упоминают другие кислоты (за исключением почему-то серной), почти неизменно приписывают совершенную работу фтористому или хлористому водороду.

Можно признать поэтому небольшой только вольностью по отношению к их построению, если исходить здесь из предположения, что весь процесс переноса оснований и кремнекислоты из магмы совершается в виде галоидных соединений, с тем чтобы увидеть, к чему такое допущение нас приведет. Наиболее показательной является количественная проверка; другими словами, если компоненты руд были вынесены из магмы в виде фторидов и хлоридов, находится ли потребное количество фтора и хлора в приемлемом равновесии с тем сохранившимся количеством этих элементов, о котором свидетельствуют наши наблюдения или заключения.

Минералообразующие элементы, которые в изобилии должны были бы быть вынесены из магмы в предположенной нами форме галоидных соединений, приведены в следующей табличке, где в круглых цифрах указаны количества фтора и хлора, весьма зна-

чительные, потребные для переноса одной тонны данного элемента.

Одна тонна	Тонн F	Тонн Cl
Si	2,7*	5,0*
Fe''	0,7	1,3
Fe'''	1,0	1,9
Mg	1,6	2,9
Ca	0,9	1,7
Na	0,8	1,5
K	0,5	0,9

\* Эти количества увеличились бы до 4 т F и 7,5 т Cl, если бы летучими соединениями были  $H_2SiF_6$  и  $H_2SiCl_6$  вместо  $SiF_4$  и  $SiCl_4$  соответственно; см. Боуэн [стр. 139].

Вдоль сброса в округе Черро-де-Паско, в Перу, единое сульфидное тело, состоящее главным образом из пирита, содержит круглым счетом 500 млн. т руды между современной эрозионной поверхностью и наиболее глубоким горизонтом 640 м. С некоторой осторожностью можно принять, что по крайней мере столько же составляет сверх того сумма той массы руды, которая унесена эрозией, и руды, которая залегает ниже последнего горизонта. Содержание основных элементов в этом теле составляет приблизительно: Fe  $\pm$  40%; Si  $\pm$  5%; S  $\pm$  47%. Если мы исключим из расчета Si, как внесенный, вероятно, из боковых пород, а не непосредственно из действующей магмы, мы все же должны будем признать, что большая часть, если не все количество Fe, а также и S, — магматического происхождения. Если принять, что Fe вынесено в виде  $FeCl_3$  (на том основании, что летучесть его заметно больше, чем у  $FeCl_2$ ), то для переноса железа из вскрытой части месторождения потребовалось бы около 380 млн. т  $Cl^1$ , а для всего рудного тела — по крайней мере вдвое больше. В то же время во всем районе единственным известным вторичным минералом, содержащим хлор (или фтор), является крайне редкий цуннит, в котором находится гораздо меньше Cl и F, чем имелось в первоначальных смежных породах в виде биотита и апатита, полностью удаленных в настоящее время гидротермальными изменениями из пород в районе нахождения цуннита. Короче говоря, нигде в районе не известны хлор или фтор в количествах, служащих хотя бы самым слабым указанием на сотни миллионов тонн, которые должны были бы быть перенесены вдоль одного проводящего канала, чтобы образовать это одно рудное тело.

Пример из Перу приведен только потому, что автор случайно знаком с ним именно с интересующей нас точки зрения. Но ни в коем случае он не единственный в отношении обилия или скудности галоидных элементов. За исключением крупных размеров этого сульфидного тела, показательные его черты в основном повторяются в огромном большинстве гипогенных руд. Даже в тех

<sup>1</sup> Около 250 млн. т Cl в случае  $FeCl_2$ .

сравнительно немногочисленных месторождениях, в которых фтор присутствует в заметных количествах, выявленное содержание его разве только в единичных случаях настолько велико, что может служить объяснением накопления совместно находящихся элементов в соответствии с концепцией газового переноса. Еще хуже положение с хлором.

Ввиду такого почти постоянного огромного расхождения в балансе между количеством рудных материалов и количеством галлоидов, потребных для газового переноса, очевидно должен быть найден какой-то путь для примирения этих противоречий. Боуэн, сознавая, по видимому, что чем меньше требований будет предъявлено к галлоидам, тем лучше, и что основная задача переноса сводится в общем к движению кремнекислоты, ссылается на «источник всегда присутствующего свободного кремнезема» в силикатных минералах. Последние, по его мнению, при разложении кислыми растворами дают свободный кремнезем, который «принимает, по крайней мере временно, форму желатинообразного кремнезема или даже остается в виде суспензии (коллоидальный раствор?) и, таким образом, является удобным для переноса. Не является ли этот кремнезем главным источником столь распространенного жильного кварца?» [стр. 140].

Какой предательский вывод по отношению к выдвигаемому так усердно значению  $\text{SiF}_4$ !

Как уже указывалось, подобное воздействие кислого жидкого раствора, согласно взглядам Боуэна и Феннера, могло распространяться только на силикаты окружающих пород, но не на магму. Если бы такой студенистый или коллоидальный кремнезем образовался в тесной связи с растворением породы, должны были бы возникнуть пустоты растворения, по своим размерам и обилию отвечающие значению выдвигаемого процесса. Где они? С другой стороны, если имеется в виду, что студенистый или коллоидальный кремнезем выделился в результате реакции замещения, коллоидальные частицы чересчур велики, чтобы фильтроваться сквозь нарастающий слой плотных кристаллических минералов<sup>2</sup>, образующихся при замещении, и кремнезем вследствие этого никогда не достиг бы главных проводящих каналов. Во всяком случае, даже если бы кремнезем мог попасть в каналы движения, его сравнительно грубое (коллоидальное) дисперсное состояние привело бы к его задержке вследствие диализа в открытых проводящих путях, предупредило бы тем самым его вступление выше по каналам в реакции замещения и сделало бы возможным его отложение только в свободных открытых полостях. Внесение кремнезема замещения, будь то в виде кварца или в виде силикатов, явление чересчур обычное и значительное, чтобы можно было считать пред-

<sup>1</sup> С той же осторожностью Феннер [стр. 105] указывает на трудность решить, какая часть эпигенетического кварца поставляется непосредственно магмой. Дальнейшие соображения относительно этого вывода см. на стр. 90.

<sup>2</sup> Такой материал дал бы то, что работники в области химии коллоидов называют ультрафильтром.

ложенный коллоидальный механизм основным способом переноса кремнезема.

Феннер в целом смотрит с совсем иной точки зрения на количественные затруднения при оценке роли галоидов. Находясь, по-видимому, под впечатлением обилия фтора и хлора, выделяемых вулканами и фумаролами, он ищет количественных подтверждений. Он обращается к океану как возможному месту накопления этих элементов, поскольку они не были фиксированы в виде минералов по пути их следования при подъеме. «Эта точка зрения, по-видимому, не приводит к результатам, которые могут быть применимы к современным геологическим условиям» [стр. 71]. Обращаясь затем к земной коре как возможному источнику галоидных элементов и основываясь на имеющихся оценках ее состава, он приходит к выводу, что в этом случае «мы получаем почти бесконечно малую величину» [стр. 72]. Разочаровавшись в земле, небе и море, он, по-видимому, приходит к выводу, что либо современные наши сведения неправильны, либо мир, в конце концов, был построен в соответствии с планетезимальной гипотезой.

Не проще ли разрешить эти трудности исходя из тех соображений, что районы с особо выдающимися явлениями фумарольной деятельности на поверхности, которые Феннер считает нормальными, на самом деле весьма специфические, крайние случаи, а потому а) непоказательны для средних примеров магматических эманаций, б) вероятно, особенно непоказательны для всего промежутка времени, захватываемого процессом эманации в каком-либо месте, и в) может быть, наиболее непоказательны для условий и вещественного состава, характерных для процессов эманации на глубине вдоль каналов, протягивающихся до плутонических интрузий.

Феннер раньше давал, как будто, более ясно выраженную оценку такой ситуации, говоря о химической природе летучих:

«Те немногие сведения о количественных соотношениях, которыми мы располагаем, относятся почти исключительно к поверхностным лавам в стадии, очень близкой ко времени их затвердевания, так как только в это время могут быть произведены сборы. Безусловно, не может найти обоснования предположение, что эти сведения служат надежным основанием для оценки относительной или абсолютной концентрации летучих в только-что поднявшейся лаве во время крупного вулканического извержения, и тем более, к концентрации на больших глубинах<sup>1</sup>.

Уже после того, как все это было написано, работы Горансона, касающиеся способности силикатных расплавов растворять воду, значительно дополнили наши знания о количестве этого летучего на глубине; но относительно вероятных количеств F и Cl в магмах мы и теперь знаем не намного больше.

<sup>1</sup> Jour. Geol. 34, 1926, 739 (выделено Грейтоном). Cp. Shepherd E. S., Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 316, 338. Установленное Шефердом повсеместное повышенное содержание F (среднее  $\pm 0,04\%$ , см. след. стр.) несколько ослабляет прежнюю остроту этой загадки.

Росс относительно элементов, способных давать летучие соединения, говорит:

«Вес перекрывающих пород стремится удержать эти элементы в магме, а потому последняя стадия кристаллизации протекает в присутствии концентрированных минерализаторов и при гораздо более низких температурах, чем те, которые преобладают в вулканической магме»<sup>1</sup>.

Боуэн обсуждает [стр. 130] случай абиссального удержания воды (в породе) при условии не слишком высокого первоначального ее содержания, в противоположность более легкому выделению ее из магм, находящихся на меньшей глубине. Разве не вероятно, что эта тенденция к удержанию на глубине должна быть выражена еще сильнее для более активных элементов Cl и F, которые вошли бы в состав апатита и слюды в породе? Плутонические породы в итоге содержат больше летучих, чем эффузивы<sup>2</sup>. Это, вероятно, не распространяется на Cl и F, хотя отклонения слишком часты, чтобы сделать возможным надежное обобщение. Во всяком случае, последние данные Шеферда ясно указывают, что пузыристость и другие признаки легкого (на меньшей глубине) выделения F обуславливают ненормально низкое содержание его в остающейся породе. В таком случае, разве не правдоподобно, что «вулканические» эманации более богаты Cl и F, чем эманации из более глубоко залегающих магм? Между тем, именно из последних образуются руды.

В связи с этим уместно также отметить, что по крайней мере часть Cl и F (а также и P), содержащихся в рудообразующем флюиде в тот момент, когда он достигает поверхности земли, не представляет эманации из действующей исходной магмы, а выделена из боковых «мертвых» пород вдоль проводящего канала. Например, упомянутое выше месторождение в Черро-де-Паско очень показательны для обычного разрушения и выноса пирохлорных Cl- и F-содержащих минералов в измененных породах, примыкающих к рудам. И поскольку позволяют судить наши несовершенные данные, эти галогенные элементы вынесены главным образом тогда, когда имело место разрушение таких заключающих их минералов, как апатит и биотит. Если в ходе реакций, сопровождающих образование руд, образуется серная кислота, последняя, видимо, разлагает галогенные соединения (будь то в твердом, жидком или газообразном состоянии) с образованием свободных галогенных кислот, а может быть, и фосфорной кислоты из апатита. Достоверно известно, что во многих местах, где в выделениях фумарол присутствуют HCl и HF, породы около выходного отверстия подвергались и продолжают подвергаться воздействию H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Здесь надо обратить внимание на поразительный факт, что при обсуждении химических процессов, протекавших в обстановке фу-

<sup>1</sup> Econ. Geol., 23, 1928, 877.

<sup>2</sup> Chamberlain R. T. The gases in rocks. Carnegie Inst. Wash., Pub. 106, 1908, 27—28; Shepherd E. S. The gases in rocks and some related problems. Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 326; Shepherd E. S. The fluorine content of rocks and ocean-bottom samples. Am. Jour. Sci., 38, 1940, 120—123.

марол, особенно при участии кислот, химики всегда определенно выдвигали на первый план галоидные соединения и уделяли мало внимания соединениям серы. Не то, чтобы соединения серы не упоминались в общем перечне, но их химической активности почти всегда уделялось лишь подчиненное внимание. Надо думать, что это вызвано какой-то причиной, но в этом случае она безусловно заключается не в количественной подчиненности соединений серы, так как при совместном рассмотрении районов развития вулканов, фумарол и горячих источников наличное количество серы, выделенной в той или иной форме, несомненно перевешивает количество галоидов вместе взятых (не наверняка, разумеется, а лишь предположительно это же могло иметь место и в прошлом). Больше того, выделения соединений серы на поверхности представляют только часть всей их массы, так как количество сульфидов в глубь по проводящему каналу колеблется от редких рассеянных минералов до огромных сплошных отложений, как это можно наблюдать в некоторых случаях. Ничего хотя бы приблизительно сравнимого в количественном отношении не наблюдается для гипогенных соединений хлора и фтора.

Несмотря на то, что химики неизменно подчеркивают роль  $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$ , доказательства геологического характера ясно указывают на  $\text{H}_2\text{SO}_4$  как на преобладающую гипогенную сильную кислоту. Барит, целестин и особенно ангидрит и гипс в качестве гипогенных минералов преобладают над всеми известными хлоридами и фторидами среди непиrogenных гипогенных минералов. В едином сплошном горном районе Morococha в Перу разведки на медь случайно вскрыли во всех трех измерениях известняк, целиком превращенный гидротермальными процессами в ангидрит (58,8%  $\text{SO}_3$ ), и продукт его гидратации—гипс, в масштабе, вероятно, не меньшем, а может быть и значительно большем, чем все количество флюорита (49,8% F), извлеченного горными работами, плюс известные его запасы на всем земном шаре.

Несомненно поэтому, что сере, сульфидам и сульфатам второе место, после галоидов, отведено не по соображениям количественного порядка. Не следует ли искать причину в том обстоятельстве, что пользующееся таким предпочтением предположение о подземном переносе в газовой фазе особенно удачно согласуется с фактом летучести галоидов при достаточном нагреве, в то время как сульфаты не так удобны для подобных гипотез и потому находятся в пренебрежении?

**Относительная летучесть.** Выдвинув положение, особо выгодное для гипотезы летучести, т. е. приписав особо важное значение галоидным соединениям, Феннер задает несколько головомомных задач, пытаясь приложить имеющиеся данные о летучести к проблеме переноса минерального вещества в газовой фазе. Эти данные он старается рационализировать несколько косвенным соображением, что некоторые фумаролы и другие поверхностные проявления наводят на мысль, будто что-то не ладно с имеющимися в настоящее время экспериментальными данными, такими, например, как летучесть  $\text{CaCl}_2$ . Хотя это вполне законная мысль, в данном случае она не кажется достаточно убедительной.

Прежде всего слишком велика вероятность, что газовую фазу в этих случаях сопровождала, хотя бы временами или с перерывами, жидкая фаза в виде брызг, подобно тому, как это наблюдается в настоящее время у некоторых действующих горячих fumarol, и что это был скорее жидкий раствор, чем газ, вероятно с высоким содержанием растворенных веществ, а потому с высокой точкой кипения, который вынес и отложил интересующие нас компоненты. Он ссылается также на подтверждающие такие взгляды опыты. Один из них был проведен Фуке (Fouqué) при яркочерном калении в 1865 г., когда техника экспериментирования в этой области, несомненно, была далека от того, что она представляет сегодня в Геофизической лаборатории, хотя Феннер и приходит к заключению, что, судя по данному Фуке описанию процесса, можно получить при нем надежные результаты.

Даже и эти примеры очень умеренной летучести проявляются в пределах обычных температур магматической кристаллизации или преимущественно выше этих температур. Эти примеры могли бы до некоторой степени служить для объяснения газового переноса минерального вещества, берущего начало по соседству со столь горячей магмой. Но это лишь небольшая часть вопросов, требующих объяснения. Перенос масс, достигающих бесчисленных миллионов тонн, осуществляясь вдоль проводящих каналов, должен достигнуть и таких участков, где температуры будут значительно ближе к температурам земной поверхности, чем к температурам магм. В приведенном опыте, несомненно, мало что в состоянии служить подтверждением идеи о газовом переносе минеральных веществ при рудообразовании в температурном интервале, скажем, 100—500° С.

Феннер вполне кстати обращается к разным случаям, наблюдаемым в поле, и ссылается на таких геологов, как Лакруа и Линдгрэн, высказавшихся в пользу газового переноса в те времена, когда пневматолит был общепринятым стилем в геологии, когда предполагалось, что если только может быть принято течение процессов при температурах выше критической температуры<sup>1</sup> чи-

<sup>1</sup> При нашем понятном стремлении установить побольше точек на «геологическом термометре» мы должны помнить, что признание неведения или разумное предположение могут быть надежнее, чем кажущаяся точность, которая не реальна. Температура кипения воды—вполне полезная и приемлемая точка на нашем условном термометре. Но мы не пользуемся ею в качестве отметки на нашем геологическом термометре, так как знаем, что она не неподвижна и не неизменна; так как в области геологии давление и содержание растворенных веществ, при которых богатый водой раствор может кипеть, варьируют в очень широких пределах, температура кипения чистой воды при одной атмосфере не только ничего не говорит, но с геологической точки зрения может вводить в заблуждение.

Но мы не всегда так осторожны и предусмотрительны. Среди общепринятых точек на геологическом термометре, которые лежат в пределах крайне полезного и важного интервала, находится температура превращения высоко- и низкотемпературного кварца и критическая температура воды. Эти величины, отвечающие соответственно 573° и 374° С, постоянно упоминаются так, как будто они настолько же неизменны и неопровержимы, как дважды два четыре. Таким мериллом пользуются для обозначения температур геологических процессов даже и те, кто вполне уясняет себе его значение — настолько велика сила привычки. В глубоко эродированных районах (а в общем, на таких именно участках глубо-

стой воды, то газовая фаза неизбежна, и особенно, когда такие решающие соображения, как высказанные Мори, еще не могли быть приняты во внимание. Феннер не ссылается на накопившиеся в современной литературе примеры структурных доказательств того, что доступные наблюдению участки интрузивного тела, вызвавшего метаморфизм, уже закристаллизовались к тому времени, когда соседние известняки претерпели пирометасоматические изменения; не упоминает он также того показательного факта, что Линдгрэн, изменивший свои взгляды в соответствии с ростом наших знаний, пришел к выводам, прямо противоположным тем, которые были высказаны им в 1900—1905 гг. и которые приводятся Феннером по этому поводу. Если перенос минерального вещества обусловлен летучестью или другими проявлениями газовой фазы, это, вероятно, должно было бы ясно сказаться на залегающих на большой глубине и подвергавшихся более интенсивному воздействию месторождениях. Позиция, которую в этом вопросе занимает Линдгрэн, позднее отражена в последнем издании его книги, где показательным является следующий отрывок.

«Из этого факта, что при большинстве замещений разного рода преимущественно выносились значительные количества таких материалов, как слабо летучие соединения калия, натрия, кальция, магния и других веществ, мы можем с уверенностью вывести заключение, что действующими агентами здесь были преимущественно жидкие растворы, а не газы. Это относится как к пирометасоматическим месторождениям, так и к оловянным и другим гипо-

кие разработки как раз и дают возможность ознакомиться с большими глубинами) мы наблюдаем руды и горные породы, находившиеся в нескольких километрах от поверхности земли во время их образования. Не лишен большого интереса вопрос, является ли кварц в таких местах высоко- или низкотемпературным. Но безусловно неверен был бы вывод, что он отложился при температуре выше (или ниже) 374°С, ибо, как показал Гибсон, давление очень сильно отражается на температуре превращения (см. стр. 16).

На критическую температуру воды не влияет давление, а потому некоторые исследователи, повидимому, считают, что по крайней мере эта точка может рассматриваться как неизменная. Однако критическая точка в 374°С установлена только для чистой воды, крайне редко встречающейся в подземной геологии. Критическая температура преимущественно водных естественных растворов может варьировать в пределах от температур, несколько более низких, чем эта цифра, и выше, до неизвестных величин, в зависимости от природы и концентрации растворенных в них веществ.

Наконец, обе эти точки предательски ведут себя и в другом отношении. Мой опыт показывает, что скучность материала, пригодного для надежного определения высоко- и низкотемпературного кварца, и ограниченность круга лиц, которые в состоянии безошибочно отличать их друг от друга (себя к ним не причисляю), накладывают тень подозрения на большую часть встречающихся в литературе подобных определений. Что же касается критической температуры, то еще труднее решить, протекали ли данные процессы, закончившиеся тысячелетия тому назад, выше или ниже критической температуры участвовавшего в них раствора. Феннер подчеркивает трудность решения вопроса, были ли минералы отложены из газа или из жидкости [стр. 99]. Бесспорно, что одно присутствие турмалина, топаза, флюорита, скарновых минералов и т. п. еще не может считаться доказательством ни преобладания критических явлений, ни даже существования субкритической газовой фазы. Линдгрэн отмечает, что «многие авторы без ограничения относят месторождения, в которых встречаются турмалин и касситерит, к этой (пневматолитической) группе» (Mineral Deposits, 4-е изд. 1933, стр. 116).

термальным и последующим классам. Газы не в состоянии были бы осуществить перенос в таких огромных размерах.

Нельзя поэтому думать, что «пневматолитические» процессы принимали существенное участие в образовании подобных месторождений»<sup>1</sup>.

Упоминает Феннер и о распределении турмалина в Филиппсбурге (Монтана), следующим образом описанном Эммонсом и Калкинсом (Emmons and Calkins):

«Это один из метаморфических минералов, который образуется, по видимому, в наибольшем удалении от контактов с изверженными породами, в непосредственной же близости от последних встречается, как будто, не особенно часто... Получается впечатление, что газы, с присутствием которых связано образование этого минерала, настолько летучи, что не в состоянии были задерживаться там, где метаморфические процессы протекали наиболее деятельно»<sup>2</sup>.

Очевидно, первая фраза этой цитаты устанавливает факт, вторая же является его толкованием. В первой фразе не содержится ничего, что доказывало бы действие газов и летучесть, выдвигаемые во второй. В то время обычно было принято рассматривать турмалин как пневматолитический минерал, а наблюдавшееся распределение его в Филиппсбурге казалось совместимым с такой концепцией. Сегодня же наблюдавшееся распределение непосредственно привлекло бы к себе наше внимание только как один из бесчисленных примеров распределения в пространстве, которое мы называем зональным распределением минералов и которое аналогично, следовательно, нахождению сфалерита и родохрозита преимущественно во внешней зоне, т. е. в удалении от центра высоких температур в Бьютт, или приуроченности кальцита к окаймляющей внешней части жил в Поркулайн, где ближе к центру эти жилы содержат главным образом кварц, анкерит и альбит, или подобному же распределению различных карбонатных минералов в месторождениях типа Дактаун, как это указывается Россом [стр. 155]. Подобное зональное распределение минералов вызвано в основном контролем физических условий над растворимостью, а не над летучестью.

Что касается литофиз, на которые указывает Феннер, то здесь вряд ли возникает сомнение, что первоначальная полость была газовым пузырем; расширение этого газа или добавление к нему извне из-за пределов первоначального пузырька, вероятно, могут иногда или отчасти быть причиной своеобразной последовательности концентрических слоев в том виде, как они часто наблюдаются. Но это нечто совсем иное, чем утверждение, что присутствующее в этих полостях твердое минеральное вещество было отложено из газа.

Обыкновенно количество этого минерального вещества значительно больше того, которое без натяжки может быть приписано

<sup>1</sup> Mineral Deposits, 4-е изд., 1933, стр. 124.

<sup>2</sup> U. S. Geol. Surv., Prof. Pap. 78, 1913, 160.

отложению из объема расширившегося газа, содержащегося в полости. Таким образом, проблема с данной точки зрения становится идентичной вопросу образования минералов, которые могут встречаться в породах, настолько же свежих, как породы, окружающие литофизы. Приходится допустить внесение материала извне и отложение его в пузырьке. Безразлично, осуществляется ли это протекающим флюидом, содержащим минеральное вещество, или диффузией без действительной циркуляции флюида. Ни в том, ни в другом случае нет ничего такого, что доказывало бы, что этот флюид был газом, а не жидкостью. Наоборот, нахождение в отдельных случаях пузырьков, частично заполненных материалом до определенной ясно выраженной горизонтальной поверхности, причем верхняя часть пузырька остается почти и даже совсем пустой (или заполняется другими минералами), скорее всего может быть объяснено как результат влияния уровня жидкости и отложения, практически происходившего с той стороны мениска, которая обращена к жидкости; во всех остальных отношениях эти образования напоминают обычные минералы. Если же часть материала литофизы могла отложиться из жидкого флюида, это, повидимому, было возможно и для всей его массы. Вывод, что транспортирующим агентом был газ, представляется совершенно неубедительным; происхождение полости, повидимому, по недоразумению ассоциировано с образованием содержащегося в ней минерального вещества.

Феннер много места отводит наблюдениям и выводам других исследователей, касающимся таких определенных вулканических выходов, как Везувий, Этна и др., а для района Катмаи дает интересную сводку по минеральным отложениям, включая сульфиды в долине Десяти Тысяч Дымов, познание драматических и поучительных черт которых столь многим обязано ему. Никто не может сомневаться в том, что в подобных местах освобождающиеся газы несут разнообразные минеральные вещества, а также, что значительная часть этого материала сама по себе находится в газообразном состоянии.

Но основные условия, характеризующие подобные случаи, резко отличны от тех, которые преобладают вдоль рудообразующих каналов<sup>1</sup>. Массы расплавленных пород, приподнятые почти или вплоть до земной поверхности и обычно сопровождающиеся эффузиями жидких или выбросами обломочных продуктов, приводят к сочетанию температур, отвечающих большим глубинам, с давлением на земной поверхности. Однако высокие температуры расплавленных масс убывают с большой быстротой, как вследствие соприкосновения с холодными породами и (или) с воздухом, так и вследствие охлаждения при внезапном выделении и расширении летучих; по этим, а также и другим причинам, как, например, ввиду повышения точки плавления и вязкости после выделения летучих, расплав застывает мелкозернистым или даже стекловатым, в рез-

<sup>1</sup> См. Ross. Physico-chemical factors controlling magmatic differentiation and vein formation. *Econ. Geol.*, 23, 1928, 876—877.

ком контрасте с более крупнозернистыми голокристаллическими текстурами интрузий, с которыми непосредственно связано рудообразование. Выделение летучих само по себе происходит со скоростью, достигающей крайних пределов, причем выделение их при таком резко ненормальном равновесии между температурой и давлением волей-неволей происходит в значительной степени в виде газа или возгона, а отчасти — в виде распыленной жидкости, настолько охлажденной расширением системы, что она остается жидкой.

Не только эти условия выделения летучих из магмы, настолько аномальных, что не в состоянии дать надежных указаний (разве что по контрасту) относительно того, как эти же летучие выделяются на глубине, но сама обстановка, которая так отличает неглубокие или поверхностные выделения, служит препятствием для концентрации и движения летучих вдоль немногих более крупных проводящих каналов, без чего не могут образоваться промышленные рудные скопления. Такое расточительное рассеивание вещества по бесчисленным выходным отверстиям хорошо иллюстрируется строением Десяти Тысяч Дымов; по словам Феннера, там имеются многочисленные фумаролы, вблизи которых «отложились в большом количестве соединения металлов, несмотря на то, что их много рассеялось в пористом туфе, который отложился на поверхности» [стр. 85].

Среди других последствий этого сильнейшего нарушения равновесия между температурой и давлением имеет место ослабление роли щелочных компонентов в эманациях и, как следствие, преобладание кислотных, в связи с повышенным различием в их летучести при подобных соотношениях высоких температур и низких давлений.

Если бы возник вопрос, действительно ли условия, названные аномальными, заслуживают такого определения, можно было бы сослаться на более высокий уровень температур таких фумарол, на прерывный характер явлений, частью которых они являются, на их сравнительно быстрый упадок до незначительных проявлений, и все это в противоположность фумаролам таких выдержанных, постоянных районов, как Йеллоустон или Роторуа, где лежащее на большой глубине тело кристаллизующейся магмы отдает свое содержание летучих при условиях, гораздо более подходящих для образования руд. В этих последних районах черты явлений отложения и изменения боковых пород в общем тождественны (если не говорить о промышленном обогащении) с теми, которыми отличаются такие эпитермальные месторождения, как Гольдфильд, Комсток и Топопах — месторождения, образовавшиеся из флюидов, состав, состояние, характер и движение которых подчинены сдерживающему контролю давлений.

Феннер неоднократно настаивал на том, что «когда пузырек, состоящий преимущественно из таких газов, как упомянутые ( $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  и др.), движется вверх в магме, он служит пространством, в котором собираются другие газы с очень малым давлением паров. Последние в результате дестилляции в основном проникают

в пузырек, как если бы он представлял собой вакуум, независимо от того, под каким давлением он находится на самом деле. Это «динамическое» действие может быть весьма эффективным в отношении собирания и удаления из магмы веществ с малым или средним давлением пара» [стр. 80].

Если даже допустить приемлемость экстраполяции качественных процессов этого способа концентрации вещества вплоть до условий огромных давлений, господствующих в магматической камере, все же необходимо рассмотреть количественную сторону этого вопроса.

Прежде всего из формулировки Феннера нельзя сделать вывода, будто струящийся газ в состоянии каким-то образом увеличивать на какую-то непосредственную величину ту незначительную летучесть, которой обладает интересующее нас вещество. Эта низкая летучесть (при данной температуре) не изменяется струящимся газом, который лишь способствует проявлению этой потенциальной летучести, устраняя в известной мере сдерживающее влияние окружающего вязкого жидкого раствора.

Затем следует помнить, что этот динамический способ увеличения отделения летучих компонентов проявляется пропорционально не массе, а объему газового пузырька, играющего роль коллектора; поэтому при всех прочих равных условиях этот способ гораздо более эффективен при давлении в одну атмосферу, чем при тысячах атмосфер, наблюдаемых в магматической камере. Объем газа при таких условиях сравнительно незначителен по отношению к объему, обычному при промышленном применении этого динамического процесса; соответственно слабее должно быть влияние процесса в его геологическом приложении.

Феннер в обзоре работы Росса выдвигает вопрос о летучести в таком аспекте, который исключительно важен для настоящей проблемы и потому заслуживает самого пристального внимания, тем более, что этот вопрос и тесно связанный с ним другой, не меньшего значения, а именно, о распределении элементов среди приходящих в соприкосновение с ними соединений, — только упоминаются в главе III сборника Линдгрена и в должной мере не разбираются. Он говорит:

«Следуя общему закону, давление пара какого-либо находящегося в растворе вещества понижается пропорционально молярному количеству сопровождающего материала»<sup>1</sup>.

Это положение, являющееся своего рода выражением закона Генри, к счастью проверено экспериментально в объеме, выходящем за пределы большинства предыдущих экспериментальных работ, современными блестящими исследованиями Горансона над системами, состоящими из воды и расплавленного гранита, альбитового или ортоклазового<sup>2</sup>, в отношении: а) природы раствора (сложные силикаты), б) температуры (1200° C) и в) давления (4000 атмосфер). Из полученных им результатов<sup>3</sup> видно, что в подобных

<sup>1</sup> Loc. cit., стр. 931.

<sup>2</sup> Am. Jour. Sci. 22, 1931, 481—502. Am. Geophys. Union Trans., 17th Ann. Meeting, 1936, 257—259. Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 71—91.

<sup>3</sup> Особенно Am. Jour. Sci., 22, 1931, 494.

«магмах» давление пара летучего растворенного вещества (вода) поразительно хорошо следует закону Генри вплоть до концентраций около 2% по весу и удовлетворительно — примерно до 3%<sup>1</sup>, что в молярном выражении значительно выше, чем указанные проценты.

Имея такое благоприятное подтверждение закона в условиях, господствующих в магме, при умеренных концентрациях одного летучего растворенного вещества — воды, можно, по видимому, сделать вывод, что закон с достаточной степенью достоверности остается в силе и для другого летучего магматического растворенного вещества, по крайней мере в пределах до молярной концентрации, скажем 2—4%/d, при условии, что это вещество обладает высокой растворимостью в магме. Так как любое соединение, если его летучесть больше ничтожно малой величины, будет находиться в магме в концентрации, равной указанной или уступающей ей (может быть, за исключением воды), не исключена возможность добиваться каких-нибудь полезных соображений об относительной летучести в количественном выражении, если только нам известно молекулярное отношение каждого летучего компонента или мы в состоянии дать приближенную его оценку. Попытка обосновать подобные выводы дается ниже.

Что касается выдвинутого как Феннером, так и Боуэном уже раньше обсуждавшегося предположения, что кремний и обычные основания горных пород, равно как и рудные материалы, выделяются из магм главным образом в виде летучих галоидных соединений, очевидно, что в газовой фазе может быть перенесено не большее количество этих элементов, чем может войти в соединение с небольшим количеством Cl и F, присутствующими в магме.

Таким образом возникает необходимость приближенно определить распределение Cl и F между элементами, которые образуют с ними соединения [см. Феннер, стр. 75]. Проф. Кистяковский (G. V. Kistiakowsky) был так любезен и проверил расчеты Андерсена (H. C. Andersen), одного из своих учеников, касающиеся распределения галоидов в «типичной» гранитной магме<sup>2</sup> и вытекающих отсюда парциальных давлений паров<sup>3</sup>. Вместе с тем выясняется,

<sup>1</sup> По мере того, как возрастает концентрация воды, увеличиваются отклонения от идеального закона; однако отклонения таковы, что скорее подчеркивают действие закона, а не ослабляют его значения.

<sup>2</sup> Исходя из средних данных, приводимых Дэли для застывшего гранита (Daly, *Igneous Rocks and the Depth of the Earth*, 1933, стр. 9), я наметил для данной цели упрощенную „типичную“ гранитную магму следующего состава (в %):

SiO <sub>2</sub>	68,2	K <sub>2</sub> O	4,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,5	H <sub>2</sub> O	2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	Cl	1,0
FeO	1,7	F	1,0
MgO	0,8	Прочие летучие, включая S	
CaO	2,0	и CO <sub>2</sub>	0,5
Na <sub>2</sub> O	3,3		100,0

Гранит, а не несколько более подходящий кварцмонцитный состав, был принят потому, что имеющиеся данные Горансона относятся к первому; на

выводах это серьезно отразиться не может. Не делалось попытки учесть долю общей суммы летучих компонентов, которые вошли бы, как первичные, так и вторичные, в состав таких пирогенных минералов, как слюда, апатит и т. д. Для данной цели казалось желательным, в частности считаясь с взглядами Феннера, принять высокое содержание Cl и F, которое взято мною равным 1% по весу для каждого.

Так как  $H_2O$  по весу, несомненно, преобладает над всеми другими присутствующими летучими веществами (см. Allen E. T. Chemical aspects of volcanism. Franklin Inst. Jour., 193, 1922, 49), допущенное высокое содержание Cl и F не позволяет мне отнестись с тем же вниманием к сверхосторожному предположению Боуэна, по мнению которого принятое им для  $H_2O$  содержание в 0,5% по весу „вероятно близко к истинной картине .. для больших глубинных масс гранитной магмы“ [стр. 130]. Боуэн в другом месте высказывает по этому поводу соображения (Evolution of Igneous Rocks, 1928, стр. 297), которые я считаю соответствующими ранее намеченной им цифре 0,5%, а не 1—2%, как понимает Джиллели. Несомненно, прав Мори, когда говорит: „Действительное содержание воды в гранитной магме расценивается в пределах от 1 до 8% по весу или даже больше, но пока эти вычисления не подтверждены опытами, они остаются необоснованными предположениями“ (Water in geological processes, Carnegie Inst. Wash. Pub. 501, 1938, 50). Тем не менее, мне кажется неправильным отказываться от соображений по этому вопросу до тех пор, пока не будет закончена вся серия опытов. Некоторые количественные указания могут быть приняты во внимание. Например, учитывая высокие точки плавления и, в особенности, огромные вязкости главных минеральных компонентов гранитных пород (Bowen. Viscosity data for silicate melts. Am. Geophys. Union Trans., 15th Ann. Meeting, 1934, 252—254), трудно себе представить, каким образом Боуэн при таком малом содержании воды, как 0,5%, думает объяснить снижение этой величины до пределов, необходимых для соответствия с действительным диапазоном температур гранитных магм, которые он имеет в виду, или с силой проникновения, обнаруживаемой гранитным расплавом, и с величиной зерен выкристаллизовавшейся породы. Я вполне согласен с утверждением Джиллели, что содержание воды должно быть выше, чем 0,5% (Gilluly J. The water content of magmas. Am. Jour. Sci. 33, 1937, 430—441. См. также Goranson. The solubility of water in granite magmas. Am. Jour. Sci. 22, 1931, 494). Такая низкая цифра, как 2,5%, принята здесь в качестве компромисса в надежде сделать эту „типичную магму“ более или менее приемлемой для большинства.

Насколько мы были осторожны в отношении  $H_2O$  в принятом здесь гранитном составе и щедры в отношении Cl и F, видно из того факта, что в данном случае отношение этих компонентов при любых обстоятельствах равняется 2,5:1, в то время как Кёнигсбергером и Мюллером (см. Moberg and Ingerson, loc. cit., стр. 667) для предполагаемого ими раствора, из которого отложились жильные минералы, принимается отношение  $H_2O:Cl=57:1$  (см. Shepherd E. S. Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 326).

Температура  $900^\circ C$  для магмы является, по видимому, приемлемой, по кривой Горансона это дает соответствующее равновесие при давлении, равном 330 атмосферам и содержании воды 2,5% (Am. Jour. Sci., 22, 1931, 494). В расчетах д-ра Кистяковского оказалось, однако, удобнее придерживаться округленной цифры  $1200^\circ$  абс., что отвечает  $925^\circ C$ .

<sup>3</sup> Проф. Кистяковский для упрощения объединяет молекулярные соотношения для Cl и F, принимая, что галоиды представлены только Cl, и для Na и K — соответственно только Na. Не делалось попытки принять во внимание  $CO_2$ , S и другие летучие, имеющиеся в упомянутом анализе. Это упрощение не отражается серьезно на приведенных здесь результатах. Основанием для подсчетов распределения галоидов служили константы равновесия, определенные из теплоты образования соединений при комнатной температуре. Несоответствие термодимических данных и вытекающая отсюда необходимость некоторых упрощающих допущений вносит немалую степень обычной неточности; допущения эти заключаются в следующем: а) изменение энтропии равняется нулю; б) теплота реакций не зависит от температуры; в) теплота растворения реагирующих веществ и продуктов реакций взаимно уравнивается. Д-р Кистяковский подчеркивает, что ни одно из этих допущений не отвечает действительности в

что наряду с образованием силикатов несравнимо большая часть присутствующих галоидных элементов соединится со щелочными металлами, что большая часть незначительного остатка вступит в соединение со щелочно-земельными металлами, закисным железом и водородом, и что остающееся весьма малое количество галоидов распределится между алюминием, окисным железом и кремнием. Эти индивидуальные соотношения в порядке распределения настолько сильно варьируют от элемента к элементу, что эффективно парциальное давление пара вряд ли можно определить, исходя из общепринятых данных о летучести чистых хлоридов, подобных тем, которые приводит Феннер [стр. 93].

С оговоркой, что полученные данные могут дать только общее представление об относительном порядке величин, указанные парциальные давления ( $2,5^{\circ}/\mu$  при 330 атм), при давлении паров воды, принятом за единицу, приведены в следующей таблице.

Относительные парциальные давления паров в гранитной магме при  $925^{\circ}\text{C}$ .  
(по Кистяковскому и Андерсену)

$\text{H}_2\text{O}$	1	$\text{CaCl}_2$	$3 \times 10^{-13}$
$\text{HCl}$	$3 \times 10^{-3}$	$\text{SiCl}_4$	$3 \times 10^{-23}$
$(\text{Na} + \text{K})\text{Cl}$	$6 \times 10^{-7}$	$\text{FeCl}_3^*$	$9 \times 10^{-30}$
$\text{FeCl}_2$	$1 \times 10^{-10}$	$\text{AlCl}_3$	
$\text{MgCl}_2$	$1 \times 10^{-12}$		

\* Термохимические данные для  $\text{FeCl}_3$  недостаточны, но предположительно парциальное давление его паров в магме того же порядка, что и для  $\text{AlCl}_3$ .

Из этих цифр вытекает, что, за исключением воды и весьма подчиненного количества свободных галоидных кислот, натрий и калий являются единственными минералообразующими элементами, которые могут быть вынесены из магмы в газовой фазе в сколь угодно заметных количествах. Хлориды таких рудообразующих металлов, как  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$  и  $\text{Zn}$ , будут улетучиваться не намного легче, чем хлориды  $\text{Fe}^{II}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$ . Кремний, алюминий и, вероятно, окисное железо примут участие в переносе в совершенно ничтожных количествах<sup>1</sup>.

Но даже и приведенная выше таблица не освещает еще всех сторон вопроса. Соотношения даны для состояния равновесия. Если бы для этих летучих соединений представился действительный случай выделиться из системы, скорость выделения первоначально была бы пропорциональна их парциальным давлениям, приведенным выше. Но выделение в таких соотношениях, отличающихся от первоначальных соотношений в распределении галоидов, привело

полной мере; но их недостатки смягчены в пределах возможного путем построения уравнений в возможно симметричном виде; поэтому он приходит к выводу, что нет оснований предполагать, что общий порядок взаимоотношений, указанный в помещенной ниже таблице, не будет справедлив.

<sup>1</sup> Мнение Феннера [стр. 92], что  $\text{Al}$  в такой мере будет входить в соединение с кислородом, образуя нелетучий силикат, что это может «сильно уменьшить его улетучивание из магмы», блестяще подтверждается, так же как и его указание [стр. 87—88] на тот факт, что тенденцию к улетучиванию скорее проявит  $\text{HCl}$ , а не хлориды металлов. Подтверждение находит также предположение Боуэна, об «ограничении количества  $\text{SiCl}_4$  в паровой фазе» [стр. 133] и тот же вывод его по отношению к  $\text{HF}$  [стр. 135].

бы к перераспределению среди остающейся части, причем проявлялась бы непрерывно тенденция к присоединению оставшегося  $\text{Cl}$  прежде всего к  $\text{HCl}$ , а затем к  $(\text{Na} + \text{K})\text{Cl}$ . В конечном счете почти все количество галоидов улетучилось бы из магмы в виде соединений, не содержащих тяжелых металлов и кремнезема. Положение еще более обострилось бы, если бы пришлось принятое нами исходное содержание  $\text{Cl}$  и  $\text{F}$  — 1% для каждого — уменьшить до менее щедро принятой величины или если бы пришлось увеличить содержание воды, оцененное нами в 2,5%. Несколькими иными взаимоотношения имели бы место при более низких температурах и повышенном содержании летучих, свойственных пегматитовым остаточным расплавам, но в недостаточной мере, чтобы изменить общую ситуацию. Окончательный ответ, повидимому, сводится к тому, что если бы существовала газовая фаза, резко преобладающая часть галоидных элементов была бы вынесена в виде  $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$  — совершенно бесполезных соединений с точки зрения выноса минерального вещества из магмы.

В итоге по всему вопросу о газовом переносе, будь то в виде летучих соединений или в виде газовых растворов легко-летучих соединений, приближенная количественная оценка поведения летучих, которая сделана выше, решительно говорит в пользу того вывода, что перенос кремния и рудных металлов не может быть осуществлен в интересующих нас масштабах в виде газообразных галоидных соединений. Ввиду того, что ни одно из других летучих соединений, например с бором, фосфором или углеродом, не обещает быть настолько же эффективным, как соединения галоидов<sup>1</sup>, единственная остающаяся надежда на возможность для газового переноса, повидимому, заключается либо а) в гидридах и им подобных соединениях<sup>2</sup>, например  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{SiHCl}_3$ ,  $\text{AsH}_3$ ,  $\text{SiS}_x$ , устойчивость которых при магматических (не «вулканических») условиях находится под большим сомнением, либо б) в прямой растворимости летучих соединений в сжатом  $\text{H}_2\text{O}$ -газе, что в количественном отношении не встречает надежной поддержки в опытах Грейга, Шеферда и Мервина, так же как и в практике современных паровых котлов, о чем уже говорилось, выше. Таким образом, вся идея газового переноса рудного материала из магмы рушится при количественной проверке.

<sup>1</sup> Ингерсон (loc. cit., стр. 455) согласен с Боуэном и Феннером относительно «значения летучих соединений при газовом переносе — несомненно, они в большинстве случаев играют очень важную роль». Взгляды же Мори и Ингерсона (loc. cit., стр. 620) совпадают с изложенным выше мнением; они высказываются в пользу «механизма для выноса материала из магмы без существенного участия летучих соединений, в подтверждение существования которых в природе почти или вовсе не встречается доказательств». Вероятно, они видоизменили бы это утверждение для очень неглубоких в вулканических очагов.

<sup>2</sup> См. ссылку Феннера [стр. 96] на Шлеферда: Shepherd. The analysis of gases obtained from volcanoes and from rocks. Jour. Geol., 33, 1925, 305. Cp. Shepherd. Am. Jour. Sci., 35A, 1938, 318.

Если рудные материалы и выносятся из магмы в составе выкипающего газа, то они должны выноситься из нее каким-то другим путем. Что они покидают магму как часть богатого водой флюида, признается всеми. Но если бы имело место выкипание из магмы, преобладающей составной частью выделяющегося газа была бы вода, и магма в сильной степени обеднялась бы в отношении ее содержания. Это послужило бы препятствием к более позднему выносу рудных материалов богатым водой жидким расплавом. Так как руды, очевидно, отложились не из газовой фазы, но вместе с тем происходят из магмы, отсюда должно следовать, что выкипание из магмы, дающей руду, является совершенно подчиненным процессом и что большая часть летучих уходит в виде жидкого раствора, в котором растворены рудные материалы.

Так как совершенно невероятно, чтобы решение вопроса, играет ли выкипание из магмы существенную роль или нет, зависело от того, происходило или нет образование руд и подобных им минеральных образований, то кажется вероятным, что выкипание из обычной магматической камеры—явление несущественное. Таким образом, опять получается впечатление, что Мори был прав в своих выводах 1924 г. В самое последнее время, в 1938 г., Мори и Барлью (Morey and Burlew), повидимому, придерживаются той точки зрения, что жидкая фаза в качестве господствующей продолжается от исходной магмы через всю минералообразующую стадию, судя по следующим их словам:

«Остающиеся после кристаллизации пегматитов водные растворы, содержащие еще больше воды при еще более низкой температуре, вызывают гидротермальное изменение уже застывших до того минералов и в конечном итоге приводят к образованию вторичных минералов в жилах»<sup>1</sup>.

Но в том же году Мори встретился с загадочным процессом проникновения и замещения и, видимо, был вынужден прибегнуть, как и многие до него, к газовой фазе. Говоря о «водных эманациях или эксгаляциях из магмы, пронизывающих боковые породы, иногда на большие расстояния, и изменяющих их состав как путем отложения вынесенного из магмы материала, так и путем выноса и перетложения части породы, в которую они вторглись», он добавляет: «Точный механизм этого воздействия все еще неизвестен, и требуется немало экспериментальных работ, раньше чем будет ясно понят этот сложный процесс», но затем делает следующий рискованный вывод: «По всей вероятности, он находится в связи со способностью газовых эманаций проникать через поры и трещинки, слишком незначительные для продвижения жидкой магмы, и с реальной «растворимостью» рудных минералов в перегретом и сильно сжатом водяном паре»<sup>2</sup>.

Феннер и Росс в сборнике Линдгрена также встретились с затруднениями при толковании способа проникновения в поры и

<sup>1</sup> Studies of solubility in systems containing alkali and water. Am Jour. Sci., 35A, 1938, 188.

<sup>2</sup> Water in geological processes. Carnegie Inst. Wash. Pub. 501, 1938, 54.

мельчайшие трещинки флюида, которым было обусловлено замещение. Прежде всего, принимая газ в качестве проникающей среды, они вероятно упускают из виду для данного случая значительную плотность и, должно быть, повышенную вязкость газа при господствующих давлениях, как это подробнее изложено на стр. 107—108. Затем, такая предполагаемая зависимость от движения замещающего флюида в процессе замещения, а потому и необходимость некоторой проницаемости, без которой невозможно было бы движение, всегда приводит к путанице, как и в случае намечаемого минерального переноса, причастного к метасоматизму.

Эти затруднения, напротив, исчезают, если диффузия рассматривается как непосредственное и местное проявление движения как для привносимых, так и для выносимых химических элементов, участвующих в замещении. При диффузии, которая, как доказано металлургами, проникает даже сквозь такую плотную структуру, как кристаллическая пространственная решетка, основное требование к флюиду сводится к тому, чтобы он поддерживал поблизости концентрацию воздействующих элементов (или ионов) и получал и распределял поступающие смещенные элементы (или ионы). Все наблюдения указывают на вероятность того, что эти функции флюид лучше выполняет в жидком, а не газообразном состоянии. Поражает, что так широко распространено пренебрежительное отношение к диффузии в применении к геологическим процессам (за исключением случаев, когда ее ошибочно ставят в связь с коллоидными явлениями) как со стороны геологов, так и специалистов в области физической химии.

Напомним, что когда масса расплавленной магмы почти доходит до поверхности или выливается в виде лавы, здесь устанавливается совсем иное равновесие между температурой и давлением, чем то, которое имело место в более или менее замкнутых массах магмы, так что в этих новых условиях летучие компоненты в большей своей части или даже целиком могут улетучиваться в виде испаряющегося или возгоняющегося газа. Но эмпирические данные наблюдений показывают, что эти условия большей частью неблагоприятны для отложения руд. Выделение в этом случае происходит не по немногим глубоким каналам, по которым движется так много флюида, что накопление отлагающегося вещества может привести к образованию промышленных руд; вместо того выделение без пользы разбросано на «десять тысяч дымов».

Это обсуждение, непосредственно посвященное разным способам переноса в газовой фазе, может быть закончено справкой по вопросу, почему газовая фаза в качестве растворителя так уступает жидкой фазе. Это не вопрос плотности (сжатия) или компактности молекулярной упаковки, как предполагали некоторые исследователи, так как свойства газа сохраняются иногда и при больших плотностях, чем те, при которых проявляются свойства жидкости<sup>1</sup>. Несмотря на легкость перехода от одной фазы к другой

<sup>1</sup> См. ссылку на Горансона в подстрочном примечании на стр. 106.

при критической точке, существует, повидимому, и еще какое-то различие между этими двумя фазами, кроме самого основного — что жидкая фаза обладает определенным объемом, в то время как газ может расширяться беспредельно. Поведение жидких растворов в поляризованном свете и в рентгеновских лучах указывает на условия молекулярной ориентировки и закономерного расположения, настойчиво наталкивая на мысль об аналогии с более строгим структурным контролем в кристаллической пространственной решетке. Никогда подобное поведение не наблюдалось у газа. Не исключено, что именно сила этих структурных связей в жидкостях удерживает их объем в определенных границах, в то время как отсутствием таких связей объясняется расширение газов.

Гибсон<sup>1</sup> успешно подытожил эти общие соображения для жидких растворов и развил вопрос в направлении, крайне близко затрагивающем нас, а именно — с точки зрения природы растворов, в которых растворителем является вода. Для нас представляют интерес следующие выдержки из Гибсона:

«Мы привыкли думать о жидких растворах просто как о газах, в которых молекулы очень сильно сближены, но такое представление не привело к заметным достижениям... в жидких растворах молекулы не распределены беспорядочно, как в газах, а ...имеется своего рода порядок... факты заставляют нас рассматривать жидкие расплавы как расплавленное твердое вещество, в котором определенная закономерная структура последнего хотя и нарушена, но не в полной мере».

«Хотя все жидкие растворы, повидимому, обладают какой-то структурой... только в воде возможно такое тетраэдральное расположение. По своей природе молекулы воды выделяются среди всех других обычных жидкостей».

«Наличие определенно выраженной структуры или закономерного распределения молекул в жидкой воде указывает, что мы должны несколько перестроить наши представления о том, что происходит, когда мы растворяем какое-нибудь вещество в воде. Растворенные ионы не только будут притягивать молекулы воды, но окажут и известное влияние на ее структуру».

Совершенно таким же образом, как твердые кристаллы начинают утрачивать некоторые из своих нормальных свойств, приближаясь вплотную к точке перехода в жидкую фазу при точке плавления (как, например, в случае общего размягчения металлов или закругления острых граней и углов металлических кристаллов под влиянием растущего поверхностного натяжения, в качестве предвестников жидкой фазы), так и жидкости начинают утрачивать некоторые из своих характерных свойств при приближении к критической точке. Вполне возможно, что это — начало разрушения внутренних структурных связей, предшествующего полному уничтожению этих структур при достижении критической точки. И разве не вероятно, что быстрое падение растворимости некоторых веществ

<sup>1</sup> The nature of solutions and their behavior at high pressures. Sci. Monthly, 46, 1938, 113—115.

при приближении к критической температуре растворителя является следствием этого распада структуры, столь близко связанного с растворимостью? <sup>1</sup> Другой путь толкования этого вопроса, указанный мне д-ром Кистяковским, сводится к тому, что по сравнению с контрастом между низкой внутренней энергией — низкой энтропией (беспорядочностью) твердого состояния, и высокой внутренней энергией — высокой энтропией газообразного состояния, внутренняя энергия жидкого состояния высока по сравнению со степенью беспорядочности (энтропии), а потому и химический потенциал жидкого состояния, подобно его удельной теплоте, относительно высок. Все это, повидимому, находится в соответствии с нашим повседневным опытом, который показывает, что из трех главных видов состояния материи жидкая фаза по своей растворяющей способности намного превосходит остальные.

**Извлечение щелочей из боковых пород.** Если магматические эманации первоначально носят кислый характер и лишь позже становятся щелочными, как полагают Феннер и Боуэн, должно иметь место извлечение щелочей из пород, образующих стенки проводящих каналов, как на это было уже указано в разделе «Приобретение флюидом вновь щелочных свойств». Это извлечение было бы необходимо в связи с двумя процессами: как источник щелочей, связанных своим происхождением с общей системой, при подъеме их до земной поверхности и потере в виде щелочных вод, и как источник щелочей, привносимых в боковые породы в тех местах, где образуются серицит и тому подобные минералы изменения или же где отлагаются в открытых полостях адуляр, альбит или алунит. Для удовлетворения этого двойного спроса может расходоваться все то количество щелочей, которое выносится непосредственно из магмы в виде эманаций, однако это количество должно быть сравнительно незначительным, если, как на этом настаивают, эманации выделяются в виде газа и решающую роль в них играют кислые компоненты.

Наша задача здесь сводится к тому, чтобы обнаружить тот участок вдоль проводящего канала, где породы подверглись такому предполагаемому выносу щелочей. Если такие участки будут обнаруживаться достаточно часто и если они достаточно крупны по размерам, можно будет считать, что общее воздействие кислот доказано. С другой стороны, если такие участки, лишенные щелочей, редки, ограничены или являются частными случаями, предположение о кислых эманациях из магмы соответственно может иметь только ограниченное приложение.

При этих поисках существенно иметь в виду, что целью их является обнаружить такие места, где щелочи селективно вынесены из породы. Если будет установлено, что порода, скажем, наполовину замещенная сульфидами, или кальцитом, или кварцем,

<sup>1</sup> С этой точки зрения интересно было бы удостовериться, каковы условия, позволяющие некоторым легко растворимым веществам случая I, если они присутствуют в умеренной концентрации, оставаться в растворе выше критической точки последнего.

содержит только половину первоначального количества щелочей, или что в породе, полностью замещенной упомянутыми минералами, не содержится их вовсе, это, по моему мнению, не является показательным, вопреки, повидимому, убеждению моего друга д-ра Шмедемана. Ибо, во-первых, такого рода общее замечание не может считаться неопровержимым доказательством того, что обусловивший его флюид был кислым, а не нейтральным или щелочным. Во-вторых, если бы на породу воздействовала сильная кислота, селективный или предпочтительный вынос щелочей (и вероятно оснований), до глинозема и кремнезема, был бы вполне естественным; поэтому отсутствие подобного селективного выщелачивания скорее говорило бы в пользу отсутствия сильных, а может быть, и слабых кислот. Наконец, предполагаемый вынос должен быть селективным и предпочтительным по отношению к щелочам в том случае, если где-то выше щелочи будут возвращены породе путем отложения серицита и тому подобными процессами замещения. Следует это из того, что раствор, несущий разные растворенные вещества, которыми он обогатился ниже путем общего, не селективного замещения породообразующих силикатов металлическими сульфидами, окислами и т. д., почти наверное не оказался бы в состоянии где-то выше воздействовать на аналогичные силикатные минералы и селективно вносить в них сколько-нибудь заметное количество вещества из разнообразного растворенного в нем материала, как только разве несколько больше щелочей, чем эти силикаты содержали уже до того. Между тем, как уже указывалось, ни одна теория по гипотетическому образованию руд не может рассчитывать на широкое приложение, если она не объясняет серицитизации и подобных широко распространенных изменений.

Кроме того, если сам по себе вопрос о том, был ли раствор кислым или нет, требует разрешения, то более общий вопрос о выносе из магмы в газовой фазе непосредственно упирается в вопрос о наличии галоидных кислот, так как соли других кислот обладают слишком слабой летучестью, чтобы играть какую-нибудь роль в этом отношении. Таким образом, воздействие таких кислот, как углекислота, серная кислота и другие, за исключением хлористого фтористоводородной, мало убедительно в качестве доказательства переноса рудного материала из магмы в газовой фазе.

Ничто, конечно, не принуждает нас ограничиваться общими и спекулятивными рассуждениями на тему об изменении типичных боковых пород. Мы знаем, что происходит с обычными боковыми породами при воздействии на них обыкновенных «гидротермальных» растворов. Химическая природа этих изменений лучше всего вскрывается в том случае, когда воздействию подвергается порода, состоящая из смеси разных минералов, слагающих изверженные породы. Мы видим в этом случае, что первыми разрушаются и превращаются в более стойкие в «гидротермальной» обстановке фемические минералы; хлорит, эпидот и карбонат (кальцит, доломит или анкерит) являются обычными продуктами переработки, а пирит и другие сульфиды, замещающие по преимуществу фемические минералы, представляют собой продукты более полного

перемещения элементов. Мы видим затем, что более известковистые разновидности плагиоклаза превращаются обыкновенно в серицит, несмотря на то, что замещающим элементам, чтобы проникнуть к известковому ядру, приходится перемещаться внутрь (а замещаемым элементам — наружу) через более щелочные внешние зоны плагиоклаза. И, наконец, мы часто видим еще более интенсивные проявления превращения в серицит натровых, а напоследок даже и калиевых полевых шпатов. Эта сводка, распространяющаяся на значительно преобладающую часть гидротермального интервала глубин, разумеется, слишком сжата и упрощена, чтобы обрисовать все детали такого замещения, но, мне кажется, достаточно точно передает основы минералого-химического направления этого воздействия. Может ли кто-нибудь усмотреть в этой картине признаки кислотного воздействия?

С другой стороны, мы знаем, что происходит с обычными породами, когда они подвергаются бесспорному воздействию кислотных растворов. Мы видим примеры выщелачивания супергенными кислотами и находим каолин и кварц (и большее или меньшее количество лимонита) в составе устойчивого остатка. Иногда мы наблюдаем также примеры выщелачивания горячими гипогенными кислотами, и опять-таки находим в составе устойчивого остатка диккит и тому подобные минералы вместе с кварцем (и большим или меньшим количеством сульфидов). Эти продукты супергенного и гипогенного кислотного воздействия поразительно похожи друг на друга, но последние в общем настолько же резко отличаются от продуктов значительно более распространенного гипогенного изменения, как оно описано выше.

Примеры как одного, так и другого типа гипогенного изменения, так сильно отличающихся друг от друга, мы наблюдаем выраженными с различной степенью интенсивности, начиная со случаев, когда воздействие настолько слабо, что оно едва может быть уловлено, и вплоть до таких, когда первоначальная порода глубоко и полностью изменена. Но при любой степени интенсивности отличить друг от друга эти два вида замещения можно почти всегда легко и безошибочно. Вряд ли можно оспаривать вывод, что независимо от степени интенсивности эти два вида замещения вызваны глубоко отличными химическими агентами. Наблюдающиеся различия и отвечающие им теоретически — это различия между растворами, которые в одном случае являются щелочными или, по крайней мере, некислыми, в другом же случае — определенно кислыми.

Заслуживает внимания, что кислый раствор приводит к селективному выносу щелочей при всех условиях, кроме одного случая. Если кислые растворы содержат серную кислоту в достаточной концентрации, часть щелочей, присутствующих во взаимодействующей с ними породе, может выделиться в виде алунита. Алунит (наряду с каолинитом) представляет довольно обычный минерал изменения в непосредственной близости от масс пирита, супергенное окисление которых настолько сильно, что приводит к высокой концентрации  $H_2SO_4$ . Алунит (наряду с минералами каолини-

товой группы) также является достаточно распространенным продуктом изменения гипогенной кислотой для того, чтобы придать большую долю вероятия выводу о преобладающей роли серной кислоты и в этом случае.

Феннер отмечает:

«Трудно решить, какое количество кварца во вторичных месторождениях поступило непосредственно из магмы и какое его количество представляет остаток после выщелачивания оснований из других минералов» [стр. 105].

Тот, кто знаком с изменением пород гипогенными растворами, вряд ли согласился бы подписаться под этим общим утверждением в таком его виде. Если бы последняя часть приведенной цитаты была заменена словами «и какое количество обязано своим образованием выносу силикатов из боковых пород путем обмена кислотных радикалов», это имело бы реальный смысл и значение. В преобладающем числе случаев, когда встречаешься с подобной неопределенностью относительно действительного происхождения кварца, последний находится в жилах или других локализованных телах, а из прилегающей боковой породы выщелочены не столько основания, сколько кремнекислота, так как порода обычно более или менее полностью карбонатизирована. Примеры такого положения в крупном масштабе наблюдаются по соседству с кварцевыми жилами на выдающихся золотоносных площадях Канадского щита, и вообще это явление распространено чрезвычайно широко. Из утверждения Феннера, на первый взгляд, как будто можно вывести заключение, что кварц, образование которого он объясняет выносом оснований, должен находиться в самих измененных боковых породах, притом в большем процентном отношении, чем до того, как были удалены основания. В общем же, противоположный случай является обычным. Таким образом, утверждение Феннера может соответствовать обычному положению только в том случае, если как основания, так и  $\text{SiO}_2$  вынесены из боковой породы, причем основания полностью унесены каким-то ближе не установленным путем, в то время как  $\text{SiO}_2$  отложилась в жилах или других локализованных массах. Но фактически это оставило бы боковую породу без единого из ее первоначальных компонентов и таким образом упразднило бы ее. Такие вещи, разумеется, не случаются. На самом деле, утверждение Феннера в том виде, как оно сформулировано, соответствует фактам только в сравнительно редких случаях определенного и не вызывающего сомнения воздействия кислот, и то лишь частично, так как большая часть оставшейся в породе кремнекислоты встречается не в виде кварца, а богатого алюминием силиката, обыкновенно минерала из группы каолинита.

Повидимому, вполне твердо установлено, что гипогенный селективный вынос щелочей, или, во всяком случае, явные признаки воздействия сильных гипогенных кислот и гипогенное отложение алуниита кислотными растворами преимущественно приурочены к менее глубоким частям всего известного вертикального разреза гипогенных рудных отложений. Шмедеман, который дал последний обзор литературы по данному вопросу, подтверждает этот вывод.

Это та область, где воздействие кислот должно было бы быть наиболее слабым, если кислоты, как таковые, происходят из глубоких областей, где залегает магма. Шмедеман, очевидно, согласен и с этим. Но он объединяет эти два факта в общем выводе, который допустим, но им рассматривается как не обязательный. Говоря о том, как далеко удаляются растворы от магматического источника и, в частности, как этот вопрос может быть приложен к месторождениям, залегающим близко от земной поверхности, он говорит:

«Если предположить, что рудные растворы начинают свой путь обладая кислыми свойствами, то отсюда логически следует, что те участки, где кислые минералы и явления кислого выщелачивания имеют развитие, должны находиться сравнительно близко от источника. Если признать такое логическое заключение, то жерла вулканов и вулканические месторождения, как некоторая группа, близки к источнику. Если же не согласиться с тем, что растворы были с самого начала кислыми, то заключение о значении кислых минералов и явлений выщелачивания, как показателей близости источника, отпадает. Проблема сводится тогда к тому, чтобы найти объяснение для сульфатов по какой-нибудь схеме, учитывающей преимущественное нахождение этих минералов вблизи земной поверхности»<sup>1</sup>.

Основное слабое место в аргументации Шмедемана я усматриваю в следующем: если в защищаемом им предположении, что растворы обладают кислыми свойствами с самого начала, ясные признаки кислотного воздействия принимаются за доказательство близости к исходной магме для месторождений, близких к поверхности, т. е. относящихся к верхней части гидротермального диапазона Линдгрена, то по аналогии и более глубоко лежащие месторождения должны были бы обнаруживать признаки кислотного воздействия, если и они соответственно близки к своему магматическому источнику. Между тем, все примеры кислотного воздействия, которые в состоянии привести Шмедеман, относятся к категории неглубоких месторождений. Это должно обозначать, что либо мы не наблюдали более глубоко залегающих руд в достаточной близости от их магматического источника, чтобы обнаружить область кислотного воздействия близ источника, что, повидимому, противоречит фактам, или же, что имеется какая-то брешь в предпосылках или ходе рассуждения. Наиболее вероятным недочетом мне представляется одно предположение, которым не смущается Шмедеман, а именно, выдвигаемая им предпосылка, что растворы обладают кислыми свойствами, когда покидают магму.

Действительно, повидимому имеется очень мало признаков селективного выноса щелочей или других убедительных признаков кислотного воздействия в более глубоких мезотермальной, гипотермальной или пирометасоматической зонах Линдгрена. Между тем, именно в этих местах, где все факторы химической деятель-

ности проявляются наиболее сильно, кислотное воздействие должно было бы быть особенно развитым и интенсивным, если, как предполагается, кислота, как таковая, происходит из магмы.

Уместно в этом случае сослаться на один из самых старых и оказавших наибольшее влияние примеров якобы пневматолитического воздействия, а именно на оловянные месторождения. Тот факт, что эти месторождения часто содержат галоиды и бор, что галоиды олова легко летучи и что, реагируя с водой, они осаждают  $\text{SnO}_2$  — обычный оловосодержащий минерал, естественно, приводит к выводу, что привнесенное минеральное вещество транспортировалось в газообразном состоянии. Кроме того, в то время, когда наши минералого-химические и другие показатели глубин были гораздо менее достоверными, чем теперь, геологи пришли к убеждению, что месторождения олова относятся, как будто, к категории наиболее глубоко залегающих цветных месторождений. Признание и постоянное повторение этих выводов придали им авторитетность, обычно не допускающую сомнений. Но по мере того как открывается и тщательно изучается все больше и больше оловорудных месторождений накапливаются доводы для пересмотра этих старых взглядов.

Прежде всего все больше укрепляется сознание трудности переноса больших количеств минерального вещества в газовой фазе, даже если бы газовая фаза была способна на соответствующий перенос. Затем умножаются доказательства в пользу того, что отложение олова может происходить и на небольшой глубине. Крупнейшая область распространения оловорудных жил на земном шаре, Центральная Боливия, в большинстве оловорудных округов показывает своеобразное сочетание не только «высокотемпературных» и «низкотемпературных» минералов, но и таких, казалось бы исключаящих друг друга ассоциаций металлов, как олово с серебром. Тщательное изучение крупнейшего в мире рудника жильного олова Лалагуа, проведенное Тернором (Turneure)<sup>1</sup>, обнаружило явные признаки телескопии, сближение и скучивание минералов, обычно принимаемых за показательные для гипотермальных отложений, с другими минералами, приуроченными к значительно меньшим глубинам; эту ненормальную последовательность автор приписывает особым условиям отложения (в брекчии, заполняющей вулканическое жерло), при которых сравнительно высокие температуры сочетались с температурами, определяемыми относительно небольшой глубиной. Тернор и мой коллега проф. Рессель Гибсон, недавно исследовавшие эту оловорудную провинцию, полагают, что такое необычное сочетание условий высокой температуры и низкого давления контролировало оловянные и олово-серебряные месторождения, простирающиеся от Оруро к югу через всю Боливию в Аргентину. Следует отметить, что сочетание высокой температуры и низких давлений должно было бы способствовать кипению жидкого раствора, и совсем не невероятно, что Лалагуа, где воздействие проявилось с наибольшей интенсивностью, в известной

<sup>1</sup> The tin deposits of Llallagua, Bolivia, Econ., Geol. 30, 1935, 14—60 и 170—190.

мере участвовала и газовая фаза. Характерным изменением пород здесь является более или менее сплошное, не селективное замещение турмалином, серицитом и кварцем.

То немногое, что я видел на этих боливийских месторождениях, а также в Корнуоле, в Малайской провинции (в частности рудник Клаппа Кампит в Биллитоне, представляющий наиболее мощные разработки жильного олова на Востоке) и в Маунт Бишоф, Тасмания, где порода, повидимому играющая роль ответственного интрузива, представлена лорфпиром, наводит меня на мысль, что в общем гидротермальные оловянные месторождения изменяются в пределах от не особенно глубоко залегающих до залегающих совсем неглубоко, что здесь не установлено надежных признаков кислотных свойств отложившихся их растворов и что газы играли в лучшем случае подчиненную роль даже там, где условия наиболее благоприятствовали им, причем образование их было связано с местным выкипанием из жидкого раствора, а не с подъемом их в виде газа вдоль всего пути от магмы.

Для значительного числа этих менее глубоко залегающих оловянных месторождений, так же как и для большинства местонахождений, для которых Шмедеманом установлено воздействие кислот, повидимому, очень хорошо подходит удачный термин Баддингтона (Buddington)<sup>1</sup> ксенотермальный. Я, со своей стороны, почти полностью согласен со всеми заключениями и специфическими классификациями Баддингтона, изложенными на протяжении всей его статьи.

Итак, повидимому, напрашивается вывод, что бесспорные факты, которыми мы располагаем в настоящее время, решительно противоречат взгляду, будто в более глубоких частях проводящих каналов мог циркулировать сильно кислый флюид. В основных чертах этот вывод подтверждается и для верхних участков канала; но в тех отдельных случаях, когда наблюдаются проявления воздействия кислоты, факты, повидимому, говорят за то, что действующим агентом была серная кислота и что преобладающая часть ее образовалась благодаря реакции в проводящем канале примерно на том же уровне, где обнаруживается ее воздействие (см. стр. 125 и дальше). Предположение, что кислотность эманаций, улетучивающихся из магмы, обусловлена содержанием в них серной кислоты, не может служить поддержкой гипотезе о переносе в кислом газе, ввиду незначительной летучести сульфатов. Во всяком случае, нет фактических данных для предположения, что на глубине имелись значительные количества сульфатов. Даже такой нерастворимый минерал, как барит, ограничен в своем распространении преимущественно верхней половиной, третью или четверть гидротермального разреза.

**Постоянство карбонатов.** Как уже указывалось, придерживаясь идеи переноса металлов в виде летучих галоидов и идеи кислых эманаций, трудно избежать вывода, что основной причиной кислотной

<sup>1</sup> High temperature mineral associations at shallow to moderate depths. Econ. Geol., 30, 1935, 205-222.

реакции в эманациях является присутствие сильных галоидных кислот. Эти кислоты не только могут выделяться как таковые из магмы, согласно взглядам Феннера и Боуэна, но они несомненно должны образоваться как таковые и в том случае, если кварц и рудные металлы будут отлагаться из летучих галоидных соединений.

Любой флюид, в котором HCl и HF присутствуют в том количестве, какое требуется согласно концепции переноса руд в виде летучих галоидов, почти бесспорно неспособен был бы выделить молекулы таких карбонатов, как кальцит, доломит, анкерит и сидерит. Между тем, эти минералы относятся к числу весьма обычных и обильных жильных минералов практически на протяжении всего вертикального ряда эпигенетических типогенных рудных месторождений. При этом в очень большом числе случаев карбонатные жильные минералы принадлежат к ранним образованиям по сравнению с другими важными минералами, например кварцем и сульфидами.

Подобная же устойчивость карбонатов наблюдается в тех случаях, когда руды встречаются в известняке и доломите. К примерам рудообразования в условиях наибольшей интенсивности процессов и ближе всего к магме, где намечаемая кислотность эманаций должна была бы быть выражена наиболее сильно, относятся пирометасоматические замещения. Казалось бы, что если флюиды, обусловившие образование этих отложений, содержали в значительной концентрации такие кислоты, как HCl и HF, почти неизбежно должны были бы возникнуть крупные полости растворения. Другими словами, кроме растворения, сопровождающего обменное отложение минералов из рудного флюида и происходящего одновременно с ним, должно иметь место дополнительное растворение, сверх и независимо от такого отложения, благодаря свободной кислоте, присутствующей в флюиде в качестве его компонента.

Между тем, пирометасоматические отложения представляют собой поразительно плотные, непроницаемые породы; образование новых минералов является прекрасной иллюстрацией к закону Линдгрена о постоянстве (в общем) объема при замещении. Когда-то принятый взгляд, что образование пирометасоматических отложений приводит к значительному сокращению объема пород вследствие избыточного растворения, для большинства случаев совершенно не оправдался; наблюдения же, проведенные в связи с этим, дали нам исключительно хороший материал для заключения, что возникновение и заполнение открытых полостей для таких месторождений являются фактором, не заслуживающим внимания. Каким бы путем ни происходило замещение карбонатов, и независимо от того, были ли то карбонаты пород или ранние карбонаты жил, не обнаруживается никаких признаков того, что какая-либо свободная кислота, более сильная, чем уголекислота или кремнекислота, была тому причиной или принимала какое-либо участие в этом замещении.

Феннер, повидимому, признает возможность ограничений по отношению к воздействию кислот на карбонатные минералы. В ча-

стности он говорит о трудностях, с которыми сопряжено удаление  $\text{CO}_2$ , как о факторе первостепенной важности для дальнейшего хода событий [стр. 88]. Подобное затруднение, по общему признанию, отразилось бы на интенсивности воздействия кислот на карбонаты, но нет оснований предполагать, что оно повлияло бы на характер воздействия. Раз здесь существовала возможность для выноса тех компонентов известняка, которые были вытеснены сульфидами, окислами и скарновыми силикатами, должны были быть возможности и для удаления некоторого количества  $\text{CO}_2$ , освобождающейся вследствие воздействия свободной кислоты. А это привело бы к образованию пустот растворения.

Казалось бы, что нет возможности уйти от этих показаний против участия сильных кислот (или кислот, не подавляемых присутствующими щелочами), несмотря на мысль Феннера, что руды «в том виде, как мы их наблюдаем», не те, какими они были в самом начале. Ибо, как ранее упоминалось, какие бы признаки переработки ни обнаруживали руды, в огромном большинстве случаев нет указаний на более раннюю кислотную стадию, на которую наложилась более поздняя щелочная, а скорее все говорит в пользу изменчивых условий под контролем щелочной среды с начала до конца.

**Перенос сульфидов.** В течение по крайней мере шестидесяти лет способ переноса материалов для образования обильных сульфидов гипогенных руд оставался невыясненным. Боуэн предлагает решение:

«Перенос сульфидов каких-нибудь металлов в щелочных растворах представляет собой важную проблему... Перенос же их в кислом растворе не вызывает теоретических затруднений»<sup>1</sup> [стр. 139].

Затем он высказывает мысль, что осаждение сульфидных минералов является простым следствием нейтрализации кислого переносщего их раствора.

Феннер приводит характерный пример, который, повидимому, должен служить иллюстрацией для общего положения Боуэна. Он говорит:

«Присутствие в парах магмы  $\text{HCl}$  делает возможным сосуществование в них таких, повидимому, несовместимых пар соединений, как, например,  $\text{PbCl}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ . Если бы свободная  $\text{HCl}$  была удалена или нейтрализована, то произошло бы осаждение  $\text{PbS}$  обычным порядком» [стр. 90].

$\text{H}_2$ , прежде всего, это может быть справедливым только постольку, поскольку  $\text{PbCl}_2$  присутствует в магматическом газе. Выше были уже приведены доказательства того, что из всего количества  $\text{Cl}$ , присутствующего в магме, большая часть того, что может быть вынесено в виде газа, будет находиться в виде  $\text{HCl}$ ; лишь очень небольшое количество  $\text{PbCl}_2$  (среди всех других возможных хлористых металлов) могло бы образоваться.

<sup>1</sup> При том условии, что кислый раствор (жидкий) мог получить металлические сульфиды в заметной концентрации или заметном количестве от предшествовавшего газа. Ср. стр. 47—50.

Затем Феннер доказывает [стр. 91], что в соответствии с законом действия масс для того, чтобы Pb не оставался в газе, любое количество HCl, присутствующее в предполагаемом им газе, должно быть уравновешено количеством H<sub>2</sub>S, отвечающим квадрату концентрации HCl. Но то, что справедливо для Pb, в большей или меньшей степени<sup>1</sup> справедливо и для других металлов, образующих сульфиды. Если же встать на точку зрения, что все рудные сульфиды образовались таким путем за счет H<sub>2</sub>S, содержавшегося в газовой фазе, вероятно мало места оставалось бы для сомнений в том, что x частей HCl, которые по каким-либо известным признакам могли бы быть признаны находящимися в газе, уравновешивались бы более чем x<sup>2</sup> частями H<sub>2</sub>S, количество которой можно было бы рассчитать, исходя из количества известных в месторождении сульфидов. Таким образом, одновременное присутствие H<sub>2</sub>S и заметных количеств металлических солей в газовой фазе могло бы отвечать истине только при недоказанном предположении об адекватном количестве HCl. Понятно, почему Феннер неудовлетворен имеющимися подсчетами или оценками количества магматических Si и F.

Во всяком случае, соображения, которыми здесь руководствуются как Боуэн, так и Феннер, повидимому, приводят к заключению, что различные металлы должны переноситься и иногда отлагаться из газа в последовательности, определяемой законом действия масс. Это, в свою очередь, определило бы, произойдет ли осаждение данного сульфида в раннюю стадию, а следовательно, на большой глубине, или в позднюю, т. е. в более высокой части проводящего канала. Нейтрализация HCl, короче говоря, будет основным фактором, контролирующим место и последовательность отложения сульфидов. Когда же раствор приобретет щелочные свойства, никакие сульфиды не будут больше осаждаться.

Несомненно, вопрос о переносе, осаждении и последовательности выделения сульфидов не может быть разрешен полностью на основании таких простых взаимоотношений и наблюдений, как те, которые выдвигаются Феннером и Боуэном в приведенных выше цитатах. Если концепция о переносе в кислой газообразной среде не решает целиком сложной сульфидной проблемы, очевидно должен существовать какой-то другой путь для разрешения остающихся вопросов. Если же это так, то не исключено, что этим другим путем будет возможно разрешить проблему в целом.

На вопрос — каков же этот другой путь, к сожалению, невозможно ответить более определенно и убедительно, чем ссылкой на

<sup>1</sup> Если бы мы могли быть уверенными в том, что валентность имеет значение в этих реакциях, касающихся сульфидных соединений, мы вправе были бы утверждать, что для одновалентных металлов потребное отношение H<sub>2</sub>S к HCl определяется первой степенью последней величины, для трехвалентных металлов — третьей степенью, для двухвалентных же металлов, подобных свинцу, — второй степенью. Пирит среди сульфидов преобладает настолько резко, что в среднем его воздействие должно быть решающим. Сейчас принято считать, что железо в пирите закисное; однако реакция равновесия между растворимой (или летучей) солью закисного железа и H<sub>2</sub>S, которая привела бы к образованию пирита, не установлена.

объяснения, выдвигавшиеся еще до выступления в печати Боуэна и Феннера. В этих объяснениях имелась тенденция к благосклонному отношению к форме переноса в щелочной жидкой среде. Очевидно, что это вопрос первостепенной важности, для разрешения которого крайне необходимы эффективные экспериментальные работы при соответствующих условиях температуры и давления.

Однако показательно и крайне ободряет то обстоятельство, что Феннер [стр. 92] с явным одобрением цитирует мнение Линдгрена:

«Сульфиды металлов с трудом растворяются в воде, но они более или менее растворимы в щелочных растворах, что было доказано экспериментально исследованиями Беккера, Ленхера, Дитте, Траута, Равича и Горация Броуна»<sup>1</sup>.

В отличие от Боуэна, Феннер, повидимому, вообще не усматривает проблемы в переносе растворенных металлических сульфидов в горячих щелочных жидкостях. Он говорит:

«...горячий раствор щелочных карбонатов и сульфидов вступает в ряд новых реакций»... «Горячий щелочной раствор вполне приспособлен для такого действия»... «Образование минеральных жил в том виде, как мы их наблюдаем, обычно объясняется, вероятно с достаточным основанием, действием такого рода растворов» [стр. 92].

Настойчивое указание Феннера, что этой щелочной стадии предшествовала стадия кислотная, таким образом, явно надо обосновать другими соображениями, а не неспособностью щелочной жидкости осуществить перенос и отложение сульфидов.

**Гранитизация.** Наиболее убедительный довод против предположения Феннера о дистилляции кислого газа непосредственно из расплавленной магмы мы находим, пожалуй, в ореолах гранитизации<sup>2</sup>, уже упоминавшихся выше. Эти образования, обнаруживаемые по всему земному шару во все возрастающем числе при возрастающем значении их, представляют продукт преобразования разнообразнейших первичных пород в материал, по составу и структуре<sup>3</sup> настолько напоминающий гранит, что раньше эти породы во многих случаях ошибочно принимались за нормальные интрузии.

Доводы в пользу того, что гранитизация представляет собой химическое замещение, приняли характер неопровержимого доказательства. Ибо, если не говорить об инъецированных телах, удастся на повторающихся примерах проследить непрерывный переход от площадей, где первоначальные породы не подвергались изменениям, до площадей, где их характерные черты постепенно утрачиваются, так что при достижении конечной точки гранитизации

<sup>1</sup> Mineral Deposits, 3-е изд., 1928, стр. 142. То же положение повторено в 4-м издании. О дополнительных опытах см. Lindner J.L. and Gruner J.W. Action of alkali sulphide solution on minerals at elevated temperatures. Econ. Geol., 34, 1939, 537-540.

<sup>2</sup> Употребляется в обычном широком смысле, согласно которому не обязательно, чтобы материнская магма получающегося продукта непременно обладала точным составом настоящего гранита.

<sup>3</sup> См. Феннер [стр. 88].

от первоначальной структуры и текстуры остаются лишь слабые следы, и, наконец, мы доходим до такого материала, в котором не осталось и намека на первоначальную породу<sup>1</sup>. В других случаях, несмотря на глубокие изменения в составе, структура первоначальной породы превосходно может сохраниться в виде своего рода псевдоморфоз.

Ясно, таким образом, что эта сторона или часть общего процесса гранитизации, подобно всем другим случаям замещения, охватывает две задачи примерно равного значения: привнос и осаждение нового вещества, и растворение и вынос старого; если их выразить количеством потребной энергии, на стороне растворения и выноса окажется перевес. Следствием этого двойного процесса будет превращение всех затронутых им пород, независимо от их состава (будь то базальтовый поток и габброидный интрузив или глицистый сланец, сланец и конгломерат из кварцевой гальки), в однообразный, в общем, конечный продукт, по составу близкий к граниту (или альбитовому граниту). Повидимому несомненно, что при широком подходе основным результатом этого процесса в химическом отношении является привнос и фиксация щелочей, происходящих из магмы.

Разве не очевидно поэтому, что к такому результату не может привести газообразный агент, обладающий кислотным характером, или флюид, газообразный или жидкий, по своему составу столь несходный с гранитом, если руководствоваться современными представлениями о магматических газообразных дециллятах<sup>2</sup>.

Несмотря на близкое сходство этих гранитизированных или мигматических масс с нормальными пегматитами в отношении состава и изменчивой текстуры, между ними существует одно заслуживающее внимания различие: в то время как жидкий расплав обычного или «нормального» пегматита, так же как и любой другой строго пирогенной дайки, обнаруживает слабую способность к растворению, замещению и выносу материала соседних горных пород, флюид, который вызывает гранитизацию, обладает такой способностью в сильнейшей степени. Надо полагать поэтому, что он был насыщен активными летучими в большей мере, чем обычный пегматитовый расплав.

Несомненно, эти случаи гранитизации дают в крупном масштабе примеры воздействия магматического флюида, который не оставил следов присутствия в нем галоидов, который должен был быть настолько богат щелочами, что последние могли иметь перевес над любыми присутствующими кислотообразующими компонентами, который должен был находиться в жидком состоянии и который предположительно, поскольку позволяют судить полевые наблюдения, вынесен из магматического источника в том же состоянии

<sup>1</sup> При том условии, что уже давно признано и твердо установлено происхождение путем замещения, представляется несколько наивным со стороны Феннера трактовать подобные образования под старым обозначением инъекций „lit-par-lit“ и придерживаться того взгляда, что все они возникли благодаря проникновению магмы под давлением в поры соседних пород [стр. 78].

<sup>2</sup> Ср. Феннер [стр. 82—83].

и с таким же составом, каким он обладал, когда реагировал с окружающими породами, вызывая их гранитизацию.

Разве не тщетны усилия, вопреки всему этому, настаивать на том, что эманации должны были выделиться из магмы в виде кислого газа? И разве не должно казаться странным, что Феннер «ради упрощения» определенно исклочает при рассмотрении вопроса рудообразования примеры глубоко залегающих сульфидов, для которых связь с явлениями гранитизации вероятна?

Не приходится отрицать, что, к сожалению, остается неопределенность в вопросе о том, в каких взаимоотношениях с материнской магмой находится в действительности флюид, образующий руды «в том виде, как мы их наблюдаем», и каким путем он произошел из нее. Но мне кажется, что те, кто склоняется к гипотезе щелочной жидкости, в примере гранитизации могут найти ободрение, если не определенный ответ.

**Взгляды Шеллера и Росса.** Обращаясь к другим разделам главы III, мы видим, что и Росс и Шеллер окончательно убеждены в том, что господствующим реагентом, участвующим в образовании гипогенных руд в одном случае и пегматитовых разновидностей в другом, является гидротермальный жидкий раствор.

Касаясь изменений, которые претерпели обычные пегматиты, Шеллер говорит:

«Пневматолитические процессы, т. е. состояния газовой фазы, могли иметь достаточно энергии для привноса значительного количества материала, но по окончании реакции едва ли оставалось достаточно энергии для выноса в газовой фазе всего замещенного материала. Уже это одно говорит в пользу гидротермального процесса как более подходящего для выноса, по крайней мере, замещенного материала» [стр. 166].

Шеллер не указывает, были ли эти растворы кислыми или щелочными; но так как наиболее обильными новыми минералами так называемой гидротермальной стадии являются альбит и слюды, возникшие в качестве продуктов замещения преимущественно ортоклаза или микроклина, stanovятся вероятным, что щелочные компоненты присутствовали всегда в достаточном количестве, чтобы играть решающую роль в гидротермальном растворе.

Росс, согласный с Мори в вопросе об отсутствии критических явлений и особенно упирающийся на тот факт, что равновесие между температурой и давлением в первую очередь определяет, представлены ли эманации из магмы в жидком или газообразном состоянии, признает, что в глубоких областях газообразное состояние может развиваться всегда, когда это допускает давление. А потому он откровенно поддерживает возможность существования газовой фазы на любой стадии и на всех стадиях минерализации, которые им описываются. Но он вполне сознает, что допущение существования газовой фазы еще не означает безусловного отсутствия жидкой фазы — другими словами, относительное весовое соотношение газа и жидкости в магматическом выделении будет определяться частным соотношением между давлением, температурой и

составом в данное время и в данном месте. Если образуется достаточная газовая фаза, она выполнит работу, пропорциональную ее массе, составу и энергии; с другой стороны, если образование газовой фазы незначительное, результаты ее воздействия будут затемнены работой, произведенной жидкой фазой.

Беспристрастно и отчетливо признавая возможность проявления в любой момент в изучаемых породах газовой фазы и воздействия газа, Росс при тщательном рассмотрении не находит действительных указаний на ее присутствие или на проявления выполненной ею минералого-химической работы, так как повсюду встречается только с признаками, которые, по его мнению, с физико-химической точки зрения должны быть обусловлены жидкостью<sup>1</sup>. Его систематический анализ физических явлений, господствовавших в разные стадии развития сложного процесса минералообразования, крайне убедителен и поучителен. Привести наиболее интересные отрывки, касающиеся этой серии вопросов, значило бы повторить большую часть статьи. Мы ограничимся здесь лишь немногими цитатами, указав, что в ряде случаев доводы, выдвигаемые на предыдущих страницах против предложений Феннера и Боуэна, находят подкрепление в высказываниях Росса, а иногда являются просто пересказом его взглядов, нашедших свое выражение в сборнике Линдгрена или в более обстоятельной его статье о месторождениях типа Дактаун. Характерными для выводов Росса относительно состояния магматических выделений являются следующие выдержки:

«Мы приходим к заключению, что родоначальная магма рудных месторождений типа Дактаун дифференцировалась на такой значительной глубине, что газовая фаза в ранние стадии кристаллизации совсем не могла существовать и могла образовываться только после того, как порода по крайней мере на две трети стала кристаллической, если только в ней не содержалось невероятно большое количество летучих. Поэтому очевидно, что образование руды не могло быть связано с выделением газов в ранний период интрузивной истории магмы. В более позднюю стадию кристаллизации должна была произойти заметная концентрация летучих веществ в остаточной магме и тогда могла существовать либо жидкая, либо газовая фаза, в зависимости от температуры и величины давления, которое противодействовало выделению газа» [стр. 147—148].

«...порядок растворимости веществ, отлагающих карбонаты, в точности соответствовал порядку растворимости этих карбонатов в жидкой фазе водного раствора и был обратным их относитель-

---

<sup>1</sup> Феннер в своем обзоре явно неправильно толкует основной аргумент Росса. Из того, что Росс признает возможным присутствие как жидкости, так и газа, но не приписывает газовой фазе никакой работы, Феннер делает вывод, что Росс «склоняется определенно к взгляду на жидкость как на главный действующий фактор» [loc cit. стр. 93]. Беспристрастный анализ Росса, проливающий свет на общую ситуацию, показывает, что его оценка действительности газа основана не на его личном предпочтении, а на полноценных фактах, наблюдаемых в природе, и на здравых выводах из физико-химических закономерностей.

ной растворимости, концентрации и способности к переносу в газовой фазе, содержащей хлор и фтор [см. стр. 154]<sup>1</sup>. Эти взаимоотношения показывают, что карбонаты не переносились в газовой фазе, а поступали из материнской магмы в виде жидкой фазы, перемещались в виде жидкой фазы и отложились из жидкой фазы» [стр. 155].

«Очевидно, гидротермальные растворы (жидкая фаза) должны были отлагать жильный материал в карбонатную стадию минерализации и также должны были обладать своим механизмом выделения (сегрегации) внутри магматической полости, как то указывает характерная последовательность кальций—магний—железо. В другие стадии минерализации, вероятно, преобладали жидкие фазы. Однако в те периоды, когда жилы были наиболее проницаемы, могли существовать и преобладать газовые фазы» [стр. 159]<sup>2</sup>.

Что касается вопроса о кислотности и щелочности, Росс говорит по поводу богатых щелочами материалов:

«...наблюдаемые отношения в изверженных породах, равно как и теоретические физико-химические соображения, ясно указывают на причины их улетучивания в позднюю стадию, когда их концентрация увеличивается вследствие кристаллизационной дифференциации. Большие количества серицита, образующиеся в коренной породе, в которой первоначально было очень мало калия, показывают, что породы, через которые проходят выделившиеся растворы, не являются достаточным источником калия и что только кристаллизующаяся магма могла доставить его в соответствующем количестве» [стр. 151].

### ПРИЧИНЫ ОТЛОЖЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА

Вопрос, как и почему минералообразующие вещества, растворенные в рудном флюиде, осаждаются и образуют минералы, которые дают руду, в высшей степени важен при исследовании происхождения эпигенетических типогенных руд. Но в настоящей статье мы не можем задаваться целью обнять вопрос в таком широком объеме. Мы вынуждены ограничиться прежде всего той частью всей генетической проблемы, которая касается природы рудного флюида; поэтому непосредственной темой здесь является поведение минерального вещества, полученного этим флюидом и переносимого им в растворенном виде. Можно сказать, что тема настоящей статьи кончается на том моменте, когда прерывается связь между рудным флюидом и растворенными в нем веществами. Итти дальше значило бы взять на себя огромную задачу.

<sup>1</sup> В связи с этим в обзоре Феннера ставится вполне уместный общий вопрос: не следует ли степень растворимости считать показательной для месторождений, образование которых приписывается жидкостям, равно как степень летучести для месторождений, образование которых приписывается газам? На самом деле, в частном случае, являвшемся предметом обсуждения у Феннера, Росс провел проверку для места отложения карбонатов с обеих точек зрения и нашел, что они приводят к одному и тому же результату, а именно — что транспортирующая среда была жидкой, а не газообразной.

<sup>2</sup> Добавления в скобках Грейтона.

Тем не менее, причины, условия, состав и последовательность отложения минералов из рудного флюида не могут не бросить некоторого света на основные характерные черты самого флюида, и в таком объеме крайне сжатый обзор процессов осаждения растворенного вещества кажется уместным.

На основании главным образом геологических наблюдений, подкрепленных растущим запасом экспериментальных данных о степени устойчивости многих минералов, уже давно было признано, что основными двумя причинами отложения минерального вещества из восходящих горячих растворов являются потеря тепла и химические реакции с окружающими породами. Но это только два из числа многих факторов, оказывающих влияние или потенциально действенных, среди которых могут быть названы: изменение состояния вещества; изменение давления; физическая природа проводящих каналов и прилегающих пород, которой, между прочим, определяются специфические свойства поверхности, подвергающейся воздействию флюида; состояние напряжения в окружающих породах; возможное влияние естественных электрических полей, пересеченных каналами; результаты смешения с другими флюидами; неуловимый и малопонятный контроль над противоречивыми тенденциями при отложении в открытых полостях и при замещении; соотношение между диффузией и течением вещества как средствами переноса растворенного вещества; наконец, почти не обсуждавшийся вопрос о метастабильном равновесии при пересыщении.

Из этих влияющих на растворимость факторов, которые могут повести к насыщению растворов и затем к осаждению, некоторые сравнительно просты и оказывают непосредственное влияние, как потеря тепла (явление простое если не по эффекту, то по крайней мере по своему влиянию), другие же крайне сложны. Химическое взаимодействие с боковой породой относится к этой последней категории, так как большое разнообразие в минералого-химическом составе пород и сложность и изменчивость состава рудного флюида приводят к возможности почти бесчисленных реакций.

Аллен (Allen), отмечая, что особенности жил наводят на мысль об отложении из жидких растворов, говорит: «Повидимому, нет явной связи между летучестью галоидных соединений металлов и последовательностью отложения металлов в жилах»<sup>1</sup>.

Линдгрэн, вероятно, первый ясно осознал, что одним из самых лучших способов обогащения знания химической природы вынесенного в отдаленном прошлом рудного флюида является изучение влияния, которое он оказывает на горные породы<sup>2</sup>, соприкасаясь с ними, так как первоначальный различный и неустойчивый состав последних в этом случае может быть предметом наблюдений наряду с разнообразными твердыми продуктами реакций, которые также сохраняются для сравнения и интерпретации, в то время как

<sup>1</sup> Chemical aspects of volcanism. Jour. Franklin Inst., 193, 1922, 52.

<sup>2</sup> Metasomatic processes in fissure-veins. A. I. M. E. Trans., 30, 1900, 578—692.

многие из других влияний или проявлений, приуроченных ко времени развития процесса, не оставили никаких следов. Именно под этим углом зрения особенно уместны изучение и испытания в интересующем нас направлении.

Ни Боуэн, ни Феннер не задаются целью среди множества влияющих факторов доказать отсутствие или бессилне каких-либо других воздействий на отложение минерального вещества, кроме только того, которое они, повидимому, особо выдвигают, а именно, нейтрализации предполагаемой ими кислотности рудного флюида. Если бы нормальный рудный флюид действительно был кислотным и, как они полагают, благодаря этому главным образом удерживал растворенные в нем вещества, хотя бы в процессе выноса из магмы и переноса на известное расстояние от нее, то вряд ли бы возникло сомнение, что нейтрализация кислотности оказывает глубокое влияние на осаждение минералов.

Боуэн утверждает относительно кислых растворов:

«Растворы, действуя на порообразующие минералы, растворяют их и отлагают новые вещества, но так как перевод вещества в раствор сопровождается более или менее полной нейтрализацией растворов, то отлагаются те вещества, перенос которых зависит от растворов, сохранивших свою кислотность. Поэтому сульфиды и некоторые окислы находятся среди отложившихся веществ» [стр. 139].

Феннер говорит:

«Очевидно, что присутствие избытка HCl имеет существенное значение для тех случаев, которые здесь рассматриваются, и что нейтрализация кислоты при ее взаимодействии с вмещающей породой производит осаждение различных сульфидов и окисей» [стр. 91].

Вполне допустимо в поисках истины становиться на ту точку зрения, что рудный флюид первоначально был кислым и что осаждение минералов из него вызвано было нейтрализацией кислоты с целью убедиться, соответствуют ли эти предположения фактам. Но логически непоследовательно ссылаться при этом на отложение минералов, никем не оспариваемое, в качестве довода, подтверждающего одновременно справедливость этих двух взаимно связанных звеньев выдвинутого предположения. Действительная проверка предположений возможна только на материале, который дают сами руды и прилегающие к ним породы.

Существует так много других причин отложения минерального вещества, которые должны быть приняты во внимание при рассмотрении бесчисленных местонахождений, и, с другой стороны, такое безграничное число случаев, в которых нейтрализация кислотности, повидимому, не в состоянии была привести к наблюдаемому отложению, что, указывая на одно это влияние как на кофенную причину, лежащую в основе отложения минерального вещества в обширном семействе гидротермальных руд, вряд ли можно рассчитывать на широкое признание этого положения среди геологов, знакомых с такими рудами. Одного уже указания на широкое распространение серицита, альбита и адуляра и щелочноземель-

ных карбонатов как минералов, образовавшихся в тесной ассоциации с собственно рудными минералами и в непосредственно прилегающих боковых породах, представляется достаточным, чтобы сделать точку зрения «нейтрализации кислоты» (а это почти всегда обозначает «сильной кислоты») совершенно неприемлемой для большинства этих руд. Другой убедительный случай независимости от нейтрализации мы имеем в нередких разительных примерах селективного влияния на отложение, оказываемого разными структурами (пересечения, зональное распределение и т. п.) или разными вмещающими породами. Для геологов, постоянно встречающихся с подобными примерами при посещении разных районов, подробное перечисление примеров излишне. Для тех же, чей личный опыт небогат такими показательными случаями, сошлемся на один убедительный пример; хотя случай этот, допустим, и крайний, он все же показателен в интересующем нас отношении для тех загадок, которые задают гипогенные рудные месторождения на всем земном шаре.

Случай, о котором идет речь, относится к району Кобальт, Онтарио, где вдоль западного берега озера Кобальт многочисленные, но бедные кварцевые жилы с сульфидами ведущих металлов в лавах Keewatin претерпевают почти внезапно коренное превращение в жилу с кальцитовым выполнением и с обильными арсенидами кобальта и никеля и баснословно богатым содержанием серебра у резкой плоскости контакта при переходе вверх в конгломерат Cobalt<sup>1</sup>. По обе стороны от этого контакта жилы, по видимому, одинаковы по отчетливой, резко оконтурированной структуре и мощности, а также по совершенно незначительным изменениям граничащих с ними горных пород. Здесь нет признаков, указывающих на присутствие кислоты в растворе или на ее нейтрализацию; но если бы даже кислота присутствовала и была нейтрализована, трудно себе представить, как можно объяснить отложения, которые здесь имеются.

Было бы большим подспорьем при поисках руд, если бы основной или даже одной из важных причин отложения руд могла считаться нейтрализация кислоты, содержащейся в рудных растворах. Но, к сожалению, причины и условия осаждения минерального вещества из гипогенных растворов значительно более сложны и тонки, чем эта простая и легко объяснимая реакция. Даже известняки не потому являются «благоприятными» породами для гипогенных рудных месторождений, что они так легко поддаются действию кислот, а прежде всего потому, что карбонатные соединения сравнительно нестойки и в других отношениях, например в отношении температур. Ни один другой существенный породообразующий минерал не сложен наполовину, грубо говоря, из летучих компонентов, притом очень легко летучих<sup>2</sup> при разнообразных условиях. Ограниченность заслуживающих внимания полостей рас-

<sup>1</sup> Некоторые примеры, с поразительной четкостью наблюдаемые в подземных выработках, были продемонстрированы д-ру Батлеру и мне в 1922 г. Эменсом (Warren H. Emens) геологом работающей здесь компании.

<sup>2</sup> Критическая температура и давление для  $\text{CO}_2$  равны  $31^\circ\text{C}$  и 78 атмосферам.

творения вокруг большей части гипогенных руд в известняке и отсутствие чего-либо аналогичного обширным известняковым пещерам, возникающим благодаря вадозовым водам, служат подтверждением того, что обычный гипогенный рудный флюид не содержит сильных кислот. Фактором, обусловившим вынос  $\text{CO}_2$  в крупных масштабах из известняка, был  $\text{SiO}_2$  силикатов.

### ДВИЖУЩАЯ СИЛА

**Общая проблема.** Те исследователи, которые придерживаются взгляда, что эманации из магмы выделяются в газовой фазе, в отношении движущей вверх силы усматривают явное преимущество в свойствах газов быстро и безгранично расширяться, а также в низкой вязкости и низком удельном весе газов по сравнению с жидкостями. Дэй и Аллен решительно ставят вопрос следующим образом:

«...если вода совсем выносятся из магмы, то обязательно в виде пара. Если кто-либо склонен возразить, что в нашем обсуждении были упущены из виду какие-нибудь важные факторы, противоречащие выводам, он сам встретится с необходимостью объяснить, как жидкая вода могла подняться до поверхности. Сила, способная совершить такую работу, до сих пор не обнаружена»<sup>1</sup>.

Справедливо ли или нет, но общепризнанным, повидимому, является взгляд, что проблема движущей силы может считаться решенной, если то, что перемещается от магмы к земной поверхности, состоит только из газа. Но со стороны некоторых авторов проявляется тенденция, в виду благоприятных свойств газа и в связи с тем, что движение вверх фактически осуществляется, считать движущийся флюид целиком или главным образом состоящим из газа. На самом деле это никоим образом не является необходимостью, что и было определенно отмечено Линдгреном:

«Я прихожу к выводу, что то, что геофизики называют магматическими эманациями, подымалось в жидком виде»<sup>2</sup>.

Относительно же механизма и движущей силы он вынужден был добавить:

«Я опасаясь, что нам придется вернуть вопрос геофизикам: требуется движущая сила, достаточная для подъема жидкой эманации от вершины батолита до земной поверхности. Может быть, кто-нибудь даст ответ на этот вопрос?»<sup>3</sup>.

Годом позже Линдгрэн сам предлагает объяснение:

«Повидимому... растворы поднимаются к поверхности... Движущей силой могло бы служить непрерывное выделение газов, которые толкают столб конденсированного раствора вперед себя»<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> The source of the heat and the source of the water in the hot springs of Lassen National Park. Jour. Geol., 32, 1924, 185.

<sup>2</sup> Hot springs and magmatic emanations. Econ. Geol., 22, 1927, 192.

<sup>3</sup> Loc. cit.

<sup>4</sup> Mineral Deposits, 3-е изд., 1928, стр. 134.

Росс, повидимому, очень близко придерживается этого взгляда Линдгрена, хотя и рассматривает жидкость как первичную эманацию, а не как конденсат. Он говорит:

«Кипящая.. газовая фаза, поднимающаяся через связанную с ней жидкую фазу, действовала бы как сила, движущая жидкость в направлении уменьшения давления» [стр. 158].

Близкого взгляда придерживается и Боуэн:

«Можно, конечно, задать вопрос — будет ли остаточные расплавы (щелочные), до тех пор, пока они остаются в жидком состоянии, иметь большую тенденцию к выделению из магматической массы. Возможно, что только после образования пара появляется движущая сила, необходимая для выделения остаточного расплава и диффузии вновь конденсированных (кислых) растворов» [стр. 137].

Это, разумеется, не настолько крайняя и непримиримая точка зрения, как приведенный выше взгляд Дэй и Аллена, возможно потому, что Боуэн сознает необходимость «...предположить некоторое движение и возобновление кипения остаточных растворов в пегматитовых каналах» [стр. 137].

Смысл этого «движение и возобновление» обсуждается ниже на стр. 114.

Феннер не останавливается специально на движущей вверх силе, довольствуясь, повидимому, возможностью положиться на действие газовой фазы, которую он рассматривает как весьма обильную в течение большей части всего эпизода рудообразования.

Очевидно, что вопрос о движущей силе тесно переплетается с вопросом о возникновении и выделении независимого, особого рудного флюида из магмы. Эта тема уже рассмотрена в разделе «Механизм выделения», где было указано, что защитники идеи эманации в виде газа имеют преимущество в аргументации в связи с возможностью воспользоваться бесспорно иной фазой, чем та, которой представлена магма. Допустив образование каки-то путем особого рудного флюида, остается подробнее рассмотреть механизм выделения его из магмы (исходной или пегматитовой) и подъема в вышележащие породы.

**Свойства газов (или жидкостей) на глубине.** Мы привыкли мыслить о различиях в свойствах газов и жидкостей, исходя из нашего каждодневного опыта, когда жидкость в сотни раз плотнее газа (например в 1250 раз для  $H_2O$  при  $0^\circ C$  и 1 атмосфере). Но, разумеется, такой резкий контраст не сохраняется на глубине. Рассмотрим в качестве примера условия, господствовавшие во время образования руд типа Дактаун, по Россу, «вероятно на глубине нескольких десятков тысяч футов» ниже поверхности того времени. Газовая фаза, если она существовала там, должна была быть сильнейшим образом сжата<sup>1</sup> и по своей плотности, вероятно, очень

<sup>1</sup> Например, Бриджмен (P. W. Bridgman) экспериментально доказал, что при высоких давлениях газы настолько уменьшаются в объеме, что значительная часть наблюдающейся сжимаемости «вызывается сжимаемостью самих атомов или молекул» (Physics of high pressure, 1931, 112). Молекулярная или атомная упаковка жидкости может быть только не намного плотнее. Горансон (личное сообщение) показал, что нет ничего абсолютного или крайнего в кри-

сильно приближалась к эквивалентной жидкости<sup>1</sup> при сравнимых давлении и температуре (субкритической), которая допускала бы существование жидкой фазы. Если прав Мори, который пришел к заключению, что насыщенный силикатами богатый водой раствор отличается более высокой критической температурой, чем та, которой характеризуются нормальные магмы, — а все относящиеся сюда соображения подтверждают этот взгляд, — то в зависимости от давления, при температуре магмы может существовать либо одна жидкая фаза подобного раствора, либо это жидкость и находящаяся с ней в равновесии газовая фаза. Если же давление таково, что допускает сосуществование этих двух фаз, наилучшей экстраполяцией, исходя из имеющихся экспериментальных данных, и лучшим выводом из существующих объяснений, повидимому, является заключение, что эти две фазы в общем обладали плотностью одного и того же порядка, хотя плотность жидкости всегда была несколько больше. При этих условиях, поскольку они касаются магматических эманаций, в значительной мере утрачивается общепризнанное преимущество газа перед жидкостью того же состава с точки зрения всплывания и, следовательно, легкости выделения из магмы и непосредственного ее окружения. Кроме того, в нижней части проводящего канала работа, необходимая для подъема столба жидкости, не должна сильно отличаться от работы, которую пришлось бы затратить на подъем столба сильно сжатого газа.

Вероятно, следующее место после плотности в данном случае занимает вязкость. Здесь экстраполяция, по имеющимся данным, для условий температур и давлений, свойственных магме, значительно менее надежна. В качестве исходного положения мы можем отметить, что газы более сильно отличаются по вязкости от жидкостей, чем можно думать, судя по относительным плотностям<sup>2</sup>.

тическом объеме газа, так как при соответствующем давлении он довел надкритический пар до объема, значительно меньшего, чем критический объем жидкой воды.

<sup>1</sup> Если жидкость представлена водным раствором, т. е. содержит растворенные вещества, как это должно быть в случае богатого водой экстракта, происходящего из магмы, обнаруживается тенденция к уменьшению сжимаемости раствора по сравнению с сжимаемостью чистой воды [Bridgman, op. cit., стр. 146]. Кроме того, особенно в случае воды, растворенные соли „повышают термическое расширение в гораздо большей степени, чем можно было ожидать“ [R. E. Gibson. The nature of solutions and their behavior under high pressure. Sci. Monthly. 16, 1938, 113]. Оба эти обстоятельства в свою очередь стремятся больше сблизить богатые водой жидкие растворы и газы в отношении их плотности в магматической обстановке.

<sup>2</sup> Например, при 200° F (93,3° C) и соответствующем равновесном давлении (0,78 атмосферы) жидкая вода примерно в 2023 раза плотнее пара, но только в 24,1 раза более вязка, что дает отношение плотности к вязкости 1:84. При 600° F (315,6° C) и 105 атмосферах жидкость в 11,7 раза плотнее и в 1,8 раза более вязка, чем пар; отношение плотности к вязкости меньше чем 1:7 [Keenan and Keyes. Thermodynamic properties of steam. 1936, стр. 31, 33, 76]. Проф. Берри (C. H. Berry) любезно сообщил мне, что некоторые данные относительно вязкости пара при проверке не были подтверждены последними работами (Hawkins, Solberg and Potter. Am. Soc. Mech. Eng. Trans., Prelim. printing, Dec. 1939).

Вязкость жидкостей резко возрастает с увеличением давления<sup>1</sup>, вязкость же газов теоретически не зависит от давления при низких давлениях, но возрастает, вероятно с увеличивающейся скоростью, в пределах тех давлений, о которых здесь идет речь. Вязкость жидкостей сильно убывает с возрастанием температуры<sup>2</sup>, в то время как вязкость газов увеличивается прогрессивно с повышением температуры. Подобный пример приведен в подстрочном примечании [на стр. 107]. Повидимому, не существует сравнимых экспериментальных данных по вязкости жидкостей и газов при одновременном действии температур и давлений, близких к господствующим в магме. Все же проф. Бриджмен высказал мне свое мнение, что при данных обстоятельствах, может быть, надо считать наиболее правдоподобным, что относительная вязкость газов, по сравнению с вязкостью жидкостей, приближается к тому же порядку соотношений, как и в случае их плотностей.

Если это верно, легкость улетучивания газа сквозь кристаллическую решетку или еще мягкую кристаллизирующуюся магму и сквозь тонкие трещинки и поры в твердой перекрывающей породе будет не очень сильно отличаться от способности к проникновению жидкости близкого в общем состава при сходной концентрации растворенного вещества.

По совместному проявлению плотности и вязкости газовая фаза при выносе из магмы особого рудного флюида будет иметь некоторое преимущество перед соответствующей жидкой фазой, однако и приближенно не напоминающее преимуществ, которые мы наблюдаем ежедневно для этих двух состояний материи.

Рассмотрим теперь относительные преимущества газа и жидкости как средства, поддерживающего течение рудного флюида, после того как он отделился от магмы; другими словами, каким образом флюид выкачивается из магматического источника к месту разгрузки на поверхности или вообще к тому месту, где он, смешиваясь, теряет свои характерные черты в этом открытом в тектурном отношении участке, богатом грунтовыми водами? Необходимо рассмотреть четыре случая: проводящий канал заполнен 1) газом от магмы до поверхности, 2) смесью жидкости и газа, 3) газом внизу и жидкостью сверху и 4) жидкостью от магматической камеры до поверхности.

**Газ от магмы до поверхности.** Если предположить, что газ выкипает из первоначальной магмы или из пегматитового расплава и в виде газа же, исключительно или преимущественно, продол-

<sup>1</sup> Среди большого числа изученных жидкостей Бриджмен нашел, что вода — жидкость, больше всего интересующая нас здесь, — ближе всего стоит к руги по м е д л е н н о м у возрастанию вязкости с увеличением давления Bridgman, op. cit стр. 345).

<sup>2</sup> У жидкостей при высоком давлении влияние температуры на уменьшение вязкости больше, чем влияние давления на увеличение ее. Например, Дэн и Берч (Dane and Birch) нашли для жидкой  $B_2O_3$ , что увеличение абсолютного давления в 1000 раз, т. е. от 1 до 1000 атмосфер, увеличивало вязкость в 4,5 раза, в то время как повышение абсолютной температуры на 25%, т. е. с 359° до 516° С, имело следствием уменьшение вязкости в 10 000 раз (Jour. App. Phys 9, 1938, 673).

жacket весь путь до поверхности, то способ и легкость продвижения вперед представляются очевидными и достаточными. Восходящий газ непрерывно движется в направлении участков, все меньше и меньше стесненных давлением, стремясь непрерывно все к большему и большему расширению — движущая сила, таким образом, не только проявится у магматического источника, но и возрастает в течение всего пути по проводящему каналу. Потеря тепла, отдаваемого газом холодным стенкам проводящего канала (что должно, наоборот, сказаться в уменьшении объема газа), неуклонно теряет свое значение по мере развития процессов минерализации, так как стенки согреваются приносимым теплом. Другими словами, уменьшение давления вдвое, с вытекающей отсюда тенденцией к удвоению (на самом деле несколько меньше, чем удвоение) объема газа, могло наступить на определенном вертикальном отрезке проводящего канала раньше, чем уменьшение вдвое температуры по абсолютной шкале (т. е. с  $400^{\circ}\text{C}$  до  $63,5^{\circ}\text{C}$ ) на том же самом вертикальном участке, которое потребовалось бы для уменьшения вдвое<sup>1</sup> объема газа.

Эти соображения, выдвигающие газовую фазу как особо благоприятную для выкачивания магматической эманации вверх, в противоположность этому, делают особо невероятной конденсацию газа снова в жидкость на каком-то уровне в канале выше намечаемого места кипения, как это предполагалось Боуэном и Феннером. Таким образом, если остановиться на вновь возникающей конденсации как способе образования той гидротермальной жидкости, наличие которой Боуэн по соображениям физико-химического порядка, а Феннер, руководствуясь наблюдениями, считают необходимой для образования руд «в том виде, как мы их наблюдаем», приходится отказаться от большей части преимуществ в отношении продвижения, которые имеет газовая фаза благодаря своей способности к безграничному расширению. Этот вывод будет рассмотрен ниже.

**Смесь жидкости и газа от магматической камеры до поверхности.** Мнение, которого придерживаются и Линдгрэн и Росс (а до некоторой степени, повидимому, и Боуэн), как мне кажется, сводится к тому, что рудный флюид образует смесь или становится смесью газовых пузырьков и жидкости в таких соотношениях массы к объему, что газ, в силу его меньшей плотности и большей способности к расширению, гонит жидкость впереди себя.

Для того, чтобы поддерживать течение по каналу в продолжение периода, необходимого для накопления рудного месторождения, в механизме продвижения вперед, как приходится предполагать, должны были бы непрерывно чередоваться жидкость и газ, за-

<sup>1</sup> Так как при высоких температурах и давлениях отклонения от идеальных законов Бойля и Шарля, касающихся газов, в большей степени связаны с давлением, чем с температурой, отсюда следует, что при собственных геологических процессах температуре и давлении уменьшение (скажем, вдвое) давления приведет к несколько меньшему увеличению объема, чем может быть уравновешено при соответствующем понижении (наполовину) абсолютной температуры, что в итоге должно дать некоторое уменьшение объема.

полняющие канал, т. е. пузыри газа, из которых каждый толкает вверх сравнительно короткий вертикальный столб жидкости — своего рода схема газового инжектора. Подобный механизм, придя в движение, должен будет работать в верхних частях проводящего канала, где более умеренное сдерживающее влияние давления делает возможным всплывание расширившегося газа в сравнительно значительной степени и где вес смеси в распространяющейся вверх колонке сравнительно невелик. Но с большими затруднениями должно быть связано приведение схемы в движение, и она будет менее эффективной на глубине, где вес вышележащего столба значителен, а небольшое преимущество, которое газ, как было пояснено, имеет по своей плотности перед жидкостью, дает ему соответственно лишь небольшую подъемную силу. Так как и Линдгрэн и Росс, повидимому, считают, что жидкая фаза в среднем резко преобладает над газовой по весу, а следовательно, на глубине, вероятно, и по объему, подобный столб перемежающихся жидкости и газа, поскольку он зависит только от этого способа продвижения, может оказаться почти или вполне статическим, а не активно текущим, в связи с тем, что на любом уровне, помимо веса, должно быть преодолено еще сопротивление трения лежащего выше столба. Кроме того, самый факт, что столб жидкости отличается «легкостью», ровно ничем не способствует подъему жидкости, поскольку он в действительности не связан внизу с соответствующим столбом «тяжелой жидкости».

На самом деле, в дополнение к активному действию всплывающего газа (обусловленному различиями в плотности), здесь должна сказаться сила его расширения, так что при непрерывном течении флюид как целое должен был бы беспрестанно расширяться и, вследствие этого, с возрастающей быстротой распространяться вверх, тем самым увеличивая сопротивление трению для столба в целом. Больше того, такое расширение газа, благодаря подъему к областям с более низким давлением приведет к тому, что газ начнет поглощать тепло из находящейся по соседству жидкости и окружающей породы, в связи с чем вокруг везде проявится тенденция к понижению температуры. Это, в свою очередь, приведет хотя бы к тому, что более значительная часть жидкости не будет доведена до кипения, что вязкость жидкой части увеличится и что дальнейшее расширение газа в известной мере упадет под некоторый контроль.

Таким образом, в этой сложной цепи взаимодействий скажутся явные трудности, хотя и не исключена возможность, что в отдельных случаях равновесие, определяемое температурой и давлением на разных глубинах вдоль проводящего канала, в состоянии будет их преодолеть. Надо думать, что найдут себе место и другие случаи, когда отношение потери тепла к потере давления или приведет на каком-то уровне к конденсации газовой фазы и включению ее в жидкую фазу (т. е. к случаю, описанному в следующем разделе) или вызовет почти сплошное кипение жидкости (т. е. будут созданы по направлению вверх условия, по существу идентичные с описанными в предыдущем разделе).

Но имеется и еще одно затруднение. В приуроченном к каналу столбе, в который поступают как газ, так и жидкость, может иметь место один из следующих двух случаев: 1) газ может образовать пузыри, чередующиеся с жидкостью, причем каждый пузырь, наподобие хлопущки, проталкивает вверх приходящуюся на его долю и расположенную над ним часть более тяжелой жидкости, или же 2) газовые пузыри, более легкие, чем жидкость, независимо поднимаются сквозь нее, не вызывая ее подъема. Какой из этих случаев наступит, это зависит от ряда обстоятельств. Благоприятно для первого из них эти обстоятельства сложатся при достаточно малом поперечном сечении канала в наиболее широком его месте, при большой скорости движения газа вверх по отношению к поперечному сечению канала, значительной вязкости жидкой части, высоком поверхностном натяжении жидкости и гладких стенках; противоположные условия будут благоприятствовать второму случаю.

Очевидно, во всяком случае, что если только скорость движения газа не очень велика (что возможно при значительной разности плотностей у газа и у жидкости), газ будет проявлять тенденцию самостоятельно прорываться через жидкость в виде пузырей, поскольку отверстия канала не слишком малы и по преимуществу трубчатого, а не пластинчатого сечения. Если бы даже вдоль проводящего канала встречались отдельные суженные места, где поднимающийся газ гнал бы жидкость впереди себя, на всех более широких участках газ подымался бы самостоятельно, очень мало способствуя, в качестве движущей силы, подъему жидкости. В зависимости главным образом от скорости движения газа, разделение будет либо совершенным (вся жидкость останется позади) при небольшой скорости, либо, при большой скорости, часть жидкости будет увлечена или «распылена» и унесена в стремительном потоке «влажного» газа. Скорее всего, если только исключить случай сравнительно большого объема быстро движущегося газа, значительная часть жидкости или даже вся она останется позади. Если, как полагают Линдгрэн и Росс, процесс рудоотложения совершается преимущественно жидкой фазой, предложенный ими механизм продвижения, повидимому, будет сильно ограничен в своем действии или же окажется вовсе недействительным, если только все проводящие каналы не будут отличаться малыми<sup>1</sup> трубообразными поперечными сечениями почти на всем их вертикальном протяжении. В таких плоских трещинах, к которым обыкновенно приурочены жилы, продвижение жидкости газом, вероятно, было бы возможно только при сравнительно высоком процентном отношении объема газа к объему жидкости и при сравнительно большой скорости его потока; поэтому аналогия с природным газом, «выкачивающим» жидкую нефть из обсадной трубы со сравни-

<sup>1</sup> Газовые пузыри, поднимающиеся в горячих источниках, достигают близ поверхности воды нескольких дюймов в диаметре, причем в прозрачной воде нередко видно, как они при подъеме распадаются на более мелкие пузыри. Можно почти не сомневаться в том, что на глубине размеры пузырьков меньше наблюдаемых около самого устья.

тельно небольшим круглым сечением, является в данном случае весьма сомнительной.

С другой стороны, если отверстия по своим размерам приближаются к капиллярам — а к этой категории относится немало проводящих каналов, например в проницаемых пластах, смесь жидкости с пузырьками почти наверное встретила бы в своем движении большие затруднения, чем один газ или одна жидкость.

Взятые в целом все эти «если» и «и» в рассматриваемой схеме инжектора с газовыми пузырями делают последнюю крайне сомнительной как общее и надежное средство выкачивания сравнительно больших объемов рудного флюида из магмы к поверхности вдоль проводящих каналов тех размеров и очертаний, какие присущи, с одной стороны, образованию жил путем заполнения открытых трещин и открытых полостей таких хотя бы размеров, которые не противоречили бы беспорядочным обломкам (или отторженцам) включающих пород обычно встречаемой величины и, с другой стороны, тонкозернистой вкрапленности и замещению. Если механизм не в состоянии объяснить образование подобных месторождений и если для его объяснения приходится прибегать к другим схемам движущей силы, эти схемы могли бы оказаться подходящими и для всех вообще случаев.

**Газ внизу, жидкость — от газа до поверхности.** Если предположить, что газ, выделившийся из магматического (или пегматитового) расплава, где-то выше вдоль канала снова конденсируется, как это следует по Боуэну и Феннеру, этот газ может рассматриваться как большой «пузырь»<sup>1</sup>, занимающий часть столба канала, выше- и нижележащие участки которого заняты жидкостью. Из такого именно сложного столба флюида должны были, по мнению защитников этого взгляда, образоваться руды.

Но такая картина — жидкого продукта конденсации вверху и газа внизу — не свободна от некоторых затруднений. Особенно ясно осложнения выступают, если исходить из предположения Феннера, что уровень конденсации лежит на значительном расстоянии выше уровня кипения в течение значительной части эпизода минерализации. Это ведет к предположению об одном огромном газовом «пузыре», безраздельно заполняющем соответствующую часть проводящего канала. Газовый «пузырь» поддерживает лежащий выше жидкий продукт конденсации, и он же должен оттеснить эту жидкость, чтобы открыть путь для подъема новых порций флюида. Между тем, как было уже указано в предыдущем разделе, поперечное сечение проводящего канала близ нижнего конца этого предполагаемого столба жидкости должно быть везде сравнительно небольшим как по ширине, так и по длине, чтобы избежать

<sup>1</sup> Для целей настоящей аргументации этот большой пузырь может на самом деле быть значительным или незначительным и может в действительности состоять из одного-единственного пузыря или из агрегата пузырей, разбросанных на определенном участке столба жидкости.

обратного стекания жидкости по стенкам<sup>1</sup> и подъема газа через жидкость и продвижения его дальше до поверхности — словом, обмена местами между газом и жидкостью. Аналогичная судьба ожидает построение Боуэна во всех случаях, кроме тех, когда проводящий канал отличается малым сечением трубчатой формы, хотя, правда, недостаточно полное изложение геометрической стороны в его концепции затрудняет точное суждение по его выводам.

Так как, к тому же, однократное заполнение проводящего канала подобным столбом флюида смешанного состава еще не может привести к образованию рудного месторождения в связи с низкой концентрацией пригодных к осаждению растворенных веществ в газе и лежащем над ним жидком конденсате, должны иметь место бесчисленные последовательные заполнения канала непрерывно текущим потоком. Если в течение этой длительной операции вес газа, образующегося у дна «пузыря» при кипении, уравнивает вес газа, получающегося от конденсации газа вверх «пузыря», объем и положение «пузыря» будут стремиться оставаться неизменными в продолжение всего процесса. В каком-то приближении такие условия должны существовать на протяжении значительной части всего времени, в течение которого происходит магматическая эманация, если соответствующие взгляды Боуэна и Феннера на рудоотложение остаются в силе по отношению ко всему огромному вертикальному разрезу, наблюдаемому в рудных месторождениях. Это приводит нас, таким образом, к представлению о газовом «пузыре» более или менее постоянного объема, который удерживается в относительно постоянном положении вышележащей «пробкой» из жидкости в течение почти всего, если не всего периода отложения минерального вещества.

При таких условиях большая часть преимуществ для продвижения, которые вытекают из наличия газовой фазы, отпадает, так как не могут быть использованы потенциальные способности к безграничному расширению, более низкая плотность и меньшая вязкость газа. Поскольку же вопрос касается движущей силы, конденсация вверх в сильной степени умалает эффект кипения вниз: газовый «пузырь» безнадежно заключен в столбе жидкости. Что же касается «необходимой движущей силы для... диффузного проникновения вновь конденсированного (кислого) раствора», приписываемой Боуэном присутствию газа, то давление в любой точке будет меньшим в газе и не большим в находящейся над ним жидкости, чем в том случае, если бы по всему проводящему каналу имелась только одна жидкость.

**Место кипения.** В рассмотренных выше трех случаях, отвечающих предположению о том, что проводящий канал соответственно заполнен только а) газом, б) смесью жидкости и газа и в) жидкостью вверх и газом вниз, место или уровень, на котором происходит предполагаемое кипение, и последствия, вытекающие из этого, здесь или в другом каком-нибудь месте, приобретают зна-

<sup>1</sup> Пока жидкость не достигнет глубины, на которой начнет снова кипеть.

чение для механизма продвижения и должны быть рассмотрены до обсуждения четвертого случая — канала, заполненного жидкостью.

Начнем с концепции кипения Боуэна. По его представлению, из пегматитового расплава выкипают летучие компоненты. Продукт выкипания должен получиться в весьма подчиненном количестве по сравнению с оставшейся фракцией, из которой выделились летучие компоненты. Для того, чтобы накопилось такое количество испарившейся фракции, которое в состоянии дать внушительное количество особого рудного флюида, по моему мнению, должно иметь место одно из следующих двух условий. В первом случае место кипения должно опускаться в массу девственного пегматитового расплава, так что образующийся при этом газ вынужден в виде пузырей прокладывать себе путь через возрастающий в вышину столб лишенной летучих жидкой фракции. Относительно связанных с таким предположением трудностей, рассмотренных в одном из более ранних разделов, напомним здесь, что так как газ, по Боуэну, образуется при ретроградном кипении, подъем газа из опускающегося места кипения должен осуществляться проникновением через увеличивающуюся в толщину массу пегматита, в большей или меньшей мере уже выкристаллизовавшегося. Боуэн, по-видимому, почувствовал некоторые связанные с этим трудности и, судя по его словам, как будто склонен опереться на второе условие, что «может быть необходимо предположить некоторое движение и возобновление кипящих остаточных растворов в пегматитовых каналах» [стр. 137].

Но как может быть осуществлено подобное «движение и возобновление» девственного (еще содержащего летучие) пегматитового расплава, если не благодаря давлению на него со стороны нижележащего магматического источника? Короче говоря, если будет иметь место подъем девственного расплава, то это произойдет без участия газовой фазы под ним, а следовательно, придется искать какую-то другую причину его подъема. Если же эта «другая причина» продвижения вверх может быть принята для данного случая, то отпадает необходимость прибегать к газовой фазе в качестве движущей силы и для всей системы. Наконец, если движение вверх пегматитового расплава удерживает уровень кипения в проводящем канале в неизменном положении, остаточный расплав, утративший выкипающие свои составные части и в связи с этим лишь незначительно сократившийся в своей массе, будет продолжать расти, обогащаясь выделяющимися в нем кристаллами, и начнет таким образом вытеснять газ или его конденсат из проводящего канала (см. стр. 35). Во всех случаях, следовательно, схема как будто оказывается несостоятельной.

Поскольку обзор Феннера работы Росса представляет измененную концепцию Боуэна относительно выделения из остаточного (пегматитового) расплава, а не непосредственно из родоначальной магмы (см. стр. 24), он видимо должен разделить такую же участь, как и взгляды Боуэна, касающиеся продвигающего механизма. Если, с другой стороны, Феннер в основном остается при своем

мнении относительно приуроченности во времени и разделения, как оно отражено в сборнике Линдгрена, самый подъем газа в виде пузырей из обширного магматического тела в магматическую камеру и дальнейшее движение газа вверх по проводящим путям в вышележащие породы на первый взгляд, как будто, является простым процессом.

При более близком ознакомлении, однако, простота эта оказывается призрачной. Прежде всего, расположенная выше «пробка» в виде жидкости, образующейся там, где газ снова конденсируется, ставит пределы расширению газа, как это было доказано выше. Затем, если выделение вещества, образующего эманации, ведет к сокращению объема (наравне с массой) остающегося расплава, какая-то действующая снизу сила, независимо от кипения, должна поддерживать подъем жидкости до потолка ее камеры, так как в противном случае в верхней ее части образовалось бы заполненное газом пространство (аналогичное «сухопарнику» в котле), а после того, как газ найдет себе выход и где-то выше примет участие в образовании руд, свод должен будет обрушиться<sup>1</sup>. С другой стороны, если выделение эманации не приведет к сокращению объема остающегося магматического раствора, это может произойти только в силу какой-то присущей системе тенденции<sup>2</sup> к расширению, т. е. к уменьшению плотности с соответствующим одновременным выделением газа. В обоих случаях или эта «независимая сила», или эта «присущая тенденция» сами по себе уже достаточны для приведения в движение (перемещение) вещества эманации, и уже нет необходимости прибегать к образованию или к свойствам газовой фазы.

**Выжимающее давление, вызванное столбом вышележащих пород.** Предположим, возникает мысль, что в только что приведенном случае свод после удаления эманации обрушится. Причиной обрушения служит вес вышележащего столба пород. Упомянутое Феннером [стр. 73] «гидростатическое давление, вызываемое весом лежащих над магмой пород», неизбежно распространяется на всю подвижную систему, независимо от того, произойдет ли обрушение или нет, образуется ли особый рудный флюид или нет, является ли рудный флюид жидкостью или газом и удерживается ли этот флюид в жидком или газообразном состоянии в магматической камере или удаляется из нее. Следовательно, вес лежащего выше столба пород в состоянии вызвать движение вверх любого из этих флюидов<sup>3</sup> по любым трещинам или другим возможным путям движения, по крайней мере до тех пор, пока не установится

<sup>1</sup> Даже небольшие своды в породах, лежащих на небольшой глубине, как, например, в забоях, обрушатся через несколько секунд или несколько десятилетий, если останутся без крепления.

<sup>2</sup> Такой, например, какая проявилась бы, если бы объем исходного раствора (магмы) оказался меньшим, чем сумма объемов, его составляющих (кристаллы плюс остаточный расплав). Это, повидному, преобладающий случай для растворов, который, как это установлено, остается в силе и при высоких давлениях, хотя и в менее резко выраженной степени.

<sup>3</sup> Если плотность такого флюида ниже, чем у твердой породы.

равновесие между давлением лежащего над ними столба пород и «напором» столба флюида в проводящем канале. Так как рудный флюид, безразлично, жидкий ли он или газообразный, почти наверное будет обладать плотностью, не достигающей половины плотности окружающих пород, этот механизм потенциального обрушения кровли будет в состоянии поддерживать весь вертикальный столб рудного флюида и сохранит еще резерв такой же величины для преодоления трения при течении. Следовательно, он сможет не только вытеснить рудный флюид на всем пути вверх до земной поверхности, но и продолжать вытеснять его в той мере, в какой этот флюид будет вновь возникать и достигать ближайшего к магме конца проводящего канала. А так как рудный флюид, раз он образовался, должен быть не только менее плотным, но и менее вязким, чем первоначальная расплавленная магма, он без затруднений достигнет проводящих каналов и воспользуется ими. В частности, это будет справедливо, если верхняя периферическая часть магмы уже настолько выкристаллизовалась, что образует тонкую кристаллическую сетку или кристаллический скелет, как полагает Феннер [стр. 79], до которой доходят или в которую переходят трещины, ведущие вверх.

Если, следовательно, допустить рудный флюид, более легкий и более подвижный, чем расплавленная магма, разве тем самым не станет неизбежным наличие механизма, выкачивающего флюид до поверхности почти со скоростью, равной скорости его образования?

Таким образом, движущая сила для перемещения и поддержания течения будет существовать независимо от того, находится ли флюид в газообразном или жидком состоянии. А тем самым будет найдена и «адекватная сила», которую искали Дэй и Аллен для «объяснения, каким образом жидкая вода поднимается до поверхности»<sup>1</sup>.

Можно поэтому выбирать между случаями обрушения и необрушения кровли. Но, во всяком случае, флюид того или иного рода и породы, образующие кровлю, должны сохранять контакт между собой. Если остановиться на обрушении кровли, это непосредственно дает ту движущую силу, которую мы ищем. Если же исходить из отсутствия обрушения кровли, придется предположить, что какая-то сила<sup>2</sup> в пределах магмы или под ней превращает

<sup>1</sup> Jour. Geol. 32, 1924, 185.

<sup>2</sup> Была предложена еще и другая схема вытеснения рудного флюида, а именно — при помощи давления пара, развивающегося при кристаллизации богатой летучими компонентами магмы, как это было блестяще продемонстрировано и разъяснено Мори (The development of pressure in magmas as a result of crystallization. Jour. Wash. Acad. Sci., 12, 1922, 219—230).

Находясь под сильным впечатлением этих идей, я представил статью, в которой пытался приложить упомянутую схему к выяснению рудного флюида (A source of pressure for ore formation.) Должено на годовом собрании (Soc. Econ. Geol. декабрь, 1922). Статья эта так и не была напечатана, частью оттого, что под влиянием энтузиазма, в сочетании с недостаточным знанием предмета, я переоценил значение некоторых стадий этого процесса, как это вскоре любезно разъяснил

самую жидкую магму в опору по отношению к породам кровли, в то время как самостоятельный рудный флюид выносится и подымается в область образования руд. И в том и в другом случае газовая фаза становится излишней.

**Жидкость от магматической камеры до поверхности.** Если изложенные здесь доводы не лишены некоторой доли здравого смысла, мы вправе ожидать встретить какие-либо признаки того, что эти теоретические выводы находят свое отражение в современных условиях природы. Повидимому, такие признаки имеются. Мы можем поэтому обратиться к рассмотрению последнего из намеченных нами случаев, а именно — когда жидкость занимает проводящий канал от магматической камеры до места выпадения растворенных веществ.

Задача выноса из магматической камеры материалов (включая выделяющиеся растворенные вещества) с образованием крупных рудных тел, несомненно, не более грандиозна, чем при подъеме больших объемов магмы, образующей огромные лавовые потоки, величественные вулканические конусы из (застывшей) жидкой лавы, обширные силли (интрузивные пласты) и огромные лакколлиты или дополиты. Во многих из этих случаев, когда перемещаемой жидкостью была расплавленная магма, особенно более мафические ее разновидности, наблюдается мало признаков того, чтобы значительные количества газа были вовлечены в эту систему. Между тем, потребовалось бы сравнительно большое количество (по весу) газа, чтобы поднять столб тяжелого расплава горных пород на всю высоту от лежащей на глубине магматической камеры до уровня, где происходила кристаллизация — недалеко от поверхности, в лакколитах или в поверхностных излияниях — и чтобы поддерживать течение этого процесса в продолжение дли-

мне Мори, частью же потому, что я сам пришел к убеждению, что хотя большое давление пара может образоваться и существовать по намеченной схеме, не сопровождаясь какой-либо газовой фазой, и спользование этого давления как средства вытеснения флюида из системы тотчас же привело бы к возникновению газовой фазы в размерах, отвечающих использованию; между тем, я тогда был такого мнения, которого придерживаюсь и теперь, что существенная и обильная газовая фаза не может развиваться из магм, которые продолжают оставаться под надежным покровом. Поэтому я отказался от мысли рассматривать этот фактор как господствующий механизм вытеснения в эту позднюю стадию магматического эпизода, к которой я приурочивал образование рудного флюида.

Позже Горансон подтвердил предсказание Мори относительно «огромных» давлений в системе силикат—вода, доказав, например, что в системах ортоклаз—вода и альбит—вода может развиваться давление вплоть до четырех и даже шести тысяч атмосфер. (High temperature and pressure phase equilibria in the albite-water and orthoclase-water systems. Am. Geophys. Union Trans., 19th Ann. Meeting, 1938, 272).

О предложенном Мори механизме образования давления одобрительно отзывается Росс в своем обсуждении магматических процессов (Econ. Geol. 23, 1928, 879—881), но специально с подъемом рудного флюида он не ставил в связь эти идеи до более обстоятельной своей статьи о месторождениях типа Дактаун (op. cit., стр. 49). Эммонс воспользовался этим механизмом парового давления для объяснения разломов над интрузивным телом и проникновения, рудоносных растворов в эти трещины (On the origin of certain systems of ore-bearing fractures. A. I. M. E. Trans., 115, 1935, 9—32; также и Gold deposits of the world, 1937, 17—35).

тельного времени, достаточного для осуществления больших передвижений магмы, активно участвовавшей в этом процессе.

Нет оснований полагать, чтобы отдельные газовые пузыри могли иметь диаметр, приближающийся к диаметру некоторых даек или трубок, через которые магмы были вытеснены вверх; поэтому, по крайней мере в таких более крупных проводящих каналах, не могло быть значительных проявлений механизма инжектора с пузырями или хлопушки. Повидимому, единственный возможный путь участия газа — это рассеянные пузыри, образующие пену как следствие расширения первоначального объема этих пузырей при переходе от большого давления на глубине до давления в одну атмосферу или несколько больше в случае поверхностного излияния. Признаки в застывших фазах или вообще какие-либо другие признаки, говорящие в пользу участия подобных крупных количеств газа, для многих таких местонахождений отсутствуют. Пемза и сильно пузырчатые лавы должны рассматриваться как исключение, а не как правило, причем пузырчатостью они обязаны местному испарению в связи с быстрым падением давления у поверхности. Притом даже если предположить, что газ в них при таком содержании присутствовал на глубине в виде пузырей, рассеянных в расплаве, и что он в состоянии был нагнетать расплав вверх, к этому механизму, несомненно, нельзя было бы прибегнуть с уверенностью в тех более многочисленных случаях, когда наблюдения говорят о малом содержании газа. В таких случаях придется, видимо, искать какую-то другую движущую силу, независимую от газовой фазы. Будет ли то вес столба перекрывающих пород, оказывающий давление на магматическое тело<sup>1</sup>, или какая-нибудь сила, присущая самой магме, — этот вопрос является самостоятельной интересной проблемой, решение которой, однако, не повлияет на вывод, что существует одна отвечающая требованиям движущая сила.

Очевидно, если тяжелая магма может в больших массах выкачиваться на поверхность без участия газа, то нагнетание вверх гораздо более легкого и более подвижного рудного раствора должно представлять для того же механизма соответственно более легкую задачу.

<sup>1</sup> См. Daly R. A. *Igneous rocks and the depth of the earth*, 1933, 247—249; также Goranson R. W. *Silicate-water systems: „osmotic pressure“ phenomena and their bearing in some problems of igneous activity*. *Am. Geophys. Union Trans.*, 18th Ann. Meeting, 1937, 247. Как Дэли, так и Горансон в этих статьях в первую очередь уделяют внимание подъему (интрузивное давление) самой расплавленной магмы, а не обособленного флюида над магмой (в узком смысле) или впереди нее. Они исходят поэтому не из веса столба пород, считая вниз до потолка магматической камеры, а из веса столба вниз до дна тела, состоящего из расплавленного материала. Их „движущая сила“ или, как Горансон ее называет, „присущее магме избыточное давление“, не находится в непосредственной зависимости от газовой фазы, а обусловлена разницей в плотности между столбом твердой окружающей породы и столбом расплава. Давление пара может, разумеется, возникнуть независимо (с действительным выделением газа или без такового) по мере того, как расплав кристаллизуется.

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ОБОСОБЛЕННОГО ЩЕЛОЧНОГО РУДНОГО ЖИДКОГО РАСТВОРА

Из предыдущего, повидимому, вытекает, что основное затруднение состоит не в том, чтобы найти движущую силу, независимую от газовой фазы, а в том, чтобы обосновать происхождение обособленного рудного флюида, который мог бы быть вынесен селективно из главной массы занимающего магматическую камеру материала. По общему признанию, концепция газовой фазы, возникающей при кипении, приводит к подобному независимому, способному к выделению флюиду; с ним связаны некоторые преимущества, хотя и несущественные и необязательные с точки зрения источника движущей силы. В других же отношениях, в особенности по способности к переносу минеральных растворов и к воздействию на породы и замещению их, газообразный рудный флюид, повидимому, резко уступает жидкому. Даже Боуэн и Феннер прибегают к жидкой фазе при разборе образования наблюдающихся руд.

С устранением затруднений с движущей силой для жидкой фазы возникает вопрос, не окажется ли возможным устранить и последнее препятствие, а именно — признать обособленный рудный флюид жидкостью.

В связи с этим сами собой напрашиваются две альтернативы, дать подробный разбор которых я здесь не имею в виду. Но желая, поскольку это возможно, навести на некоторые мысли конструктивного характера по затрагиваемым в этих двух гипотезах вопросам, я намерен привести здесь очень сжатый набросок их.

Первая из этих гипотез, в основе которой лежит давно высказывавшаяся мысль, повидимому сходна с предположениями Росса в основном в том, что рассматривает рудный флюид как остаточный, богатый щелочами расплав, сходный по происхождению с расплавом, дающим пегматит, но значительно опередивший его в отношении дифференциации, а потому более специализированный по своему составу. Надо полагать, что подобную концепцию можно логически и детально развить дальше, чтобы объяснить (в предположении, что наша исходная магма была, скажем, гранитной) последовательное образование из единой, но изменяющейся жидкости гранита, аплита, «нормального» пегматита и «специального» пегматита, гранитизацию и отложения минералов, к которым относятся и руды. Согласно этой концепции, рудный флюид отделяется от остального материала в отдельную фазу настолько же полно, как если бы он выделялся в виде газа, в связи с тем, что это последний «остаточный расплав» магмы, все остальные составляющие которой к этому времени перешли в твердое состояние. Когда-нибудь в будущем я рассчитываю выступить с этой темой, так же как с более полной трактовкой и следующей гипотезы.

Вторая гипотеза является альтернативой по отношению к первой с точки зрения того, что должно произойти, когда в жидком еще остаточном расплаве исходной магмы установится состав, более

или менее точно отвечающий пегматитовому. Исходя из факта высокого содержания воды в смоляном камне, эта гипотеза принимает в качестве предпосылки, что гранитный магматический расплав, с самого начала или после отделения кристаллов, может содержать сравнительно высокий процент воды — мысль, встретившая сочувствие и поддержку с появлением первой статьи Горансона на эту тему. Не исключается, что с дальнейшим охлаждением и кристаллизацией содержание воды (и других летучих компонентов) становится чересчур большим для того, чтобы эти компоненты могли остаться в растворенном виде в гранитном расплаве. Вследствие этого выделяется самостоятельная водная фаза, которая, однако, в противоположность отдельной газовой фазе (в пользу каковой, по сложившимся убеждениям, говорят исследования Горансона<sup>1</sup>), рассматривается нами как отдельная жидкость, настолько насыщенная растворенными веществами из гранита и находящаяся под таким давлением, что может оставаться в жидком состоянии при той несколько пониженной температуре, которая в это время должна преобладать в магме. Ибо в конечном счете критерий несмешиваемости для системы жидкость плюс жидкость идентичны с критериями несмешиваемости для системы жидкость плюс газ, а именно — две флюидные фазы, из которых каждая насыщена компонентами другой.

Следовательно, особый рудный флюид рассматривается нами как вторая жидкость, которая благодаря охлаждению теряет способность смешиваться с остаточной магматической жидкостью примерно в ее пегматитовую стадию. Хотя эти две жидкости насыщены каждая компонентами другой, они могут сильно отличаться друг от друга по составу, в общем подобно тому, как могут резко различаться по составу, т. е. по соотношению компонентов, жидкость и ее пар, находящиеся в равновесии. При этом, однако, степень различия в составе между одной жидкостью и другой, с ней несмешивающейся, повидимому меньше, чем между жидкостью и газом, и в этом заключается большое преимущество предположения о жидком состоянии рудного флюида. Это преимущество действительно проистекает из того основного обстоятельства, ранее уже указывавшегося, что жидкость является более эффективным растворителем нелетучих веществ, чем ее эквивалентный газ. Таким образом, жидкий рудный флюид достаточно богат металлами и кремнеземом и вместе с тем способен удержать в растворе столько же кислотообразующих компонентов в виде их соединений, как если бы это был газ, в котором они содержатся в виде свободных кислот или их радикалов.

<sup>1</sup> Горансон придерживался того мнения, что насыщенная водой магма, подымаясь в области меньшего давления, не могла уже сохранять в растворе все то количество воды, которое содержалось в ней до того. По его словам, «избыточная вода в магме должна собраться в «шарики» (globules; Am. Jour. Sci., 22, 1931, 500). Эти «шарики» не обязательно являются газом, хотя Горансон, повидимому, имел это в виду. Состояние их будет зависеть непосредственно от концентрации растворимых в них веществ, заимствованных из гранита (как влияющих на критическую температуру), и от давления.

Эта обособленная рудная жидкость, несомненно, будет обладать меньшей плотностью и меньшей вязкостью, чем более обедненная летучими и более богатая кремнеземом жидкость, из которой она выделилась; поэтому она независимо будет подниматься к верхней границе всей жидкой системы, образуя таким образом наблюдаемые концентрации вокруг «куполов» и других апикальных структур и особенно легко проникая в трещины, которые могут возникать в породах кровли. Короче говоря, при господствующих в это время в магматической камере условиях повышенных давлений и температур, эта выделившаяся жидкая фаза, по сравнению с другой, главной жидкостью, не намного отличается по своей плотности и вязкости от аналогичной газовой фазы, в связи с чем она обладает соответствующими преимуществами в отношении отделения от главной жидкости. При ослаблении давления она в состоянии расширяться в значительной, но ограниченной степени, в противоположность газу, способность которого к расширению беспредельна. С точки зрения нашей темы главное отличие от газа заключается в том, что жидкость могла бы содержать в растворе гораздо больше компонентов, участвующих в образовании руд и жил, и характеризовалась бы щелочной, а не кислой реакцией.

Ввиду проявляющейся среди авторитетных работников Геофизической лаборатории тенденции оспаривать мысль о несмешиваемости жидкости в силикатных системах при тех составах и температурах, которые вероятны для изверженных пород<sup>1</sup>, я долго не решался выступить с настоящей гипотезой<sup>2</sup> в более широком кругу, чем тот, среди которого она могла найти распространение благодаря неоднократным повторениям в лекционной аудитории. Однако сборник Линдгрена ободрил меня, так как в нем я нашел поддержку приемлемости подобной идеи с физико-химической точки зрения, притом с неожиданной стороны. Обсуждая вопрос о распадении магмы на несколько фаз, Феннер признает возможность пяти фазовых групп. Из них только две группы заслуживают здесь

<sup>1</sup> Например, Greig J. W. Immiscibility in silicate melts. *Am. Jour. Sci.*, 13, 1927, 148—152.

<sup>2</sup> Одно дело выступать в пользу смешиваемости растворов столь глубоко сходного состава, как, скажем, расплавленный гранит и расплавленный перидотит, и совсем другое дело отрицать несмешиваемость богатых силикатами и богатых сульфидами расплавов или раствора, содержащего, скажем, 90% порообразующих силикатов и 10% воды, с раствором, в котором содержится, например, 90—95% воды и 5—10% минерального вещества. Подобным же образом одно дело при рассмотрении расплавов порообразующих силикатов настаивать на том, что если бы несмешиваемость фактически имела место, образующаяся порода, как правило, должна была бы обнаруживать признаки застывших эквивалентов обеих жидких фаз (ср. Bowen N. L. Concerning „Evidence of liquid immiscibility in a silicate magma“. *Jour. Geol.*, 34, 1926, 71—73), так как в подобных вязких расплавах действительное пространственное разделение двух жидкостей было бы делом длительным и нелегким; но совсем другое дело отрицать возможность разделения двух настолько различных жидких фаз, как богатая силикатами, но насыщенная водой, с одной стороны, и богатая водой, с другой, притом в обоих случаях — жидкостей, вероятно, крайне подвижных, судя по силе проникновения, которую обнаруживают пегматиты, жильный кварц и флюид, дающие минеральные замещения.

упоминания, притом первая только для того, чтобы поддержать и усилить принцип, вложенный в пятую группу. Феннер говорит:

«К первой группе относятся сульфидные жидкости (расплавы), которые, как полагают, при охлаждении становятся несмешивающимися с силикатной магмой и проявляют тенденцию к осаждению...» [стр. 73].

«Пятая группа допускает возможность существования второго силикатного расплава, не смешивающегося с первым<sup>1</sup>. Этот расплав, возможно, образуется, когда магма при ее кристаллизации дошла до такого состояния, что в остаточном расплаве заключалось больше некоторого определенного процентного содержания воды и других летучих веществ. Этот случай может иметь важное значение для петрогенетических процессов<sup>2</sup>, но для преследуемых нами целей его можно отнести к четвертой группе» [стр. 73].

Хотя четвертая группа Феннера отвечает общепринятому остаточному расплаву пегматитового типа и хотя он приписывает последнему совершенно подчиненную и случайную роль в образовании руд, Феннер не находит нужным уделять большее внимание вопросу об этой особой несмешивающейся жидкости, чем он это делает в приведенной выше цитате.

Таким образом, основное различие между взглядами Феннера и моими, по видимому, сводится к оценке того, в состоянии ли подобная обособившаяся жидкость, образующаяся в таких масштабах, что она «может иметь важное значение для петрогенетических процессов», играть существенную роль и в процессах металлогенеза.

Что касается приведенных двух альтернативных гипотез, а именно: гипотезы постепенно изменяющегося остаточного расплава, в конце концов превращающегося в рудоносную жидкость, и гипотезы рудоносной жидкости, выделившейся благодаря несмешиваемости из пегматитовой (примерно) стадии магматического остаточного расплава, — то для выбора между ними доводы, которыми мы располагаем, слишком недостаточны<sup>3</sup>. Преимущество первого предположения в отношении сравнительной простоты и, пожалуй, лучшей защищенности от нападков с точки зрения его осуществимости уравнивается тем фактом, что на второе предположение, хотя бы качественно, распространяется большая часть преимуществ, приписываемых газу, среди которых главным я считаю тенденцию рудоотложения проявляться наиболее интенсивно вблизи верхней периферической части рудных тел. Правда, не исключено, что это последнее обстоятельство могло в известной мере быть результатом и других процессов.

<sup>1</sup> Очевидно «первый» обозначает здесь не первую фазовую группу, приведенную выше (т. е. несмешивающаяся сульфидная жидкость), а первый или главный силикатный расплав, в отличие от данного обособившегося второго силикатного расплава.

<sup>2</sup> Не полагает ли Феннер, что это тот путь, который приводит к гранитизации?

<sup>3</sup> Различие в объеме текста, отведенном здесь трактовке этих двух гипотез, не должно рассматриваться как показатель предпочтения, которое я даю одной перед другой.

Вместе с тем вполне возможно, что эти два рассмотренных способа выделения особого рудного раствора не исключают друг друга. Я имею в виду, что в некоторых магмах исходный состав, направление дифференциации, быстрота охлаждения и изменения давления могут способствовать постепенному изменению остаточного раствора до состояния, когда он становится способным к рудообразованию. В других магмах, в которых дифференциация протекает при иных условиях, не исключается возможность расщепления остаточного раствора в несмешивающиеся фракции, из которых меньшая по объему и более специализированная является рудообразующим флюидом. На самом деле, в некоторых случаях весь комплекс имевшего место рудообразования, может быть, распределяется между этими двумя методами. Вряд ли нужно добавлять, что, насколько нам известно, многие магмы не дают промышленных руд или чего-либо, хотя бы отдаленно напоминающего их с точки зрения ценности минеральных отложений; для подобных случаев, объясняющихся предположением недостатка летучих компонентов, не приходится задумываться, образовался ли остаточный водный жидкий раствор, или несмешивающийся водный жидкий раствор, или газ с высоким содержанием воды в поздние этапы магматического цикла.

Я отдаю себе отчет в том, что этот набросок двух способов образования рудообразующего щелочного жидкого раствора оставляет без ответа много вопросов, естественно возникающих в связи с этими гипотезами. Но если бы изложенные соображения могли дать толчок и оказать поддержку в развитии мысли, что в конце концов не исключается приемлемый путь возникновения подобной жидкости, несмотря на защиту идеи о газе крупными авторитетами, — отсюда мог бы последовать ценнейший вклад полезных идей и даже экспериментальных работ по деталям и условиям данного процесса.

### ПОЯСНЕНИЕ ПОНЯТИЙ „ГАЗ“ И „КИСЛЫЙ“

Все предыдущие страницы настоящей статьи согласно вели нас к тому выводу, что рудный флюид, начиная от его возникновения в магматической камере и кончая разгрузкой на земной поверхности, по всей вероятности, представлял собой щелочной раствор. Но не могли остаться незамеченными частые оговорки при высказываниях относительно рудного флюида, такие, как «в общем случае», «в значительно преобладающем числе случаев», «поскольку речь идет об обычном рудном флюиде» и т. д. Эти смягчающие выражения внесены не с целью самозащиты, не для того, чтобы хоть частично снять с себя ответственность; они действительно были нужны в качестве заблаговременного признания, что существуют неоспоримые факты, которым здесь не могло быть уделено внимание в должной мере. Теперь мы можем обратить внимание на непосредственно наблюдающиеся факты выхода на поверхность кислых газов и кислых жидких растворов и на вероятность, что флюиды именно такого характера могли обусловить образование

некоторых месторождений и вызвать изменения, обнаруживающиеся под землей в горных выработках. Короче говоря, ни один имеющий опыт геолог не может отрицать, что существуют кислые рудные растворы, что их могут сопровождать газы и что, несомненно, это производные магмы. Сторонник общей гипотезы о щелочном рудном жидком растворе видит себя поэтому логически вынужденным найти приемлемое объяснение для этих неоспоримых кислот и газов.

Сущность утверждения Росса заключается в уже цитированном выше его положении, что газ, наиболее вероятно, представлял собой кислоту:

«...могла существовать либо жидкая, либо газовая фаза в зависимости от температуры и величины давления, препятствующего выделению газа» [стр. 148].

Однако Росс не находит оснований для вывода, что в месторождениях, о которых он пишет, действительно возник кислый газ, поэтому им и не устанавливается связь между действием щелочных и кислых растворов.

Моя собственная точка зрения на этот предмет, высказанная мною в другом месте, совпадает с мнением Росса, но так как я отважился на несколько большую детализацию, то здесь уместно привести некоторые цитаты.

«...гидротермальный раствор преимущественно жидкий, тем не менее превращение его в газообразное состояние всюду потенциально возможно при более быстром уменьшении давления, чем охлаждении, и может в какой-то мере происходить в отдельных точках»<sup>1</sup>.

«Большая часть представителей эпитеpmальной зоны... совершенно таким же путем, как и в нижних зонах... была образована щелочными растворами. Но в некоторых из них подымавшиеся растворы могли быть кислыми»<sup>2</sup>.

«Если содержание в растворах образованной таким образом (серной) кислоты где бы то ни было превышало присущую им природную щелочность, растворы эти там уже не в состоянии были отлагать карбонаты, а воздействовали на любой карбонат, ранее отложившийся на уровне или выше уровня перехода к кислотности... Там, где концентрация кислоты становится более значительной, должно иметь место более решительное воздействие на щелочные силикаты боковых пород<sup>3</sup>... Такое крайнее развитие кислотности в гидротермальных водах, повидимому, можно ожидать... лишь совсем близко к поверхности. Возможно даже, что оно совпадает иногда с изменением раствора из преобладающего жидкого состояния в более или менее газообразное вследствие быстрой потери давления близ поверхности»<sup>4</sup>.

Изучение жил, прорезающих брекчию заполнения обширного кратера взрыва в Черро-де-Паско, Перу, где алуниг и дикинг развиваются совместно, образуя псевдоморфозы по серициту, в свою

<sup>1</sup> Econ. Geol., 28, 1933, 520.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 541.

<sup>3</sup> Loc. cit., стр. 541. Слово в скобках добавлено Грейтоном для восстановления контекста.

<sup>4</sup> Loc. cit., стр. 542.

очередь образовавшемуся из породообразующего полевого шпата, приводит Грейтона и Бовдича (Bowditch) к следующим выводам, которые, надо полагать, распространяются и на другие месторождения с близкими условиями:

«...нормальные взаимоотношения между изменением температуры и изменением давления в обычных гидротермальных жилах таково, что флюид сохраняет преимущественно, если не полностью, жидкое состояние; другими словами, падение температуры, по сравнению с падением давления, в направлении к поверхности происходит настолько быстро, что тенденция раствора к закипанию нигде не проявляется в сколько-нибудь господствующей степени. Однако там, где температура поддерживается на ненормальном уровне по отношению к давлению, например, благодаря перегреву, или где давление внезапно падает по сравнению с температурой, например, благодаря повторному раскрытию трещин, — флюид, находившийся до того в жидком состоянии, может, если одна из этих тенденций проявляется достаточно сильно, притти в состояние кипения в соответствующей степени, причем более летучие составные части реагируют на это первыми, а менее летучие стремятся оставаться в жидком состоянии»<sup>1</sup>.

«Можно заключить, что в начале растворы везде были щелочными, но в сравнительно позднюю стадию периода минерализации в верхней части проводящего канала образовалась в растворах серная кислота благодаря окисляющему воздействию воды на серу, обильно содержащуюся в какой-то форме в щелочных растворах. Природа этой реакции такова, что ей должно было благоприятствовать более низкое давление, чем соответствующее равновесию при данной температуре»<sup>2</sup>.

«Высказывается предположение, что различные проявления современных районов развития горячих источников могли быть представлены на поверхности выше уровня, на котором образовались жилы Сегго, и что все эти явления могут быть результатом воздействия жидких растворов, первоначально щелочных, но которые в более позднее время местами на небольшой глубине становились кислыми, а может быть, и газообразными»<sup>2</sup>.

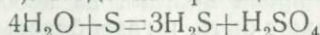
Имеется в виду, что последовательность стадий в Черро-де-Паско обычная для тех случаев, когда в рудных растворах развивается кислотная стадия; минералы, которые могут быть приписаны кислотным агентам, обычно приурочены к поздним стадиям всего эпизода минерализации. Такая последовательность — сперва щелочной, затем кислой — хорошо согласуется и с тем, что наблюдается в явлениях изменения вокруг кислых источников и фумарол в районах терм, например в Йеллоустоне, в месторождениях Восточной Индии и особенно поразительно в Роторуа. Согласуется оно и с последовательностью в составе самих термальных вод, как это было уже отмечено в цитате из Дэй [на стр. 97]. И в значительном большинстве случаев, которые мне приходилось наблю-

<sup>1</sup> Econ. Geol., 31, 1936, 689.

<sup>2</sup> Loc. cit., стр. 697. Более полные разъяснения см. на стр. 693—695.

дать, будь то в выработках горных районов или у выходов на поверхность терм, кислотность обусловлена преимущественно  $H_2SO_4$ .

Последовательность щелочной — кислый, повидимому, более правдоподобна, чем обратная последовательность, если, как намечается, переход в кислое состояние имеет место в щелочной жидкости на каком-то участке проводящего канала и вызван падением давления, опережающим падение температуры. Ибо чем дольше продолжается течение потока, тем больше нагреваются стенки и, следовательно, тем меньше они поглощают тепла из раствора, протекающего через данную точку, в результате чего раствор здесь становится все более горячим. Давление, действующее в это время на раствор, может колебаться, причем высокое давление, отмечаемое в какой-нибудь точке, скорее может обозначать частичную закупорку путей где-нибудь выше, чем увеличение давления снизу; поэтому высокое давление обнаруживает тенденцию сочетаться с замедленным течением и, следовательно, с более медленным нагреванием стенок, а также с более низкой температурой раствора, протекающего через ту или иную точку. С другой стороны, низкое давление, действующее на раствор в данной точке, если оно не вызвано замиранием всего процесса, скорее всего является результатом повторного раскрытия проводящих каналов, облегчающего течение и ускоряющего процесс нагревания. Такое сочетание низкого давления, несомненно свидетельствующего о незначительном препятствии движению растворов сверху, с высокой температурой раствора в связи с быстрым его продвижением, быстрым приносом тепла и хорошей изоляцией вследствие предшествующего хорошего прогрева стенок, дает уже приближение к условиям, при которых жидкость может начать кипеть. Оно приближает нас также к условиям, когда может протекать такая реакция, которой благоприятствуют умеренная, но не слишком низкая температура, скажем  $200-250^\circ C$ , и достаточно низкое давление (в достаточной близости от поверхности при незакупоренном канале), чтобы не служить препятствием для увеличения объема (образование газового продукта). Подобная реакция изучена Алленом<sup>1</sup>:



Но в значительно преобладающем числе случаев эта реакция (или какая-либо аналогичная ей), повидимому, или совсем не происходит, или же настолько ограничена, что присущая раствору щелочность сохраняется; поэтому месторождение во всех подобных случаях несет следы влияния его щелочного происхождения.

С другой стороны, при неизбежных колебаниях температуры и давления иногда может случиться, что обильное развитие  $H_2SO_4$  наступает настолько рано, что до того могло иметь место лишь незначительное отложение из первоначально щелочного раствора. В таком случае воздействие кислого реагента было бы направлено на неизмененную породу, а не на продукты изменения ее под влиянием щелочного раствора. Но так как вся серия «гидротермаль-

<sup>1</sup> Day and Allen, Volcanic activity and hot springs of Lassen Peak, 1925.

ных» руд свидетельствует о том, что кислое воздействие—случай необычный, а потому и ненормальный, такой частный случай раннего возникновения кислотности, повидимому, не сохраняется как таковой до конца периода минерализации, а вновь возвращается к нормальным условиям щелочности благодаря приближению равновесия между температурой и давлением к «нормальному». Таким образом могли бы быть объяснены те немногие примеры раннего кислотного воздействия, за которым следовало щелочное, как это наблюдалось Барбэнком (Burbank)<sup>1</sup> в Бонанце, Колорадо, и совсем недавно описано Лёверингом (Lovering)<sup>2</sup> для Боулдер Коунти, Колорадо.

Напомним, что то же самое направление неуравновешенности отношения давление—температура благоприятствует возникновению тех телескопических месторождений, которые Баддингтон (Buddington) называет ксенотермальными. Эти случаи развития кислотности в растворе, вероятно сопровождающегося кипением, могут, следовательно, рассматриваться как охватывающие частный случай ксенотермальных месторождений.

Полупно отметим, что такое отношение между температурой и давлением, которое благоприятствовало бы образованию  $H_2SO_4$ , можно рассчитывать встретить прежде всего при трубкообразных структурах (или при наличии сравнительно открытых кратеров взрыва, диатрем), а также там, где в месте пересечения двух открытых путей получается повышенная проводимость. Дело в том, что при этих условиях и малая величина давления, воздействующего на раствор, и легкость продвижения в высшей степени локализованного потока горячего раствора, и малая отдача тепла в связи с относительно малой поверхностью более или менее трубкообразного проводящего канала или в связи с непосредственно предшествовавшим вулканическим прогревом<sup>3</sup> — все это взаимодействует в создании подходящей обстановки для соотношения высокая температура — низкое давление. Показательно поэтому, что так много подобных случаев проявления воздействия кислых растворов и так много ксенотермальных месторождений вообще приурочено к трубкообразным структурам или к кратерам взрыва<sup>4</sup>. Несомненно, такие месторождения в общем необычны, хотя в отдельных случаях, например в Брадене, Чили, они очень велики.

Возражения, которые выдвигались<sup>5</sup> против изложенного предположения об образовании серной кислоты в растворе на уровне, лежащем значительно выше магматического источника, исходят из убеждения, что элементарной серы, из которой могла бы образо-

<sup>1</sup> U. S. Geol. Surv., Prof. Pap., 169, 1932, 82—85.

<sup>2</sup> The genesis of ferberite and gold telluride ores of Boulder County, Colo. Доложено на собрании в Миннеаполисе. Soc. Econ. Geol., Dec. 1939.

<sup>3</sup> См. Econ. Geol., 28, 1933, 544.

<sup>4</sup> См. Schmedeman, loc. cit., также W. H. Emmons. Diatremes and certain orebearing pipes. A. J. M. E. Techn. Pub., 891, 1—15, в сборнике Mining Technology, май, 1938.

<sup>5</sup> При личном обсуждении с друзьями, специалистами по физической химии; см. также Day and Allen. Volcanic activity and hot springs of Lassen Peak, 1925, стр. 120 и 139.

ваться  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , нигде не встречается в системе, как только на поверхности, где она будто бы произошла при атмосферном окислении сероводорода, выделяемого фумаролами и горячими источниками. Может быть, атмосферное окисление действует достаточно быстро, чтобы превратить часть движущегося  $\text{H}_2\text{S}$  в  $\text{S}$  в той специфической обстановке, в которой наблюдается сера, хотя огромное количество  $\text{H}_2\text{S}$ , в неизменном виде улетучивающееся в атмосферу из таких выводных отверстий, и отсутствие признаков окисления его после того, как он таким образом попал в атмосферу (это может проявляться в виде «снега», состоящего из охлажденной серы, выпадающей в окрестностях), говорят за то, что эффективность подобного окисления должна быть, во всяком случае, очень низкой. Я со своей стороны затрудняюсь понять, как исследователь, хорошо знакомый с условиями и ограничениями окисления газообразным атмосферным кислородом в геологической обстановке, может согласовать выдвигаемый способ образования с действительной картиной нахождения самородной серы в выцветах горячих источников, сольфатар и вулканических выходов, в подземных пещерах и трещинах в вулканических кратерах или вокруг них, и прежде всего в виде настоящих «лавовых потоков» расплавленной серы, приуроченных к вулканам, например, в Чили<sup>1</sup> и на Северном острове Японии<sup>2</sup>. Геологические показания настолько подавляюще свидетельствуют о значительных массах подземной серы магматического происхождения, что для опровержения этих показаний и вытекающих из них последствий требуются более бесспорные доказательства, чем простое предпочтение, оказываемое с физико-химической точки зрения ее образованию только на поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В одном из предшествующих разделов настоящей статьи обращалось внимание на крайне тесное переплетение между собой всех более крупных подразделений этого общего обсуждения природы рудообразующего флюида. Приуроченность ко времени, механизм выделения из магматического материала, движущая сила для подъема и некоторые из причин отложения минерального вещества оказались теснейшим образом связанными с состоянием, а следовательно, и с составом особого рудного флюида. Отсюда становится понятным, почему такую большую часть статьи пришлось отвести этим двум центральным проблемам — состоянию и составу. Самой главной целью статьи поэтому было изучить и сопоставить положительные стороны концепции о выделении рудного флюида из магмы в виде щелочной жидкости и противоположной концепции — что он покидает магму в виде кислого газа.

Раньше чем будет сделана попытка подвести итог выводам, к которым привело это исследование, представляется желательным

<sup>1</sup> Например, B. Leiding. Informe sobre las azufreras de Gorbea. Bol. Minas y Petról. (Chile), 6, 1936, 464—471 (no Annot. Bibliogr. Econ. Geol. 9, 1937, No. 2, p. 306).

<sup>2</sup> T. Watanabe. Личное сообщение.

набросать, как сложились эти противоположные мнения о жидкости и газе и о щелочном и кислом составе растворов.

Во второй трети предыдущего столетия, когда полевые наблюдения с успехом вытеснили философскую спекуляцию как единственное руководящее начало при геологических рассуждениях и выводах, и когда идея о роли магмы в образовании руд встала на научную почву взамен метафизической, интерес к вулканам и к европейским оловянным рудам привел к концепции, названной химиком Бунзенем пневматолитом.

Среди сторонников теории восходящих растворов эта общая идея о значении летучих соединений галоидов и бора на некоторое время завладела мыслью более, чем какое-либо другое мнение, относящееся к природе рудного флюида, и со временем многими было распространено на контактово-метаморфические месторождения. Но были и приверженцы идеи о жидком агенте, хотя представление о составе последнего оставалось крайне смутным. В 80-х годах Беккер и Эммонс выступили с доводами в пользу щелочного жидкого рудного раствора. Для большей части гипогенных месторождений этот взгляд нашел признание и был развит специалистами, изучавшими геологию рудных месторождений, особенно в Соединенных Штатах, и наиболее успешно Линдгреном.

В дальнейшем к этому предмету, как части обширной проблемы о магме, возник интерес у физиков и физико-химиков Геофизической лаборатории в Вашингтоне, и поскольку они придерживались своих физических и физико-химических представлений, они стояли на точке зрения постулата о щелочном жидком растворе магматического происхождения, который нашел поддержку и с их стороны. Следующая цитата показательна для их взглядов в то время:

«Пирит глубоких жил, метаморфических контактов и горячих источников, а также и магм, образован горячими растворами, причем такие растворы никогда не содержат минеральных кислот, а обычно, если не всегда, являются щелочными<sup>1</sup>.

Но затем наступило время, когда исследователи из Геофизической лаборатории в Вашингтоне, усердно стремясь найти объяснение для магмы и магматических процессов, нашли естественным и желательным выйти в поле и собственными глазами ознакомиться с современными проявлениями живой магмы. И таким образом, один за другим, Дей, Шеферд, Аллен, Феннер и Циес в особенности, взялись за геологические наблюдения в таких центрах, как Килауза, Лассен Пик, Десять Тысяч Дымов, Иеллоустон, Ява и Бади, Роторуа и Гватемала. Это привело к новой ситуации или, по крайней мере, к широкой разработке и укреплению позиции, которую заняли физики и во главе их химики исходя из наблюдений над явлениями этого типа. Но вначале эти изменения мало коснулись рудных месторождений, так как ни одна из указанных мест-

<sup>1</sup> Allen, Crenshaw and Johnston. The mineral sulphides of iron. Am. Jour. Sci., 33, 1912, 171.

ностей не является горнопромышленным районом, и освещение руд отнюдь не входило в задачи первой очереди.

По мере вовлечения в круг вопросов ярких поверхностных проявлений магматической деятельности, эти исследователи вплотную пришли в соприкосновение с кислыми газообразными эманациями. Хорошо вооруженные химическими и физическими знаниями и совершенными методами измерений, сбора материалов и анализов, они не только существенно обогатили наше понимание этих поверхностных явлений, но сумели также успешно сочетать многое из своих достижений с богатым, многолетним опытом Геофизической лаборатории в области экспериментальных работ над синтетическими магмами. Постепенно предпочтение, которое они давали кислому газу в качестве важного элемента характеристики магм и магматической деятельности, стало оказывать влияние на современную петрогенетическую мысль и теорию, а затем начало проникать и в область рудоотложения.

Программа совокупного лабораторного изучения и полевых наблюдений далеко продвинулась вперед, когда Феннеру и Боуэну было предложено представить, на основании накопившегося материала, обзор физико-химических факторов, управляющих эпигенетическим гипогенным рудообразованием, для включения в сборник Линдгрена. В статьях, помещенных этими двумя исследователями в сборнике, впервые дано надлежащее изображение значения кислых газов в процессах рудообразования и сделана попытка осветить, как этот реагент возник и как он действовал в разнообразных реакциях и процессах. Таким образом, неожиданно Феннер и Боуэн, знатоки теоретической петрологии, заняли ведущее место в защите гипотезы генезиса руд, находящейся в резком несогласии с теми взглядами, которых в течение полувека придерживалось в отношении большей части гипогенных месторождений большинство геологов—специалистов по рудным месторождениям. Их выступление в части рудообразования встретило моральную поддержку и прямое подкрепление со стороны некоторых из ближайших сотрудников, как, например, в следующих строках:

«Что ценные металлы в рудных месторождениях могли быть и были принесены в газообразном состоянии, в настоящее время признается многими геологами... и концепция непрерывного выделения газов из горячей массы, содержащей летучие вещества, не только является наиболее простой, но и согласуется со всеми нашими представлениями о горячих источниках, в то время как альтернативная точка зрения — перенос водного раствора из магмы до поверхности — до сих пор не могла быть согласована с фактами»<sup>1</sup>. Однако разделы 1 и 2 главы III сборника Линдгрена остаются главным оплотом гипотезы, отстаивающей роль кислых газов при образовании руд. И эта общая гипотеза особенно резко выделяется благодаря противоречивости с разделами 3 и 4 той же главы, составленными соответственно Россом и Шеллером.

В настоящей попытке дать оценку этим упомянутым противо-

<sup>1</sup> Allen and Day. Hot springs of the Yellowstone National Park. Carnegie Inst. Wash., Pub. 466, 1935, 94.

речивым гипотезам я задался целью подойти к проблеме рудообразования так, как будто то, что подлежало изучению, представляло собой последовательный ход металлургического процесса. Таким образом даются некоторые существенные стадии и контролирующие условия, которые следует принять во внимание для того, чтобы логически проследить ход процесса с начала до конца. В мои намерения входило разобрать и оценить последовательно каждый из них как независимые проблемы самостоятельного значения. За другими остается решить, в какой мере удалось придать каждому звену законченный вид, независимо от выводов, к которым нас приводит изучение других звеньев цепи. Однако такой метод не обеспечивает должного внимания ко взаимной связи между отдельными звеньями и к окончательной оценке всей цепи в целом. Восполнить этот пробел и является задачей настоящего заключительного раздела (см. «Общепризнанные представления», стр. 18—20).

Основные выводы из предшествующих разделов этой статьи могут в кратких словах быть подытожены в том виде, как они приведены ниже, однако лишь с оговоркой, что подобный сжатый обзор не в состоянии охватывать все факты или все необходимые соображения. Заголовки помогают найти более пространное изложение в предыдущем тексте.

1. Возрастные соотношения. Отделение особого гипогенного рудного флюида от преобладающей массы магматического материала происходило не путем выкипания в раннюю стадию из родоначальной магмы, а было приурочено примерно к концу активного магматического цикла, будучи определенно послепегматитовым. Однако пространственные и количественные соотношения пегматитов и руд показывают, что большая часть рудных месторождений генетически не находится в прямой связи с пегматитами, а происходит, подобно пегматитам, непосредственно из главной магмы.

2. Механизм выделения. В качестве способа физического выделения особого рудного флюида из основной массы магматического материала, вынос в виде независимой фазы обладает очевидными, совершенно неоспоримыми преимуществами. Как показывает наш повседневный опыт в условиях земной поверхности и в свете привычных нам геологических понятий, повидимому, легче всего себе представить такую независимую фазу, если она представляет собой газ. Однако этот газ не обладал бы теми свойствами, которые обычно ассоциируются у нас с этим состоянием, а именно малой плотностью и низкой вязкостью; вместо того он, вероятно, мало чем отличался по плотности и вязкости от жидкости сходного состава в условиях, господствующих в магматической камере. Кроме того, характерное свойство струящегося газа, как коллектора содержащихся в жидкости легколетучих компонентов, понижается в магматических условиях. Большое преимущество газа в качестве средства и среды выделения состоит в самом факте различия этой фазы от оставшейся. Но это различие фаз может быть обеспечено и двумя другими способами, из которых

каждый дает жидкость: а) или кристаллизацией всех остальных компонентов магмы, в результате чего обособится рудный флюид как конечная и единственная жидкость, присутствующая в это время в магматической камере; б) или при помощи механизма, поддерживаемого Феннером, — расщепления остаточного раствора, примерно в пегматитовую стадию, на две несмешивающиеся жидкости; из них менее обильная, менее плотная и менее вязкая представляла бы собой рудный флюид, который соответственно этому обладал бы способностью отделяться от другой (с высоким содержанием силикатов) жидкости этой несмешивающейся пары, совершенно подобно тому, как мог бы вести себя при таком же разделении плотный и вязкий газ.

3. Движущая сила. Вопрос о движущей силе рассматривается в зависимости от всех тех способов, какими проводящий канал, простирающийся от магматической камеры до выхода на земную поверхность, может быть заполнен: одним газом, или отчасти газом и отчасти жидкостью, или только жидкостью. Повидному, если бы канал целиком и постоянно был заполнен газом, механизм подъема был бы прост и зависел бы только от способности газа к беспредельному расширению. Однако ни Феннер, ни Боуэн не полагаются на одну только газовую фазу как фактор образования руд, для которого все мы ищем объяснения. Как только какая-нибудь вышележащая часть проводящего канала заполняется жидкостью, большая часть преимуществ, которые дает газовая фаза в качестве средства продвижения, исчезает. В проводящем канале, занятом жидкостью в смеси с газовыми пузырями, смесь может при известных условиях быть самодвижущейся в случае значительной быстроты движения, с одной стороны, и однообразного небольшого трубкообразного поперечного сечения проводящего пути, с другой. Но геологически такие условия, мягко выражаясь, невероятны; поэтому в проводящем канале, занятом частью газом и частью жидкостью; для подъема, повидному, возникает необходимость в какой-то внешней движущей силе почти в такой же степени, как если бы канал от магматического очага до поверхности был занят только жидкостью. Движущая сила для нагнетания вверх больших масс жидкостей (т. е. тяжелых вязких расплавленных горных пород), как будто существует вне зависимости от газовой фазы и объясняется действием большого веса вертикального столба твердой коренной породы одинаковых размеров. Давление на магму веса горных пород может быть усилено давлением пара, возникающим при кристаллизации пород на глубине, но подобное добавочное давление несущественно и, во всяком случае, не может вызывать необходимость в наличии газовой фазы. С другой стороны, выясняется, что концепция образования особого рудного флюида путем кипения магматического расплава встречается с непреодолимыми трудностями, если только уровень жидкости, на котором улетучивается выкипающий рудный флюид, не поддерживается каким-то направленным вверх, независимым от газа, воздействием. Следовательно, само по себе давление, вызываемое «напором» столба вышележащих пород, кото-

рое способно поддерживать подъем тяжелых вязких расплавленных пород до поверхности, тем более должно быть способным вытеснить более легкую и менее вязкую рудную жидкость из магматической камеры вверх до земной поверхности.

4. Новая конденсация газа. Происхождение водного раствора, предусматриваемого как Феннером, так и Боуэном, обсуждается с точки зрения их мнения, что кислый газ, образовавшийся на глубине выкипанием из магмы, где-то выше в проводящем канале должен снова конденсироваться в кислую жидкость. Выясняется, что такая новая конденсация определенно менее вероятна, чем предположение, что газ, если он образуется в обильном количестве на глубине, остается в виде газа на всем пути вплоть до поверхности или до того участка, где он, поглощенный обильными инертными подземными водами небольших глубин, теряет как свою индивидуальность, так и активность.

5. Приобретение щелочных свойств. Предположение, что кислые воды, якобы образующиеся при новой конденсации кислого газа, становятся щелочными благодаря реакции с окружающими породами, приемлемо в условиях, когда воды имеют легкий доступ к щелочьсодержащим породам. Такие условия могли, однако, господствовать только в самый первый отрезок времени всего продолжительного периода течения флюида. С увеличением толщины слоя выщелоченных пород, примыкающих к проводящему каналу, вскоре создаются условия, когда течение кислых вод должно происходить в «изолированной» или инертной, лишенной щелочей трубе, и начиная с этого времени поток на всем протяжении может поглощать слишком мало щелочей, чтобы побороть предполагаемую первоначальную кислотность. Короче говоря, если кислые с самого начала растворы движутся вдоль того или иного проводящего канала в достаточном количестве для отложения рудных масс в промышленных количествах и промышленного состава, растворы полностью, за исключением самых ранних незначительных порций, должны остаться кислыми на протяжении всего пути до выхода на поверхность.

6. Изменения горных пород, вызванные щелочами или кислотами. Предположение, что первоначальный кислый газ, конденсировавшийся снова в кислую жидкость, а затем превращающийся благодаря взаимодействию с боковыми породами в щелочную жидкость, в состоянии после этого воздействовать на аналогичные боковые породы и вносить щелочи в процессе серицитизации, опрокидывает, по видимому, наше представление о тенденции растворов притти в равновесие с боковыми породами. Этот неожиданный вывод вряд ли может быть принят без дальнейших доказательств, пока никем не представлены. Последние могли бы быть получены, если бы оказалось возможным указать еще более глубоко лежащую зону, где имели место существенное и важное селективное замещение и вынос щелочей, которые выше могли послужить материалом для образования серицита и т. п. Однако такая зона неизвестна. Изменения пород магматическими флюидами, приуроченные к наибольшим глубинам

(т. е. наиболее близкие к магматическому источнику). — это крупномасштабные примеры гранитизации; последние же представляют собой случаи привноса щелочей, в аналогичном масштабе, непосредственно из магмы.

7. Перемещение вниз зоны, где раствор становится щелочным. Мнение, что то место в проводящем канале, в котором раствор вновь приобретает щелочный характер, находится не только вверху, где происходит предполагаемое воздействие кислого агента, но позднее фактически опускается до находящегося в то время в действии источника, придает еще значительно большую искусственность всей концепции о смене кислотного характера щелочным. Это мнение, как будто, не подкрепляется никакими фактическими данными, и вместе с тем находится в противоречии с большей частью того, что мы знаем относительно окружающей более глубоких частей канала.

8. Переработка щелочами. Разбирается взгляд, что такое предполагаемое перемещение места приобретения жидкостью щелочного характера вниз до зоны, где в течение продолжительного времени на породы воздействовал кислый газ, приводит к глубокой переработке и изменению состава более ранних отложений, будто бы образованных кислым газом. Для проверки этого взгляда можно пользоваться теми критериями, которые служат для обнаружения супергенного обогащения, как будто аналогичного такой предполагаемой переработке. Не было найдено подтверждений ни этой аналогии, ни общей переработке предполагаемого характера. Вместе с тем доводы в пользу этой переработки показывают, что Феннер не выдвигает возражений с физико-химической точки зрения против переноса и отложения руд горячими щелочными жидкими растворами.

9. Летучие галоидные соединения. Получившее признание положение, согласно которому металлы и другие составляющие минеральных образований переносятся в виде летучих галоидных соединений, нуждается, как здесь доказывается, в нагромождении благоприятных предпосылок. Температуры, необходимые для существования заметного давления паров, возможны в магматической камере в раннюю стадию, но если только наши представления о температурах рудообразования не грешат сильно в сторону их преуменьшения, температура, необходимая для улетучивания, не может сохраниться в каналах среди пород, так что приходится обращаться к каким-то другим агентам переноса для большей части пути вдоль тех крупных проводящих каналов, в которых образуются руды. Имеющиеся подсчеты количества  $Cl$  и  $F$  в горных породах и океанах дают результаты, совершенно несоизмеримые с цифрами, в которых выражается потребность в этих элементах для переноса в виде летучих галоидных соединений огромной массы минеральных веществ известных месторождений. Устанавливается, что то количество галоидных элементов, которое присутствует в магме, должно выделяться в виде свободной кислоты, столь резко преобладающей, что в части минералообразующих компонентов лишь немного может быть вынесено из

магмы в виде галоидных соединений; преобладающая роль галоидов поэтому сводилась бы попросту к перемещению элементов из одной части твердых коренных пород в другую — своего рода модернизированный латераль-секреционный процесс. Присутствие галоидных соединений в наблюдавшихся выделениях из жерл вулканов и выходов термальных источников объясняется отчасти более слабой фиксацией этих элементов в пирогенных минералах, когда магма застывает в вулканических, а не гипабиссальных или плутонических условиях, отчасти же выщелачиванием этих элементов (из апатита, слюд и других минералов, входящих в состав окружающих пород) на тех небольших глубинах, на которых образуется серная кислота, что изложено ниже в параграфе 13. Если не говорить о выходах на поверхность, господствующей сильной кислотой в геологических процессах является не  $\text{HCl}$  или  $\text{HF}$ , а  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; сульфаты же обладают низкой летучестью.

10. Доводы в пользу кислотности. Предположение, что рудный флюид покидает магму, обладая кислым характером, и остается кислым в продолжение некоторого времени после новой его конденсации, было проверено на наблюдавшихся продуктах замещения в породах вдоль проводящих каналов и по роду минералов, образующихся в самих месторождениях. Повидимому, серицит, типичный и важный минерал изменения «гидротермальных» месторождений, часто сопровождается обильными карбонатами, а альбит, адуляр и прежде всего карбонаты являются характерными минералами жил. Известняки вмещающих пород замещаются, но не растворяются в избытке замещающего вещества, как это должно было бы быть при наличии свободной сильной кислоты. Эти факты несовместимы с присутствием в рудном флюиде кислот, более сильных, чем углекислота или кремнекислота. Перенос сульфидов, столь типичных для гипогенных руд, вопреки высказывавшемуся мнению, является делом не простым, если растворы кислые; затруднения сводятся к количественному несоответствию, отсутствию признаков осаждения сульфидов при нейтрализации кислоты и к невозможности объяснить этим путем наблюдающееся различие во времени и пространстве (последовательность и зональное распределение) при отложении обычных сульфидных минералов. Если рудный флюид покидает магму в кислом состоянии, его кислотность в это время должна быть выражена сильнее всего, а общая физическая и химическая энергия быть наибольшей; следовательно, кислотный характер воздействия на ближайшие породы должен был бы проявляться отчетливее всего на глубине. Оказалось, что это находится в полном противоречии с геологическими фактами, так как участки неоспоримого кислотного воздействия наблюдаются в месторождениях, отвечающих сравнительно небольшим глубинам. Гипогенные оловянные руды отнесены к ксенотермальным, т. е. образовавшимся при более высоких температурах, чем большая часть других неглубоких руд, и при более низких давлениях, чем большинство других высокотемпературных руд. Наиболее же глубокие из всех известных проявлений воздействия магматических флюидов на боковые породы вызывают гранитизацию, которая безусловно

представляет собой не изменение, вызванное кислотой, а привнесение целочей, и которая, без сомнения, не могла быть вызвана газообразным агентом.

11. Причины отложения минерального вещества. Условия, управляющие отложением минералов из рудообразующего флюида, изучены в достаточной степени, чтобы по этому процессу составить себе представление о природе флюида. Изучение показывает, что в огромном большинстве случаев наблюдающиеся особенности размещения, окружения и последовательности отложения не согласуются со взглядом, что осаждение обусловлено нейтрализацией кислотности рудного флюида. С другой стороны, помимо преобладающего по своему влиянию фактора — потери тепла, должны быть привлечены гораздо более сложные и трудноуловимые причины отложения для того, чтобы объяснить локализацию руд в связи со структурным контролем и осветить поразительные явления зональности минерального вещества.

12. Жидкость или газ. Физическое состояние, в котором рудный флюид выносится из магмы, признается наиболее важным звеном всей цепи предпосылок, так как оно отражается на способе и времени отделения, движущей силе переноса и даже на химическом составе рудного флюида, а как следствие, и на характере изменения пород и на условиях и причинах отложения минерального вещества. Рассматривается относительная способность жидкости и газа к переносу минерализующих растворов. Как видно, и Феннер и Боуэн признают, что газовая фаза в этом отношении крайне неблагоприятна, факт, подтверждающийся всей совокупностью нашего опыта и наглядно объясняющийся коренным структурным отличием между газом и жидкостью, лишь недавно оцененным должным образом. Само обсуждение расчленено на два раздела: газовый перенос соединений, летучих по своей природе, и перенос легколетучих соединений в газовом растворе при содействии летучих растворителей. Для первого раздела из расчетов Кистяковского и Андерсена, повидимому, вытекает, что давнишнее представление о летучести галоидных соединений совершенно ошибочно в отношении количественной соразмерности процесса. Для второго же раздела установлено следующее: а) что растворимость легколетучих веществ в таком летучем растворителе, как вода, ничтожна в газовой фазе ниже критической температуры раствора; б) что для таких легколетучих веществ, обладающих незначительной растворимостью в жидкой фазе при температуре несколько более низкой, чем критическая температура воды, развитие критических явлений приводит к возникновению газа, практически не содержащего растворимых веществ; в) что для тех мало растворимых веществ, которые обладают значительной растворимостью в жидкой воде близ ее критической точки, критические явления для насыщенных растворов отсутствуют, если не говорить о температурах, неприемлемых в геологическом отношении; г) но если концентрация какого-нибудь одного из этих легко растворимых компонентов достаточно далека от насыщения, критические явления могут иметь место при геологически приемлемых температурах, а газовая фаза мо-

жет содержать значительное количество этого вещества, однако только при условии, что отсутствуют другие растворимые вещества, ведущие себя сходным образом, которые могли бы привести к повышению критической температуры для этого многокомпонентного раствора до неприемлемого уровня — а это условие химической простоты вряд ли может быть встречено в какой-нибудь производной магмы. Совершенно прав был, повидимому, Мори, утверждая, что критические явления невероятны в магмах или магматических производных, за исключением разве поверхностных изменений и эксплозионных выбросов. Короче говоря, способность газовой фазы, безразлично выше или ниже критического состояния, выполнять требующуюся большую работу по переносу минерального вещества признается совершенно несоответствующей этой задаче для условий подземных интрузий, которые одни в состоянии дать концентрацию металлов в объеме, необходимом для образования руд. Росс стоял на правильном пути, когда писал:

«... материалы, образующие руды и жилы, по всем признакам являются магматическими остаточными расплавами, отделившимися при таких физических условиях, которые допускают их существование в виде растворов, богатых твердыми элементами, или даже в виде гидротермальных растворов, причем нет таких законов физики, которые могли бы предписывать им природу магматических эманаций в газовой фазе. Прогрессирующая кристаллизация исходной магмы постепенно, путем непрерывного ряда процессов, привела к концентрации минерализаторов и к образованию богатого водой раствора, и простое перемещение последнего под влиянием давления с того места, где он возник, превратит его в жилообразующий, замещающий или рудообразующий раствор. Если он выносится при высокой температуре в область с низким давлением, он, несомненно, превратится в газовую фазу, и дальнейшая способность его к реакциям будет соответствовать свойствам такой фазы. Если, с другой стороны, раствор находится под достаточным давлением и удаляется медленно через достаточно труднопроницаемые каналы, давление может сохраниться и богатый водой материал, образующий жилу, может остаться в жидкой фазе на протяжении всей своей минерализующей деятельности»<sup>1</sup>.

13. Пояснение понятий «газ» и «кислый». Нельзя не согласиться с тем, что начальный щелочной рудный раствор может притти в состояние кипения и выделить таким образом соответствующее количество газа в любом месте, где такому процессу соответствует соотношение температуры и давления. Но в подавляющем большинстве случаев и в частности на всем протяжении проводящего канала, за исключением менее глубоких участков, потеря тепла восходящего раствора достаточно быстра по отношению к потере давления, чтобы помешать сколько-нибудь существенному и неслучайному вскипанию. Такие условия надо считать «нормальными» равновесием между температурой и давлением. Следовательно,

<sup>1</sup> Physico-chemical factors, controlling magmatic differentiation and vein formation. Econ. Geol., 23, 1928, 878.

жидкое состояние преобладает, а щелочность сохраняется, хотя и с некоторыми колебаниями, так как в одном месте из раствора выпадает больше щелочей, чем поступает в него из окружающих пород, в другом — больше поступает, чем отлагается. Тем не менее, и газ и кислый флюид, безразлично жидкий или газообразный, и кислотное воздействие на породы — являются наблюдающимися кое-где фактами, которые не приходится отрицать и которые должны найти себе объяснение в приемлемой гипотезе, касающейся природы рудного флюида. Объяснения, которые здесь выдвигаются, сводятся к следующему.

а) В вулканических излияниях, жерлах вулканов и, может быть, сильно приближенных к земной поверхности интрузиях, не сопровождающихся взрывами, высокие температуры, обычно свойственные глубинам, внезапно оказываются совмещенными с низкими давлениями, свойственными только ближайшей к поверхности области, и в этих исключительных условиях нарушенного «нормального» равновесия между температурой и давлением в магме могут иметь место испарение, возгон, возникновение пузырей, критическое изменение состояния и другие аномальные явления; не обладая и отдаленным сходством со всем тем, что наблюдается в замкнутой магме, такие наблюдаемые явления представляют собой характерные особенности всего вулканического процесса.

б) В совершенно особых и необычных условиях, на небольшой глубине от поверхности, если сравнивать с общим «гидротермальным» диапазоном глубин, рудный флюид может испытать нечто вроде нарушения своего собственного «нормального» равновесия между температурой и давлением, и в этих условиях высокой температуры и низкого давления дело может дойти до образования в растворе серной кислоты, в результате местной реакции между водой и серой, сопровождающегося превращением до того щелочной жидкости в кислую со всеми вытекающими отсюда последствиями; кроме того, при этих же самых «аномальных» соотношениях температуры и давления жидкость в некоторых случаях может притти в состояние кипения, причем выделяющийся газ, несомненно, будет обладать кислотой, а не щелочной реакцией. Основание для такого толкования можно видеть в некоторых поверхностных явлениях в районах терм и в подземных условиях в некоторых эпитермальных месторождениях, а также в той особой группе ксенотермальных месторождений, в которых явно наблюдается несомненное воздействие кислоты на боковые породы. Последовательность — сначала щелочной, затем кислый раствор, повидимому, преобладает в большинстве тех случаев, когда местное превращение растворов в кислые запечатлено на твердом минеральном веществе, доступном нашим наблюдениям; однако в тех редких случаях, когда подобное необычное или «случайное» превращение в кислый раствор происходило так рано, что работа первоначальной щелочной жидкости оставалась совершенно незначительной, кислое воздействие могло предшествовать следующему за ним щелочному воздействию, связанному с таким изменением равновесия между температурой и давлением в сторону «нормального», что образование кислоты прекращалось. предше-

ствующий перегрев и повторное раскрытие путей могли быть существенными факторами, способствовавшими нарушению «нормального» отношения между температурой и давлением в этих сравнительно неглубоких участках. Вряд ли подобное резкое понижение давления по сравнению с температурой могло иметь место на большой глубине, где образуются лепотермальные, мезотермальные, гипотермальные и пирометасоматические руды, в связи с чем образование кислоты на глубине почти совсем или совсем исключается.

14. Подведение итога. Обзор всех этих выводов приводит нас к некоторым определенным заключениям. Только при условии неизменного отбора благоприятствующих альтернатив из целого ряда спорных решений может найти поддержку положение о выделении кислого газа из нормальной магмы. Шансов на то, что такой результат действительно будет достигнут, немного. Если рудный флюид покидает магму в виде горячего кислого газа, большая часть его достигнет, повидимому, поверхности в виде горячего кислого газа, так как та же постепенно возрастающая «изоляция» проводящего канала, благодаря которой флюид остается горячим и газообразным, будет способствовать и сохранению его кислотности. Даже если бы выделения из магмы были газообразными, они могли бы осуществить только ничтожный перенос легколетучих минералообразующих веществ. Подавляющее число показаний свидетельствует против кислого агента в более глубоких зонах, а веские причины заставляют полагать, что выкипание из магмы, скрытой толщей горных пород, не является существенным фактором. С другой стороны, возможны и действительно имеются в наличии источник, способ отделения и движущая сила для подъема жидкой щелочной эманации — флюида, гораздо лучше приспособленного для переноса минеральных компонентов и по своему составу соответствующего работе, действительно выполненной в процессе как рудоотложения, так и изменения боковых пород. Только при особых условиях, на сравнительно небольшой глубине, допускается наличие в рудном флюиде кислот и газов, причем возникающие таким путем газы фактически не содержат растворимых минеральных веществ. Только в тех случаях, когда массы сильно нагретых расплавленных пород быстро поднимаются до участков с незначительным давлением, газовая фаза может приобрести некоторое значение в качестве средства переноса минералообразующих веществ — а это безусловно не те условия, в которых происходит концентрация металлических руд. Растущее недоверие Линдгрена к пневматолитическому процессу рудообразования и, в конечном счете, отказ от него дают нам новый пример интуитивного знания им руд. А так как Боуэн, Феннер и Росс согласны с тем, что горячая жидкость была тем агентом, которому обязаны своим происхождением руды, являющиеся предметом их изучения, мы, повидимому, вправе применять без всяких ограничений термин гидротермальный к обширному семейству руд от пирометасоматических и гипотермальных до эпитеермальных и телетермальных.

Правильны ли или ошибочны многочисленные предыдущие выводы, в столь значительной мере совпадающие со взглядами Росса,

и правильны ли вообще выводы любого из современных исследователей, работающих над этой обширной проблемой, — все это отступает на второй план перед следующим вопросом, более глубокого значения. Никто, вероятно, не будет отрицать, что любой вывод по данному трудному предмету на сегодняшний день в лучшем случае будет далек от совершенства. Однако крайне важно знать, являются ли направления и методы, которым мы ныне следуем при наших поисках истины, наилучшими, отвечающими современному уровню наших знаний. Нет надобности отчаиваться из-за длины пути до конечной цели, если мы медленно продвигаемся по тропе, наверняка ведущей к ней. Существенно поэтому проверить наши исходные позиции.

Три работника с большим опытом в области физической химии геологических процессов дали то наиболее ценное, к чему привели их размышления над происхождением руд. Три различных и несовместимых результата получены при этом. Почему? Никким образом из этого нельзя сделать вывод, будто бы такой исход означает, что физическая химия, сильная в своей собственной сфере, не может с пользой и уверенно быть применена в проблемах геологии. Наоборот, для того, чтобы преодолеть поверхностность и ограниченность человеческих наблюдений, особенно в таких животрепещущих вопросах, как различные магматические процессы на глубине, геология должна получить от физики и химии все то, что они могут дать ей. Но в таком случае, как нам избежать таких несогласующихся выводов, как те, к которым приходят упомянутые авторы в сборнике Линдгрена? И, в частности, как нам поступить, чтобы выбраться из тупика в вопросе об образовании руд?

Разбор интересующих нас трех статей ясно показывает, что у Росса обнаруживается большее подчинение физико-химических соображений геологическим показаниям, чем у Феннера и Боузона. Геологические доказательства проблемы подобного рода состоят из фактов, непосредственно, относящихся к этой проблеме и действительно наблюдаемых в природе — определенных, осязаемых реальностей, как то: минералов, составов, текстур, размещения. Для процесса рудообразования факты, которыми пользуются геологи, представляют неоспоримые сохранившиеся последствия этого процесса, происходившего много веков тому назад. К несчастью, концентрация водородных ионов (pH), фазовые диаграммы и уравнения закона действия масс, относящиеся к этому процессу, не сохранились и их приходится синтезировать. Геолог наблюдает, что карбонаты обильно отлагались, вместо того, чтобы быть полностью растворенными, поэтому его заключение, что кислотность флюида не могла быть вызвана более сильной кислотой, чем  $H_2CO_3$ , является крайне простым и элементарным выводом, и никакое построение на основании теоретических физико-химических представлений, повидимому, не может ближе подойти к истине. Геолог отмечает в поле, что пегматитовые дайки секутся минеральными жилами; его конечный вывод, что рудообразование следовало за пегматитовой стадией магматической дифференциации, заслуживает большего доверия, чем противоположное мнение,

если оно основано на цепи физико-химических и термодинамических заключений, с каким бы блеском и эрудицией они ни были сделаны.

Однако и это различие еще не вскрывает полностью сложность общей ситуации. Аксиомой является, что приложение математики к сложной проблеме дает ответ не более надежный, чем предпосылки, вложенные в математическую формулировку. Если ответ неверен, ошибка связана, по всей вероятности, не с математическими исчислениями, а с выбором предпосылок. Именно так и обстоит дело и в случае геологии и физической химии.

Затем встает вопрос о методе. Можно исходить из группы предпосылок, применить математические, геологические или физико-химические методы и прийти к результату, который преподносится как единственный возможный результат, из чего делается вывод, что и применявшийся метод является единственным возможным. Но можно начать и с другого конца — исходить из известного результата, приложить к нему свой метод и отсюда вывести предпосылки, которые считать единственными возможными предпосылками, полученными единственным возможным методом. Очевидно, что если бы было известно, каковы верные предпосылки, это были бы уже не предпосылки, а факты. Таким образом, один метод в общем исходит из недоступных и неизвестных событий далекого прошлого и прокладывает себе путь к тому, в чем рассчитывают найти истинные следствия, в то время как другой метод исходит из доступных и известных современных данных и прокладывает путь к тому, в чем надеются найти истинное начало. Различие это несколько напоминает то, какое существует соответственно между дедукцией и индукцией. Вряд ли можно сомневаться, что второй метод в приложении к проблемам, подобным нашей, скорее обещает дать надежный результат, если он находится в одинаково опытных и осторожных руках.

На мой взгляд, именно такая резкая разница существует между методикой Росса, с одной стороны, и Боуэна и Феннера, с другой. Росс исходил из данной массы руд, характер, последовательность и обстановку которых он установил тщательнейшим образом как фактический материал. К этим фактическим данным он приложил затем такие принципы и взаимоотношения из общей суммы физико-химических теорий, которые, как казалось, лучше всего согласуются шаг за шагом со всеми фактами в его построении и всеми нашими наиболее надежными выводами относительно больших глубин. Последовательно придерживаясь этого метода, он постепенно доходит до начальной точки процесса, а именно, до родоначальной магмы. Отсюда он обращается к законченным рудам и составляет свое мнение относительно вероятного пути образования из магмы этих самых руд. Так как рассматриваемые руды, в частности, повидимому достаточно характерны для многих гипогенных сульфидных месторождений, Росс выдвигает общую теорию происхождения подобных руд. Подчеркнем, что всестороннее значение этих руд служило ему основной исходной точкой.

Боуэн и Феннер не следовали такому методу. Как построение, так и содержание их статей показывает, что им отправной базой служили не детальные фактические данные по рудам и их окружению, а скорее их собственные идеи относительно источника магмы. Исходя из готовой концепции об отношении рудного флюида к магме, каждый из них прокладывает себе дальше путь рядом последовательных рассуждений, главным образом физико-химического характера, в надежде достигнуть результата, приемлемого с точки зрения отложения руд. А так как даже и теперь еще и даже для таких выдающихся специалистов по петрогенезу, как Боуэн и Феннер, магма является довольно смутным и эластичным понятием, оба они чувствуют необходимость в известных предпосылках до начала поисков способа образования руд.

Мы видим, что эти опытные исследователи магм, проработавшие под одной крышей в течение многих лет, после правильного начала обращаются к различным в корне предпосылкам относительно магмы в качестве основы для соответствующих остальных их операций. Феннер приходит к выводу, что расплавленная магма рано теряет большую (вероятно большую?) часть летучих компонентов<sup>1</sup> и что последние составляют рудный флюид. Боуэн, с другой стороны, полагает, что летучие компоненты сохраняются, пока общая ортотектическая кристаллизация не даст остаточного пегматитового раствора, и что из этой жидкости, сильно отличающейся по составу от исходной магмы, образовался в свою очередь особый рудный флюид.

При таком заметном различии в исходных предпосылках не удивительно, что во всем дальнейшем изложении авторы обращаются к различным физико-химическим принципам, придают разное значение принципам, которыми оба они пользуются, сопровождают выводы различными суждениями и в конце концов приходят к сильно отличающимся и несовместимым заключениям.

Однако оба автора принимают в качестве исходной предпосылки отделение рудного флюида путем кипения. Феннер — путем простого кипения выше критической температуры выкипающей фракции. Боуэн — путем ретроградного кипения ниже критической температуры. Почему оба остановили свой выбор на кипении и на газообразном рудном флюиде?

В свое время я позволил себе в качестве ответа высказать следующую догадку: потому что газовая фаза, как будто, представляла некоторые преимущества для разрешения задачи отделения и нагнетания вверх рудного флюида; но главным образом потому, что авторы, совместно с другими сотрудниками Геофизической лаборатории, изучавшими горячие источники, фумаролы и вулканы, находились под глубоким впечатлением, которое произвели на них наглядные события и условия, существующие на поверхности — крайней верхней точки магматической «дымовой трубы», и, повидимому, пришли к заключению, что наблюдаемые здесь явления

<sup>1</sup> Этот крайний взгляд был, повидимому, несколько видоизменен в обзоре Феннера работы Росса (см. выше стр. 24).

весьма характерны и для того, что происходит на протяжении всего пути вниз до магматического очага. Мне кажется совершенно бесспорным, что годы слепой веры в первичную природу и повсеместное распространение газа от поверхности на всем пути вниз до магмы не только привели к совершенно ошибочному толкованию и запутанному и околному объяснению поверхностных выделений, находящихся в жидком состоянии, — горячих источников, но послужили причиной также того, что Боуэн и Феннер начали свои исследования руд с весьма ненадежной предпосылки.

Допустив такие начальные положения, они и в дальнейшем вынуждены предпринимать странные, неестественные и сомнительные шаги: новая конденсация, приобретение щелочных свойств, неправильный взгляд на возрастные соотношения и осложнение явлений коренной переработкой — все это принадлежит к числу трудностей и неправдоподобных представлений, вытекающих из положений одного из авторов или их обоих; к тому же они обычно проявляют полное невнимание к альтернативному решению в тех случаях, когда из двух или нескольких возможностей рассматривают только одну.

Боуэн более последователен в развитии принятой им предпосылки: введя примерно столько осложнений, сколько можно считать приемлемыми, он в конце концов откровенно признает руды продуктом кислого жидкого раствора. Тот факт, что средняя гипогенная руда и ее окружение ясно говорят о том, что руда не является продуктом кислого раствора, его не смущает. Даже те существующие в действительности руды, которые обнаруживают признаки кислотного воздействия, относятся преимущественно к неглубоким образованиям, а потому, вероятно, сменяются внизу рудами, происхождение которых не связано с кислыми растворами; таким образом и для этих руд исключаются история и способ образования, предусматриваемые механизмом Боуэна.

Феннер, благодаря лучшему пониманию того, что в действительности представляют собой руды и их окружение, не останавливается на стадии кислого газа, а также и на стадии кислой жидкости, как это делает Боуэн. Для того, чтобы добиться чего-то, что приближалось бы к рудам «в том виде, как мы их наблюдаем», ему приходится маскировать свои первые и главные отложения кислого газа наложением воображаемой переработки щелочного раствора, который он считает способным независимо выполнить все необходимые функции. Повидимому, единственным основанием (или доказательством) для такой предполагаемой переработки является побуждение скрыть недочеты рудоотложения предположением существования более раннего кислого реагента и привести в согласие с убеждением, что выделение из магмы должно было происходить в виде газа.

Таким образом, придя к неизвестному концу и приняв для этого неизвестного концепцию газовой фазы, Феннер и Боуэн получают результаты, которые должны в корне отличаться друг от друга, так как они обусловлены сильно разнящимися реагентами. Руды Боуэна — воображаемые; руды Феннера получены только

благодаря воображаемой последовательности процессов. С другой стороны, Росс, начавший с известного конца ряда, имея дело с физико-химическими взаимоотношениями и принципами, никогда не терял связи со здоровыми началами, заложенными в геологические факты.

Если бы Боуэн, Феннер и другие, столь же компетентные исследователи согласились применять физико-химические соображения по рудоотложению, идя от известного к неизвестному, как это делал Росс, они, по всей вероятности, пришли бы к заключению, близкому к полученному Россом, которое в свою очередь совпадает с выводами Линдгрена и многих других геологов, основывавшихся на интерпретации накопленных опытных данных по рудам.

Высказанное здесь критическое отношение не должно никого вводить в заблуждение относительно истинной ценности рассматриваемых статей Боуэна и Феннера. Изучение и расчленение идеи отделения летучих в виде газовой фазы для понимания рудоотложения было совершенно необходимо; и замечательно удачно, что это было сделано такими искренними приверженцами этой идеи, обладающими в то же время богатейшим опытом и с геологической и с физико-химической точки зрения. Ими оказана истинная услуга науке о магмах и учению о рудных месторождениях тем, что были ясно выдвинуты наиболее веские доводы, какие могут быть приведены в пользу возникновения и активности газовой фазы. Особенно полезен перекрестный огонь по этому общему вопросу, возникающий вследствие наличия двух мнений вместо только одного. Совершенно независимо от этого вопроса, который бесспорно длительное время будет темой дебатов — являются ли их предпосылки и выводы здравыми или нет, статьи эти изобилуют ценными сведениями и стимулирующими взглядами, за которые каждый занимающийся изучением вопросов рудоотложения должен быть глубоко признателен авторам.

Если бы кто-либо в поисках широкого освещения современных теорий о происхождении гипогенных руд поставил вопрос — с чего начинать, ему не мог бы быть дан лучший совет, как прочесть с одинаковым вниманием все разделы главы III сборника Линдгрена. Но когда он ознакомится с ними, ему следует обратиться к более полному отчету Росса [стр. 40—62] для того, чтобы устранить многие противоречия, рассеять многие сомнения и ознакомиться с прекрасно изложенными положениями о рудообразовании, повидимому, созвучными с накопленными сведениями о самих рудах.

Раньше чем закончить настоящую статью, сделаем еще одно замечание.

Твердое убеждение в существовании обильной газовой фазы, одновременной с жидкой магмой, имело более широкие последствия, чем только связанные с вопросом об образовании руд, где богатый летучими флюид играет существенную роль. Поощряемые физико-химиками и под давлением их авторитета специалисты по общей геологии и особенно петрологии становились все более и более смелыми и настойчивыми в отношении активности газа в сравнительно бедной летучими компонентами магме в собственном

смысле. Они не только прошли весь путь, проложенный физико-химиками, но во многих случаях зашли еще гораздо дальше, как на то справедливо жалуется Феннер [стр. 70].

Обычным становится, что приходится читать или слышать о «содержании газа» или о «газе, присутствующем» в магмах, когда на самом деле отдельная газовая фаза не имеется в виду или, по крайней мере, достоверно не доказана. Это просто небрежности терминологии, но они поощряют недостаточно строгое мышление и фантастические предположения. Отсюда, повидимому, родилось нечто вроде мистической веры в способность «газа» в магме совершать любое трудное действие, иначе остающееся непонятным. Как иначе можно расценить такие предположения, как, например, то, что некоторые важные случаи дифференциации, влекущие за собой крупные изменения в составе, обусловлены всеохватывающим газовым переносом полевошпатовых молекул из одного участка крупного магматического тела в другой, отдаленный; или предположение, что огромная работа по замещению породы (щелочными компонентами) при гранитизации может быть совершена газом.

Не пора ли подтянуть наше мышление и нашу терминологию так, чтобы они близко соответствовали фактам и разумным предположениям, вместо того чтобы потворствовать чрезмерной спекуляции? Давайте говорить о наших фазах в том виде, который им, вероятно, свойственен, а в случае сомнений — проявлять осторожность. Нет «газа» в наполненной бутылке пива, пока она не откупорена. «Вода, вода повсюду» в виде жидкости под тропиками не противоречит факту, что у полюсов нет «ни капли воды, чтобы напиться». Несчетные тонны водяного пара завлакивают небеса, а океан содержит едва пузырек его. Обильный газ, выделяемый лавами, вулканическими кратерами и фумаролами — единственными доступными нашим наблюдениям отдушинами к действующей магме, — не доказывает еще, что газ как таковой в изобилии имеется там, где при резко иных условиях совершается на глубине главная часть магматической работы.

Больше того, давление в полной бутылке пива наиболее сильно до того, как она откупорена, и именно потому, что газовая фаза отсутствует. Равным образом и давление пара в магме, обусловленное содержащимися в ней летучими веществами, наибольшее, пока они удерживаются в растворе, и начинает падать, как только становится возможным их выделение в виде газа. Поэтому обычное утверждение, что вулканические взрывы вызываются газами, высвобождающимися из магмы, ставит, как говорят англичане, «повозку впереди лошади». Цельность в структурном отношении вышележащей кровли, повидимому, нарушается максимальным воздействующим на нее давлением, т. е. тогда, когда летучие вещества по преимуществу удерживаются еще в жидком состоянии. С того момента, как эта структура обрушится, вследствие чего будет ослаблено то, что удерживает в равновесии магматическую систему, летучие компоненты бурно испаряются, и сильнейшее расширение газа, здесь таким образом возникшего, продолжает и завершает эксплозионный процесс.

Если стремление разъяснить путаницу, возникшую из таких разногласий по поводу образования гипогенных руд, и серьезное желание помочь устранить эти трудности, привели меня к недостаточно сдержанным и чересчур натянутым аргументам, не вправе ли я рассчитывать на снисхождение, учитывая сложность и глубину проблемы? Не может быть места иллюзиям по поводу того, что высказанные здесь точки зрения будут с жаром приняты и что в них содержится бесспорная и окончательная истина. Достаточно надеяться, что они позволят, до известной степени, подвергнуть дальнейшему рассмотрению и изучению группу концепций, которым, повидимому, грозила опасность оказаться на некоторое время в числе «разрешенных», но разрешенных лишь под давлением авторитета, а не путем доказательств. Величайшее значение для будущего имеют дальнейшие физические и химические исследования в непосредственной связи с авторитетным геологическим руководством и геологической интерпретацией, так как только при таком, самом тесном сотрудничестве целого ряда исследователей, путем перекрещивания их мнений, сложившихся на основе разнообразных фактов и опыта, можно рассчитывать на удачу в погоне за глубочайшими тайнами породы. Что касается наиболее трудной стороны этой частной задачи, а именно, сущности характера и проявлений магматических эманаций, то никто не вооружен лучше для высказывания своего мнения, чем Мори. Обсуждая итоги тридцатилетнего изучения минеральных систем в Геофизической лаборатории, он ссылается на большое число химических компонентов, изучение которых совершенно необходимо даже для приближенного только понимания изверженных пород, и на еще значительно большее их число, которое надо принимать в расчет, чтобы приблизиться к познанию рудных месторождений, и затем говорит<sup>1</sup>:

«Двойные системы понять легко; тройные системы могут быть постигнуты без особого труда при известном навыке, даже если и температура и давление рассматриваются как переменные; в четырехкомпонентных системах трудно разбираться, даже если исключить давление из числа переменных. Пятикомпонентную систему почти невозможно представить<sup>2</sup>. Необходимые опыты могут быть проведены в лаборатории; химические законы служат вполне соответствующим руководящим началом как при экспериментальной работе над упрощенными системами в лаборатории, так и для сложных природных систем; но чтобы представить себе даже только приближение к природе, ничего не говоря о самой природе, — требуется большая способность представления, чем та, которой мы теперь обладаем. Способность представления накладывает известное ограничение в познании нами процессов природы».

<sup>1</sup> The studies in silicate chemistry of the Geophysical Laboratory. Trans. Soc. Glass Techn. 20, 1936, 233—254.

<sup>2</sup> Речь идет о представлении систем состав—свойство в физико-химических граммах. Уже четырехкомпонентная система только для изображения состава требует диаграммы-модели в трехмерном пространстве. Для обычных методов представления систем из большего, чем четыре, числа компонентов, надо было бы прибегать к свойствам пространств четырех и выше измерений; такое многомерное пространство мы можем мыслить, но не можем его представить так, чтобы получились наглядные диаграммы. *Ред.*

## *Э. Ингерсон и Дж. Мори*

Earl Ingerson and George W. Morey. *Econ. Geol.* 1940, No. 6,  
772—785

Проф. Грейтон в своей недавней статье проделал внушительную работу по разбору и интерпретации данных, касающихся природы рудообразующего флюида. В число рассматриваемых вопросов им включено: источник, состав и состояние подвижного агента переноса; механизм и время процесса выделения из главного магматического тела металлов и сопровождающих их веществ; движущая сила, способная осуществить перенос; условия и причины осаждения минералов и сопутствующее ему изменение боковых пород, вызываемое движущимся флюидом. Эта статья ценна не только благодаря обширному опыту автора по рудным месторождениям, но и в связи с чрезвычайной полнотой, с которой им охвачены имеющиеся в литературе мнения относительно природы рудообразующего флюида. Последующие замечания имеют в виду дополнить и уточнить некоторые из положений Грейтона, особенно в тех случаях, когда он дает свое толкование взглядам, опубликованным нами каждым в отдельности и совместно.

**Состояние растворов.** Мнения сходятся на том, что источником рудообразующих растворов является магма в стадии кристаллизации, но состояние, в котором эти растворы выделяются магмой, и механизм этого процесса служат предметом разногласий.

Состояние магмы в последние стадии дифференциации неизвестно; наши выводы мы можем основывать только на геологических наблюдениях, интерпретируемых в свете физической химии растворов. Повидимому, всеми предполагается, что в последние стадии состав магматического раствора преимущественно пегматитовый, заключающий накопившиеся аксессуарные составные части, летучие и нелетучие, оставшиеся после кристаллизации большей части первоначальной магмы. К числу этих компонентов магмы принадлежат окислы более редких щелочных металлов, затем галоидные соединения, борная кислота, фосфорная кислота, двуокись углерода, сера и, наконец, вода. Общий состав и относительные количества этих компонентов будут находиться в зависимости от состава родоначальной

магмы и ее последующей истории, а следовательно, в каждом отдельном случае будут наблюдаться отступления от картины, взятой в целом.

Дальнейшая история такого предполагаемого магматического раствора — это то, что интересует нас в первую очередь. При разработке ее исследователь скован противоречиями в геологических наблюдениях и отсутствием положительных сведений, особенно в отношении содержания воды, которое можно предполагать в разные стадии дифференциации. Тем не менее, мы придерживаемся того мнения, что этот первичный магматический раствор никогда не бывает в надкритическом состоянии.

Последний термин требует определения, а для того, чтобы это сделать, в свою очередь необходимо остановиться на вопросе о критических конечных точках. Так как эта тема довольно детально рассмотрена нами в одной из предыдущих статей<sup>1</sup>, мы можем ограничиться здесь кратким резюме.

В бинарной системе, в которой кривая растворимости или плавкости непрерывна от точки эвтектики до точки плавления компонента с более высокой температурой плавления, критическая кривая (или кривая точек перегиба), соединяющая критические точки двух компонентов, лежит выше кривой точек плавления. Под кривой точек плавления понимается кривая, отвечающая составу жидкой фазы, существующей одновременно с твердой и парообразной; с ней связана кривая, которая дает состав присутствующего одновременно пара. В общем случае приходится исходить из предположения, что эта парообразная фаза содержит оба компонента, т. е. что она тоже представляет собой раствор.

В системе подобного типа критические явления не наблюдаются у насыщенных растворов. Смесь данного состава должна быть нагрета выше температуры полного растворения при каком-то неизвестном, соответственно высоком давлении, чтобы обнаружить критические явления, т. е. притти в состояние, при котором состав и свойства жидкости и сосуществующего пара становятся тождественными. Примером такого случая может служить бинарная система  $H_2O-K_2Si_2O_6$ .

В другом случае кривая плавкости пересекается критической кривой, а так как критическая температура второго компонента лежит значительно выше его точки плавления, должны иметь место не одно, а два пересечения, которые и определяют первую и вторую критические конечные точки. Область ниже первой критической конечной точки и выше второй критической конечной точки характеризуется одновременным существованием парообразной, жидкой и твердой фаз, в пределах же области между критическими конечными точками возможны только две фазы — твердая и газовая. Фиг. 2 в упомянутой статье Мори и Ингерсона показывает, что в критических конечных точках парообразная и жидкая фазы приобретают тождественный состав; газо- или парообразная фаза

<sup>1</sup> Morey G. W. and Ingerson Earl. The pneumatolytic and hydrothermal alteration and synthesis of silicates. *Econ. Geol.*, 32, 1937, 607—761.

сама по себе представляет раствор. Так как речь идет о температурах, превышающих критическую температуру данного раствора, принято рассматривать его как газ, а не как пар, ввиду же отсутствия отчетливого различия между жидкостью и газом материалы в этом надкритическом состоянии часто обозначаются как «флюидные» фазы.

Ссылками на Мори<sup>1</sup> неоднократно обосновывается то положение, что «магматические растворы» никогда не достигают надкритического состояния, т. е. что им никогда не свойственно состояние выше критической точки, причем говорится это не о воде, а о сложном магматическом растворе, на свойствах которого отражается каждый компонент. Грейтон говорит, например (стр. 137):

«Совершенно прав был, повидимому, Мори, утверждая, что критические явления невероятны в магмах или магматических производных...» (выделено Ингерсоном и Мори).

Необходимо заметить, что в приведенной цитате содержатся две различные идеи. Одна из них — это, что магмы или магматические растворы никогда не бывают в надкритическом состоянии. Нам кажется, что это правильно. Но к этому сделано добавление — «или магматических производных», точное значение которого нам непонятно.

Продолжающийся процесс фракционной кристаллизации приведет к обособлению жидких маточных магматических растворов, непрерывно обогащающихся водой. Это могут быть те «магматические производные», о которых говорит Грейтон; если так, мы вполне согласны с ним.

Однако можно толковать это выражение как обозначающее парообразную фазу, существующую одновременно с ортомагматическим раствором. Возможность существования подобной парообразной фазы неоднократно допускается проф. Грейтоном в его доводах, и нам представляется желательным высказать по этому поводу нашу точку зрения.

Образование парообразной фазы в целом внутри жидкой фазы или по соседству с ней зависит исключительно от относительных давлений. Давление пара магматического раствора обладает определенной величиной; раствор находится под известным внешним давлением. Если давление пара больше внешнего давления, образование парообразной фазы будет иметь место, если же оно меньше внешнего давления, парообразная фаза образоваться не может. Как указывает Грейтон, говорить об этой потенциальной парообразной фазе как о «содержании газа» в магме — это значит пользоваться недостаточно точной терминологией, что неизбежно ведет к путанице. Кроме того, «кипение» требовало бы наличия поверхности раздела, дающей возможности пару улечься. Образование пара в общем невероятно.

Возможен, однако, и другой механизм. Магма не замкнута в непроницаемой оболочке. Покрывающий и окружающий материал обладает пористостью, и парообразная фаза в состоянии проник-

<sup>1</sup> Morey G. W. Relation of crystallization to the water content and vapor pressure of water in a cooling magma. Jour. Geol., 32, 1924, 291—295.

нуть в поры, свободные от более вязкой жидкой фазы. Это не кипение, но все же возможный способ отделения «магматической производной». Такую именно возможность допускал Ингерсон<sup>1</sup>. Эта производная фаза могла проникать по трещинам и трещинкам; нередко она проявляется вокруг интрузивов более или менее однообразным метаморфическим ореолом, независимым от разломов.

Пар, находящийся в равновесии со сложным раствором, по составу отличается от жидкости, и в рассматриваемом нами типе раствора различия будут значительны. Если пар сгущается в жидкость на некотором расстоянии от магмы, эта жидкость — раствор магматического происхождения — будет отличаться от материнского ортомагматического раствора. В частности не исключено, что производный раствор может обнаруживать критические явления или может быть получен в надкритическом состоянии. Эта система отличается по составу от ортомагматического раствора.

Упустив из виду различия между этими двумя типами магматических производных, Грейтон утверждает, будто Мори и Ингерсон «высказали противоречивые взгляды на значение критических явлений в магматических жидкостях», создавая тем впечатление, будто мы намеревались, но не оказались в состоянии в нашей совместной статье обосновать различия в наших взглядах по поводу пневматолитической и гидротермальной деятельности<sup>2</sup>. Между тем, в предыдущих статьях Мори рассматривал ортомагматические растворы, а Ингерсон — водные растворы, происходящие из последних упомянутым выше путем, и ни малейшего разногласия здесь не было и нет. Ингерсон никогда не утверждал, будто ортомагматические растворы могут когда-либо переходить в надкритическое состояние, а Мори никогда не говорил, что паробразная фаза в равновесии с такими растворами, вероятно, обладает температурой, не превышающей ее критической температуры, т. е. критической температуры массы того же состава, что и пар.

Другой случай неверного толкования, вызванного тем же недостаточным учетом различий между ортомагматическими растворами и их производными, встречается на стр. 56: «...то, что в его (Мори) намерения явно входило показать, что подобные воды горячих источников, поскольку происхождение их магматическое, на всем своем пути от магмы находятся в состоянии жидкости». В цитируемом Грейтоном месте Мори говорит то, что имеет в виду: что магма остается жидкой, пока она не достигнет гидротермальной стадии или стадии горячих источников; но нигде он не говорит и не имеет в виду чего-либо относящегося к ранним эманациям, которые на всем пути до поверхности будто бы находятся в жидком состоянии.

Механизм выделения. Образование такой паровой фазы и жидкого раствора, в который она переходит там, где температура достаточно понижена, должно представлять собой

<sup>1</sup> Ingerson Earl. Relation of critical and supercritical phenomena of solutions to geologic processes. Econ. Geol., 29, 1934, 454—470

<sup>2</sup> Morey and Ingerson, op. cit.

вполне непрерывный процесс. Тем не менее Грейтон, несмотря на значительность проявлений ранних по времени образования паров (для которых в поле имеются обильные доказательства в виде метаморфических ореолов вокруг интрузий), объясняет происхождение своей рудообразующей жидкости внезапным расщеплением остаточной магмы на два несмешивающихся жидких слоя. Боуэн<sup>1</sup> показал, что этому представлению противоречат полевые наблюдения; тем не менее Грейтон считает, что подобное расщепление возможно и действительно имело место.

Не подкрепляется ли это допущение и какими-либо лабораторными опытами, которые нам были бы известны? Прежде всего, если растворы обладают таким составом, какой приписывает им Грейтон, т. е. если это богатая силикатами фаза с 90% силикатов и 10% воды и богатая водой фаза с 5—10% растворенного минерального вещества (стр. 121, прим. 2), то при температуре, обуславливающей жидкое состояние богатой силикатами фракции, богатая водой жидкость находилась бы выше своей критической температуры. Для 10%-ного раствора температура возросла бы не более чем на 30° (Хитаров и Иванов<sup>2</sup> нашли, что для 15%-ного раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  критическая температура воды повышается только на 28°).

Нам представляется невероятным, чтобы магматическое производное, содержащее 90% силикатов (преимущественно кремнекислота и компоненты молекул полевого шпата, если по составу оно близко к пегматиту) могло быть жидким при температуре, не намного превышающей 400°С. Чтобы быть в жидком состоянии при таких температурах, силикатный слой должен был бы состоять главным образом из щелочных силикатов, что противоречит полевым наблюдениям, причем если бы даже раствор имел такой состав, он, судя по лабораторным опытам, обладал бы смешиваемостью с раствором, содержащим 90% воды.

Для того, чтобы обосновать идею несмешиваемости, ссылались на присутствие боратов, сульфидов, фторидов и т. д. Это в большинстве случаев остается спекуляцией; экспериментальные данные отсутствуют почти полностью, если же они имеются, то не говорят в пользу идеи несмешиваемости, скорее даже делают ее еще менее вероятной. Правда, значительное содержание упомянутых выше составных частей приводит к несмешиваемости жидкостей в некоторых безводных силикатных системах. В системе  $\text{B}_2\text{O}_3$ — $\text{CaO}$ — $\text{SiO}_2$ , обладающей наиболее обширной областью несмешиваемости среди всех изученных до сих пор подобных тройных систем, 90%  $\text{Na}_2\text{O}$  полностью ликвидируют несмешиваемость. Следовательно, можно предполагать, что в намечаемых Грейтоном слоях окислы щелочных металлов должны содержать в достаточном количестве, чтобы воспрепятствовать возможной несмешиваемости жидкостей. Если же нет, то 90% воды в одном из слоев почти наверно предотвратили бы такую возможность.

<sup>1</sup> Bowen N. L. Evidence of liquid immiscibility in a silicate magma Jour. Geol., 34, 1926, 71—73.

<sup>2</sup> Chitarow N. J. and Iwanow L. A. Kritische Temperatur des Wassers und der wässerigen Lösung des kieselsauren Natriums. Zentr. Min., 1936, 45—54.

По нашему мнению, доводы говорят против вероятности гипотезы несмешиваемости жидкостей в качестве процесса магматической дифференциации, и подавляюще эти доводы свидетельствуют против несмешиваемости в те стадии, когда возрастает значение воды. Кроме того, такая гипотеза является лишней потому, что присутствующая всегда парообразная фаза открывает возможность более простого и более вероятного способа переноса.

Концепция переноса при помощи паровой фазы подкрепляется и теорией и экспериментальными данными. Мнение, что растворимость теряется в критической точке, давно уже было признано неправильным, а то, что перенос действительно может иметь место, доказано фактами, постепенно накопленными в течение ряда лет изучения водных растворов выше критической точки воды.

Грейтон (стр. 50) в качестве довода против растворимости в газовой фазе напоминает обычную лабораторную практику, например, количественное разделение выпариванием досуха. Несомненно, что только ничтожные количества нелетучих компонентов могут перейти в раствор при атмосферном давлении, но при  $500^{\circ}\text{C}$  и давлении в 9000 атмосфер (стр. 16) обстановка складывается совсем иначе. Плотность, количество воды в единице объема является важнейшим фактором растворимости в парообразной фазе, а для  $500^{\circ}$  и 9000 атмосфер уравнение Горансона<sup>1</sup> дает для объема 1 г воды  $1929 \text{ см}^3$ . Свойства воды при таких условиях едва ли можно сравнивать со свойствами ее в котлах высокого давления, и доводы, приведенные на стр. 62, приходится признать несостоятельными.

Растворимость в некоторых системах убывает при приближении к критической температуре, но нет экспериментального доказательства того, чтобы растворимость приближалась к нулю в какой-либо системе, в которой не имеет места изменение фазы около критической температуры или регрессия растворимости при более низких температурах. К тому же растворимость увеличивается выше критической температуры при возрастании как температуры, так и давления<sup>2</sup>, и вполне вероятно поэтому, что вода в виде газа в условиях, близких к магматическим, может растворить больше нелетучего материала, чем жидкая вода при  $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$ . Прочий, кроме преобладающей воды, материал может быть либо принесен водой при ее движении от магмы, либо проникать сквозь газ путем диффузии. Грейтон (стр. 85) выдвигает диффузию как фактор, который может объяснить исключительную силу проникновения рудной жидкости. С таким же успехом, как при жидких растворах, это может быть достигнуто при помощи газообразной воды выше ее критической температуры.

Экспериментальные доказательства того, что вода выше ее критической температуры может содержать в растворе значительные количества нелетучих веществ, хорошо известны. Грейтон при-

<sup>1</sup> Goranson R. W. Silicate-water systems: Phase equilibria in the  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--H}_2\text{O}$  and  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8\text{--H}_2\text{O}$  systems at high temperatures and pressures. *Am. Jour. Sci.*, 35A, 1938, 71-79.

<sup>2</sup> Hannay J. B. and Hagarth J. On the solubility of solids in gases. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 29, 1879, 324-326.

водит их, но указывает, что испытывавшиеся смеси все были растворимы, и категорически утверждает, что «мы вправе рассчитывать только на действительно ничтожный перенос  $\text{SiO}_2$ , растворенный в газообразной  $\text{H}_2\text{O}$ ». Прежде всего мы не нуждаемся в доказательстве растворимости чистой  $\text{SiO}_2$  в газообразной воде, чтобы объяснить перенос кремнекислоты и отложение ее в виде кварца. Кварц является первичной фазой в силикатных растворах, которые содержат значительные количества и других материалов, способствующих его растворимости (например в растворах, содержащих  $25\% \text{Na}_2\text{O}$ ).

Это дает удовлетворяющий всем требованиям способ переноса. Однако новейшие данные показывают, что кварц может быть перенесен и отложен как таковой и в отсутствие щелочей. В последнее время в нашей собственной лаборатории перестраивалась паровая печь и при этом было сделано несколько очень интересных наблюдений. Печь находилась в действии в течение 9 месяцев, причем было проведено 250 операций, во время которых средняя температура в бомбе составляла  $450^\circ\text{C}$ , а давление 3000 фунтов на квадратный дюйм. Температура наиболее горячей точки внутри печи варьировала примерно от 600 до  $1050^\circ\text{C}$ . При каждом обороте печи применялось от 20 до 30 г воды, в зависимости от того, сколько ее накапливалось в течение данной операции. Следовательно, общее количество введенной воды превышало 5000 г, но, по всей вероятности, не достигало 7500 г. При вскрытии бомбы и печи оказалось, что около 50 г кварца отложилось на трубчатых перегородках и около верхней части бомбы. Кремнекислота была извлечена из огнеупорных трубок в бомбе и не могла быть перенесена никаким иным путем, как только газообразной водой.

Отдельные операции длились от 2 до 24 часов — вероятно недостаточно продолжительное время для того, чтобы газообразная вода могла быть насыщена кремнекислотой, особенно при более поздних операциях, когда значительная часть кремнезема, который мог быть извлечен, была уже вынесена из трубок. Но если считать, что вся вода при каждой операции была насыщена и что каждый раз весь кремнезем осаждался в печи, мы имели бы растворимость в пределах от  $\frac{2}{3}$  до 1%, и это при таком незначительном давлении. Здесь может быть выдвинута мысль о диффузии и, следовательно, повторной службе растворителя. Мы не возражаем против этого, ведь то же самое может происходить и, несомненно, происходит в природе. Это, без сомнения, говорит о большем, чем «ничтожный перенос  $\text{SiO}_2$ , растворенной в газообразной  $\text{H}_2\text{O}$ »<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Недавно нам удалось получить количественные данные (неопубликованные), показывающие определенно, что дистиллированная вода растворяет больше (свободной от щелочей) кремнекислоты при  $500^\circ\text{C}$  и 575 атмосферах, чем при любой температуре ниже критической температуры воды. (Данные для более низких температур взяты из литературы: Moseley and Ingerson, 1937, фиг. 11).

Растворимость выражается величиной того же порядка, что и в приведенном случае отложения кремнезема в паровой печи, и достаточно велика для осуществления переноса в парообразной фазе крайне значительных количеств кремнезема, в сущности больших, чем, вероятно, могло бы быть перенесено жидкой водой при любой температуре.

На время одной операции внутрь печи была помещена кварцевая трубка в качестве добавочной трубчатой перегородки, и к концу операции платиновая фольга, окружающая навеску, была вся покрыта мелким кремнеземом. Навеска была подвешена совершенно независимо от кварцевой трубки.

Дополнительное доказательство дает прогрессирующее загрязнение термопары в паровой печи железом из заключающей навеску бомбы. Хотя термопара висит свободно среди газообразной воды, она настолько быстро поглощает железо<sup>1</sup>, что необходимой становится частая калибровка. В последнее время применяется прокипяченная дистиллированная вода, свободная от галоидных соединений и от  $\text{CO}_2$ ; поэтому железо должно было переноситься в виде  $\text{Fe}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  или  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  — соединений, которые все не только не летучи, но и крайне мало растворимы при обычных условиях.

Грейтон (стр. 61) толкует опыты Грейга, Мервина и Шеферда<sup>2</sup> как показатель очень незначительного переноса кремнезема. Опыты эти производились в трубках при низком давлении паров  $\text{H}_2\text{O}$ , и самый незначительный перенос в таких условиях указывал бы на значительный перенос при магматическом давлении. Упомянутые авторы сами не уверены в том, что их опыт опровергает возможность переноса кремнекислоты газами. Шеферд<sup>3</sup>, например, склонен видеть в нем указание на то, что ничтожная порция воды может привести в движение значительное количество кремнекислоты.

Относительно механизма отделения рудообразующего флюида в виде газа или пара Грейтон полагает, что для этого необходимы уменьшенное давление и кипение (стр. 56). Мы уже останавливались на этом вопросе и высказывали свое мнение, что должны существовать поры или каналы, по которым движутся растворы, причем заполнены они с самого начала парообразной фазой. Может не быть существенных или даже заметных результатов, пока дифференциация не достигнет известного уровня, но важно то, что эволюция газовой фазы непрерывна во времени и что для возникновения ее не требуется внезапного падения давления и кипения магмы. С развитием дифференциации меняется характер и количество газовой фазы, но выделение материала в эту фазу и через нее является нормальным и непрерывным процессом, разъяснение которого менее связано с «гадательными предположениями» (стр. 56) чем расщепление магмы на два несмешивающихся жидких слоя.

Движущая сила. Грейтон старается доказать, что газ не может быть источником той силы, которая вызывает движение растворов вверх, так как в каналах, по размерам отвечающих жилам, вода потекла бы обратно, не будучи в состоянии удерживаться впереди проникающего газа. Однако крайне невероятно, чтобы могли существовать открытые полости таких размеров в пределах давлений и температур, при которых растворы представ-

<sup>1</sup> Определение Циеса.

<sup>2</sup> Greig J. W., Merwin H. E. and Shepherd E. S. Notes on the volatile transport of silicas. Am. Jour. Sci., 25, 1933, 61—73.

<sup>3</sup> Частное сообщение.

ляют собой газы; а ближе к поверхности жидкость проталкивается жидкостью же, расположенной ниже, которая в свою очередь проталкивается газом, находящимся в более узких нижележащих каналах.

По словам Грейтона (стр. 139), «если рудный флюид покидает магму в виде горячего кислого газа, большая часть его достигнет повидимому, поверхности, в виде горячего кислого газа». Это зависит от природы и температуры окружающих пород. Нет причин, почему бы эманациям не конденсироваться при охлаждении, образуя жидкую оболочку вокруг газовой оболочки. Такой вывод представляется нам более вероятным.

Отложение. а) Состояние раствора. Нет таких критериев, которые позволили бы определенно сказать, образовалось ли какое-нибудь месторождение из газообразного или жидкого раствора. Если давление выше критического, растворение, перенос и отложение непрерывны; отсутствует резкий перелом при критической температуре; поэтому для большинства рудных месторождений критерии в поле, повидимому, найдены быть не могут. Можно различать три общих случая.

1) Если температура выше критической, отложение происходит из газовой фазы, независимо от величины давления. Это вопрос определения понятия.

2) Если температура ниже критической, раствор, отлагающий осадок, для большинства рудных месторождений должен быть жидким, так как давление, вероятно, больше критического давления для умеренно концентрированного раствора.

3) Если и температура и давление ниже критических, растворы могут представлять собой либо жидкость, либо пар, в зависимости от соотношений между температурой и давлением. Это тот случай, когда крупную роль играют типичные летучие соединения, связанные главным образом с вулканическими и другими близповерхностными явлениями.

Случаи 1 и 2 удалось бы отличить для какого-нибудь месторождения, только если бы нам были известны температура и состав раствора, выделяющего осадок. Но в этом случае, чтобы быть уверенным, что данный раствор был жидким, необходимо было бы располагать доказательствами того, что давление превышало известную величину.

Очевидно, что точно определить эти факторы невозможно, и вряд ли мы когда-нибудь в состоянии будем их оценить. Тем не менее, Грейтон особенно выдвигает тот факт, что Росс основывает свои выводы относительно рудообразующих жидкостей на надежных геологических наблюдениях. На самом деле Росс, отнюдь не выдвигавший доводов в пользу газообразного, или жидкого состояния растворов (случаи 1 и 2), упустил из виду истинные газообразные растворы и сосредоточил внимание на доводах, доказывающих, что летучие соединения обыкновенно не принимают участия в образовании руд; другими словами, речь идет в сущности о различиях между случаями 1 и 2 и случаем 3.

Например, Росс (цитируется Грейтоном, стр. 100) в качестве доказательства жидкого состояния раствора приводит тот факт, что в Дактауне материалы, отлагавшие карбонаты, в отношении растворимости этих карбонатов в жидкой фазе водного раствора обладали совершенно той же последовательностью и как раз обратной последовательностью в отношении способности к переносу (летучести) в хлорсодержащей газовой фазе. Однако порядок растворимости в сжатой газовой, богатой водой фазе, вероятно, будет тот же, что и в жидком водном растворе; поэтому это отнюдь не является свидетельством против газообразного раствора, а доказывает лишь отсутствие проявлений одной группы летучих соединений, действовавших при недостаточно точно определенных условиях.

Подобным же образом и другие геологические критерии не в состоянии опровергнуть идею газообразных растворов, распространяясь в равной степени как на подобные сильно сжатые растворы, безусловно существующие на глубине, так и на жидкие водные растворы.

б) Щелочность. Грейтон высказывается в пользу щелочного раствора, как первоначально, так и в последующем, но допускает, что иногда наблюдения говорят в пользу кислых растворов. Щелочность раствора зависит от состава первоначальной магмы и стадии дифференциации, в которую была выделена та или иная часть раствора. В общем ранние фракции являются, повидимому, более кислыми, а более поздние, особенно остаточный первичный раствор при достижении им гидротермальной стадии, — более щелочными. Каждое месторождение представляет собой отдельную проблему, и парагенетические взаимоотношения в каждом отдельном случае должны были бы дать возможность решить, были ли растворы кислыми, щелочными или непостоянными в отношении щелочности.

Кстати, мы согласны с замечанием Грейтона относительно пользования терминами «кислый» и «щелочной». При современном определении, согласно которому «Электролит, дающий водородные ионы ( $H^+$ ) в качестве одного из прямых продуктов ионизации, называется кислым», термин становится бесполезным в приложении к большинству растворов, с которыми встречается геолог. Напротив, примененный в более старом и более широком смысле, термин этот, хотя он и более трудно поддается определению, выражает представление, которое иначе не может быть передано без обстоятельных разъяснений, сохранение же его не грозит осложнениями.

«Относительная крепость кислот» определяется степенью их ионизации, а гидролиз определяется степенью ионизации соли и воды. Но константа ионизации воды возрастает с температурой до максимума, который достигается несколько выше  $200^{\circ}C$ , после чего она начинает падать. Экстраполяция при температурах выше критической температуры воды недопустима. Было отмечено<sup>1</sup>, что

<sup>1</sup> Arrhenius S. Kosmische Physik. Leipzig. 1903, 312.

при высоких температурах вода становится более сильной кислотой, чем кремнекислота. Доводы, однако, настолько скудны, что высказывание это приходится рассматривать как необоснованное утверждение.

## РЕЗЮМЕ

1) Состояние. а) Ортомагматические растворы (т. е. сама магма), вероятно, никогда не бывают нагреты выше их критической температуры и остаются в жидком состоянии пока не достигнут (и если не достигнут) гидротермальной стадии.

б) Магматические эманации в равновесии с магмой почти несомненно находятся в газообразном состоянии близ магмы, так как температура их превышает критическую температуру; они могут, однако, конденсироваться в жидкость на других участках, где температура достаточно низкая.

Мы пытались доказать возможность существования газовой фазы, происшедшей из магмы, и переноса материала при помощи этой парообразной фазы и через нее. Подобная парообразная фаза не может в значительном объеме образоваться в самой магме или над ней, если господствующее давление выше давления пара магмы, но подобная парообразная фаза может улетучиваться из магмы через поры и трещинки в окружающих породах. Что касается относительного значения газов и жидкостей при образовании настоящих рудных тел, то здесь отмечается недостаток убедительных доводов как по полевым наблюдениям, так и по лабораторным исследованиям. Признается вероятность того, что большая часть рудообразующих флюидов возникла в одну из поздних стадий цикла; поэтому большинство из них может представлять остаточные ортомагматические растворы, никогда не находившиеся в газообразном состоянии. Такие растворы образуют, может быть, большую часть рудных месторождений, но нельзя не признать, что и газообразные растворы должны сопровождать магматический цикл и что они в состоянии осуществлять значительный перенос нелетучего материала. Что на самом деле это имело место, не может быть ни доказано, ни опровергнуто; пока не накопится значительно больше фактов как в области полевых наблюдений, так и лабораторных исследований, не представляется возможным оценить относительную роль этих двух процессов в образовании рудных месторождений.

2) Механизм выделения. Если рудообразующий флюид выделяется из магмы в виде отдельной фазы, а не представляет собой магму в ее конечной стадии, выделение в виде газовой фазы детально описанным выше путем, по нашему мнению, гораздо лучше согласуется с полевыми и лабораторными данными, чем выделение в виде несмешивающейся жидкости.

3) Возрастные соотношения. Выделение отдельной фазы мыслится как непрерывный процесс, с самого начала протекающий при сохранении равновесия с магмой, а не как возникающий самопроизвольно в более поздние стадии цикла. В первые стадии газообразная фаза, вероятно, большей частью не имеет

крупного значения, но при всестороннем обсуждении нельзя упустить из виду, что присутствует она всегда. В отдельных случаях сохранились явные следы активности газовой фазы в довольно ранние стадии. Более поздние растворы, безразлично, газообразные или жидкие, несомненно играют гораздо большую роль в качестве рудообразующих факторов.

4) **Движущая сила.** Высказывается мнение, что давление газа дает хотя бы часть движущей силы. Обрушение кровли способствовало бы нагнетанию вверх как сжатых газообразных, так и жидких растворов.

5) **Отложение:** а) **Состояние.** Упоминается три общих случая, причем указывается на невозможность исходя из полевых данных определить, находились ли растворы, отлагавшие руды, в жидком или газообразном состоянии. Доказательства за и против активности летучих соединений могут быть найдены в текстурах и парагенезах.

б) **Щелочность.** Характер растворов в отношении их щелочности или кислотности представляет проблему, требующую разработки для каждого отдельного месторождения.

Геофизическая лаборатория  
Института Карнеги  
в Вашингтоне

10 июля 1940 г.

### *К. Н. Феннер*

C. N. Fenner. Econ. Geol., No. 7, 883—904.

В приложении к выпуску журнала *Economic Geology* за март—апрель 1940 г. помещена длинная и важная статья д-ра Грейтона о природе рудообразующего флюида. Цель ее вкратце характеризуется следующей выдержкой из статьи.

«Исходя из положений и выводов Феннера, Боуэна, Росса и Шеллера в сборнике, посвященном В. Линдгрёну, настоящая статья дает оценку современным знаниям и теоретическим обобщениям в части происхождения, состояния, состава, миграции и воздействия той подвижной среды, которая выносит минералообразующие материалы из магмы и отлагает их в виде гипогенных эпигенетических руд».

В статье особенно оспаривается мнение, что минеральное вещество вообще и рудообразующие элементы в частности выносятся из магмы в значительных количествах в паровой (газовой) фазе, и автор статьи становится на защиту взгляда о движении в жидком растворе, происшедшем непосредственно из жидкой магмы без участия паровой фазы.

Статья дает интересное и умелое изложение взглядов, в корне отличающихся от изложенных Боуэном и мной в сборнике Линдгрёна. Наши взгляды сходятся в том, что среда, при посредстве которой рудообразующие элементы первоначально выделяются из магмы, представляет собой газ, хотя в некоторых отношениях наши мнения и расходятся.

Статья д-ра Грейтона заслуживает внимательного ознакомления

и обсуждения со стороны лиц, интересующихся вопросами образования руд. Это ценный вклад, который надо приветствовать. Тем не менее доводы автора не убедили меня в том, что прежние мои взгляды были неверны. В то время, когда я размышлял над ответом, мной была получена от д-ра Ингерсона (Геофизическая лаборатория) рукопись статьи на эту тему, составленная им совместно с д-ром Мори, с просьбой дать свои замечания. Статья произвела на меня такое прекрасное впечатление, что первоначально я был склонен отбросить мысль об изложении своей точки зрения. Однако после размышлений мне показалось, что имеется еще немало важных вопросов, которые Ингерсон и Мори не пытались осветить, и что дальнейшее обсуждение статьи д-ра Грейтона представляется желательным.

На стр. 15 (подстрочное примечание) д-р Грейтон возражает против значения, в котором, как он полагает, физико-химики пользуются термином «щелочной», подразумевая в корне различные свойства флюида. Может быть, и имеются некоторые основания для такого впечатления, но едва ли в той мере, в какой он предполагает. Не только в отношении понятия «щелочной», но и некоторых других физико-химических терминов и представлений, как, например, значения выражений «сильная кислота» и «критическое состояние» магмы и ее производных, в его статье замечаются некоторые неясности, отражающиеся на доводах. Ответ Ингерсона и Мори показывает, где д-р Грейтон несколько сбился с пути в отношении «критического состояния», и этот вопрос не требует дальнейшего обсуждения. Ими же приводятся некоторые до сих пор неопубликованные ценные сведения, полученные при лабораторных исследованиях, относительно способности паров, особенно водяного пара, при высоких давлениях и температурах растворять многие вещества, сами по себе не летучие. Сведения эти ценны не только в связи со статьей д-ра Грейтона, но и по отношению ко всему вопросу о возможности газового переноса.

По поводу термина «сильная кислота» необходимо помнить, что раствор может содержать сильную кислоту, не будучи сам сильно кислым. Сильными являются те кислоты, которые в водном растворе сильно ионизированы. Освобождаются водородные ионы, и количество их определяется значением рН. HCl является сильной кислотой, так как капля ее в 100 см<sup>3</sup> воды почти полностью ионизирована, но получающийся раствор не может быть назван сильно кислым, так как он нейтрализуется очень небольшим количеством щелочи. С другой стороны, слово «щелочной» (alcaline) в том смысле, в каком им пользуются химики, подразумевает свободные OH-ионы. Значение его точно, но возможность путаницы возникает потому, что для обозначения присутствия какого-либо соединения щелочного металла пользуются близким по созвучию термином «alcalic» или «щелочьсодержащий», или «богатый щелочью». Путаница вызывается, следовательно, не концепцией, а только сходством терминов; тем не менее случаи недоразумений в геологической литературе нередки. Действительно, многие геологи, повидимому, полагают, что богатые щелочами магмы, обычно

обозначаемые как щелочные магмы, обладают щелочными свойствами в химическом значении слова. В этом вопросе геологи, повидимому, сами были главными виновниками того, что их неверно понимали, хотя и физико-химики, писавшие на геологические темы, не всегда свободны от ошибок из-за небрежного употребления терминов.

Смешение понятий «щелочной», «щелочьсодержащий» и «богатый щелочью», повидимому, лежит в основе ряда неправильных представлений в статье д-ра Грейтона. Газ, выделяемый магмой, может быть кислым по своей реакции и в то же время богатым щелочами. В отложениях фузарол вулканического происхождения рядом наблюдателей (особенно Лякруа на Везувии) установлено высокое содержание  $KCl$ , или  $NaCl$ , или их обоих. В сущности данные, как будто, указывают, что после легколетучих веществ, например  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $BO_3$ , эти хлориды щелочных металлов обычно являются наиболее широко распространенными составными частями вулканических эманаций. Д-р Грейтон посвятил ряд страниц своей статьи отысканию источника щелочей в обильном сериците, обыкновенно присутствующем в боковой породе рудных месторождений, и доводам в пользу своего мнения, что этот материал не был выщелочен из боковой породы в одном месте и снова отложен в другом. Доводы не кажутся мне убедительными, поскольку ими исключается такой процесс, как один из возможных источников содержащего щелочи вещества, но вероятность происхождения его непосредственно из магмы тоже не должна быть упущена из поля зрения. Магматический газ, способный к переносу минерального вещества в растворе, покидает магму, будучи насыщенным всем тем, что он в состоянии растворить, и если в момент выделения он полностью находится в состоянии равновесия с магмой — вполне насыщенным этим материалом. Это последнее условие, как будто, нередко не соблюдено в полной мере.

Благодаря такому процессу выноса щелочных металлов непосредственно из магмы в состоянии пара, не только боковые породы рудных месторождений могут обогатиться щелочьсодержащим материалом, но этот процесс может сыграть роль существенного фактора и в гранитизации, каково бы ни было толкование гранитизации в целом. В идее переноса щелочьсодержащего материала в кислых растворах нет непоследовательности.

Упоминание о гранитизации приводит нас к другому вопросу в статье д-ра Грейтона. На стр. 21 он говорит: «Пегматиты... во всяком случае рассматриваются теперь почти всеми как представители позднематематической стадии» (выделено Грейтоном).

Это утверждение дается в виде вступления к выводу, приведенному на странице 23, будто обзор литературы показывает, «что в районах, где присутствуют и руды и пегматиты, руды признаются более молодыми образованиями в столь резко преобладающем числе случаев, что либо зарождаются сомнения в полноценности доказательств в пользу обратной последователь-

ности, либо возникает предположение, что эта необычная последовательность является результатом особых или необычных условий, вплоть до пересечения руд пегматитами из более поздней, самостоятельной магмы.

Это положение приводится Грейтоном в порядке противопоставления с теми взаимоотношениями, которые, по его мнению, вытекают из факта выноса руд из магмы в паровой фазе, как это было принято мной. Здесь возникает несколько вопросов, требующих разъяснений.

Во-первых, действительно ли пегматиты, как общее правило, представляют позднюю магматическую стадию? Гранитизация большинством геологов признается, повидимому, как обычный процесс. Гранитизация обыкновенно сопровождается инъекцией материала, либо *lit-par-lit*, либо в виде секущих жил или дайк, которые всегда напоминают обыкновенный пегматит. Кроме того, некоторые геологи, специально занимавшиеся изучением гранитизации, пришли к заключению, что это явление вызвано действием какой-то эманации или производной магмы, наступавшей впереди основного тела и предшествовавшей внедрению главной массы флюидной магмы. Это говорит за то, что локализация пегматитовых тел имела место в одну из ранних стадий магматической эволюции.

Во-вторых, большинство геологов, вероятно, согласно с тем, что рудные месторождения, как общее правило, происходят от крупных тел изверженного материала, может быть, достигающих местами в отдельных случаях размеров в сотни кубических миль. В тот или иной отрезок времени разные участки такого тела, как в горизонтальном направлении, так и по вертикали, должны находиться в разных стадиях развития. С одного участка могут выделяться пегматитовые флюиды, с другого — рудоносные. Делом случая будет, которые из них пересекут другие.

В-третьих, в моей основной статье, обосновывая предположение, что руды переносятся в паровой фазе, я привел доводы, которые как будто доказывали, что в некоторых случаях важные металлические месторождения формировались в столь ранний период истории магматического тела, что выделявшиеся им эманации должны были быть газообразными. На что я при этом хотел обратить внимание, это то, что если в таких случаях образование руд связано с газовой фазой, вполне разумно допустить, что то же самое имело место и в других случаях, для которых по тем или иным причинам доказательства отсутствуют. Защищая это положение, я, может быть, создал впечатление, будто по моему мнению металлические компоненты всегда выделяются в раннюю стадию. Наоборот, я придерживаюсь того взгляда, что эволюция их продолжалась до тех пор, пока эманация газов продолжала оставаться существенным фактором.

В моем изложении доказательство в пользу теории газовой эволюции заключается, мне кажется, в часто наблюдающемся скоплении рудных жил вокруг плутонических куполов. В качестве аргумента приводилось, что пока магма в куполах находилась в жидком состоянии, последние могли служить коллектором для газов,

проникавших вверх по основному телу магмы и приводивших к наблюдаемым результатам; после же того как кристаллизация продвинулась настолько вперед, что привела к застыванию магмы в куполах и на некоторую глубину вниз, не было больше явных причин, в силу которых какие-нибудь рудные флюиды могли быть направлены в сторону куполов. Так как рудные флюиды принадлежали, таким образом, к ранним образованиям, они не могли представлять собой жидкие остаточные продукты продвинувшейся кристаллизации.

По поводу этих соображений Грейтон пишет (стр. 24).

«Преимуществом концепции Феннера относительно времени и способа выделения рудного флюида является то, что она позволяет дать объяснение, ранее отсутствовавшее, для наблюдающейся тенденции к скоплению рудных месторождений в большем числе в пределах и вблизи «куполов» и других периферических частей интрузивных тел, чем в центральных и более глубоких их участках. Однако это в достаточной мере общее и неопределенное<sup>1</sup> явление, получившее приемлемое, но не обязательное и не единственно возможное объяснение ранним выделением газа, повидимому, недостаточно для устранения более специфических трудностей, охарактеризованных выше, как, например, ореолы гранитизации<sup>2</sup> и возрастные соотношения руд и пегматитов».

Этот текст сопровождается подстрочным примечанием, в котором приводится наблюдение Мори, что во многих случаях рудные растворы подымались вдоль крыльев значительных синклиналей, из чего Грейтон заключает, «что, по крайней мере, в этих случаях влияние магматических куполов, повидимому, не проявляется». Это замечание, направленное против моего довода, не попадает в цель. Я не предполагал, что куполы необходимы для образования рудных месторождений, а утверждал лишь, что там, где рудные залежи скопляются вокруг куполов, это говорит в пользу выделений в газообразном состоянии. Рудные растворы, какова бы ни была их природа, несомненно, могут перемещаться по подводящим каналам.

Несколько дальше (стр. 26) Грейтон хотя бы отчасти признает правильность моего довода, высказываясь следующим образом:

«При большом объеме еще жидкой магмы (и, может быть, в присутствии тонкого слоя магмы, уже выкристаллизовавшейся) идея Феннера, повидимому, верно указывает путь отделения восходящих газовых пузырей и проникновения их в виде отдельной и отчетливой фазы в любые пустоты, имеющиеся в вышележащих породах. Это, повидимому, условие, которое должно быть принято во внимание при объяснении образования большей части эпигенетических руд. Иначе говоря, должна иметь место обильная селективная миграция фракции, отвечающей рудному флюиду, с отделением ее от остального магматического материала».

<sup>1</sup> Выделено Феннером.

<sup>2</sup> У меня нет уверенности, что я вполне уясню себе доводы Грейтона относительно ореолов гранитизации.

На стр. 27—28, следуя аналогичному ходу мысли, Грейтон делает существенный вывод, к которому я полностью присоединяюсь. В нем ясно изложены условия, которые должны быть учтены при формулировке приемлемой теории природы рудообразующего флюида:

«Приходится во всяком случае признать, что процесс кипения, сопровождающийся появлением ясно выраженной поверхности раздела, на обширном ли пространстве или на узком участке местного значения, между исходной жидкостью и образующимся газом, бесспорно создает благоприятные условия для резкого разделения на разные составы. И в какой бы мере эти две фазы ни были обособлены, занимая при этом значительные объемы и взаимно исключая друг друга, описываемый механизм нуждается в приемлемом объяснении в части наблюдающегося поразительного контраста между характером руд, с одной стороны, и изверженных пород или пегматитов, с другой, а также и локализации руд. Несмотря на некоторые недостатки, это, несомненно, убедительный довод в пользу представления о кипении... никто больше не выдвигал с полной ясностью столь же простого и действенного способа выделения и сегрегации особого рудного флюида в виде жидкости. Если бы остальные последствия выделения в виде газа были столь же благоприятны и так же легко поддавались обоснованию, разногласия относительно природы и состояния рудоносного флюида, вероятно, давно уже были бы устранены».

Это значит, действительно, что рудный флюид должен отделяться от главной массы жидкой магмы либо в виде газа (как полагают Боуэн и я), либо в виде обособившейся жидкости (чего придерживается на последующих страницах Грейтон). Никакие другие возможности, как будто, не совместимы с указанными требованиями.

На стр. 38 Грейтон приводит следующую выдержку из моей статьи:

«Как только со временем плутоническое тело, являющееся источником газов, охлаждается, горизонт, на котором пневматолитическое состояние выделившегося материала уступает место гидротермальному состоянию, понижается и в конце концов оказывается на уровне самого магматического источника».

По этому поводу Грейтон замечает:

«Такое представление о понижении уровня конденсации, являясь обязательным в законченной гипотезе Феннера, все же кажется крайне неправдоподобным».

В других местах статьи (напр. на стр. 51) Грейтон заявляет, что если рудный флюид выделяется из магмы в виде горячего кислого газа, большая часть его, повидимому, и поверхности достигнет в виде горячего кислого газа.

Мне не удастся удовлетворительно проследить ход мысли, приводящей Грейтона к этим выводам. Мне кажется, в сущности, не требующим доказательств, что при обычных условиях будут иметь место нейтрализация кислоты и конденсация пара. Так как, может быть, не всеми будет принята такая точка зрения,

уместно дать здесь более полную картину (упрощенную и обобщенную для краткости) процесса, как я его себе представляю.

Начнем с крупного плутонического тела в ту стадию, когда оно внедрилось в холодные окружающие породы. Из этой магмы выделяются газы. Количество последних в магматическом теле может быть в общем значительным или незначительным, и аналогично может варьировать содержание рудообразующих компонентов, так как образование рудных жил, связанных с плутонами, очень редкое явление. Точные цифры содержания летучих не могут быть даны, и мы можем только указать, что по сравнению с магмами вообще интересующая нас магма предположительно должна быть скорее богатой газами<sup>1</sup>.

Если в перекрывающих и окружающих породах имеются структуры, допускающие настолько легкое выделение газов, что любая данная порция их только в течение короткого времени находится в соприкосновении с более холодными стенками, выделения могут оставаться в состоянии газов на всем пути до поверхности, как это предполагает Грейтон. Если, однако, даже наиболее благоприятные из существующих каналов создают затруднения их проходу, как, например, в зонах разлома, забитых на протяжении тысяч футов раздробленными обломками пород, газы в состоянии будут только медленно пробиваться вверх.

После внедрения теплота уходит наружу, как благодаря движению газов, так и путем передачи тепла от магмы и от проводящих газы каналов через покрывающие и окружающие породы. Волна возрастающей температуры во вмещающих породах характеризует первоначальную стадию. Однако передача тепла через горные породы является процессом очень медленным, а масса покрывающих пород во много раз больше массы рудного флюида. При описываемых условиях установится такой температурный градиент, что на поверхности температура будет намного ниже, чем у источника. Вдоль каналов, по которым передвигаются эманации, температура будет выше, чем в самих стенках, но если движение выделений медленное, температура их будет только немного выше, так как они постоянно будут отдавать тепло окружающим породам, и раньше, чем они достигнут поверхности, наступит конденсация.

Однако необходимо еще принять в расчет сложный характер газов в то время, когда они покидают магму. Водяной пар, являющийся, как предполагают, главной составной частью, будет в числе газов, конденсирующихся наиболее поздно. Галоидные соединения щелочных металлов, тяжелых металлов и кремния, совместно с фосфором, бором и другими элементами, возможно в неизвестных нам сочетаниях, сопровождаемые некоторыми присутствующими веществами, нелетучими сами по себе, но растворимыми в других парах при господствующих на глубине крайних

<sup>1</sup> Чтобы дать хотя бы приближенное количественное представление, я подсчитал, что куб глубинной магмы со стороной в 4 мили, содержащий 1% газа, содержит 7 миллиардов ( $7 \times 10^9$ ) тонн газа. При 5% газа он содержит 35 миллиардов ( $35 \times 10^9$ ) тонн.

температурах и давлениях, все они, повидимому, выпадут в значительной части раньше, чем наступит более заметная конденсация водяного пара. Двуокись углерода и  $H_2S$ , наоборот, могут сохраниться в виде газа до конца, если они не образуют соединений с основаниями боковых пород. Дальнейшее осложнение создается тем фактом, что летучесть соединений тяжелых металлов в парах, содержащих  $H_2S$ , становится возможной (или, по крайней мере, значительно возрастает) в присутствии свободной галоидной кислоты. Так как концентрация свободной кислоты постепенно уменьшается благодаря взаимодействию с боковыми породами в нижней части проводящего пути, сульфиды металлов осаждаются. Такая нейтрализация кислоты может быть обусловлена соединением ее не только с окислами щелочных металлов, но также и с  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  и т. д., присутствующими в минералах горных пород.

Весь процесс — выделение газов из магмы, их движение по каналам среди окружающих пород, химические реакции, в которые они вступают, и их конечная конденсация — обязательно носит сложный характер; но хотя детали сложны и могут быть выражены только в общем виде, лежащие в основе принципы просты и в общих своих чертах обоснованы прямыми наблюдениями, нуждаясь в ничтожном количестве допущений. Первым наблюдающимся фактом является громадное газовое давление, обнаруживающееся при многочисленных вулканических извержениях. Повидимому, оно в состоянии вытеснить газы из плутонической массы, несмотря на очень большое сопротивление, вызываемое трением в порах окружающих пород. Повидимому, очень высокое газовое давление проявляется в некоторых магмах в то время, когда они еще почти совсем жидкие. Эти давления развиваются раньше, чем газы в результате кристаллизации будут сосредоточены в небольшом объеме остаточной жидкости, хотя давление и может возрастать по мере развития кристаллизации.

Второй наблюдающийся факт касается способности магматических газов переносить минеральное вещество. Металлические руды и другие минеральные соединения встречаются в вулканических областях в условиях, указывающих на то, что они вынесены на поверхность в парообразной фазе. Такие минералы местами были обнаружены в весьма значительных количествах, хотя часто в обстановке, свидетельствующей о том, что вряд ли они составляли больше, чем ничтожную часть всего количества, вынесенного улетучивающимися газами.

Располагая такими данными, полученными в результате наблюдений, мы воспользовались теми химическими и физическими принципами, которые, казалось, в состоянии объяснить их.

До сих пор обсуждение предмета ограничивалось первой стадией, следующей за внедрением плутона — стадией, во время которой волна нарастающей температуры продвигалась в покрывающих и окружающих породах. В течение этой стадии паровая фаза могла простирались на всем протяжении до поверхности или не достигать ее, но и в первом случае, надо думать, значительная часть

веществ, которые были растворены в газах, выделялась в пути, если только движение газа не происходило более или менее беспрепятственно. Такое выделение растворенного вещества приписывается охлаждению газов при их восходящем движении, реакциям с боковыми стенками и встречающимся по пути материалом и внутренним реакциям между составляющими газов.

При описанных условиях температура близ источника достигает максимума непосредственно после того, как произошло внедрение плутона, но при распространении тепла на вышележащие породы максимум его, повидимому, значительно отстает, так что в любой точке верхних участков он будет достигнут позже. Здесь наблюдается аналогия с проникновением летом тепла в поверхностные слои почвы.

Вследствие потери тепла магматическими массами температура у источника неизбежно начинает падать, хотя, вероятно, много лет проходит раньше, чем магма замрет настолько, что выделение заметных количеств газа прекратится.

Хотя максимум температуры на любом уровне в вышележащих породах будет достигнут некоторое время спустя после внедрения плутона, всегда будет наблюдаться градиент убывающей температуры от источника вверх (иначе плутон не охлаждался бы).

Условия в течение длительного периода, следующего за первой волной восходящей температуры, могут рассматриваться как представляющие вторую стадию, хотя переход к ней, разумеется, не резкий. Если не говорить об условиях, которые должны считаться необычными, а именно, почти беспрепятственного движения газов вверх, можно принять, что газы медленно передвигаются по некоторым каналам и что вся система, плутон и выделения, охлаждаются. Область наиминимальной температуры находится у поверхности, так как с поверхности, в конечном счете, уходит все тепло. В конце концов плутон становится холодным и замирает, но раньше, чем будет достигнута эта стадия, неизбежно, как я себе представляю, должен иметь место промежуточный ряд условий, при которых водяной пар конденсируется в жидкость в верхней части каналов, в то время как внизу он остается еще в парообразном состоянии. По мере того как охлаждается система, промежуточная поверхность, к которой приурочена конденсация воды, перемещается в направлении вниз.

Д-р Грейтон доказывает, что если даже некоторая часть улетающей воды в верхних участках конденсируется в жидкость, газ в состоянии проникать через нее в виде пузырей и обладает лишь незначительной способностью вытеснять жидкость или даже вовсе не обладает ею.

В этом вопросе Ингерсон и Мори в своем ответе в основном встали на точку зрения затрудненного продвижения, изложенную здесь. Однако имеется, повидимому, еще вопрос о пористости и непроницаемости рудных каналов, и по этому поводу интересно было бы услышать мнение других геологов и горных инженеров. В итоге собственного опыта в течение многолетней деятельности в качестве горного инженера и путем наблюдений подземных усло-

вий в ряде горных районов, у меня создалось твердое убеждение, что, за исключением ближайших к поверхности участков, обычно не встречается ни структур, ни пористых слоев, плоскостей сбросов или зон дробления, которые дали бы настолько свободный проход газам, какой, повидимому, требуется с точки зрения д-ра Грейтона.

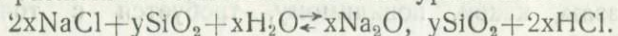
Защитники теории «рудных магм» указывали на брекчии и отторженцы пустой породы, со всех сторон окруженные рудой или сопровождающими ее минералами, как на доказательство инъекции рудной магмы в пустоты. Однако большинство геологов сочло бы, что подобные обломки первоначально поддерживались более мелким обломочным материалом, затем замещенным жильным материалом, и не признало бы такие месторождения доказательством в пользу открытых пространств. Может быть, некоторые жеоды и карманы, выстланные кристаллами минералов, представляют первоначальные пустоты, но для этого нет необходимости, чтобы была какая-либо трещина сколько-нибудь значительных размеров; остается очень спорным, не представляют ли нередко такие пустоты частично заполненные полости, образовавшиеся в результате растворения. В особо пористых породах, служащих хранилищами нефти, искусственно созданное газовое давление в состоянии вытеснить нефть из пор породы впереди газа.

Может быть выдвинуто возражение (не встречающееся у Грейтона), что если бы даже образовалась промежуточная поверхность между конденсировавшейся жидкостью сверху и газом внизу, это было бы статическое состояние, и газ не продолжал бы теснить жидкость вверх. Очевидным ответом на это будет, что хотя положение промежуточной поверхности и стационарно, этим не исключается возможность проникновения сквозь нее материала, который из газа внизу конденсируется в жидкость сверху. Нагрузка на газ при этом не увеличивалась бы, так как увеличение массы конденсировавшегося материала у промежуточной поверхности компенсируется истечением на поверхность земли.

На одной из предыдущих страниц этой дискуссионной заметки было высказано положение, что газы, улетающие из магмы, будут (если они находятся в совершенном химическом равновесии с магмой) переносить все то количество магматического минерального вещества, какое они только могут перенести. Кому-нибудь могло бы притти в голову задать вопрос: почему в этом случае предполагаемая их кислотность не была вполне нейтрализована до того, как они покинули магму, или если они не стали нейтральными, каким образом они могут позже воздействовать на боковые породы, раз они восприняли весь основной материал, который они в состоянии удерживать? Не предусмотрев ответа на эти вопросы в моей предыдущей статье, я оставил открытым путь для возражения. Д-р Грейтон, повидимому, пропустил этот случай, но такая мысль может у него явиться, если вопрос останется невыясненным. Объяснение можно дать в виде расширенного изложения некоторых положений, выдвинутых в моей предыдущей статье.

В ней я ссылался на замечательные опыты Гей-Люссака и Те-

нарда в 1809 г., позднее проверенные количественно Кльюсом (Clews) и Томпсоном (Thompson). При нагревании смеси  $\text{NaCl}$  и  $\text{SiO}_2$  в токе водяного пара при разных температурах, вплоть до  $1045^\circ \text{C}$ , выделялись различные количества  $\text{HCl}$  по уравнению:



Было получено также и небольшое количество  $\text{Cl}$ . Выделение  $\text{HCl}$  становится еле заметным примерно при  $600^\circ \text{C}$ . Повышение температуры и увеличение притока водяного пара приводит к более интенсивному выделению  $\text{HCl}$ .

Здесь заслуживают внимания два обстоятельства. Для такого рода равновесия в двухфазной системе не требуется, чтобы вся кислота в газовой фазе и вся щелочь в твердой (или жидкой) фазе были нейтрализованы, а допускается их раздельное сосуществование; при этом диссоциация возрастает (как следует из увеличивающейся концентрации  $\text{HCl}$ ) с повышением температуры. Последнее явление находится в согласии с правилом Ле-Шателье, по которому с возрастанием температуры обратимые реакции проявляют склонность протекать в том направлении, которое сопровождается поглощением тепла.

Можно думать, что этот опыт, при всей его простоте, обладает достаточной аналогией с условиями, господствующими в магмах, чтобы объяснить наблюдающийся факт содержания свободной кислоты в эманациях магм, несмотря на то, что они насыщены минеральным веществом, и показать, что, по мере того как эти кислые эманации проникают из магмы в более охлажденные породы, они проявляют склонность вступать в реакции с породой и извлекать основания.

На стр. 78—79 Грейтон приводит следующую выдержку из моей статьи:

«Когда пузырек, состоящий преимущественно из таких газов, как упомянутые ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и др.), движется вверх в магме, он служит пространством, в котором собираются другие газы с очень малым давлением паров. Последние в результате дистилляции в основном проникают в пузырек, как если бы он представлял собой вакуум, независимо от того, под каким давлением он находится на самом деле. Это «динамическое» действие... может быть весьма эффективным в отношении собирания и удаления из магмы веществ с малым или средним давлением пара».

По этому поводу Грейтон выдвигает следующее возражение:

«...следует помнить, что этот динамический способ увеличения отделения летучих компонентов проявляется пропорционально не массе, а объему газового пузырька, играющего роль коллектора; поэтому при всех прочих равных условиях этот способ гораздо более эффективен при давлении в одну атмосферу, чем при тысячах атмосфер, наблюдаемых в магматической камере. Объем газа при таких условиях сравнительно незначителен... соответственно слабее должно быть влияние процесса в его геологическом приложении».

Это возражение Грейтона на первый взгляд представляется хорошо обоснованным и губительным для критикуемой идеи. То же

самое возражение против переноса не только рудного вещества, но и любого минерального материала, при помощи газовых пузырей, поднимающихся в жидкой магме, вероятно приходило в голову и другим. Желательно поэтому развить эту мысль более подробно, чем это сделано мною раньше, приняв во внимание важный принцип, упомянуть который я тогда упустил из виду. Это принцип дифференциального напряжения.

Согласно этому принципу, если давление или другая сила прилагается к одной из двух тесно соприкасающихся фаз и только к ней, тенденция материала перейти из фазы, подвергающейся давлению, в фазу, не подвергающуюся ему, соответственно увеличивается<sup>1</sup>. Из этого следует весьма существенный вывод, что при отсутствии влияний, вносящих изменения в эти взаимоотношения, как абсолютные, так и относительные количества составных частей газового пузыря по существу те же самые, независимые от того, обладает ли он большим объемом при давлении в одну атмосферу или малым при тысяче атмосфер.

Чтобы решить, какие изменения необходимы, продолжим анализ. Мое представление сводится к следующему.

Когда жидкость подвергается гидростатическому давлению, сопротивление какой-нибудь ее части окружающему давлению обусловлено главным образом сопротивлением ее молекул взаимному сближению. Является ли жидкость однородной или гетерогенной, каждая молекула испытывает то же самое воздействие. Положение является состоянием статического сопротивления. С газами дело обстоит совершенно иначе. В них сопротивление динамично — внешнее давление приводит к энергичной бомбардировке стенок термально возбужденными молекулами. Каждая молекула ведет себя независимо от других и каждый вид молекул развивает давление пропорционально начальному количеству этих молекул. Отсюда следует широко известный закон, что в смеси каждый газ развивает свое собственное давление так, как если бы других газов не существовало.

Из предыдущего, как будто, ясно следует, что все молекулы способных улетучиваться веществ, когда они растворены в жидкости, находящейся под давлением, испытывают то же самое давление, что и окружающие молекулы, но если количество некоторых из них невелико, они в случае перехода в газовый пузырь с преобладанием других летучих веществ испытывают только небольшую часть давления, большая часть которого приходится на долю преобладающих газов. Они как бы выжаты из жидкости, в которой они находились под большим давлением, и перешли в газ, где давление очень незначительно.

В приведенной цитате Грейтон говорит о «сравнительно незначительном» объеме пузырей при давлении в тысячи атмосфер в магме, а некоторые авторы представляют дело так, будто пузырь

<sup>1</sup> Аналогичное явление, объясняющееся теми же термодинамическими законами и более широко известное, — это таяние льда под давлением. Вода, переходящая в состояние нормального давления, тут же снова замерзает.

большой на поверхности становится на глубине всего лишь с булавочную головку. Рассмотрим сферический пузырь диаметром 1000 дюймов при давлении в одну атмосферу. На глубине трех миль в магме, где давление составляет приблизительно 1000 атмосфер, его сферический объем сократился бы до  $\frac{1}{1000}$  указанной величины, но диаметр все же был бы равен 100 дюймам. Для пузырей таких больших размеров, какие видны на фотографии лавового кратера на Килауэа, сокращение диаметра до  $\frac{1}{10}$  все же оставило бы пузыри порядочной величины. Несомненно, что сокращение объема до  $\frac{1}{1000}$  сильно изменило бы господствующие внутри условия, так что представление, что он является как бы вакуумом для меньших газов, не могло бы уже в полной мере остаться в силе, несмотря на то, что объем все же еще далеко не достиг бы незначительного объема жидкости. Подсчет, проведенный в предположении, что законы, относящиеся к газам, сохраняют свою силу в этих предельных условиях, показывает, что водяной газ при температуре 1000° С и давлении 1000 атмосфер обладал бы объемом примерно в 5,8 раза большим, чем обычная жидкая вода. Правда, законы о газах полностью не могут быть распространены на такие случаи. Сжимаемость газа уменьшилась бы, а это повлекло бы за собой больший объем пузыря, чем следует из расчета. Все же идея вакуума по отношению к малым газам потребовала бы пересмотра в связи с тем, что сопротивление внешнему давлению уже не сводилось бы полностью к динамической бомбардировке возбужденных молекул, а отчасти и к их противодействию силам, стремящимся привести их в более близкое соприкосновение.

Другим вносящим изменения влиянием, которое следует учитывать, является повышенная растворимость газов в окружающей магме при увеличенном давлении. Одно время предполагали, что даже при очень высоких давлениях такое увеличение растворимости следует закону Генри, согласно которому растворимость прямо пропорциональна давлению; однако опыты Горансона довольно хорошо опровергли это предположение. Он показал, что в исследованных им системах кривая растворимости при высоком давлении идет почти под прямым углом к кординате давления. Повышенное давление очень мало увеличивало растворимость.

Тем не менее, влияние давления на растворимость в интересующих нас условиях, пожалуй, не настолько важно, как это кажется. Если магматическая масса после внедрения приходит в более или менее статическое состояние (т. е. не нарушаемое сколько-нибудь значительно конвекционными токами), верхняя поверхность ее приходит в состояние, приближающееся к равновесию растворимости по отношению к проходящим сквозь нее газам. Таким образом будет проявляться тенденция к достижению равновесия химического состава между магмой и газовыми струями, что повлечет за собой различия в составе между придонной и верхней частями плутонической массы.

Резюмируя, мы можем сказать, что принцип дифференциального напряжения, повидимому, в значительной мере устраняет возражение, которое выдвинул Грейтон по поводу малого объема газовых

пузырей на глубине в магме. Несомненно, на глубине нескольких миль законы, касающиеся газов, настолько видоизменены, что его возражение остается в силе. Не исключено даже, что на таких чрезвычайных глубинах газы могут освобождаться, если магматическое тело незадолго до того было приподнято с еще больших глубин и благодаря этому уменьшилась его нагрузка, но мало вероятно, чтобы они с успехом могли служить своего рода вакуумной камерой для газов. По мере движения пузыря вверх, его объем возрастает, а вместе с тем возрастает и его роль как вакуум-камеры для меньших газов. Похоже на то, что такой процесс приобретает значение на глубине нескольких тысяч футов. К тому же, изменение давления и температуры отражается на равновесии смеси газов в пузыре, а также и их равновесии с окружающей магмой, так что происходит взаимный обмен материалом между двумя фазами по мере того, как пузырь движется вверх, и все это способствует появлению различий в химическом составе между нижними и верхними частями плутона и выносу материала из верхних частей в кровлю. По мере застывания магмы все больше и больше газа выделяется из остаточного расплава, и этот газ оказывает свое метаморфизирующее воздействие.

Анализ возражений, выдвинутых Грейтоном на первое место в его аргументации, повидимому, не говорит о необходимости существенного изменения ранее высказанной точки зрения, что газовые пузыри, поднимающиеся в магматической камере, являются действенными агентами в отношении переноса минерального вещества с нижних горизонтов в верхние и далее в окружающие породы.

Грейтон возражает против важного значения, которое я приписываю галоидным элементам в качестве носителей руд, исходя из малого количества Cl и F, обыкновенно присутствующего в примыкающих к рудным телам породах. В качестве примера он приводит (стр. 69) отдельное сульфидное рудное тело в округе Черро-де-Паско, состоящее главным образом из пирита, содержащее 500 млн. т между современной поверхностью и самым глубоким разведанным горизонтом на глубине 2100 футов.

«...нигде в районе не известны хлор или фтор в количествах, служащих хотя бы самым слабым указанием на сотни миллионов тонн, которые должны были бы быть перенесены вдоль одного проводящего канала, чтобы образовать это одно рудное тело».

Аналогичное возражение делалось и другими авторами, не только в отношении переноса рудных минералов, но и перемещения минерального вещества в газовой фазе вообще. Иногда это возражение облечено в категорическую форму, указывающую на убежденность в том, что оно наносит теории сокрушительный удар. Однако я нигде не нашел ничего, что могло бы служить ясным ответом.

Взамен газов Грейтон предпочитает разбавленный щелочный раствор (стр. 128—129), содержащий, скажем, 90—95% воды (стр. 121, подстрочное примечание), причем эта жидкость выделяется непосредственно из главного магматического тела. Подобная щелочная жид-

кость в качестве носителя руд является обычным представлением, и мне приходилось уже высказывать мнение, что такая жидкость, по своим свойствам сходная с выдвигаемой Грейтоном, но образовавшаяся совершенно иным путем, неизбежно в конечном счете происходит из кислых газов путем конденсации и взаимодействия с бажковыми породами и приобретает существенное значение в поздние стадии рудоотложения. По отношению к возражению Грейтона по поводу галоидов в ранние стадии в порядке критики может быть поставлен вопрос: что удерживает сульфидные руды в разбавленном щелочном растворе и делает возможным их перенос? Обычный ответ состоит в том, что растворение их становится возможным благодаря избытку щелочных сульфидов. Это, повидимому, приемлемое объяснение, и в своей первоначальной статье я пытался показать, как можно себе представить образование подобной жидкости. Но это не избавляет нас от такого же затруднения (если это затруднение), как и в случае исчезновения галоидов. Здесь возникает вопрос — что происходит с громадными количествами избыточной серы щелочных сульфидов? Небольшая часть иногда накапливается путем превращения первоначальных железосодержащих минералов в пирит, но это далеко не дает удовлетворительного и исчерпывающего ответа для такого месторождения, как рудное тело Черро-де-Паско. Данные Грейтона показывают, что это почти чистый пирит. Руда должна была быть перенесена к месту современного ее нахождения в каком-то растворе, в котором она могла быть растворена, и избыточная сера щелочных сульфидов исчезла столь же бесследно, как и галоиды, по поводу которых Грейтон выдвигает свое возражение. Ответ на данный вопрос, а также и на некоторые другие, сходные с ним, повидимому, надо искать в том факте, что магматические «минерализаторы» (французское «*minéralisateurs*») вообще не образуют устойчивых породообразующих минералов. Они выносятся на поверхность и смываются.

Показательный пример такого действия дают минералы бора. Отложения их находятся во многих вулканических районах, и общепризнано, что борная кислота их происходит из магматических эманацій. В южной Калифорнии встречаются пласты, отложенные в современных или более древних мелких водоемах пустынных областей, содержащие огромные количества боратов. Можно предполагать, что борная кислота в ряде мест проникла вверх сквозь толщи пород, хотя соединения бора скудно представлены среди породообразующих минералов.

Грейтон (стр. 99) приводит следующее высказывание Шеллера, к которому он присоединяется:

«Пневматолитические процессы, т. е. состояния газовой фазы, могли иметь достаточно энергии для привноса значительного количества материала, но по окончании реакции едва ли оставалось достаточно энергии для выноса в газовой фазе всего замещенного материала. Уже это одно говорит в пользу гидротермального процесса, как более подходящего для выноса, по крайней мере, замещенного материала».

Мне не удалось понять основную мысль Шеллера. Если происходит ряд реакций, благодаря которым газ образует некоторые новые минералы и выносит, частично или полностью, некоторые старые, каждая реакция сопровождается выделением энергии, которое может быть отрицательным или положительным<sup>1</sup>. Мне неизвестен такой принцип, пользуясь которым можно было бы заранее определить, каковым будет общий итог обмена энергии для серии реакций, или будет ли он положительным или отрицательным. Даже отрицательный обмен не является еще препятствием для течения реакции, энергия будет попросту заимствована из окружающей среды. Во всяком случае, имеется так же много или так же мало оснований для распространения того же возражения и на реакции жидкого раствора.

В разных местах Грейтон аналогичным образом указывает на затруднения при объяснении некоторых явлений пневматолитическими процессами, не обращая внимания на то, что подобные же затруднения возникли бы и в том случае, если бы было дано предпочтение жидким растворам. В качестве такого случая можно сослаться на приводимые им (стр. 104) месторождения Кобальт, Онтарио, где «...многочисленные мощные, но бедные кварцевые жилы с сульфидами ведущих металлов в лавах Кьюотин претерпевают почти внезапно коренное превращение в жилу с кальцитовым выполнением и с обильными арсенидами кобальта и никеля и баснословно богатым содержанием серебра у резкой плоскости контакта при переходе вверх в конгломерат Кобальт».

Я не сомневаюсь, что эти руды отложились в месте современного их нахождения из щелочных растворов. Об этом свидетельствует характер их жильной породы, и в соответствии с теоретическими воззрениями я высказал предположение, что пневматолитические процессы ранней стадии ведут к щелочным растворам в более позднюю стадию. Основной же момент, на который я хотел здесь указать, это то, что вряд ли Грейтон или кто-либо из геологов мог дать приемлемое объяснение такого месторождения, как Кобальт, не прибегая в значительной мере к спекуляции. Свообразные черты оставляют открытой проблему при любых теоретических воззрениях на природу рудообразующего флюида.

В своей статье я сделал вывод, что «...материал, первоначально отложенный из паровой фазы, в конечном счете окажется в гидротермальной обстановке, под влиянием которой он будет перенесен и видоизменен примерно так же, как это происходит при вторичном обогащении, когда супергенные процессы налагаются на «гипогенные».

По этому поводу Грейтон выдвигает следующие возражения (стр. 45):

«Между тем, замечательной особенностью руд, обогащенных супергенными процессами, является возможность видеть продукты о б о и х процессов, наложенные одни на другие, отмечать отчетли-

<sup>1</sup> Например, если  $\text{HF}$  вступает в реакцию с твердой  $\text{SiO}_2$  и уносит в виде газа  $\text{SiF}_4$ , развивается много тепла. Следует заметить еще, что «возрастание свободной энергии» в физико-химическом смысле не означает обязательно выделения тепла.

вые различия между ними и проследить на бесчисленных примерах все переходы от более или менее полного обогащения до неизмененного родоначального гипогена... Разве не вполне уместен поэтому вопрос, были ли установлены столь же убедительные геологические доказательства, как и те, которые делают неоспоримым вторичное обогащение, для «сравнимого» превращения более ранних отложений кислым газом в более поздние руды в том виде, как мы их наблюдаем?»

Можно заметить, что по сравнению с длительным периодом, в течение которого ведется изучение рудных месторождений, чуть ли не вчера лишь получило признание значение вторичного обогащения при образовании сульфидных и подобных им руд, а геологи научились ясно различать «продукты и того и другого процессов». Даже после того, как был намечен путь, благодаря распространению основной идеи, последовали годы дискуссий относительно того, что считать надежными признаками, позволяющими различать «первичные» и «вторичные» минералы, могут ли некоторые минералы быть в одном случае первичными, а в другом вторичными, а также по ряду более мелких вопросов. Вероятно и сейчас еще не все эти вопросы разрешены к всеобщему удовлетворению. Тем не менее, довод Грейтона очень убедителен. Я попытаюсь разобраться в нем, исходя из двух соображений.

Во-первых, зона вторичного обогащения ограничена снизу глубиной, до которой вадозные воды были в состоянии проникнуть. Ценные сведения дает изучение природы и взаимоотношений рудных минералов выше и ниже этой границы. В процессе, о котором я говорил, нет ничего на это похожего. Каналы, в которых руды осаждались в ранние стадии, в более поздние стадии были заполнены по всей своей длине растворами иного химического характера, но все еще горячими и сильно реагирующими, в которых руды могли снова растворяться. Проявляется тенденция снова растворить первоначально отложившиеся руды, перенести их вверх и заново отложить, причем предел этому процессу во времени и в движении вверх ставит только охлаждение системы до такого состояния, при котором химическая активность этих растворов замирает. Эффект сводится к удалению руд из участков, в которых они были первоначально отложены газами, и к перемещению их в более высокие горизонты.

Повидимому, среди рудничных геологов укоренилось убеждение, что обеднение руд с глубиной обыкновенно наступает в значительном удалении от магматического очага. К такому результату, вероятно, в состоянии привести обрисованный выше процесс. Даже там, где руды продолжают вниз, в верхнюю часть родоначального плутона, они испытали воздействие растворов с больших глубин. Жилы прослеживаются при горных работах только до тех пор, пока есть надежда обнаружить промышленную руду. Что именно происходило вдоль проводящих каналов между точкой, где прекращена разработка, и очагом, из непосредственных наблюдений, неизвестно. Кое-где современный уровень эрозии бесспорно вскрыл эти нижние непродуктивные участки каналов, верхние части которых содержали богатые руды, но они лишь в редких случаях могут быть отождествлены. Трудности возникают вследствие того, что существует значи-

тельное разнообразие трансгрессивных (секущих) тел, образовавшихся путем метаморфизма, или замещения, или заполнения, среди которых приходится выбирать то, что представляется нижними частями рудных жил.

Во-вторых, частично соглашаясь со взглядами Грейтона, можно утверждать, что среди большого разнообразия естественных условий, при которых за осаждением газами следовало воздействие жидких растворов и переотложение ими, вероятно возможность обнаружения где-либо отложений этих двух процессов в соответствующие им стадии во взаимном соприкосновении, и можно предположить, что в этом случае удалось бы встретить явные признаки и тех и других. Многие из рудных минералов, образовавшихся при вторичном обогащении, отличаются по своему составу от минералов первичных залежей. В какой мере геологи были бы в состоянии разобраться в этом деле, если бы все минералы были одни и те же? Между тем, это, повидимому, отвечает в общих чертах положению с рудами, отложенными газами и жидкими растворами. При вторичном обогащении тот факт, что жилка одного минерала пересекается другой, служит практически полезным признаком вторичности, но известны многочисленные примеры, когда движения и растрескивание жильного материала происходили во время первичного осаждения, иногда повторно, так что возникали жилки, где один первичный минерал пересекает другой. Само по себе это явление еще не показательно. Среди минералов, собранных в фумаролах в долине Десяти Тысяч Дымов, видное место занимают магнетит, пирит, галенит, сфалерит и ковеллин. Те же минералы обыкновенно приписываются образованиям, отложенным горячими жидкими растворами щелочных сульфидов. Близкие упомянутым минералы, отложенные газами, неоднократно указывались и в других местностях. Действительно, мне неизвестны такие металлические руды, для которых установлено их осаждение газами и которые не могли бы быть осаждены также и щелочными жидкими растворами. Это сильно увеличивает трудность отнесения их к той или иной из этих двух групп.

Приведенные два соображения, мне кажется, имеют большое значение для выяснения, почему признаки разных процессов в данном случае не могут быть получены так же легко, как при вторичном обогащении.

На стр. 80 у Грейтона встречается следующее замечание:

«...очевидно, что в газовой фазе может быть перенесено не большее количество этих элементов (рудных металлов), чем может войти в соединение с небольшими количествами  $Cl$  и  $F$ , присутствующими в магме (выделено Феннером).

Это замечание сопровождается выполненным Андерсоном под руководством проф. Кистяковского расчетом распределения или распространения  $Cl$  и  $F$  среди элементов в типичной гранитной магме, а также вычислением протекающих отсюда парциальных давлений газов. Грейтон придает большое значение полученным результатам и делает следующие выводы:

«Из этих цифр вытекает, что за исключением воды и весьма подчиненного количества свободных галоидных кислот, натрий и калий

являются единственными минералообразующими элементами, которые могут быть вынесены из магмы в газовой фазе в сколько-нибудь заметных количествах».

При проведении этих расчетов по необходимости были введены некоторые упрощающие допущения, касающиеся изменения энтропии, теплоты реакций, теплоты растворения и отсутствия некоторых летучих соединений. Повидимому, это упрощение было причиной того, что не были приняты во внимание существенные изменения энергии, вызванные сложной серией реакций, которые имеют место, когда способные к улетучиванию компоненты при уменьшении давления освобождаются из сочетаний, в которых они существовали в магме, и перегруппируются среди выделившихся активно летучих компонентов, в то время как оставшиеся магматические элементы также перегруппируются между собой. Я очень сомневаюсь, чтобы для такого сложного вещества, как глубинная магма, имелись достаточные данные, которые могли бы придать ценность количественным подсчетам такого рода. Подсчеты в моей статье, основанные на применении закона действия масс, по сравнению с нами отличались большой простотой. В ней не делалось попытки получить сравнимые количественные данные, а имелось в виду показать, как проявляются некоторые основные законы. Во всяком случае, если Грейтон в приводимых подсчетах хочет доказать что-то, то он берется доказать слишком многое. В долине Десяти Тысяч Дымов количество металлических минералов, осажденных газами, несомненно, было немалым. Магматическое тело под Долиной вероятно было небольшим, так как энергия быстро уменьшилась в течение нескольких лет. В других районах, например вокруг некоторых вулканов, минералы фумарол были найдены, вероятно, в больших количествах, но относительно размеров магматического тела, из которого они выделились, ничего не известно.

На предыдущих страницах я пытался дать ответ на некоторые из более существенных возражений, выдвинутых Грейтоном по поводу моих представлений о природе рудообразующего флюида. Это предмет, в котором так много неизвестного, что не приходится рассчитывать на возможность дать картину, свободную от затруднений и не подлежащую изменениям в будущем. Большая заслуга Грейтона в том, что он провел резкую грань между двумя в корне различными взглядами на природу флюида, выделяемого из магмы. Другим следует продолжать это дело, обогащая наши знания наблюдениями и выводами теоретического характера в пользу того или другого процесса.

Клифтон, Нью Джерси  
15 июля 1940 г.

### *В. Джеймс Бичэн*

W. James Bichan. Econ Geol., 1941 No. 2. 212—217

В виду молчаливого признания большинством геологов, что рудообразующие флюиды являются преимущественно гидротермальными растворами, своевременно обратить внимание на некоторые не-

достатки подобной среды для выполнения роли существенного носителя руд, если допустить, что эта среда одна является агентом рудоотложения. Пренебрежение, которое проявляется в настоящее время к более полному обоснованию гидротермального происхождения руд с физической, химической и геологической точек зрения, для большинства руд отражается в следующих трех положениях из рассматриваемой статьи проф. Грейтона.

«Все согласны с тем, что руды рассматриваемого здесь обширного семейства в известных нам условиях представляют результат воздействия горячих жидких растворов и являются, следовательно, гидротермальными растворами в узком значении слова» (стр. 19).

«Мы видим, что и Росс и Шедлер окончательно убеждены в том, что господствующим реагентом, участвующим в образовании гипогенных руд в одном случае и пегматитовых разновидностей в другом, является гидротермальный жидкий раствор» (стр. 99).

«Так как Боуэн, Феннер и Росс согласны с тем, что горячая жидкость была тем агентом, которому обязаны своим происхождением руды, являющиеся предметом их изучения, мы, повидимому, вправе применять, без всяких ограничений, термин гидротермальный к обширному семейству руд, от пирометасоматических и гипотермальных до эпитермальных и телетермальных» (стр. 139).

Определение, которое Грейтон дает понятию гидротермальный как «горячей, существенно состоящей из воды, жидкости» (стр. 14), следует определению Линдгрена<sup>1</sup> и остается в той же мере расплывчатым, в какой оно неполно, так как «горячая» и «существенно состоящая из воды (watery)» лишь сравнительные термины, а «жидкость» не обязательно подразумевается при употреблении термина «гидротермальный», если речь идет не о совершенно произвольном применении его проф. Грейтоном и другими.

Несомненно, некоторые месторождения могут быть гидротермальными в узком смысле слова, придаваемом этому термину проф. Грейтоном, но значительно большее число их обнаруживает неоспоримо более тесное родство с «нормальными» пегматитами, чем с осадками горячих источников, которые служили до сих пор основанием для объяснения большинства минерализующих реакций.

Мы вправе поставить следующие вопросы:

1. Какая разница существует между кварцем изверженных пород и пегматитов и кварцем гипотермальных рудных жил, которая доказывала бы, что первый выкристаллизовался из магмы, а последний был отложен из раствора, состоящего преимущественно из воды?

2. Подобный вопрос уместен и по отношению к другим минералам, обычным и в магматической стадии в пегматитах и в гипотермальных жилах, например, к турмалину и альбиту, а также и к минералам магматических сегрегаций, например обычным сульфидам.

<sup>1</sup> Lindgren W. Mineral Deposits, 3-е изд. 1928, стр. 143. «Растворы, образующие жилы, с самого начала были, вероятно, жидкими и часто сильно концентрированными. Главной составляющей в них являлась вода, и растворы неизменно находились в подвижном, не вязком состоянии».

3. Принимая во внимание важную работу Гибсона<sup>1</sup>, касающуюся повышения температуры инверсии кварца с увеличением давления, и открытие Мином<sup>2</sup> высокотемпературного кварца в некоторых канадских гипотермальных жилах, должны ли мы попрежнему придерживаться Линдгреновской оценки температурных границ образования разных классов отложений, обычно обозначаемых как гидротермальные, не внося необходимых поправок в зависимости от глубины, на которой имела место минерализация?

4. Как мог высокотемпературный кварц отлагаться при температуре свыше 832° С (на глубине около 30 км) из раствора, который перестает быть жидким при температуре, на несколько сот градусов более низкой, чем упомянутая?

5. Основываясь на цифре растворимости кремнекислоты в воде при 335° С, определенной Хитченом<sup>3</sup> в 0,21 часть кремнекислоты на 100 частей воды при давлении около 136 атмосфер, можно спросить, не является ли количество воды, необходимое для переноса в растворе той массы кварца, которая отложена поблизости от крупных гипотермальных рудоносных районов земного шара, столь же невероятной, как упоминаемое Грейтоном количество газа, участвовавшего в переносе хлором железа в Черро-де-Паско?

6. Согласно подсчету Бойделя<sup>4</sup>, минерализующие растворы в рассматриваемом им случае могли обнаружить падение температуры менее чем на 2° С при подъеме на 5000 футов по жильной зоне. Из опытов Хитчена можно определить, что разница в растворимости кремнекислоты на протяжении 2° С при 335° С составляет меньше чем 0,003 части кремнекислоты на 100 частей воды. Таким образом, каждая тонна кварца, отложившаяся на один фут глубины, потребовала бы циркуляции вдоль жильной зоны почти 170 миллионов тонн гидротермального раствора. Для случая нормального рудника, выдающего 100 тонн кварцевой руды в сутки, количество раствора, предположительно участвовавшее при таких условиях в процессе отложения нормального запаса руд предприятия, путем соответственного умножения определяется примерно в 170 000 000 000 000 тонн, т. е. еще более несостоятельной цифрой, чем у Грейтона для случая Черро-де-Паско.

7. Как может магма дать «водные растворы, богатые кремнеземом»<sup>5</sup>, который, судя по определению Хитчена, обладает низкой растворимостью в воде?

8. Определения Хитчена показывают, что растворимость кремне-

---

<sup>1</sup> Gibson R. E. The influence of pressure on the high-low inversion of quartz. Geophys. Lab. Pap. No. 663 (перепечатано из Jour. Phys., Chem., 32, 1197—1205 и 1206—1210, 1928).

<sup>2</sup> Meen V. B. The temperature of formation of quartz and some associated minerals. Univ. of Toronto studies, Geol. ser., No. 38, 1935, 61—68.

<sup>3</sup> Hitchen, Stanfield C. A. method for the experimental investigation of hydrothermal solutions, with notes on its application to the solubility of silica. Trans. Inst. Min. Met., 44, 1935, 277.

<sup>4</sup> Boydell H. C. Temperature of formation of an epithermal ore deposit. Trans. Inst. Min. Met., 41, 1932, 499.

<sup>5</sup> Lindgren W. Op. cit., стр. 125.

кислоты в щелочных растворах уменьшается с возрастанием температур; не проявят ли подобные растворы тенденцию к извлечению кварца из боковых пород в случае достижения ими более холодных горизонтов земной коры?

9. Что происходит с «особым рудным флюидом» Грейтона, если он не найдет способа покинуть магматическую камеру, после того как он был отделен каким бы то ни было процессом от основного магматического тела?

10. Чем представлены продукты затвердевания раствора, происшедшего из магмы, если последняя нашла себе выход несколько раньше руды при отделении предполагаемого «особого рудного флюида»?

11. Какой получится продукт, если предполагаемые в магме несмешивающиеся жидкие растворы одновременно найдут себе выход, и что может предупредить заполнение каналов обеими этими жидкостями в той же самой системе жил?

12. Что происходит с огромным количеством воды, потребным для переноса минерального вещества при гидротермальной системе, если растворы не в состоянии достичь поверхности после того, как они отложили главную массу содержащегося в них минерального вещества?

13. Не могут ли гидротермальные растворы, содержащие двуокись углерода в количестве, необходимом для образования карбонатов, вызвать разложение пирита тотчас после его образования, даже в большей степени, чем те изменения, которые вызываются действием на этот минерал поверхностных вод?

14. Не вызывают ли водные карбонатные минеральные растворы каолинизацию полевых шпатов боковых пород (подобно тому, как к образованию каолина приводят сходные растворы поверхностного происхождения), т. е. изменение боковых пород, совершенно отличное от обычно приводимого как гидротермальное?

Полное отсутствие фактического материала, указывающего на существование каких бы то ни было условий несмешиваемости в магме, из которой произошли «гидротермальные» отложения, а также и резких изменений в процессах дифференциации магмы, достаточных для объяснения внезапного появления гидротермальных растворов в соответствующих количествах к концу пегматитовой стадии, заставляет обратиться к рассмотрению тех продуктов, которые может дать магма, если эти продукты найдут себе выход в тот или иной момент во время ее существования.

Предполагается, что магматическая стадия при образовании количественно подчиненных продуктов магмы продолжается дольше, чем стадия образования «нормального» пегматита; действительно, она может продолжаться до лептотермальной стадии рудообразования, или почти до тех пределов, когда проявляется полосчатость кварца, характерная для осаждения из растворов, и остаточные пустоты в жилах (я то и другое является показателем кристаллизации из водного раствора).

Упомянутая выше работа Гибсона, в сочетании с известными фак-

тами относительно верхней границы кристаллизации кварца, позволяет ограничить температуру образования высокотемпературного кварца и допускает образование некоторого количества низкотемпературного в магматическом интервале температур и на приемлемой глубине; вместе с тем это говорит за то, что концепция рудной магмы приемлема в не меньшей степени, чем любая другая теория, развивавшаяся для объяснения процессов отложения подобных производных магмы.

Во избежание смешения понятий, предлагается термин «магма» ограничить флюидом, находящимся в пределах магматической камеры и наиболее значительных ее ответвлений или апофиз, и ввести термин *с и л и к о т е р м а л ь н ы й р а с т в о р* для тех порций, которые вынесены вдоль трещин дайк и жильных зон с образованием пегматитов и некоторых рудных месторождений.

Когда во время движения к поверхности большая часть кремнекислоты, образующей силикотермальный раствор, отложилась и достигнуты условия, при которых присутствующая в растворе вода переходит в жидкое состояние, — тогда только действие гидротермальных процессов распространяется на образование некоторых лептотермальных месторождений, а также и месторождений, которые относятся к эпитермальным и телетермальным.

Предположенная теория позволяет:

1. Дать объяснение общности характеристики кварца в изверженных породах, пегматитах и рудных месторождениях гипотермального и мезотермального типа, в противоположность его полосчатой разности, характерной для более низкотемпературных стадий.

2. Объяснить различие между сплошным заполнением жил более высокотемпературных «гидротермальных» отложений и развитием друз в низкотемпературных типах.

3. Выдвинуть единый процесс осаждения для сульфидов, встречающихся как в магматических сегрегациях, так и во многих жилах более высоких температурных категорий, и для турмалина, обычного в изверженных породах, пегматитах и многих гипотермальных жилах.

4. Выдвинуть довод в пользу более широких температурных рамок образования руд, в соответствии с наблюдаемыми пределами глубин многих месторождений, общий характер которых сохраняется с небольшими изменениями на протяжении многих тысяч футов по вертикали.

5. Внести ясность в вопрос о нахождении высокотемпературного кварца в некоторых гипотермальных жилах и в многочисленных пегматитах.

6. Устранить практические затруднения, связанные с переносом больших количеств кремнекислоты в водном растворе.

7. Объяснить обычную последовательную смену производных магмы, зависящую от последовательного выделения их из магматического очага во все более поздние стадии в продолжение всего процесса дифференциации.

8. Во всех отношениях привести наши воззрения в согласие с на-

копившимися фактами полевой геологии относительно рудных месторождений и такими сопровождающими их явлениями, как изменение боковых пород.

Рудник Сигмх, Квебек  
15 июля 1940 г.

### Т. Лёверинг

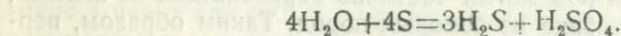
## ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛЬФРАМОВЫХ РУД В БАУЛДЕР КАУНТИ, КОЛОРАДО

T. S. Lovering. The origin of the tungsten ores of Boulder County, Col. Econ. Geol., 1941, No. 3, p. 229—279.

От редакции. В статье Лёверинга, посвященной описанию и толкованию ферберитовых жил района Баулдер Каунти, много внимания уделяется вопросам происхождения этих руд и в частности разбирается приложимость к ним взглядов, развиваемых Грейтоном. Как минералогия заполнения жил ферберита и сопряженных с ними теллуридов золота, так и состав вмещающих пород (кварцевый монзонит) в контакте, где ближайшая к жилам зона серицитизации сменяется зоной интенсивного развития минералов глин (диккит, бейделлит, аллофан и др.), по мнению автора, дают ясное указание на характер действовавших рудных растворов. Источником минерализованных растворов Лёверинг считает магму биотитового латита, эманации которой, проникнув без существенных изменений сквозь пористую эксплозионную брекчию, в вышележащих трещинах вступают во взаимодействие с окружающей породой и отлагают растворенные в них вещества.

Разбор на последних страницах статьи некоторых взглядов Грейтона с точки зрения данной группы месторождений, а отчасти и общая оценка их представляют несомненный интерес для тех, кто стремится разобраться во взглядах Грейтона. Этот отрывок и приводится здесь; для лучшего понимания дано и краткое заключение.

Недавно Грейтон выступил с результатами обширного исследования о природе рудообразующих флюидов, которое привело его к выводу, что эти флюиды всегда покидают магму в виде щелочной жидкости. Для таких районов, как Черро-де-Паско, Гольдфильд, Бонанца и Баулдер Каунти, где установлено воздействие гипогенных кислых растворов, Грейтоном принимается превращение первоначально щелочных растворов в кислые при образовании газовой фазы, по уравнению реакции примерно следующего вида:



Реакция вызвана, по мнению Грейтона, низким давлением в верхней части проводящих путей и нормально должна приводить к наложению позднего кислотного изменения боковых пород и руд на более раннее изменение щелочными растворами. Там, где за кислотным воздействием следует щелочное изменение, как, например, в Бонанце и Баулдер Каунти (и Гольдфильд?), это объясняется образованием  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в настолько раннюю стадию, что предшествующие щелочные растворы успели вызвать только незначительные изменения. Эта ранняя ненормальная кислотность будто бы сменялась затем нормальными условиями щелочного раствора.

Искусное использование Грейтоном физических, химических и полевых данных придает его изложению большую убедительность. Ниже приводятся некоторые из наиболее существенных доводов, заставивших его отрицательно отнестись к предположению, что рудо-

образующий флюид может покидать магму в виде кислой эманации.

1. Пар как ниже, так и выше критической точки является крайне убогим носителем и летучих и нелетучих соединений магмы.

Давление пара летучих галоидов приводит к заключению, что почти все количество F и Cl выносятся вместе с H в виде HCl и HF, а не в виде соединений с металлами. В случае нахождения огромных масс руды в одном месторождении, как, например, в Черро-де-Паско, указанные обстоятельства делают крайне невероятным, чтобы перенос кремнекислоты и рудных металлов мог совершаться в виде газообразных галоидных соединений.

2. Высокая скрытая теплота пара и низкая теплопроводность пород делают невероятным, чтобы могла иметь место конденсация газа в жидкость после того, как началось кипение. Тепло будет притекать быстрее, чем породы в состоянии его поглощать, и газовая фаза, естественно, сохранится на всем пути до поверхности. Это исключило бы возможность присутствия различной жидкой фазы во время рудоотложения.

3. Магматическое тело, достигающее земной поверхности, находится в совсем иных условиях равновесия температуры и давления, чем замкнутые магмы, из которых происходят рудообразующие растворы. Следовательно, присутствие летучих галоидных соединений металлов в вулканических эманациях не дает надежных указаний относительно того, при каких условиях те же летучие соединения выделяются на глубине.

Первый довод, согласно которому содержащиеся в магме галоидные соединения не в состоянии переместить те огромные массы металла, которые заключены в одном крупном сульфидном месторождении, трудно доказуем, но представляется весьма правдоподобным. Однако ферберитовые месторождения и месторождения теллуридов золота отличаются от большинства рудных месторождений низким содержанием присутствующего в них металла. Вся добыча вольфрама из района Баулдер Каунти составляет всего лишь 17 000 тонн ферберита. Металлосодержащие минералы, ассоциирующие с теллуридами золота, крайне скудны, если не говорить о пирите и марказите, которые оба могли частично образоваться из железа, выщелоченного на глубине из боковых пород. Таким образом, первый довод, если понимать его буквально, говорит в пользу того, что руды района Баулдер Каунти произошли из эманаций, выделившихся из магмы в виде газовой фазы, и дает объяснение для малого количества сопровождающих металлосодержащих минералов.

Второй довод не учитывает некоторых существенных факторов, как, например, охлаждения вследствие расширения и охлаждения, обусловленного переходом в разветвляющиеся каналы, что влечет за собой соприкосновение с большей поверхностью породы по мере удаления пара от магмы. Охлаждение, вызываемое одним адиабатическим расширением, при падении давления с нескольких тысяч до нескольких сотен футов, измерялось бы сотнями градусов. Поступление в разветвляющиеся каналы замедлило бы движение пара и увеличило бы поверхность соприкосновения, и оба эти фактора оказали бы влияние в направлении охлаждения и конденсации.

Третий довод, очевидно, исходит из убеждения, что все магмы, выделяющие рудообразующие растворы, относятся к магмам глубинным — мнение, с которым не согласен автор настоящей статьи. Если в Черро-де-Паско исходная магма внедрилась до горизонта, где имело место гипогенное изменение кислотности, и если, как предполагает Грейтон, кислотность появилась в рудообразующих растворах в связи с псывлением газовой фазы, — сама магма, казалось бы, должна была выделять кислые газообразные эманации на этом более высоком горизонте. Изменения под воздействием кислотных растворов, повидимому, простираются вниз до уровня, лежащего не менее, чем на 3000 футов ниже земной поверхности, существовавшей в Черро-де-Паско в стадии минерализации. Данные относительно глубины распространения воздействия кислых растворов на породы в этом южноамериканском районе, вместе с полученными в Катмаи данными относительно переноса в газовой фазе, приводят нас к логическому заключению, что кислые газообразные металлосодержащие эманации могут выделяться из магм на глубине нескольких тысяч футов ниже поверхности.

... Можно предположить, что поверхность в то время, когда образовались месторождения (в Баулдер Каунти) лежала не менее чем на 2000 футов выше современной. Давления в трещинах с непроницаемыми оторочками на такой глубине могли быть сравнительно высокими, но чувствительность рудных столбов к присутствию таких оторочек в жилах показывает, что имелись сравнительно открытые каналы и что давления, нагнетающие растворы вверх, не были чрезмерно большими. Указанием на низкие давления служат также ограниченность жидких включений в кварце и ассоциация минералов. С достаточным основанием можно предполагать, что эманации, выделявшиеся эксплозивной интрузивной брекчией, обладали крайне высоким начальным давлением. Низкие давления в трещинах сверху почти несомненно приводили к появлению газовой фазы, а расширение газа должно было привести здесь к быстрому падению температуры. Подобная газовая фаза неизбежно характеризовалась бы кислой реакцией.

По данным Аллена и других исследователей, марказит переходит в пирит при  $450^{\circ}\text{C}$  и присутствие его определяет верхний предел температуры, при которой образовались руды. Присутствие дикжита указывает на температуры, слишком низкие для образования накрита, но чересчур высокие для каолинита. Ассоциация сфалерита, галенита, тетраэдрита, миаргирита, полибазита и фрейбергерита говорит в пользу эпитермальных условий, но эти минералы являются представителями определенно более холодных растворов, чем те, которыми был отложен ферберит. Если судить по вычисленному давлению насыщенного пара<sup>1</sup>, максимальная температура разбавленного водного жидкого раствора при гидростатическом давлении 2000 футов составит около  $275^{\circ}\text{C}$ . Высказывается мнение, что температура, при которой образовался ферберит, находилась в пределах между  $200$  и  $300^{\circ}\text{C}$ .

<sup>1</sup> Hodgman C. D. Handbook of Chemistry and Physics, 19-e изд., 1934, стр. 1273.

При внимательном анализе доводы Грейтона против реальности существования кислых газовых металлоносных магматических эманаций либо не выдерживают критики, либо служат серьезной поддержкой заключению, что именно такой механизм привел к возникновению вольфрамовых месторождений района Баулдер Каунти. Вполне сознавая, что выводы Грейтона могут действительно распространяться на большинство месторождений, автор полагает, что соотношения, наблюдаемые в поле, и парагенезис руд, описанных им, вполне логично объясняются воздействием конденсата первоначально кислых газовых металлоносных эманаций, выделившихся из латитовой магмы.

**Заключение.** Месторождения теллуридов золота местами содержат в небольшом количестве ферберит и тесно связаны, минералогически и пространственно, с вольфрамовыми месторождениями. Приводятся доказательства, что и месторождения теллуридов золота и вольфрамовые месторождения генетически привязаны к внедрению латитовой интрузивной брекчии. Раннее проявление изменений под влиянием кислых агентов при возрастающей, повидимому, интенсивности их с глубиной говорит в пользу предположения, что растворы были кислыми у их источника. Убогое содержание сульфидов наводит на мысль о переносе в газовой фазе при выделении растворов из магмы. Сила взрыва, сказывающаяся во внедрении латитовой интрузивной брекчии, приводит к убеждению, что эманации отделились от магмы в виде газовой фазы, содержавшей воду, теллур и серу, совместно с галоидными соединениями золота и вольфрама, и в таком виде поднялись по проницаемым путям в горячей пористой латитовой брекчии, но конденсировались, как только они вступили в холодные трещины выше интрузивной брекчии. Минералогический состав месторождений показывает, что эти кислые водные растворы могли превращаться в щелочные благодаря взаимодействию с боковыми породами и что ферберит осаждался, когда реакция жидкого раствора приближалась к нейтральной, в то время как теллуриды золота не осаждалась раньше, чем растворы становились щелочными.

Мичиганский университет  
1 октября 1940 г.

Отв. редактор *А. Н. Заварицкий*

Технич. редактор *А. И. Красновская*

Сдано в набор 14/VIII 1945 г. Подписано к печати 22/III 1946 г. Л-53482  
Тираж 3000. Формат 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. 11<sup>1</sup>/<sub>2</sub> п. л. 48 000 зн. в 1 п. л., 14,1 д. а. л.  
Цена 20 руб. Зак 6616.

220