

С. И. НАБОВО

**ИЗМЕНЕНИЕ ПОРОД В ЗОНАХ АКТИВНОГО ВУЛКАНИЗМА**

Во время извержений и продолжительное время после извержений газы и образующиеся при более низких температурах водные растворы, проходя через породы, взаимодействуют с ними. Характер изменения пород зависит как от их состава, так и от состояния самих растворов (газовые, жидкие), состава, температуры, кислотности и концентрации их. Изучение процесса перерождения пород в зонах современного активного вулканизма может в некоторой степени иметь интерес при выяснении генезиса околорудных изменений.

**ИЗМЕНЕНИЕ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАЗОВ**

Изменение пород под действием газов в районах современных фумарол незначительное и ограничивается небольшими площадями. Прежде чем дать характеристику этому процессу, остановимся в нескольких словах на газовом выносе из магмы и лавы компонентов, которое в случае более интенсивного проявления могло бы привести к изменениям состава исходной лавы.

Во время образования в 1946—1948 гг. андезитового купола на вулкане Швелуч из лавы отделялись летучие, из которых при охлаждении осаждались возгоны (табл. 1), состоящие из сульфатов натрия, калия, магния и кальция (тенардита, афтиталита, глауберита, полигалита) с небольшой примесью галогенидов натрия и калия (галита и сильвина).

Возгоны осаждались непосредственно из летучих, выделяющихся из андезитовой экструзии. Лава выжималась вязкой, имела максимальную температуру  $980^{\circ}$ , и по составу возгонов можно было судить, что при этих температурах из лавы с сернистыми газами улетучивались щелочные металлы, причем натрий — более интенсивно, чем калий. Если в лаве количество натрия было в три раза больше, чем калия, то в возгонах натрия в десять, двадцать раз больше, чем калия. Щелочные металлы, вероятно, летели в виде сульфитов, которые на воздухе окислялись до сульфатов. Другие породообразующие элементы улетучивались из лавы слабее, причем кальций все же более интенсивно, чем магний, железо, алюминий и кремний. То же можно сказать и о микроэлементах, в частности рудных. В возгонах, судя по спектральным анализам, не наблюдалось их особой концентрации, за исключением ванадия. Одни и те же рудные элементы, приблизительно в одинаковых количествах, были определены и в андезите, и в продуктах прямого возгона.

На Ключевском вулкане из базальтовой лавы, изливающейся из побочных кратеров при высоких температурах (лава имела температуру в мо-

Таблица 1

Состав возгонов на Шивелуче во время извержения 1946—1948 гг.  
(анализ растворимых в воде возгонов, пересчитано на 100% без нерастворимого остатка)

Окислы и элементы	1	2	3	4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	0,27	0,77	0,82	0,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	0,04	0,29	0,86	—
FeO . . . . .	—	—	—	—
CaO . . . . .	0,62	0,69	1,31	5,86
MgO . . . . .	0,77	2,33	0,56	0,86
Na <sub>2</sub> O . . . . .	33,59	29,35	35,16	37,03
K <sub>2</sub> O . . . . .	1,82	2,65	4,16	2,97
SO <sub>3</sub> . . . . .	53,30	52,23	51,49	50,91
Cl . . . . .	1,68	0,14	1,07	—
H <sub>2</sub> O — 110	4,08	6,57	4,57	1,94
H <sub>2</sub> O + 110	3,83	4,98	—	—
Сумма . . .	100,00	100,00	100,00	100,00

1. Возгон собран в августе 1947 г. на куполе Суелич с поверхности трещины, в которой на глубине светилась лава. Аналитик М. Е. Казакова.

2. Возгон собран в августе 1947 г. со свежих отложений раскаленной тучи. Аналитик М. Е. Казакова.

3. То же.

4. Возгон собран в апреле 1948 г. со свежих отложений раскаленной тучи. Аналитик А. И. Покровская.

мент излияния 1170°), выделялись наряду с парами воды галоидные и в меньших количествах сернистые газы. С хлором из лавы улетучивались и металлы. В возгонах, осаждающихся на поверхности трещин и глыб лавы, преобладали галогениды аммония, щелочных металлов и в меньших количествах — галогениды железа, алюминия, меди, магния и кальция. Из анализа возгонов следует, что при высоких температурах с хлором улетучивались преимущественно натрий и калий, причем в тех же пропорциях, в каких они находились в лаве. Состав возгона из базальта Тирануса (извержение 1938 г.) по анализу Л. А. Башариной (в весовых %): Na — 30,95; K — 9,64; Cl — 55,91; H<sub>2</sub>O — 0,32; NH<sub>4</sub>Cl — 2,70; сумма — 99,52.

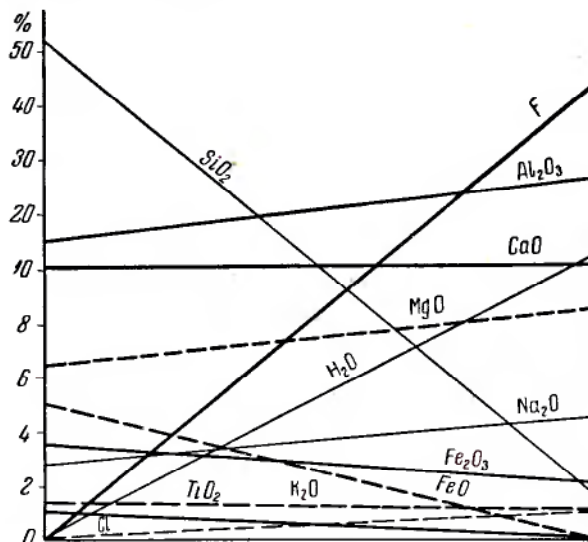
С фтором из лавы выносились, в основном, железо и кремний.

Подчеркивая незначительный газовый перенос металлов, не приводящий к их особой концентрации, проследим некоторые закономерности миграции их.

Базальтовая магма Ключевского вулкана на данном этапе эволюции была богата галоидными газами; из рудных элементов с галоидными газами выносилась медь с образованием хлоридов меди с содержанием Cu в некоторых возгонах до 60%, т. е. концентрация ее по сравнению с лавой увеличилась в 6000 раз. Андезитовая магма Шивелуча на данном этапе эволюции была богата сернистыми газами, из рудных элементов в возгонах концентрировался ванадий (в некоторых сульфатах определено до 12% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, т. е. концентрация ванадия увеличивалась в 1200 раз). В возгонах обоих вулканов в малых количествах (спектроскопически) определены бериллий, свинец, олово, цинк, кобальт, никель, цирконий, молибден, висмут, галлий, хром, барий, стронций, скандий. Галоидные возгоны из базальтовой лавы Ключевского вулкана были богаче этими

металлами, чем сульфатные возгоны из андезита и, кроме того, в них дополнительно определены еще сурьма, серебро, кадмий, галлий, теллур.

В процессе остывания и кристаллизации лавы на поверхности из нее происходило фракционное выделение летучих. Это хорошо можно было проследить на побочных кратерах Ключевского вулкана. На Билюкае (прорыв 1938 г.) в эксгаляциях первого года остывания базальтового



Фиг. 1. Изменение химического состава базальта под действием фтористого водорода. Слева — состав свежего базальта, справа — перерожденного.

потока микроэлементы были в больших концентрациях, чем в эксгаляциях, выделившихся десять лет спустя и, кроме того, в последних совсем не обнаружены серебро, кадмий, ртуть, сурьма, барий, цинк, молибден, галлий, олово, свинец. В эксгаляциях кратера Заварицкого два года спустя после излияния лавы, по сравнению с первым годом, не обнаружены серебро, литий, бериллий, галлий, и определены в более слабых линиях олово, теллур.

В нашатыре, образующемся в раннюю стадию остывания лавового потока, обнаружены бериллий, олово, медь, цинк, кобальт, никель, цирконий, галлий, таллий, хром, ванадий, барий, стронций, скандий. В нашатыре, образующемся на том же лавовом потоке, но остывавшем в продолжении двух лет, определены только следы меди. Как правило, более ранние, высокотемпературные эксгаляции, выделяющиеся в процессе формирования породы, выносили больше металлов, чем последующие. В процессе остывания и кристаллизации лавы галоидные газы сменялись сернистыми и впоследствии углекислыми газами.

Перерождение отвердевшего базальта под действием газов мы наблюдали на тех же потоках побочных кратеров Ключевского вулкана, в местах проникновения через него фтористого водорода. Базальт обесцвечивался и превращался в сыпучку, состоящую из фтористых минералов (табл. 2, фиг. 1 и 2).

Лава под воздействием фтористых газов обеднялась кремнием и железом, и в перерожденной породе они почти полностью отсутствовали; остальные породообразующие элементы оставались в ней в тех же относительных количествах, в каких они были в неизменном базальте. Такое перерождение породы легко объяснить, поскольку SiF<sub>4</sub>, FeF<sub>3</sub> улетучи-

Таблица 2

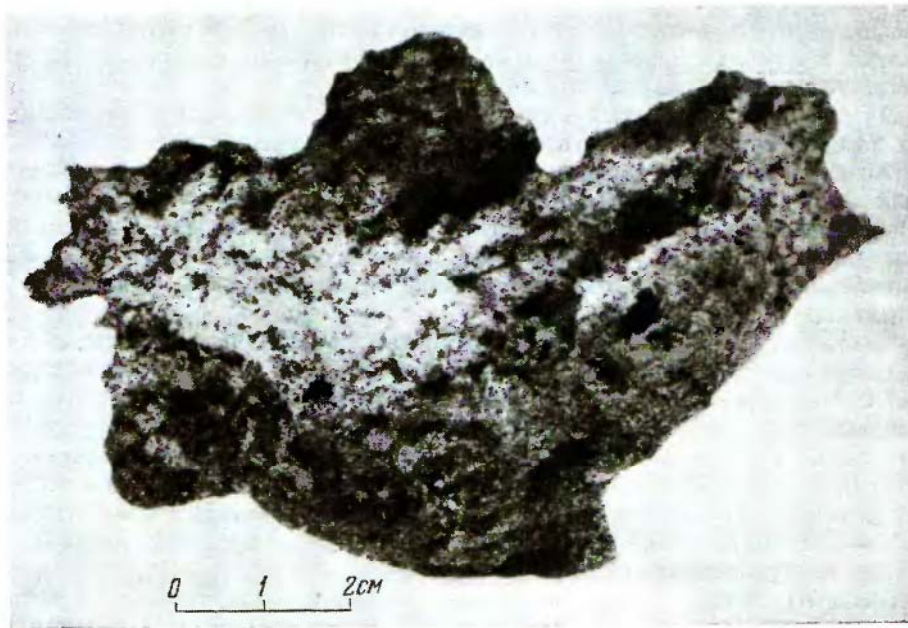
Состав свежего базальта и перерожденного под воздействием фтористого водорода, в процентах

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	F	Cl	H <sub>2</sub> O
1. Свежий базальт .	51,03	1,00	17,03	3,58	5,23	10,45	6,75	2,93	1,34	—	—	0,30
2. Перерожденная порода .	1,80	—	28,26	2,04	—	11,15	8,65	4,62	1,07	43,40	0,81	13,46

1. Аналитик К. П. Сокова. 2. Аналитик В. Некрасова.

ваются при температурах порядка 100—300°, в то время как фториды других металлов улетучиваются при значительно более высоких температурах (NaF — 1195°, KF — 1545°).

В первую стадию разложения базальт сохранял структуру горной породы, но большинство минералов — плагиоклаз, оливин и пироксен замещались изотропным светлым веществом. Основная непрозрачная бурая стекловатая масса обесцвечивалась пятнами, наиболее интенсивно



Фиг. 2. Перерожденный базальт. Лавовый поток Билюкая, Ключевской вулкан.

около пор. Плагиоклаз изменялся раньше других минералов, причем сначала с отдельных зон зональных вкрапленников. Изменение пироксена начиналось обычно около трещинок. Во вторую стадию разложения порода теряла первоначальную структуру и плотность и рассыпалась в тонкий агрегат, состоящий из фтористых минералов (ральстонита, флюорита и других).

Под воздействием кислых газов — хлористого водорода и сернистого газа, в присутствии паров воды, лава интенсивно краснела за счет окисления

железа основной стекловатой массы. Углекислый газ был в данном случае наименее активен.

## ПОСТВУЛКАНИЧЕСКАЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАДИЯ

(сольфатарная)

Наиболее энергично происходило изменение пород при более низких температурах (около  $100^{\circ}$ ) в сольфатарную стадию, когда условия были таковы, что была возможна частичная конденсация паров и образование жидких растворов. В условиях обилия кислорода происходило окисление и переход слабых кислот ( $H_2S$ ,  $H_2SO_3$ ) в серную кислоту. В этом процессе принимали участие и атмосферные воды. От лавовых масс или ареолов, имеющих высокие температуры, метеорные воды отгонялись.

Многие вулканы на Камчатке и Курильских островах находятся в сольфатарном состоянии, которое отражает остывание лавы на некоторой глубине, сопровождающееся выделением летучих компонентов.

Среди газов сольфатар преобладали пары воды,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$  и присутствовали  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ , мышьяковистая и борная кислоты. В случае наличия благоприятных морфологических условий (пониженные места, богатые грунтовыми водами) образовывались гидросольфатары, которые формировались в результате насыщения поверхностных и грунтовых вод вулканическими парами воды и газами. Изменение пород в районе сольфатар и гидросольфатар происходило под воздействием циркулирующих в породах через поры и трещинки растворов и зависело от концентрации и кислотности последних.

На сольфатарах старых куполов Шевелуча пары и газы выделялись как из межпластовых и секущих трещин, так и через агломерат (площадное выделение). Из энергично выделяющегося из трещин газа, имеющего температуру около  $100^{\circ}$  и выше, осаждалась самородная сера. При просачивании газа через агломерат на поверхности термальных площадок выкристаллизовываются сульфаты в виде пленок, наростов и корок. Дожди смывали выцветы, но при установлении хорошей погоды они снова появлялись.

Металлы для образования выцветов заимствовались из породы. В поле мы получили прямое подтверждение этого. В один из августовских дней 1947 г. в сольфатарном поле Кратерной вершины был оставлен термометр в медной оправе. Через некоторое время около термометра образовался интенсивно голубой выцвет сульфата меди. Медь из оправы термометра под воздействием серноокислых растворов перешла в раствор. В таком необычном выцвете спектроскопически, кроме меди, обнаружены элементы лавы — кальций, алюминий, магний, железо, титан, кремний, натрий, калий, т. е. произошло смешение растворов.

Выцветы, взятые с различных участков сольфатарного поля, по своему химическому составу несколько отличались друг от друга. В одних местах образовывались преимущественно алюминиевые сульфаты (алуноген), в других — железо-алюминиевые (галотрихит), в третьих — сульфаты преимущественно закисного железа (мелантерит), на некоторых участках образовывались квасцы (сульфаты щелочных металлов), а на некоторых — с примесью сульфатов магния — пиккерингит и другие. Состав выцветов отражал состав растворов, которые, следовательно, в различных условиях были неодинаковы. Такое различие могло быть за счет того, что породы, через которые проникали растворы, находились в различных стадиях разложения.

Когда лава была еще мало изменена, в раствор последовательно переходили все окислы, и в образующихся выцветах присутствовали все по-

родообразующие элементы (за исключением кремния), правда, в несколько иной пропорции, чем они были в лаве. Выцветы были обогащены натрием, калием, магнием и кальцием, хотя отношение натрия к калию оставалось таким же, какое было в лаве. Там, где лава, в результате длительного прохождения растворов, была изменена в глины, обогащенные гидратами алюминия и железа, в выцветах по сравнению со свежей лавой было мало магния, мало или совсем не было щелочных металлов, они были обогащены алюминием и железом (алуноген, галотрихит).

В табл. 3 приводится состав выцветов с различных участков.

Таблица 3

Химический состав выцветов, в процентах

Оксиды	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub> . . . . .	59,57	—	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	16,44	8,65	8,55	14,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	4,11	3,88	2,87	2,96
FeO . . . . .	2,49	1,51	0,72	2,46
MgO . . . . .	4,04	4,02	1,38	Нет
CaO . . . . .	6,43	Нет	5,62	»
Na <sub>2</sub> O . . . . .	3,27	6,25	Нет	»
K <sub>2</sub> O . . . . .	2,72	2,50	»	»
SO <sub>3</sub> . . . . .	—	38,92	50,06	36,55
H <sub>2</sub> O . . . . .	0,40	35,22	30,80	43,98
Сумма . . .	99,47	100,95	100,00	100,00

1. Свежий андезит. Анализ из работы А. А. Меньилова (1956).
2. Выцвет около молодой сольфатары на Кратерной вершине, вблизи нового купола Суелич. Аналитик Н. Н. Шаврова.
3. Выцвет около старой сольфатары Кратерной вершины (Осенняя). Аналитик Н. Н. Шаврова.
4. То же. Аналитик Л. А. Башарина.

Кальций выделялся в виде гипса, ангидрида, бассанита и в состав растворимых в воде выцветов не входил. Растворы, взаимодействуя с породой по мере ее изменения, также меняли свой состав, и выцветы отражали эти изменения.

Состав выцветов зависел также от изменения концентрации и кислотности растворов. Сильнокислые (рН = 2—4) растворы выщелачивали все металлы из лавы за исключением кремния. Слабокислые растворы алюминий и железо из породы в раствор переводили слабо и, соответственно, выцветы не были обогащены ими.

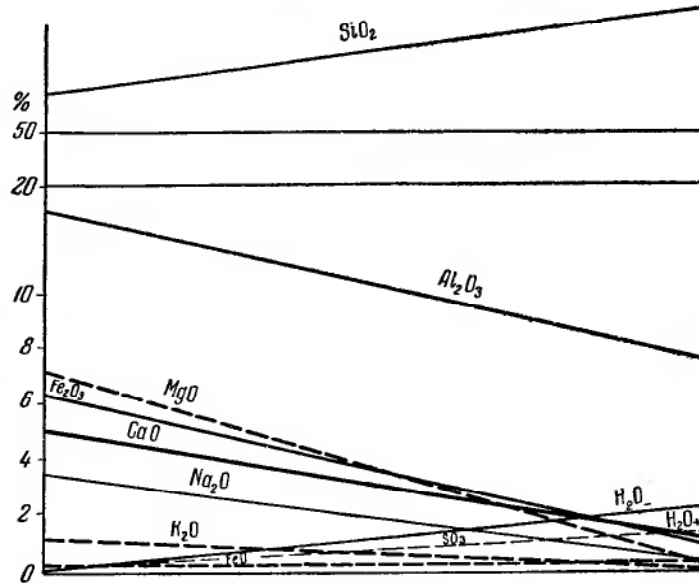
Образование выцветов происходило следующим образом. Выделяющиеся в районе сольфатар сернистый газ и сероводород вблизи поверхности окислялись, и в условиях влажности образовывалась серная кислота. Сернокислые растворы, заполняющие поры и трещинки в лаве и агломерате, разлагали минералы лавы и переводили большинство компонентов в раствор в виде сульфатов. Последние переносились течением растворов к поверхности и выкристаллизовывались на ней в результате изменения физических факторов равновесия, понижения температуры и особенно концентрации, наступающей вследствие потери растворителя (испарения воды).

В районе сольфатар и гидросольфатар породы под воздействием сернокислых растворов полностью перерождены. Мы наблюдали четыре типа изменения пород, характер которых обуславливался различной кислотностью и концентрацией растворов.

1. Изменение пород под воздействием кислых сернистых растворов—опалитизация

На сольфатарах, где выделяющиеся газы имели большую концентрацию сероводорода и сернистого газа, шел бурный процесс окисления, образования серной кислоты и более кислых растворов. Лава и агломерат (андезиты) в районе сольфатар были полностью разложены и превращены в белые плотные и сыпучие массы, обогащенные опалом или полностью состоящие из него.

В первую стадию разложения порода сохраняла плотность и структуру. Плагноклаз вкрашленников часто начинал опалитизироваться с более основных зон, богатых анортитовой молекулой, а потом опалитизировался



Фиг. 3. Изменение химического состава андезита при превращении в опалит. Слева — состав свежего андезито-базальта, справа — опалолита.

полностью. Опалитизация основной стекловатой массы началась около пор. Цветные компоненты замещались волокнистым опалом по трещинкам. Во вторую стадию разложения порода, частично сохраняя порфировую структуру, становилась рыхлой. Происходило полное ее обесцвечивание. Химическое разложение породы заключалось в последовательном выносе из нее сернокислыми растворами всех компонентов (за исключением кремния и титана), которые только временно находились в сульфатах, а вообще полностью уносились атмосферными водами с поля сольфатар (табл. 4 фиг. 3 и 4). Исключение составляли кальций, который, входя в слаборастворимые гипс, бассанит и ангидрит наравне с серой оставался в опалолитах; опал изотропный со светопреломлением, колеблющимся от 1,424 до 1,455. Часто он двупреломляет, имеет сферолитовую и струйчатую структуры, вероятно, за счет натяжений при его кристаллизации.

Спектроскопически в опалолитах определена только медь (следы линий). Микроэлементы породы наравне с петрогенными элементами перешли в раствор.

Химическое изменение породы кислыми сернистыми растворами происходило за счет выноса из нее натрия, калия, алюминия, магния,

Таблица 4

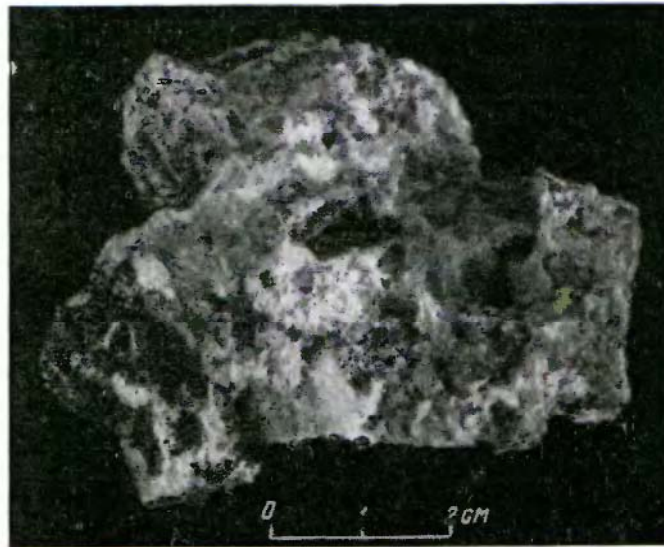
Состав свежего андезита и перерожденной породы на куполе Кратерной вершины Швелуча

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sub>-11</sub> <sup>o</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>+110</sub>	S	Сумма
1	57,98	0,50	16,65	6,41	0,23	7,13	5,45	3,73	1,20	—	0,16	—	99,44
2	80,50	1,80	7,68	0,80	0,38	0,29	1,14	2,40	0,26	2,30	1,70	0,65	99,90

1. Свежий андезит. Анализ из работы А. А. Мевяйлова (1956).

2. Перерожденная в опалолит порода (с примесью алуниита). Аналитик Н. Н. Постникова.

кальция и обогащения кремнием, титаном, серой и водой. Образование опалолитов в районе вулканов под воздействием сернокислых растворов, по нашему мнению, может пролить свет на генезис некоторых месторождений вторичных кварцитов.



Фиг. 4. Опалолит. Купол Каран на вулкане Швелуч.

2. Изменение пород под воздействием слабокислых сернистых растворов—аргиллитизация

На сольфатарах со слабой концентрацией сероводорода и сернистого газа, где образовывались менее концентрированные сернокислые растворы, происходила аргиллитизация породы. Лавы и агломераты на площадях проникновения паров и сольфатарных газов разлагались и преобразовывались в глины.

Среди глин нередко находились еще не вполне разложенные глыбы лавы, на которых можно было видеть все стадии сернокислотного разложения, от осветленных, с структурой лавы, но с целиком каолинизированными плагиоклазами (вкрапленники пород) до бесструктурных глин.

Среди глинистых минералов преобладал каолинит, реже галлузит и гидрокислы железа. К ним примешивалась опал, гипс и сера.

В первую стадию изменения породы происходило разложение полевого шпата вкрапленников, при этом часто отдельных зон, а потом уже



полностью. Плагноклаз в проходящем свете становился мутным и превращался в каолинит. Цветные минералы изменялись позже плагноклаза, сначала амфибол, потом пироксен — в зеленоватый, волокнистый, слабо двупреломляющий хлорит (?). По трещинкам в породе появлялись окислы железа. В эту стадию разложения порода сохраняла плотность и первоначальную структуру. В дальнейшем порода, сохраняя структуру, становилась мягкой, разваливающейся при нажиме на нее. Вкрапленники плагноклаза полностью перерождались в каолинит, причем в основной массе появлялось много окислов железа. В последнюю стадию разложения порода делалась рыхлой, бесструктурной, осветленной, полностью состоящей из глинистых минералов. В глине встречались скопления пористого и плотного опала, образование которого могло происходить за счет полного выноса растворами из андезита всех окислов и освобождения кремнезема в виде геля.

В табл. 5 приведены анализы свежего андезита, породы, перерожденной в глину, опала и выцвета.

Таблица 5

Химический состав андезита и разложенных пород

Окислы	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub> . . . . .	57,98	42,10	91,56	—
TiO <sub>2</sub> . . . . .	0,50	0,96	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	16,65	38,04	—	13,83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	6,41	0,40	—	2,91
FeO . . . . .	0,23	Нет	—	2,42
CaO . . . . .	7,13	0,40	—	—
MgO . . . . .	5,45	0,18	—	—
Na <sub>2</sub> O . . . . .	3,73	1,14	—	—
K <sub>2</sub> O . . . . .	1,20			
SO <sub>3</sub> . . . . .	—	3,72	2,08	35,97
H <sub>2</sub> O . . . . .	0,16	13,30	5,56	43,25
Нерастворенный остаток . . .	—	—	—	1,85
Сумма . . . . .	99,44	100,24	99,20	100,23

1. Свежий андезит. Анализ из работы А. А. Меньялова (1956).
2. Перерожденная порода — каолинитовая глина. Аналитик М. Е. Казакова.
3. Опал. Аналитик С. И. Набоко.
4. Выцвет. Аналитик Л. А. Башарина.

Указанные образцы были подвергнуты спектральному анализу (результаты в табл. 6).

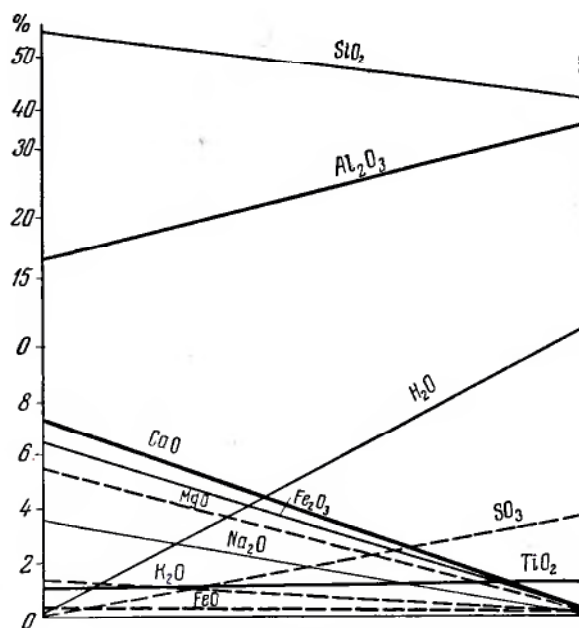
Из сравнения анализов неизменной породы и перерожденной в глину мы видим, что в последней все окислы, кроме алюминия (и часто железа), находятся в уменьшенных количествах. Кальций, магний и щелочные металлы почти полностью вынесены из породы. Кремния в глинах меньше, чем в неизменной породе, однако, при пересчете химического состава с вычетом привнесенных H<sub>2</sub>O и SO<sub>3</sub>, количество его приближается к количеству в лава. Обогащение глин окислами алюминия и железа могло происходить при выносе растворами наравне с другими металлами и кремния, а также при осаждении их из растворов. В кислых водах сольфатар и в искусственном конденсате перегретых паров и газов в районе гейзеров присутствует кремний, т. е. он из породы частично переходит в раствор.

Результаты спектрального анализа <sup>1</sup>  
Аналитик Л. И. Индиченко

Изученная порода	Be	As	P	Cu	Co	Ni	Pb	Zr	Ta	Cr	V	Ba	Sr	Ti
Неизменная лава . . . . .	Сл.	Сл.		Слаб.	Слаб.	Слаб.	Слаб.	Сл.	Слаб.	Слаб.	Слаб.	Ср.	Ср.	Оч. слн.
Перерожденная порода — галлуазитовая глина . . . . .	—	—	Ср.	Сл.	—	—	—	Слн.	Ср.	Оч. слн.	Слн.	Оч. слн.	Слн.	Тоне
Опал . . . . .	—	—	—	Сл.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Выцвет . . . . .	Сл.	Сл.	—	Сл.	—	—	—	—	—	Слаб.	Слаб.	—	—	Слаб.

<sup>1</sup> Сл. — следы линий; слаб. — слабые; ср. — средние; слн. — сильные; оч. слн. — очень сильные.

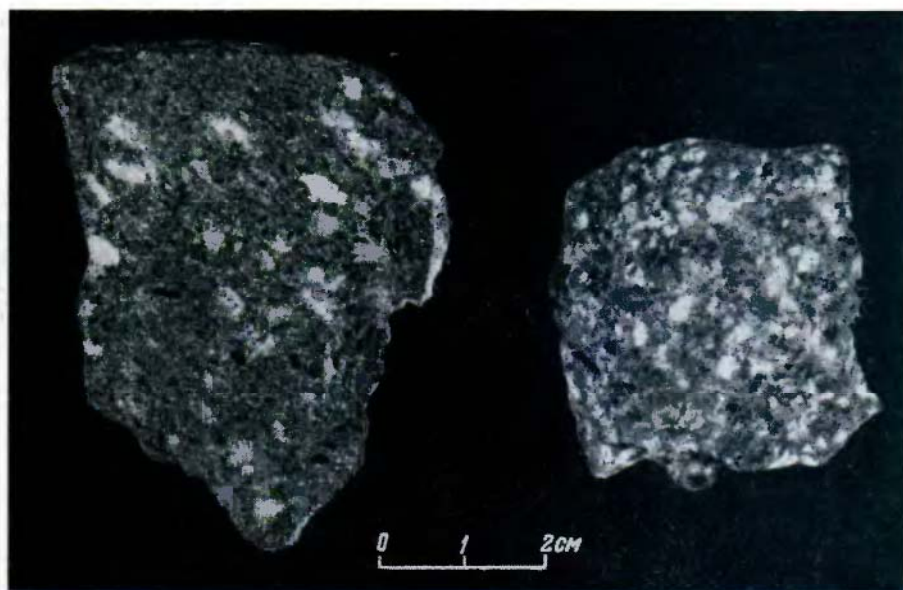
С другой стороны, на Кошелевских гидросольфатах из вод с рН около 5 происходило осаждение глин, весьма обогащенных окислами алюминия и железа, как это видно из прилагаемого анализа Н. Н. Постниковой (в процентах):  $\text{SiO}_2$  — 36,04,  $\text{TiO}_2$  — 1,26,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 26,28,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 17,18,  $\text{FeO}$  — 1,16,  $\text{MnO}$  — 0,10,  $\text{MgO}$  — 0,29,  $\text{CaO}$  — 0,54,  $\text{Na}_2\text{O}$  — 2,72,  $\text{K}_2\text{O}$  — 0,20,  $\text{H}_2\text{O}$  — 14,04,  $\text{S}$  — 0,30, сумма = 100,11.



Фиг. 5. Изменение химического состава андезита при превращении в каолинит. Слева — состав свежего андезита, справа — каолинита.

Осаждение гидроокислов алюминия и железа в виде гидратов из кислых вод происходило при их нейтрализации, наступавшей по мере разбавления их атмосферными водами и выщелачивания пород. Они удерживались в терминальных водах с рН меньше 5.

Аргиллитизация пород (лав среднего состава) наблюдалась нами в районах гидросольфатар на Диком гребне, Верхне- и Нижне-Кошелевских, Верхнегейзерных гидросольфатарах, в районе термальных источников и гейзеров Паужетских и Долины гейзеров. Аргиллитизация происходила под воздействием кислых вод термальных источников и, особенно, кислых поровых растворов. В районах Паужетском и Долины гейзеров, где термальные воды щелочные натровохлоридные, разложение пород происходило явно под действием поверхностных сернокислых растворов (в водной вытяжке из глины около гейзера Великана было определено до 9 %  $H_2SO_4$ ).



Фиг. 6. Слева — образец свежего андезита, справа — измененного в глину. Купол Каран на вулкане Шивелуч.

Таким образом, под воздействием на породы слабокислых растворов происходило обогащение их алюминием, а в некоторых случаях и железом и обеднение кальцием, магнием, натрием и калием (фиг. 5 и 6).

### 3. Изменение пород под воздействием концентрированных сернистых растворов — алунитизация

В районах некоторых сольфатар и гидросольфатар в отличие от опалитизации и аргиллитизации щелочные металлы не уносились из породы растворами, а входили в основную сернокислую соль — алунит. При этом происходило даже увеличение количества щелочных металлов в большей своей части за счет увеличения калия. Алунитизированные породы мы встречали на вулканах Кихпинич и Кошелева. Перерожденные лавы — плотные, белого цвета, с грубым раковистым изломом — совершенно не сохранили первоначальной текстуры. Под микроскопом видна реликтовая структура в одних случаях лавы, а в других — туфа, чаще же структура не сохранилась. Алунитизация сопровождалась опалитизацией и аргиллитизацией. Алунит замещал вкрапленники плагиоклаза и пятнами основную массу, а также заполнял поры и трещинки в породе.

Алунитизация происходит в районе сольфатар и гидросольфатар и в настоящее время. В районе Верхнегейзерных гидросольфатар у подножия вулкана Кихпинич (Камчатка) белые глины обогащены алунитом. Воды гидросольфатар — кислые (рН около 5) сульфатно-аммонийно-кальциево-магниево-магниево. Здесь наглядно видно обогащение воды гидросольфатар кальцием и магнием за счет выноса их из породы сернокислыми водами. Перерожденная же порода накапливает натрий, калий и алюминий.

Таблица 7

Химический состав алунитизированных пород

Оксиды	1	2	3
SiO <sub>2</sub> . . . . .	22,33	29,66	47,90
TiO <sub>2</sub> . . . . .	0,91	0,43	0,71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	31,43	27,60	18,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	1,19	0,45	0,20
FeO . . . . .	—	—	0,52
Na <sub>2</sub> O . . . . .	3,33	3,04	2,16
K <sub>2</sub> O . . . . .	4,45	3,50	2,77
H <sub>2</sub> O . . . . .	10,36	9,02	10,00
SO <sub>3</sub> . . . . .	25,86	25,30	16,66
Сумма . . . . .	99,26	99,00	99,65
Содержание алунита, мол. % . . . . .	61%	67%	47%

1. Перерожденная порода вулкана Кихпинича.  
Аналитик Н. Н. Шаврова.
2. Глины Верхнегейзерных гидросольфатар.  
Аналитик Н. Н. Шаврова.
3. Перерожденная порода вулкана Кошелева.  
Аналитик Н. Н. Постникова.

Для камчатских алунитов характерен кали-натровый состав.

Таблица 8

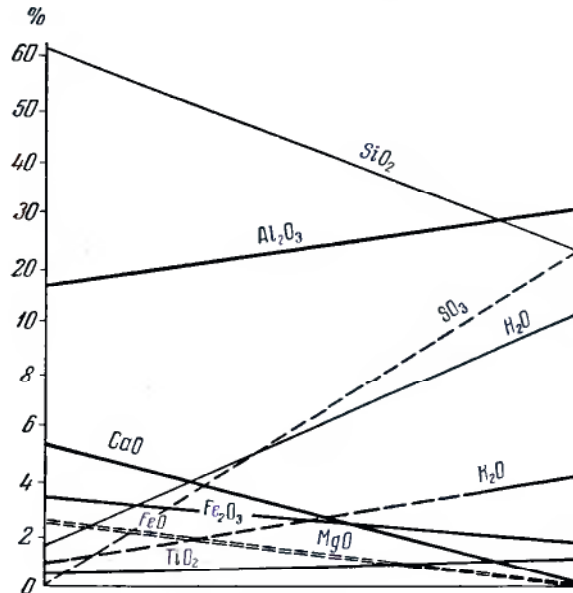
Состав алунита в процентах

Компонент алунита	Верхнегейзерные	Кихпинич	Кошелева
Натровый . . . . .	55	56	53
Калиевый . . . . .	45	44	47

Алунит в мелких таблитчатых кристалликах, одноосный положительный, удлинение отрицательное,  $N_g = 1,594$ ,  $N_p = 1,573$ ,  $N_g - N_p = 0,021$ .

Алунитизация на Кихпиниче сопровождалась сульфидизацией. Камчатские алуниты кали-натровые, однако, при увеличенном количестве щелочных металлов по сравнению со свежей породой, в алунитизированных породах калия более повышенное количество по отношению к натрию, чем в лаве. Если в лаве  $Na_2O : K_2O = 3 : 1$ , в алунитизированной породе  $Na_2O : K_2O = 1 : 1$ . При перерождении лавы в алунит происходило

увеличение в ней  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  и уменьшение  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ; количество  $\text{Na}_2\text{O}$  оставалось тем же (фиг. 7 и 8).



Фиг. 7. Изменение химического состава андезита при превращении в алуниит. Слева — состав свежего андезито-базальта, справа — алуниита.



Фиг. 8. Алунизированная порода. Вулкан Кизпинич.

При каких условиях происходит алунификация вместо опалитизации и аргиллитизации, нам не вполне ясно. Наблюдаются при этом два случая: первый — при длительном проникновении сольфатарных газов ( $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{SO}_2$ ) сквозь поры в лаве и агломерате. При этом  $\text{Na}_2\text{O}$ , как уже было

сказано выше, сернистыми газами выносятся из лавы более интенсивно, чем калий, а поэтому последним обогащаются алунитизированные породы.

Во втором случае алунитизация происходит в условиях более низких температур, конденсации паров и образования водных растворов. Судя по данным, наблюдавшимся в Верхнегейзерном районе, кислотность растворов была около 5. Более кислые растворы изменяли породы в опалолиты, а менее кислые и концентрированные — в каолиниты. Условия при алунитизации таковы, что щелочные металлы не обогащают раствор (действительно в водах этого района мало натрия и калия, они аммонийно-магнезально-кальциевые), а соединяются с алюминием и серой с образованием основного, нерастворимого в воде сульфата — алунита.

#### 4. Изменение пород слабощелочными водами

В районе Киреунских термальных источников мы наблюдали перерождение пород в монтмориллонитовые глины. Воды источников минерализованные (1,471 г/л) натрово-хлоридного состава с pH около 8. Изменение пород происходило под воздействием паров воды и поровых растворов, которые, судя по тому, что на термальных площадках не образовывалось выцветов, не содержали иона  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Глины светло-розовые и бурые легкие, тонкодисперсные. Судя по химическому анализу, термограмме и рентгеноструктурному анализу, глины состояли из монтмориллонита, бейделлита, нонтронита. Порода, претерпев полное минералогическое изменение, в химическом отношении изменилась мало. Произошла только частичная потеря магния, натрия и калия, которые компенсировались водой, как это видно из следующих цифр (анализ Н. Н. Постниковой, в процентах):  $\text{SiO}_2$ —48,84;  $\text{TiO}_2$ —0,74;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —16,67;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ —8,02;  $\text{FeO}$  — 0,64;  $\text{MnO}$  — 0,22;  $\text{MgO}$  — 1,97;  $\text{CaO}$  — 3,36;  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1,00$ ;  $\text{H}_2\text{O}$  — 12,20;  $\text{H}_2\text{O}_{+110}$  6,68; S — 0,26; сумма — 100,60.

Все вышеописанные процессы — опалитизация, аргиллитизация, частично алунитизация, сопровождающиеся образованием сульфатов, происходят вблизи поверхности в окислительной зоне. Самородная сера и сульфаты на глубине сменяются сульфидами.

Некоторые данные об изменении пород на глубине получены в результате проведения буровых работ в районах термальных источников в Исландии и в Йеллоустонском парке (США).

В Йеллоустонском парке в Верхнем бассейне при бурении получен следующий разрез: от 0 до 18 м — переход от гейзерита к пропитанному кремнекислотой гравию; 18—36 м — обломки риолитов сцементированы кварцем, ортоклазом, опалом, халцедоном, кальцитом, гётитом и цеолитами; от 20 до 28,3 — гейландит, ниже идет анальцит; 42—67 м — в трещинах анальцит; 68—124 м — основная масса дацита замещена кварцем и ортоклазом.

Из химических анализов измененных пород следует, что в них привнесены  $\text{SiO}_2$ , натрий замещен калием приблизительно в эквивалентных количествах.

В бассейне Норрис, в отличие от Верхнего бассейна, воды кислые, сульфатные. У поверхности ортоклаз риолитов выщелочен, присутствуют каолинит, кристобалит, кварц и тридимит. С глубины от 10 до 60 м наблюдается частичное выщелачивание ортоклаза, замещение породы глинистыми минералами, причем к каолиниту добавляется бейделлит. Глубже 60 м идет только бейделлит.

Различие в процессе изменения пород в двух бассейнах, по Феннеру (1934), объясняется количеством воды и глубиной, до которой она

доходит. В Верхнем бассейне много воды, достигающей больших глубин, поэтому вулканический  $\text{CO}_2$  может воздействовать на значительную толщину пород, и воды насыщаются щелочными металлами и кремнекислотой. Происходит замещение в породе натрия калием, отложение кремнекислоты, и воды доходят до поверхности богатые щелочными металлами.

Химическое изменение исландских базальтов под воздействием щелочных вод иное, чем иеллоустонских риолитов. В Исландии в перерожденной породе, по сравнению со свежим базальтом, все окислы кроме  $\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , находятся в тех же количествах, в каких они были в свежем базальте. Исключение составляет  $\text{Na}_2\text{O}$ , количество которой увеличилось за счет осаждения из циркулирующих вод; увеличилось и количество окисного железа за счет закисного. Несмотря на незначительное химическое изменение, порода минералогически переродилась полностью, не осталось ни одного первичного минерала базальта: лабрадор и широксен перекристаллизовались в цеолит и хлорит.

В Иеллоустонском парке, по Феннеру (Fenner, 1934), изменение риолитов щелочными водами состоит в основном в замещении натрия калием в молекулярных пропорциях, так что отношение  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) : \text{Al}_2\text{O}_3$  остается постоянным. Аллен и Дей считают, что исследования Феннера объясняют состав вод источников, в которых количество натрия значительно превосходит количество калия. Барт (Barth, 1950) для Исландии полагает, что повышенное количество натрия по сравнению с калием в термальных водах не является результатом непосредственной реакции между водой щелочных источников и боковой породой. Наоборот, натрий из термальных вод поступает в породу.

По нашим данным, в условиях формирования термальных источников за счет поверхностных вод, например, в Верхнегеизерном районе (Камчатка) ясно видно повышение количества натрия по сравнению с калием в водах термальных источников и в выцветах за счет выноса его из пород и обогащение в результате этого перерожденных пород (алузитов) калием.

## ВЫВОДЫ

1. Поствулканическое изменение лав и агломератов под воздействием газовых и водных растворов зависит от состава, кислотности и концентрации последних. Наибольшее изменение пород происходило в случае появления жидкой фазы воды. Газы, за исключением фтора, мало активны.

2. Газы, обогащенные фтористым водородом, при воздействии на твердую лаву вызывают обесцвечивание ее и обеднение кремнием и железом. Порода в твердом состоянии перекристаллизовывается в агрегат фтористых минералов алюминия, кальция, магния, натрия и калия — ральстонита, флюорита и других (газовый фтор-метасоматоз).

Газы из паров воды, хлористого водорода и сернистого газа окисляли лаву, что проявлялось в ее сильном покраснении. Углекислые газы в поверхностных условиях мало активны.

3. Изменение лав в районах сольфатар и гидросольфатар под воздействием образующейся в поверхностных условиях серной кислоты (за счет окисления сольфатарных газов  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{SO}_2$ ) можно определить как поствулканическое выщелачивание. При этом состав перерожденных пород обусловлен кислотностью и концентрацией растворов.

4. Наиболее кислые сернистые растворы перерождали лавы в опалолиты. При разложении пород все элементы последовательно (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe) переходили в раствор, за исключением кремния и титана, которыми и обогащались перерожденные породы. Образующиеся опалолиты были пористые — прибавление воды не компенсировало выщелоченных окислов.

Кремний освобождался из породы и в виде геля частично мигрировал, перерождаясь и обогащая отдельные участки.

Процесс опалитизации в районах современных сольфатар может пролить свет на образование вторичных кварцитов.

5. Слабо кислые (рН около 6) сернистые растворы незначительной концентрации перерождали лавы в глины, состоящие в большей своей части из каолинита и гидроокислов железа (реже галлуазита, ферригаллуазита). Этот процесс известен в литературе, как сольфатарная аргиллитизация (Коржинский, 1954). В районе сольфатар при аргиллитизации первичные минералы породы превращались в каолинит с сохранением структуры породы.

Добавление воды частично компенсировало вынос кальция, магния, натрия и калия. При аргиллитизации происходила концентрация алюминия (и железа) в основном за счет выноса других компонентов породы, а также путем осаждения гидроокислов из воды, вследствие уменьшения ее кислотности. Это могло происходить под влиянием разбавления растворов и при нейтрализации их под влиянием продолжающегося взаимодействия с породами. В глинистых осадках, образовавшихся таким путем, концентрация алюминия и железа большая, чем в глинах, образовавшихся при простом выщелачивании пород. Концентрация алюминия и железа может рассматриваться, как «обогащение» перемещенными инертными компонентами (Коржинский, 1954).

6. Концентрированные сернистые растворы (со значением рН около 5) вызывали перерождение лав в алуныты. Из породы в раствор переходили кальций и магний, частично натрий, в результате чего перерожденная порода обогащалась алюминием и калием. Щелочные металлы связывались с алюминием в основной, нерастворимый в воде сульфат — алунит и в отличие от опалитизации и каолинизации не выносились растворами с сольфатарных полей, а входили в состав перерожденных пород. Структуры замещения — выполнения пустот и образование жилок алунита говорят в пользу частичного осаждения его из растворов.

7. В условиях пропаривания (температура около 100°) и образования нейтральных и слабощелочных растворов, лавы перерождались в глины, состоящие из монтмориллонита, бейделлита и нонтронита. Химически порода почти не изменялась. Сохранившиеся структуры первоначальных пород говорят в пользу того, что происходило перерождение породы без особого перемещения элементов.

8. Д. С. Коржинский противопоставляет вторичным кварцитам субвулканической фации аргиллитизированные породы собственно вулканической фации.

Такое разделение расходится до некоторой степени с выводами Н. И. Наковника (1947), выдвинутыми им на основании изучения казахстанских так называемых «вторичных» кварцитов, который пришел к заключению о связи этих кварцитов с кислыми газотермами фумарольно-сольфатарной стадии. Наши наблюдения над современными газогидротермами говорят о явной связи процессов опалитизации и аргиллитизации. Особенности процесса перерождения пород определялись в основном кислотностью и концентрацией сернистых растворов. Опалитизация представляет собой крайний тип аргиллитизации (поствулканического выщелачивания).

9. Процесс опалитизации и аргиллитизации сопровождался образованием в приповерхностной (резко окислительной) зоне серы и сульфатов. Металлы на образование сульфатов заимствовались при этом из породы при сернокислотном ее разложении. Они были временными минералами и вследствие хорошей растворимости за исключением гипса, бассанита, ангидрита и алунита, не сохранялись.



10. Сульфаты на некоторой глубине сменялись сульфидами. Сернистые газы сольфатар в приповерхностной зоне окисляются в серную кислоту, которая разлагает породы и переводит железо в виде сульфата в раствор. При взаимодействии нисходящих растворов, содержащих сульфатное железо, с восходящими растворами, богатыми сульфидным ионом, происходило осаждение сульфидов железа. По мере подтока восходящих водных растворов и газов с низким потенциалом кислорода и сильным влиянием сульфидного иона зона сульфидизации надвигается на зону сульфатизации и серы. Этим можно объяснить одновременное присутствие черных железных сульфидов и элементарной серы на сольфатарах вулкана Менделеева на острове Кунашир (Курильские острова), вскрываемых выработками на глубине 3—6 метров от поверхности.

11. Парагенезис минералов в районе сольфатар и гидросольфатар на некоторой глубине иной, чем в поверхностной зоне. Судя по литературным данным, опалитизация и аргиллитизация сменяются цеолитизацией, хлоритизацией, адуляризацией, окварцеванием, сульфидизацией и образованием целого ряда других минералов. С одной стороны, уменьшается роль кислорода, с другой—увеличивается роль вулканической углекислоты в процессах перерождения пород.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- К о р ж и н с к и й Д. С. Очерк метасоматических процессов. Сб. «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, М., 1954.
- М е н я й л о в А. А. Вулкан Швелуч, его строение, состав и извержения. «Тр. Лабор. вулканологии АН СССР», вып. 10, 1956.
- Н а к о в н и к Н. И. Вторичные кварциты, их минеральные фации, генезис и практическое значение. Изв. АН СССР, сер. геол. № 4, 1947.
- В а r t Т. Volcanic geology. Hot springs and geysers of iceland «Carnegie Inst. Wash.», № 587, 1950.
- F e n n e r. C. W. Hydrothermal metamorphism in geyser - basins of Yellowstone National Park, is shown by deep drilling. «Trans. Am. geophys. Union», № 15, 1934.