

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р



Т Р У Д Ы
ЛАБОРАТОРИИ ВУЛКАНОЛОГИИ
И
КАМЧАТСКОЙ
ВУЛКАНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Выпуск 5



С. И. НАБОКО

ИЗВЕРЖЕНИЕ БИЛЮКАЯ,
ПОБОЧНОГО КРАТЕРА КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА,
в 1938 г.

Главный редактор — академик *А. Н. Заварицкий*
Ответственный редактор — *В. И. Влодавец*



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

МОСКВА

1947

ЛЕНИНГРАД

С. И. НАБОКО

**ИЗВЕРЖЕНИЕ БИЛЮКАЯ, ПОБОЧНОГО КРАТЕРА
КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА, в 1938 г.**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вулканические явления составляют небольшую часть общего магматического процесса, а протекающая на наших глазах деятельность вулканов охватывает в большинстве случаев только последние проявления давно начавшегося процесса. Все же, по ним иногда удается частично восстановить явления, происходящие на глубине, а наблюдения за деятельностью современных вулканов и анализ ее проливают свет на некоторые вопросы общего магматизма. Для изучения и разрешения этих вопросов на Камчатке, в стране действующих вулканов, Академией Наук СССР в 1935 г. под руководством академика Ф. Ю. Левинсон-Лессинга была организована Вулканологическая станция, построенная у подножья высочайшего на Евро-Азиатском материке и одного из наиболее активно действующих вулканов — Ключевского. Автору посчастливилось провести на станции два года и быть свидетелем грандиозного извержения этого гиганта и возникновения новых побочных вулканов. Извержение 1937—1938 гг. систематически описывалось в «Бюллетенях Вулканологической станции» за 1938—1939 гг. (А. А. Меньяйлов и С. И. Набоко). Обобщение и анализ этого извержения были даны в работе А. А. Меньяйлова, вещественный состав извержения охарактеризован в одной из статей автора.

В настоящей работе дается динамика извержения, описание продуктов деятельности и механизм образования побочных кратеров, в частности Билюкая, прорвавшегося на восточном склоне Ключевского вулкана в феврале 1938 г. Автор не был свидетелем момента возникновения нового вулкана; подъехать к нему удалось только спустя несколько дней после его прорыва, но излияние лавы и развитие извержения удалось наблюдать в непосредственной близости от кратера.

Извержение Билюкая продолжалось в течение года. Изучение его деятельности велось зимой — путем экспедиций, снаряжавшихся для наблюдения на месте извержения и взятия проб лавы, газов, сублиматов и других продуктов извержения, летом — путем стационарных наблюдений. Палатка была расположена в полукилометре от действующего кратера. Наблюдателей засыпало пеплом, обливало грязевым

дождем, от оглушительных взрывов сотрясалась почва, ночью было светло, как днем. Наблюдения велись у самого кратера. В периоды временного затишья удавалось спускаться в кратер и брать там пробы газов, возгонов и лавы. Сбор материала приходилось делать в условиях подвижного потока, и не раз мы оказывались плывущими на глыбах, передвигавшихся благодаря движению под ними расплавленной лавы. Изучение одновременного извержения 10 кратеров, расположенных на 15-километровом горизонтальном протяжении на различных гипсометрических уровнях (от 900 до 4860 м), и продуктов их извержения дало представление о характере дифференциации в магматическом очаге, имеющем связь с дневной поверхностью. Закалка вытекающей из жерла расплавленной лавы позволила судить о порядке кристаллизации базальта. Систематические наблюдения над извержением вулкана дали огромный материал по динамике и механизму извержения.

Работа велась под постоянным руководством академика А. Н. Заварицкого, которому автор приносит сердечную благодарность. В повседневной полевой и лабораторной работе автору ценную помощь оказывали В. И. Влодавец и А. А. Меняйлов, за что автор также выражает им большую благодарность.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевской вулкан, высотой в 4860 м, величаво подымается над окружающей местностью, поражая зрителя своей красивой, правильной конической формой. Верхняя часть конуса покрыта вечными льдами, но после взрывов (в периоды действия вулкана) ослепительно белый конус покрывается слоем песка и становится черным и мрачным.

С незапамятных времен из Вершинного кратера Ключевского вулкана выделяется пар, и периоды относительно слабого действия сменяются периодами сильных извержений. Из весьма скудной литературы известно



Фиг. 1. Извержение Билюкая в августе 1938 г. Фото с картины Е. В. Васильева.

около 50 извержений; из них наиболее сильным являлось, вероятно, извержение 1829 г., когда излилось около 3,5 км³ лавы. Характер извержений обычно смешанный, эксплозивно-эффузивный. Особенностью Ключевского вулкана является наличие на его склонах большого количества паразитных и побочных кратеров. Образование здесь новых кратеров еще не описывалось, за исключением кратеров Туйла, Биокось и Киргурич, прорвавшихся в 1932 г., и группы Билюкая, очевидцем образования которых был автор (фиг. 1).

По данным В. И. Влодавца (1940), все побочные кратеры расположены в зоне подножья, начиная с высоты 1500 м и ниже. Исключение составляют два кратера — кратер Стеллера и Разрушенный, находящиеся

в зоне подошвы. Больше всего побочных кратеров на северо-восточном склоне. Преобладающее количество их размещено по радиусам, идущим от кратера вулкана как от центра, но многие кратеры, как установил В. И. Влодавец, находятся почти на одной горизонтали и располагаются концентрически вокруг него. Всего к Ключевскому вулкану относится 53 побочных кратера, в том числе 12 прорвавшихся за последние годы, 9 в 1938 г. и 3 в 1932—1933 гг. Из 41 побочного кратера, образовавшегося до 1932 г., по тем же данным, 19 относятся к взрывному типу, 5 — к эффузивному, 1 — к смешанному; 10 кратеров трудно отнести к определенному типу и 6 не были осмотрены. Следовательно, из 24 побочных кратеров 19 являются взрывными и 5 эффузивными, т. е. отношение эффузивных кратеров к взрывным составляет 1 : 4. Для побочных кратеров последних лет (1932 и 1938 гг.) это отношение иное: большинство из них, а именно 9 из 12 кратеров, имеет эффузивный характер. Таким образом, при учете всех побочных кратеров отношение эффузивных к взрывным составляет 14 : 22, т. е. близко к 2 : 3.

Обычно побочные конусы имеют форму дуги или амфитеатра, открытых со стороны склона. Характерным моментом является наличие на склонах нескольких небольших сближенных кратеров или же больших кратеров, в которых находится несколько жерл. Эта особенность проявляется и на кратерах 1938 г., о чем более подробно сказано ниже. Из старых кратеров примерами могут служить: Незаметный, в котором по прямой линии расположены четыре жерла; Левашева, у которого наряду с главным кратером имеется второе боковое отверстие; кратер «D» с двумя жерлами; «I», имеющий на вершине 3 жерла; «Келль» с двумя жерлами, разделенными гребнеобразным мысом «Очки» с двумя рядом расположенными большими жерлами, в которых находится по нескольку более мелких; «Беринг», на конусообразной вершине которого имеется шесть жерл.

Самыми высокими побочными кратерами Ключевского вулкана являются «К», высота конуса которого достигает 200 м, и не уступающий ему по высоте конус Билукай, которому посвящена данная работа. Из взрывных кратеров наиболее мощным является «Е»: бомба длиной около 3 м и с поперечником в 1 м, найденная на его склоне, не имеет себе равных по величине, если не говорить о бомбах, выброшенных из Вершинного кратера Ключевского вулкана, в несколько раз больших. Из старых эффузивных кратеров данные имеются только для кратера «О», излившего лаву в количестве 4 млн. м³ (поток в 750 м длины, 75—250 м ширины и 25 м высоты). Самым же мощным эффузивным кратером Ключевского вулкана является Билукай, поток которого протянулся на 16 км при средней ширине в 1,5 км. Побочные кратеры, прорвавшиеся в 1932 г., уступают в этом отношении Билукаю; так, например, Биокось, по данным Кулакова (1934), излил лаву в количестве 15 млн. м³, Киргурич — 30 млн. м³ и Туйла — 45 млн. м³.

Из других вулканов, принадлежащих к Ключевской группе, обилием побочных кратеров отличаются Плоская сопка и Толбачик. Последний имеет около 120 побочных кратеров, значительно больше, чем Ключевской вулкан. Здесь также преобладают взрывные кратеры, но, кроме того, встречаются маары, обязанные своим происхождением газовым взрывам. По большому количеству побочных кратеров на своем склоне Ключевской вулкан сходен с вулканом Этна, извержения которого, по мнению большинства вулканологов, надо рассматривать как эксцентрические. Деятельность Ключевского вулкана в основных чертах

типа вулканов, но в отдельные моменты она обнаруживает и особенности, характерные для других типов. Отдача газов происходит не постоянно, а временами — после периодов накопления. Отдельные извержения имеют характер взрывов, жидкая магма приходит в движение, и часть ее выбрасывается распыленной — в виде вулканического песка и бомб; лавовые эффузии сопровождают извержение. В периоды между отдельными извержениями, которые имеют продолжительность от 2 до 10 лет, Вершинный кратер Ключевского вулкана или совершенно бездействует, что бывает очень редко, или слабо парит.

1. ИЗВЕРЖЕНИЕ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА в 1937—1938 гг. И ЕГО ПРОДУКТЫ

Автор был свидетелем очередного извержения Ключевского вулкана, начавшегося в 1937 г. и сопровождавшегося в 1938 г. прорывом на его склонах ряда паразитных и побочных кратеров. Это извержение подробно описано А. А. Меняйловым, но для уяснения процесса образования побочного кратера Билукая и механизма его извержения необходимо хотя бы кратко остановиться на нем.

Извержение Ключевского вулкана началось в апреле 1937 г. и продолжалось два года. До начала извержения вулкан находился в стадии редких эксплозий малого радиуса.

Непрерывное слабое парение нарушалось взрывами малой силы. Оживление вулканической деятельности наступило после тектонического землетрясения 4—25 ноября 1936 г., которому предшествовало первое появление зарева над кратером, быстро прекратившегося и возобновившегося только спустя 5 месяцев. Вероятно, в результате землетрясения открылась трещина, и магма поднялась по ней. В период после землетрясения спокойное парение кратера все чаще и чаще стало сменяться взрывами газов, насыщенным рыхлым материалом. День ото дня сила взрывов возрастала, что можно было проследить по все увеличивавшейся высоте выбросов; это был период, непосредственно предшествовавший извержению.

Началом извержения можно считать появление 3 апреля 1937 г. уже не исчезающего огненно-красного зарева над кратером, свидетельствовавшего о подъеме магмы по каналу вулкана. Сначала прерывистое и слабое освещение стало затем появляться все чаще и чаще и превратилось, наконец, в непрерывное и сильное зарево, на фоне которого выделялись огненные точки, — это вылетали блоки расплавленной лавы. До с. Ключи, расположенного в 32 км от кратера, стали доноситься раскаты грохота, усиливавшиеся с каждым днем. Первое извержение произошло 12 апреля: всю ночь массы огненного материала при оглушительном грохоте выбрасывались из кратера и скатывались потоком по склонам вулкана, а песок тучами вылетал из кратера и дождем падал в окрестности вулкана. Такие эксплозии предшествовали излиянию лавы. Первый лавовый поток был замечен 18 мая, и с этого времени лава все чаще стала изливаться из Вершинного кратера. Потоки лавы обычно были короткие, порядка сотен метров, и только единичные достигали значительной длины — до 3 км. А. А. Меняйлов выделяет этот период, называя его периодом преобладания эффузий над эксплозиями. Сила отдельных извержений со временем все возрастала: увеличивалось количество

излитой лавы, высота и скорость подъема газового столба, скорость полета бомб. Усиление активности продолжалось до определенного периода, который условно выделяется как кульминационный (сентябрь — октябрь). К этому периоду приурочен прорыв на западном склоне, на трещине северо-западного направления, ряда паразитных кратеров (Камули, Радиста и Перевального), изливших потоки лавы.

С момента прорыва паразитных кратеров характер деятельности вулкана изменился; лава стала реже изливаться из кратера, и, наоборот, все чаще и сильнее стали выбросы рыхлого материала. Этот период А. А. Меняйловым назван периодом преобладания эксплозий (ноябрь 1937 г. — февраль 1938 г.). Период сильных эксплозивных извержений Вершинного кратера закончился прорывом на восточном склоне ряда побочных кратеров — Билукай, Тирануса, Третьего, группы маар и Козея (фиг. 3). Вслед за прорывом побочных кратеров извержение Вершинного кратера ослабело, и вулкан вступил, по А. А. Меняйлову, в период заключительных редких эксплозий и побочных эффузий. Наконец, извержение Вершинного кратера прекратилось и сменилось слабым выделением пара или клубов газов, подобно тому как это наблюдалось в период, предшествовавший извержению. Побочный же кратер Билукай еще в продолжение целого года был очень активным и изливал лаву.

Таким образом, извержение Ключевского вулкана, длившееся два года и происходившее сначала (с 3 апреля 1937 г. по 8 февраля 1938 г.) через выход на вершине вулкана и паразитные кратеры, а затем (с 8 февраля 1938 г. по февраль 1939 г.) через побочный кратер Билукай, носит сложный характер. Мы здесь имеем и боковой, и эксцентрический характер извержения. При боковых извержениях лава, поднимающаяся по главному каналу, находит себе путь через кратерные отверстия на более низком уровне по сравнению с Вершинным кратером (паразиты); при эксцентрическом извержении лава пользуется вспомогательными каналами, которые либо ответвляются от главного канала на значительной глубине, либо образуют независимые выходы из магматического резервуара (побочные кратеры). Извержение Ключевского вулкана, начавшееся через Вершинный кратер — выход на дневную поверхность центрального канала, по мере развития извержения сначала вступило в период бокового извержения, когда энергия частично стала разряжаться через бокки, и под конец — в период эксцентрического извержения. Намечаются, следовательно, три периода в извержении Ключевского вулкана:

1) период извержения через Вершинный кратер (по А. А. Меняйлову — период преобладания эффузий);

2) период бокового извержения — эксплозии из Вершинного кратера и эффузии из паразитических кратеров Камули, Перевального и Радиста (по А. А. Меняйлову — период преобладания эксплозий);

3) период эксцентрического извержения — редкие заключительные эксплозии, а потом парение Вершинного кратера и преимущественно эффузивные извержения через побочные кратеры Билукай, Тиранус и Третий.

Надо отметить, что с развитием извержения кратеры возникали на все более и более низких уровнях, начиная с 4800 м и кончая 900 м. Деятельность этих кратеров была непродолжительной, и только кратер Билукай, находящийся на самом низком уровне (900 м), был активен в продолжение года, в то время как извержение через Вершинный кратер почти прекратилось.

Как мы видим, в процессе извержения Ключевского вулкана наблю-

далось постепенное усиление активности до определенного периода, который условно выделяется как кульминационный, после чего сила извержения стала постепенно уменьшаться; при этом до кульминационного периода преобладали эффузии, после него — эксплозии. Извержение развивалось таким образом, что энергия разряжалась отдельными пароксизмами, которых А. А. Меняйлов насчитывает 45. В промежутках между ними Вершинный кратер слабо парил и наблюдались даже моменты полного спокойствия. Промежутки между отдельными пароксизмами были сходны с периодами затишья между большими извержениями. Образование первых кратеров (Камули, Радист и Перевальный) произошло в кульминационный период, образование же второй группы кратеров (Биллокай, Тиранус, Третий, группа маар и Козей) — в заключительный период деятельности Вершинного кратера.

Лава как Главного кратера, так и побочных застывала в потоках типа «аа». Рыхлые продукты извержения были представлены шлаком, бомбами типа хлебной корки, шлаковыми лапилли, песком и пеплом. Твердые и рыхлые продукты извержения Вершинного кратера по химическому и минералогическому составу весьма близки между собой и относятся к андезито-базальтам. Большая относительная высота вулкана и трудные условия восхождения ограничивали возможность сборов продуктов извержения, особенно лавы и газов. Лучше обстояло дело со сбором рыхлых продуктов, выпадавших на большой площади, благодаря чему они могли быть изучены полнее.

Лава, излившаяся из Главного кратера и из трещин на западном склоне вулкана, обладает андезитовой и витрофировой структурой. Основная масса состоит из буро-коричневого стекла с микролитами плагиоклаза. В основной массе плавают фенокристаллы оливина, плагиоклаза лабрадора ($JPM = +33^\circ$, что соответствует № 60), моноклинного пироксена ($cNg = 30^\circ$, $2V + 64^\circ$) и ромбического пироксена ($cNg = 8^\circ$, $2V = -72^\circ$). Все минералы свежие, вторичные минералообразования отсутствуют. Рудный минерал в виде мелких зернышек рассеян в основной массе и включен в фенокристаллах плагиоклаза, пироксена и оливина. Особенностью структуры лавы является некоторый гломеропорфировый облик породы. Вкрапленники плагиоклаза, пироксена и оливина располагаются кучками, и это состояние кристаллической части, вероятно, говорит о том, что эти минералы существовали в интрателлурическую фазу и имели возможность передвигаться в не столь вязкой среде. По химическому составу лавы как из Главного кратера, так и из западной трещины очень близки друг к другу. По классификации Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, порода ближе всего подходит к базальтам, но более кислым, чем нормальные, и с несколько пониженным отношением $R_2O : RO$. При пересчете по методу А. Н. Заварицкого и нанесении числовых характеристик на диаграмму типов изверженных пород, получивших особое название, фигуративная точка ложится близко к точке кварцевого базальта. Из сравнения нормативного и модального составов усматриваем существенное различие: нормативно в породе присутствует кварц, хотя порода содержит модальный оливин.

Эксплозивные продукты выбрасывались из кратера в виде блоков шлаковой лавы, полосовидных бомб и бомб типа хлебной корки. По минералогическому и химическому составу они мало чем отличаются от лавы одновременного излияния.

Вулканические пески Главного кратера извержения 1937 г. состоят почти целиком из обломков минералов и лавы Ключевского вулкана. Чаще они ювенильные — магматические, представляющие распыленную

магму, но встречаются и резургентные — лавовые пески, возникшие от раздробления застывшей в жерле лавовой пробки или стенок кратера.

Можно наметить три группы песков. Первая — лавовые пески, возникшие от раздробления стенок кратера и старой лавовой пробки; ей соответствуют пески эксплозивных извержений в августе 1936 г., происходивших до начала извержения, и эксплозий в самом начале извержения. Вторая группа обнимает преимущественно магматические пески, являющиеся результатом распыления жидкой магмы, поднимающейся по каналу вулкана; ей соответствуют пески периода эксплозий и эффузий (от июля 1937 г. до января 1938 г.). Наконец, третью группу образуют снова лавовые пески, но возникшие от раздробления новых лавовых пробок, состоящих из материала данного извержения, успевшего застыть в периоды затишья между отдельными пароксизмами; ей соответствуют пески периода заключительных эксплозий, характеризующих затихающую деятельность Главного кратера (от января до апреля 1938 г.).

Вулканические пески отдельных выбросов имеют однообразный петрографический состав. Отличительными признаками их являются форма частиц и количественные отношения между отдельными компонентами. Почти во всех песках присутствуют три типа обломков: 1) однородного стекла, 2) стекла с вкрапленниками и микролитами и 3) минералов. Стекло встречается или бурое непрозрачное, или зеленое, различных оттенков, прозрачное. Показатель преломления стекла колеблется в пределах от 1.577 до 1.555, что соответствует, по кривой Джорджа, колебаниям SiO_2 от 50 до 54%. Показатели преломления обломков стекла меняются даже в одном образце песка в зависимости от окраски его и величины частиц. Такие колебания могут быть вызваны тем, что выбрасываемые из кратера частицы стекла имели различный размер и, возможно, разную температуру и при соприкосновении с воздухом в различной степени окислялись. Из кристаллических компонентов присутствуют следующие: плагиоклаз-лабрадор ($N_g = 1.571$, $N_p = 1.565$, угасание $\perp \text{PM} = +33^\circ$), моноклинный пироксен ($N_g = 1.714$, $N_p = 1.698$), ромбический пироксен ($N_g = 1.700$, $N_p = 1.688$), оливин ($N_g = 1.724$), апатит и рудный минерал. Кроме того, в некоторых песках встречался в значительном количестве изотропный минерал с низким показателем преломления ($N = 1.487$).

По химическому составу вулканические пески приближаются к лавам данного извержения и по петрографическому составу относятся к гиперстеновым андезито-базальтам. Пески различных выбросов отличаются друг от друга содержанием в них кремнекислоты. Намечаются две группы песков: пески с содержанием кремнекислоты 54.5—54.6% характеризуют начальный период извержения (от начала до октября 1937 г.), пески с содержанием кремнекислоты 53.3—53.9% характеризуют последующий период извержения (от октября 1937 г. до января 1938 г.). Таким образом, если считать, что химический состав песков отражает состав магмы, тогда в процессе извержения мы имели изменение магмы от более кислой к более основной. Такие изменения химического состава продуктов выбросов в пределах одного цикла извержения говорят о наличии процесса дифференциации в вулканическом очаге Ключевского вулкана. Во время периода относительного покоя вулкана, когда из кратера выделялись только газообразные продукты и происходили взрывы малой силы, активной частью являлась верхняя часть застывающей лавовой колонны. Под лавовой пробкой магма была в относительно спокойном состоянии, и там могла происходить некоторая диф-

ференциация с образованием более кислой верхней части. Первые порции взрывных продуктов, представлявших распыленную магму верхней части вулканического канала, были более кислыми. По мере подъема новых порций лавы из более глубоких частей, взрывные продукты становились более основными. Это был период преобладания эффузий, подъема все новых и новых порций магмы из более глубоких частей. Образование 9 кратеров на 15-километровом горизонтальном протяжении и на различных гипсометрических уровнях, извергавших продукты с закономерно изменяющимся химическим составом, дали дополнительный материал для суждения о дифференциации в магматическом очаге вулкана. В дальнейшем мы подробнее коснемся этого вопроса. К механизму извержения Ключевского вулкана и образования побочных кратеров мы вернемся в конце работы, а сейчас приступим к описанию хода извержения и продуктов деятельности побочных кратеров, прорвавшихся в 1938 г., в заключительный период деятельности Ключевского вулкана.

II. ПОБОЧНЫЕ КРАТЕРЫ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ в 1938 г.

Новые побочные кратеры прорвались в восточном секторе Ключевского вулкана, у подножья его, на расстоянии 8 км от вершины и в 30 км на юго-восток от с. Ключи. Прорыв нижнего кратера, названного нами Билюкаем в честь камчадальского бога-громовержца, произошел 7 февраля 1938 г. в 2 часа, а прорыв верхних кратеров — накануне, 6 февраля в 23 ч. 30 м. До прорыва кратеров землетрясений, как при образовании Туйлы, Биокося и Киргурича в 1932 г., не было, и только 7 февраля в 2 часа в с. Камаках (но не в Ключах) жителями ощущалось слабое землетрясение. О прорыве кратеров мы узнали по большой туче, разрастающейся у подножья. На трещине почти широтного простирания (ONO 80°) образовалось три кратера, изливших одновременно лавовые потоки, взрывной кратер, названный нами Козеем, и ряд воронок взрыва, или маар. Ниже всех, на высоте 900 м, образовался кратер Билюкай. На высоте 1000 м прорвался кратер Тиранус, на 1160 м кратер Третий или Невидимка, на 1770 м образовалась двойная воронка взрыва, на 1790 м — цепочка из 5 воронок взрыва и на 1800 м возник двойной взрывной кратер Козей.

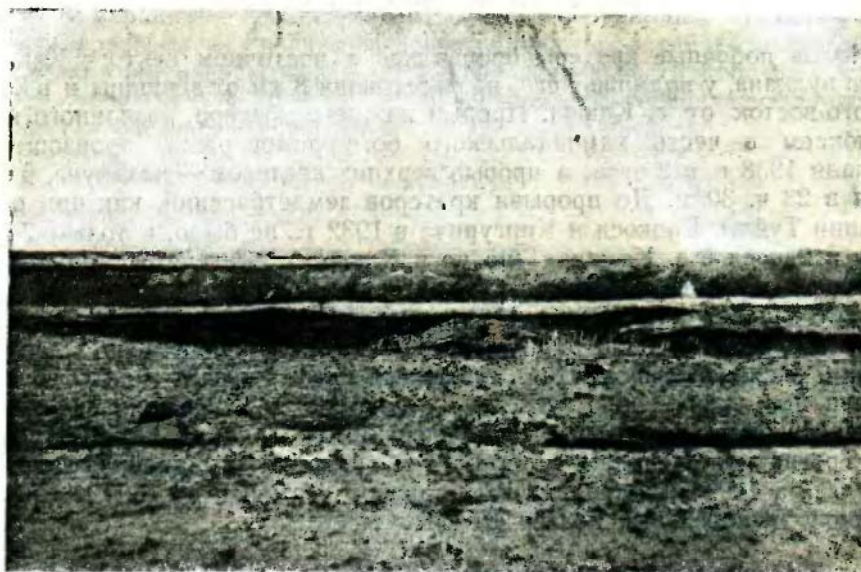
1. РАЙОН ПРОРЫВА КРАТЕРОВ

Местность, где прорывались кратеры, представляет пологий ровный склон, с уклоном в районе верхнего кратера Билюкай в 4—5° и в районе верхнего кратера Козей в 10—12°. Кратеры прорвались вдоль русла и в самом русле р. Каменистой, пересыхающей летом, но многоводной весной, во время таяния снега. Лавовые потоки кратеров Третьего и Тирануса залили русло, поток Билюкай некоторое время шел по дну реки, но потом покинул ее и лишь пересекал ее русло несколько раз ниже по склону. Все кратеры находятся выше зоны древесной растительности, Билюкай — немного выше границы кустарниковой зоны и альпийских лугов. Район сложен вулканическими пирокластическими образованиями, хорошо вскрытыми в разрезах воронок взрыва и в бортах р. Каменистой. На севере и на юге, приблизительно на высоте Билюкай, находятся старые, потухшие паразитические кратеры и их лавовые потоки. На юге ближе всего находится кратер «S», на северо-востоке — Безухий стан. Отдельная Береза и другие.

2. ИЗМЕНЕНИЯ В РЕЛЬЕФЕ, ВЫЗВАННЫЕ ПРОРЫВОМ КРАТЕРОВ

Прорыв новых кратеров несколько изменил рельеф местности, внося добавочные — как положительные, так и отрицательные — элементы. К положительным элементам относятся конусы и лавовые потоки, к от-

рицательным — воронки взрыва, оседание местности по сбросовым трещинам и провалы. Так, на совершенно ровной местности вырос конус Билукай высотой в 200 м и образовалось лавовое поле в 16 км длиной, около 2 км шириной и 12—15 м высотой. Отдельные нагромождения на лавовом поле достигают 30 м высоты. Лавовый поток Тирануса залил русло р. Каменистой и почти сравнял ее с окружающей местностью. Среди отрицательных элементов воронки взрыва имеют кратеры диаметром до 150 м и глубиной до 10—30 м. Между кратерами Билукаем и Тиранусом, на правом берегу р. Каменистой, на ровной площади образовалась серия параллельных трещин широтного направления, по которым последовало оседание местности (фиг. 2). Оседание земли произо-



Фиг. 2. Сбросовые трещины в районе Билукай. Фото С. И. Набэко.

шло без структурных изменений, ступенчато, причем в центральной части это оседание максимальное, а в обе стороны от центра вверх идут ступени. Амплитуда отдельных сбросов до 1 м, общее оседание центральной части — 2,5 м. В районе кратера Третьего вся местность разбита трещинами; часть из них, меридионального направления, открытые, зияющие; широтные же трещины закрытые.

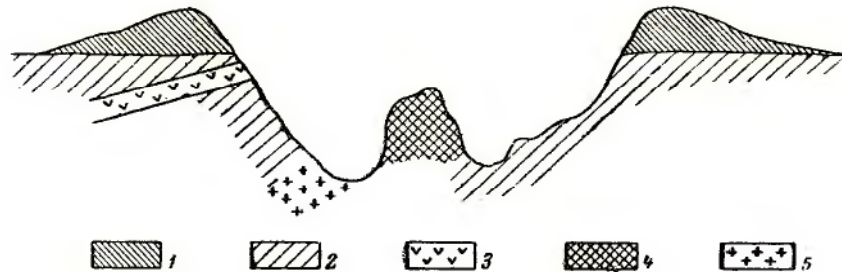
В связи с тем, что кратеры прорвались в русло р. Каменистой и запрудили ее, река пошла по новому пути, успев промыть русло за лето на глубину до 1 м. Новое русло образовалось южнее лавового потока Билукай и в расстоянии 8 км от кратера уходит под лавовый поток. В старом русле р. Каменистой, около конуса Третьего, образовалась запруда с озерком.

Из всех описанных изменений в рельефе на долгое время сохранится конус Билукай со своим лавовым потоком. Лавовые поля Тирануса и Третьего, воронки взрыва, провалы в земле и трещины, вероятно, скоро сравняются, будучи засыпанными рыхлым материалом как от весеннего таяния снега, так и при новых извержениях вулкана.

3. ОПИСАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КРАТЕРОВ, ПРОРВАВШИХСЯ ОДНОВРЕМЕННО С БИЛЮКАЕМ

1) Кратер Козей

6 февраля в 23 ч. 30 м. на восточном склоне Ключевского вулкана, на высоте 1800 м, прорвался кратер, названный Козеем. Он представляет собой воронку взрыва, окруженную замкнутым кольцевым валом, высота которого от подножья не превышает 3—5 м. Вал сложен рыхлым материалом, преимущественно остроугольными обломками плотной лавы, не принадлежащей, вероятно, к продуктам этого извержения. В окружности кратера и на кольцевом валу обнаружены шлаковые бомбы извержения Козея. Кратер вытянут с востока на запад, примерно, на 150 м при ширине около 75—80 м. Глубина кратера 30 м. Со дна кратера поднимается отвесная скала с крутыми, почти вертикальными стенками, высотой в 20—25 м, сложенная плотной лавой, аналогичной обломкам лавы кольцевого вала. Восточная стенка скалы покрыта обильным



Фиг. 3. Кратер Козей:

1 — кольцевой вал из рыхлых продуктов; 2 — взрывной материал предыдущих извержений Ключевского вулкана; 3 — старая лава; 4 — скала скорлуповатого сложения; 5 — лава Козея.

налетом цветных возгонов. На дне кратера, у подножья скалы, обнажается черная шлаковая лава Козея, и здесь же находится несколько шлаковых бомб (фиг. 3).

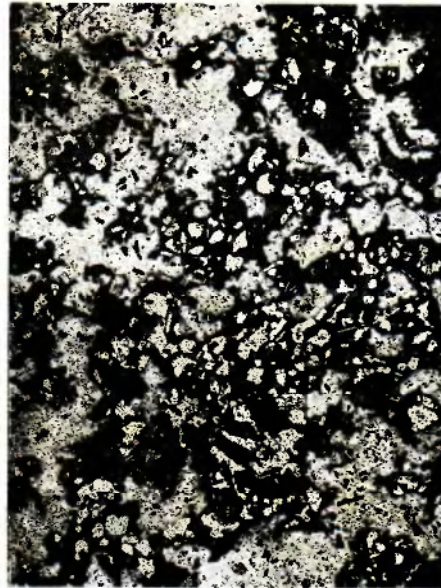
Спустя 10 дней после образования Козея активность его проявлялась в непрерывном выделении пара, сменяющемся взрывами. При взрывах был слышен грохот и вырывался столб черного дыма. Спустя еще месяц, в марте, характер деятельности в общем был тот же: на фоне не очень сильного парения через неправильные интервалы времени происходили небольшие взрывы с выбросами рыхлых продуктов. Вокруг Козея белая пелена только что выпавшего снега становилась черной от вулканического песка. Спустя пять месяцев деятельность кратера ослабела, взрывы почти не происходили, и он выделял только пары. При спуске в кратер было установлено, что газ выделялся из-под скалы, находящейся в центре кратера на его дне. Козей вступил в фумарольную стадию действия.

Лава Козея, обнаруженная в коренном залегании только на дне кратера, имеет черный землистый вид и очень пористую шлаковую текстуру. Под микроскопом наблюдается черная непрозрачная основная масса, состоящая почти из одного стекла с небольшим количеством микролитов, в которой плавают фенокристаллы плагиоклаза, моноклинного и ромбического пироксенов и, реже, оливина. Количество пор в породе

превышает 50%, форма их неправильная, у самых мелких пор она приближается к округлой (фиг. 4).

Количественный минералогический состав лавы следующий: фено-кристаллов плагиоклаза 6.5%, пироксенов 4.7%, оливина 0.8%, основной массы 36% и пор 52%.

Плагиоклаз встречается в форме таблиц, имеющих двойниковую структуру. Наблюдаются зональные кристаллы. Особенностью строения плагиоклаза является переполнение его включениями черного стекла.



Фиг. 4. Структура базальта Козея, увел. в 16 раз.

иногда в таком количестве, что включения составляют около половины всей массы плагиоклаза. Наблюдается некоторая вытянутость включений стекла вдоль длинной оси кристаллов и скопление их полосками.

Замеры на федоровском столике в разрезах \perp РМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты замеров плагиоклаза в лаве Козея

	Угол погасания в сечениях \perp РМ,	№ плагиоклаза
Ядро зонального вкрапленника	41	81
Периферия зонального вкрапленника	38	70
Незональный вкрапленник	35	64
Микролит	36	66
»	37	68

Таким образом, плагиоклаз вкрапленников имеет состав лабрадора-битовнита (№ 64—84) с более основным ядром состава битовнита (№ 84) и периферией (№ 64). Микролиты более кислые, чем ядро, и относятся к лабрадору (№ 66—68).

Пироксен моноклинный и ромбический в приблизительно одинаковых количествах, в виде округлых зерен и обломков, скапливается кучками. Моноклинный пироксен светлозеленого цвета, прозрачный, включает зернышки рудного минерала и плагиоклаза, загрязненного, в свою очередь стеклом. По оптическим константам ($2V = +60^\circ$; $cNg = 44^\circ$; $Ng = 1.714$; $Np = 1.690$) пироксен относится к диоксид-геденбергиту. Состав его, по диаграмме Винчелля, следующий: 10% FeO, 12% MgO, 28% CaO, что соответствует 33% геденбергитовой молекулы. Ромбический пироксен обладает плеохроизмом: по Np — слабозеленый, по Ng — слабозеленый; $2V = -76^\circ$; $cNg = 2^\circ$. Состав, согласно диаграмме Винчелля, 18% FeO, 27% MgO.

Оливин в породе мало, размер зерен не превышает 0.2 мм, форма округлая. Он встречается в кучках совместно с моноклинным пироксеном.

Особенностью лавы Козея является наличие в ней, наряду с моноклинным пироксеном, ромбического пироксена и незначительного количества оливина. Второй особенностью является переполнение вкрапленников плагиоклаза включениями стекла.

В табл. 2 приводится химический анализ лавы Козея.

Таблица 2

Химический состав лавы кратера Козея (аналитик К. П. Сокова)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
Вес. %	53.93	1.14	16.91	3.45	5.51	0.20	5.74
Мол. колич.	898	014	166	021	077	003	142
	CaO	BaO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	S	Сумма
Вес. %	8.57	0.04	0.27	3.23	1.07	0.07	100.13
Мол. колич.	153	000	002	052	012	002	—

Фигуративная точка на диаграмме А. Н. Заварицкого расположена близко к точке валамита, но отличается повышенным «m'» и «с» и пониженным «f'» и «Q». По классификации Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, порода ближе всего стоит к базальтам, при несколько повышенном коэффициенте кислотности и пониженном отношении R₂O : RO.

Эксплозивные продукты — шлак и вулканический песок — по структуре и минералогическому составу аналогичны лаве.

Через полгода после своего образования Козей продолжал довольно интенсивно выделять газ густого белого цвета, сильно пахнущий серо-

Таблица 3

Пересчеты анализа лавы Козья

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по Л. Н. Заварицкому	Магматическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Леви со Л.-Лессингу
$\left. \begin{array}{l} Q = 4.8 \\ or = 6.7 \\ ab = 27.3 \\ an = 28.4 \\ di = 9.8 \\ hy = 15.3 \\ mt = 4.9 \\ il = 2.1 \\ ap = 0.7 \\ pr = 0.1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 67.2 \\ \\ \\ \\ \\ 32.9 \end{array}$ $\frac{SAL = 67.2}{FE = 32.9} = 2.05$ $\frac{Q}{f} = \frac{4.8}{62.4} = 0.08$ $\frac{K_2O + Na_2O}{C O} = \frac{64}{102} = 0.6$ $\frac{K_2O}{Na_2O} = \frac{12}{52} = 0.23$ <p>Символ П. 4. 4. 4.</p>	$\begin{array}{l} a = 8.8 \\ c = 7.0 \\ b = 21.6 \\ s = 62.6 \\ f' = 39 \\ m' = 45 \\ c' = 16 \\ n' = 81 \\ r' = 1.5 \\ \varphi = 13 \\ Q = 0.6 \\ a/c = 1.2 \end{array}$	$2.3 RO \cdot R_2O_3 \cdot 4.8 SiO_2$ $R_2O : RO = 1 : 5.8$ $\alpha = 1.81$

водородом. При взятии пробы газа в ампуле конденсировался пар, причем за 12 минут прохождения газа через трубку выделилось 12 см³ воды. На стенках ампулы и в воде осаждалась самородная сера в виде довольно обильного налета. Газ имел следующий состав: SO₃, CO₂, Cl = 1.76%, H₂ = 0.3%, CH₄ = 0.26%, O₂ = 22.9%, N₂ = 74.78% (анализ производился в Газовой лаборатории ИГи АН СССР).

Газ, поднимающийся со дна кратера, окутывал скалу, на стенках которой, особенно с восточной стороны, отлагалось очень много сублиматов. Можно наметить четыре типа разных сублиматов.

1. Щеточки чистой желтой кристаллической серы. Кристаллы, судя по блеску граней, призматического строения, до 3—4 см длиной, с параллельными штрихами на гранях.

II. Цветные натечные каплевидные отложения сублиматов, напоминающие миниатюрные сталактиты, образующиеся под выступами на скале. Длина их достигает 5 см. Обычно они полые и очень хрупкие. Цвета крайне разнообразные: коричневые, бурые, красные, желтые и белые. В этом сублимате определено три минерала:

1. Прозрачный, буроватый, двупреломляющий, Ng = 1.480 и Nr = 1.470, двусный положительный. Минерал ближе всего подходит к буссенготиту (NH₄)₂O · MgO · 2SO₃ · 6H₂O. Реакция на NH₃ и SO₃ положительная. Растворяется в воде.

2. Бесцветный, прозрачный, волокнистый, двупреломляющий, Ng = 1.483 и Nr = 1.474. Растворяется в воде.

3. Опал.

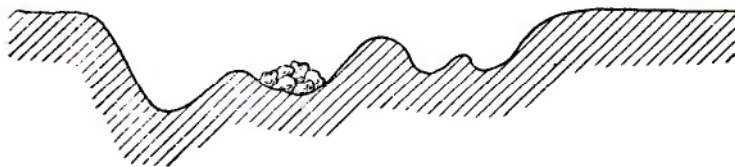
III. Смесь белых минералов, волокнистых, жирных наощупь, хорошо растворяющихся в воде, кислых, вязущих на вкус. По оптическим и химическим свойствам ближе всего подходят к энсомиту, пиккерингиту

и галотрихиту (подробное описание их дано ниже). Других минералов в этих сублиматах не обнаружено.

IV. Тонкоземлистый налет интенсивно синего цвета. Реакция на медь и SO_3 положительная. Минерал не сохранился и оптически не изучен. По химическому составу относится к сульфату меди и по цвету может быть отнесен к кренкиту ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) или же к бутиту ($\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Качественный состав сублиматов: Cl, F, S, H, O, C, N, Cu, CO, Ni, Pb, Mo, V, Cr, Zr, Sa, Na, K, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si.

Температура газовой струи 240—250°.

Образование Козея началось, вероятно, со взрыва, давшего воронку с кольцевым валом. После этого произошел подъем магмы, которая выдавила скалу. Лава на поверхность не излилась, она наблюдается только на дне воронки у подножья скалы. Тип кратера эксплозивный.



Фиг. 5. Разрез воронки взрыва с 4 кратерами.

Рыхлого материала больше, чем эффузивного, но подсчитать его массу трудно, так как он был рассеян на большой площади, а потом сдут ветром.

Несколько ниже по склону Ключевского вулкана, на восток от Козея, обнаружены две воронки взрыва, вытянувшиеся в виде цепочки. В первой имеется четыре кратера (фиг. 5), во второй — два. На дне воронок обнаружено всего несколько кусков шлаковой лавы.

2) Кратер Третий (Невидимка)

На высоте 1260 м в русле р. Каменистой, на той же трещине широтного простиранья, восточнее Козея, одновременно с ним, образовался кратер, названный Третьим (Невидимка). Насыпного конуса здесь нет, есть только лавовое нагромождение в начале потока, возвышающееся над дном оврага на 15 м. На лавовом нагромождении находится чашеобразное углубление диаметром в 20 м и глубиной в 5 м, которое могло быть воронкой взрыва или же кратером с жерлом на дне. Воронка окружена кольцом фумарол, температура которых в августе, шесть месяцев спустя после прорыва кратера, была 250°. На восток от кратера в русло Каменистой влился и разлился по нему лавовый поток, достигающий длины 250 м, ширины 50 м и высоты в среднем 5 м (фиг. 6). Поток в августе был совершенно оформлен; он застыл настолько, что движение его прекратилось. Выходов газа — фумарол — на лавовом потоке не наблюдалось. У истока лавовый поток был более широким, к концу он суживался; на нем намечались разбитые продольными трещинами боковые валы, несколько возвышающиеся над центральной частью потока. В истоке, у подножья лавового нагромождения, трещины различных направлений приближаются к концентрическим. Вокруг кратера на площади радиусом в 100 м разбросаны шлаковые бомбы, количество которых и величина, в отдельных случаях достигающая 0.5—0.8 м,

ближе к кратеру повышаются. Более мелкие бомбы имеют листоватую, пластинчатую и трубчатую форму; были встречены и очень изящные ребристые бомбы, но все они чрезвычайно хрупки. В свежем изломе многие шлаковые бомбы в порах имеют яркосинюю побежалость. Поверхность вокруг кратера Третьего изрезана трещинами всевозможных направлений.

Кратер был обнаружен в феврале 1936 г., спустя 10 дней после прорыва остальных кратеров, по тонкой высокой струе пара, почти непрерывно поднимавшейся из русла р. Каменистой. Тогда, ввиду тяжелых зимних условий, к нему нельзя было подойти, а можно было только догадываться о его существовании (поэтому он был назван Невидим-



Фиг. 6. Лавовый поток кратера Третьего.
Фото С. И. Набоко.

кой). Спустя месяц парение в месте предполагаемого кратера было совсем слабое, но зато мы с вершины Тирануса увидели в русле реки конец лавового потока. Летом этот кратер был несколько раз посещен нами; в это время действовали, и то слабо, только фумаролы на лавовом нагромождении.

Лава застыла с образованием потока типа «аа». Особенностью лавы кратера Третьего является ее полосатость, вызванная сменой плотных полос более пористыми. Форма пор при этом не округлая, как в лавах других кратеров, а вытянутая. Цвет лавы темносерый, почти черный, в свежем изломе поверхность матовая. Невооруженным глазом видны вкрапления светлосерого плагиоклаза и светлозеленого пироксена.

Под микроскопом структура лавы андезитовая. Основная масса состоит из темного непрозрачного стекла, микролитов плагиоклаза и небольшого количества зернышек пироксена. Отношение микролитов к стеклу приближается к 1 : 1. В основной массе плавают фенокристаллы плагиоклаза, моноклинного пироксена, оливина и изредка ромбического

пироксена. Особенностью структуры является кучное расположение вкрапленников пироксена; в кучках насчитывается до десяти зерен.

Плагиоклаз присутствует в идиоморфных зернах в виде таблиц, ромбов и крестообразных двойников. В большинстве случаев он чистый, и даже некоторые зерна, имеющие включения стекла, остаются совершенно чистыми в периферической зоне. Структура плагиоклазов двойниковая, строение зональное; зоны резко отграничены друг от друга, причем зональность прогрессивная. Встречаются в плагиоклазе включения зерен оливины. Замерами на федоровском столике определен плагиоклаз вкрапленников с 80% анортита и микролиты с 75% анортита (табл. 4).

Таблица 4

Результаты замеров плагиоклаза в лаве кратера Третьего

	Ng	Nm	Np	2V	№	Закон
Большой вкрапленник	43°	63°	59°	—86°	81	Периклиновый [010]
Средний вкрапленник	58	85	31	—86	80	Карлсбадский [001]
Микролит средней величины	56	80	34	—86	75	» [001]

Пироксен также обладает формой идиоморфных кристаллов с двойниковой структурой и зональным строением. Кроме того, встречаются круглые зерна, собранные в кучки. Часто кристаллы пироксена по периферии имеют каемку с включениями капелек стекла. По оптическим свойствам ($2V = +64^\circ$; $cNg = 39^\circ$) пироксен относится к диопсид-геденбергиту.

Ромбический пироксен встречается не во всех шлифах и по количеству уступает моноклинному пироксену и оливину. Размер таблиц 1×0.5 мм. Таблицы ромбического пироксена разъедены моноклинным, что хорошо видно при скрещенных николях по различным цветам интерференции и по погасанию. Оптические свойства следующие: $2V = -75^\circ$; 78° ; $cNg = 0^\circ$; плеохроизм по Np светлорозовый, по Ng светлозеленый.

Оливины в шлифе довольно много. Он представлен более мелкими выделениями, чем плагиоклаз и моноклинный пироксен. Форма — округлые и овальные зерна. Окружен тоненькой каемкой моноклинного пироксена и рудного минерала.

Однажды было встречено зерно, в центральной части которого находится таблица ромбического пироксена, окруженная каемкой оливины, а внешняя, более тоненькая каемка представляет моноклинный пироксен. Плагиоклаз выделялся позже оливины, зерна которого он включает.

В табл. 5 приводится химический анализ лавы (обр. № 868).

При нанесении числовой характеристики по А. Н. Заварицкому на диаграмму типов изверженных горных пород, получивших особое название, имеем фигуративную точку, близко стоящую по составу к габбро-диориту (в нашем базальте несколько повышено φ). Из пересчетов по американскому методу мы видим, что нормативно в породе присутствует кварц, в действительности же мы имеем породу с оливином.

Таблица 5

Химический состав лавы кратера Третьего
(аналитик К. П. Сокова)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₂	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Вес. %	53.48	0.93	16.53	4.12	5.64	0.16	6.56	8.80	2.56	1.46	100.24
Мол. колич.	891	011	162	026	078	002	163	157	41	16	—

Таблица 6

Пересчеты анализа лавы кратера Третьего

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому	Магматическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу
$\left. \begin{array}{l} Q = 4.9 \\ Or = 8.9 \\ ab = 21.5 \\ an = 29.2 \end{array} \right\} 64.5$ $\left. \begin{array}{l} di = 11.7 \\ hy = 16.4 \\ mt = 6.0 \\ il = 1.7 \end{array} \right\} 35.8$ $\frac{SAL}{FEM} = \frac{64.5}{35.8} = 1.8$ $\frac{Q}{F} = \frac{4.9}{59.6} = 0.08$ $\frac{K_2O + N_2O}{CaO} = \frac{57}{105} = 0.5$ $\frac{K_2O}{Na_2O} = \frac{16}{41} = 0.4$	$\begin{array}{l} a = 7.8 \\ c = 7.2 \\ b = 23.6 \\ s = 61.4 \\ f' = 38 \\ m' = 47 \\ c' = 15 \\ n = 72 \\ t = 1.2 \\ e = 15 \\ Q = 0 \\ a/c = 1.1 \end{array}$	$2.4 RO \cdot R_2O \cdot 4.7 S \cdot O_2$ $R_2O \cdot RO = 1:7$ $\alpha = 1.74$

Бомбы кратера Третьего резко отличаются от бомб других кратеров своей ленточной и ребристой формой. По структуре, минералогическому и химическому составу лава бомб мало отличается от лавы потока (SiO₂ 53.54% в бомбе, 53.48% в лаве). Бомбы кратера Третьего, в отличие от бомб других кратеров, выбрасывались в жидком, пластическом состоянии и при полете в воздухе приобретали ребристую поверхность и разнообразную форму. Лава была менее вязкая, чем у других кратеров, что следует из полосатости ее, вытянутости пузырьков в ней и формы бомб. Меньшая вязкость лавы объясняется большей насыщенностью летучими компонентами (в лаве и бомбах Третьего H₂O₊₁₁₀ определено = 0.6%, в лавах других кратеров — до 0.2%).

Образование кратера Третьего рисуется в следующем виде. Сперва произошел взрыв, повидимому, сильный, судя по тому, что блоки больших размеров (до 0.5 м в диаметре) были отброшены на расстояние 100 м. Затем последовало излияние лавы. Количество лавы, излитой на дневную поверхность, равняется приблизительно 60 000 м³, количество взрывных продуктов — 3000 м³. Эффузивный индекс $\frac{6000 \cdot 100}{63000} = 98$.

3) Кратер Тиранус

Тиранус находится на дне р. Каменистой, русло которой заполнено его лавовым потоком. Насыпного конуса Тиранус не имеет, но в западной части лавового поля имеется лавовое нагромождение, поднимающееся над потоком всего на 10 м и достигающее высоты бортов реки. Над лавовым нагромождением, в свою очередь, возвышается пять скалистых утесов, из них четыре расположены полукругом, а пятый находится в середине. Стенки утеса вертикальные, местами видны сглаженные поверхности, напоминающие плоскости скольжения, а на стенках некоторых утесов заметна полосатость, причем верхний и нижний пласты пористые, а центральный плотный. Пласты изогнуты в виде



Фиг. 7. Лавовый поток Тирануса. Фото С. И. Набоко.

свода. Из трещин в основании скал выделяется газ и покрывает стены налетами возгонов. Лавовое поле между утесами разбито вертикальными зияющими трещинами, ширина которых в отдельных случаях превышает 1 м при очень значительной глубине. Из трещин подымается обжигающий воздух.

На запад и восток от кратерного нагромождения по дну оврага протягивается лавовый поток; вверх по оврагу поток прошел всего метров 20, но вниз протянулся на 1000 м и дошел до нижнего конуса Билюкая, где он засыпан бомбами, лапелли и песком последнего. Ширина лавового потока Тирануса в среднем 100 м, высота 5—6 м. По бокам поток сопровождается лавовыми валами, возвышающимися несколько над общим полем. Валу разбиты трещинами, направленными наискось по отношению к движению, и лава здесь в форме пластов завернута к наружной части потока, наподобие пластов земли на свежеспаханном поле. Ближе к центру протягиваются валы из обломков шлака, местами отсутствующие, а центральная часть потока состоит из трех продольных

лавовых валов. Характер лавы глыбовой (фиг. 7). Глыбы крупных размеров, около 2 м в диаметре; мелкие обломки встречаются редко. Выходов газовых струй на лавовом потоке не обнаружено, все фумаролы сосредоточены на лавовом надкратерном нагромождении.

Вокруг Тирануса на площади диаметром в 100 м прослеживается слой рыхлого материала мощностью у кратера до 50 см, состоящий из кусков шлака, диаметром от 30 см и меньше, и лапилли. С удалением от кратера мощность слоя уменьшается. На самом лавовом потоке бомб, лапилли и песка не обнаружено; вероятно, излияние лавы последовало позже эксплозии.

Тиранус, по сведениям местных жителей, прорвался 6 февраля 1938 г. По словам очевидца П. П. Кочергина, в 23 ч. 30 м. 6 февраля появилось невысокое огненное облако, которое, продержавшись 5 минут, рассеялось. В это время на земле стала заметна узкая огненная полоса, к 24 часам и она потускнела, и осталась только одна огненная точка в виде пылающего костра.

Нам удалось попасть к месту извержения только спустя 10 дней после прорыва кратера, когда лавовый поток уже достаточно застыл и прекратилось движение в его поверхностной части. Из кратера выделялся столб белого пара, вверху сливавшегося с газообразными продуктами Билюкая в огромное кудрявое облако. Иногда слышался гул и происходило эксплозивное выделение газа с примесью небольшого количества рыхлого материала — пыли. По ночам газы, выделяющиеся из кратера, периодически освещались в розовый цвет в связи с обвалами и обнажениями еще красной лавы. Спустя полтора месяца (в конце марта) Тиранус только слабо парил, а через 5 месяцев (июль—август) действовали, и то очень слабо, только фумаролы.

Лава застыла в лавовый поток типа «аа». На поверхности она пористая, в более глубоких частях потока плотная. Цвет лавы черный, блеск стеклянный. Невооруженным глазом обнаруживается серый плагиоклаз и зеленый пироксен. Под микроскопом видна андезитовая и витрофировая структура породы. Для характеристики лавы Тирануса приведем описание одного образца (№ 10).

Структура породы витрофировая. Основная масса светлорубого цвета с тонкими микролитами плагиоклаза и зернышками пироксена. При большом увеличении (объектив № 7) наблюдается вторая генерация микролитов плагиоклаза в виде тончайших перекрещивающихся иголок, образующих решетку. Фенокристаллы представлены плагиоклазом, пироксеном и оливином.

Плагиоклаз в форме идиоморфных кристаллов с ромбовыми разрезами. Структура зональная, причем в центральной части зерна много включений стекла, а внешняя кайма водяно-прозрачная, чистая, резко отделяющаяся от остальной части зерна меньшим показателем преломления. Некоторые зерна плагиоклаза имеют волнистое угасание. Замерами на федоровском столике определен плагиоклаз, содержащий 70% анортитовой молекулы, причем незональные вкрапленники и микролиты имеют почти одинаковый состав (табл. 7).

Пироксен моноклинный. Идиоморфные очертания его редки, чаще он встречается в виде округлых зерен величиной 1.5 мм в кучных скоплениях. Окраска зеленая, очень светлая. По оптическим свойствам он сходен с пироксеном лавы других кратеров ($2V = +62^\circ$, $+64^\circ$, $cNg = 42^\circ$). Особенностью пироксена является наличие в нем большого количества включений бурого стекла; отдельные зерна напоминают решето. В основной массе при большом увеличении обнаруживаются

Таблица 7

Результаты замера плагиоклазов в лаве Тирануса

	Ng	Nm	Np	2V	№	Закон
Вкрапленник широкий, большой	66°	30°	68°	88°	70	$\frac{1}{(010)}$ [001]
» средних размеров . . .	69	33	61	80	66	«
Микролит тонкий	60	72	38	88	70	[001]

призмочки с пирамидальными окончаниями минерала с прямым погасанием, который, вероятно, является ромбическим пироксеном.

Оливина много, количественно он не уступает вкрапленникам плагиоклаза и пироксена. Оливин присутствует обычно в форме округлых зерен и окружен тонкой рудной каемкой ($2V = -88^\circ$).

Кроме описанных минералов в породе имеется много рудного минерала в форме кубиков, рассеянных в основной массе и включенных в фенокристаллах. Порядок выделения минералов такой: сначала оливин (встречены включения оливина в плагиоклазе и пироксене), затем пироксен и плагиоклаз, возможно кристаллизовавшиеся одновременно, так как встречаются их сростания; это стадия интрателлурическая. После излияния лавы на дневную поверхность кристаллизовались снова плагиоклаз и пироксен и, наконец, застывало стекло с последними иглочками плагиоклаза и ромбического пироксена. Оливин являлся реакционным минералом и сохранился благодаря образованию вокруг зерен рудной каемки.

Химический состав лавы Тирануса (обр. 10) представлен в табл. 8.

Таблица 8

Химический состав лавы Тирануса, образец № 10

(аналитик П. Н. Ниссенбаум)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Сумма
Вес. %	53.17	0.88	14.27	5.92	5.92	0.16	6.35	9.40	2.58	1.23	0.04	99.92
Мол. колич.	886	011	140	037	082	002	158	168	042	013	—	—

Среди рыхлых продуктов извержения Тирануса преобладают бесформенные куски шлака, реже встречаются бомбы трубчатой и ленточной формы. Все они шлаковые с пористой структурой. Встречаются бомбы полосатой текстуры; полосы различаются одна от другой пористостью. Ленточная или трубчатая форма бомб и изогнутость их говорят о том, что они были оторваны от жидкой магмы и выброшены в полупластическом состоянии. Размер бомб до 50 см, но наиболее распространенными являются бомбы в 30 см. Для полного представления достаточно будет дать описание одной бомбы.

Пересчеты анализа лавы Тирануса, образец № 10

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому	Магматическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу
$Q = 6.6$ $O = 7.2$ $ab = 22.059.4$ $du = 18.5$ $hy = 11.8$ $mt = 8.6$ $il = 1.7$ $\frac{SAL}{FEM} = \frac{59.4}{40.6} = 1.5$ $\frac{Q}{F} = \frac{6.6}{52.8} = 0.12$ $\frac{K_2O + Na_2O}{CaO} = \frac{55}{85} = 0.65$ $\frac{K_2O}{Na_2O} = 0.31$ Символы: П. 4.4.4	$a = 7.4$ $c = 5.4$ $b = 26.8$ $s = 60.1$ $f' = 40$ $m' = 40$ $c' = 20$ $n = 76$ $t = 1.2$ $e = 18$ $Q = -0.3$ $a/c = 1.3$	$2.6 \bar{R}O \cdot R_2O_3 \cdot 5SiO_2$ $R_2O : RO = 1.7.5$ $\alpha = 1.8$

Так, бомба, найденная в кратере Тирануса, представляет изогнутую трубку длиной около 50 см, сечение которой имеет форму эллипса с

большим диаметром 8 см.

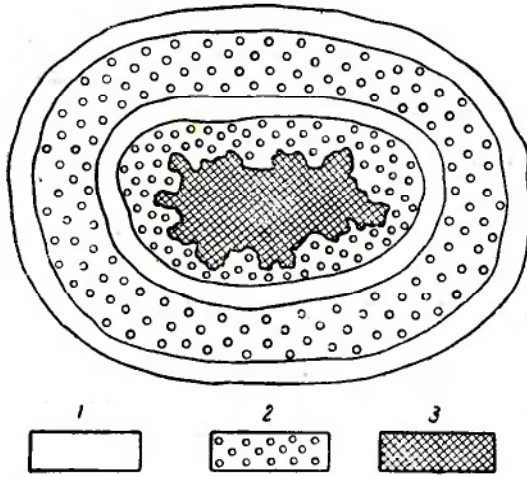
Поверхность бомбы ямчатая, матовая. Строение неоднородное. Внутренняя часть бомбы представляет

вспенившуюся лаву, в которой больше 50% составляют поры самой причудливой формы, по размерам варьирующие в пределах

от 1 до 5 мм. Вспенившаяся лаву окружена менее пористой оболочкой, толщиной около 2 см, с порами меньших размеров. Периферическая часть бомбы

состоит из трех оболочек: плотной пористой и самой внешней — снова плотной

(фиг. 8). Пористые оболочки черные, плотные — серые со стеклянным блеском.



Фиг. 8. Структура трубчатой бомбы из Тирануса — разрез:

1 — плотная лава; 2 — пористая лава; 3 — сильно пузыристая лава.

Плотная лава имеет стекло светлозеленого цвета с микролитами плагиоклаза, зернышками пироксена, иголочками апатита и сыпью рудного минерала. В основную массу погружены немногочисленные фено-

кристаллы плагиоклаза, пироксена и оливина. Плагиоклаз вкрапленников двойниковой структуры, незональный, обычно совершенно чистый, лишь изредка с включениями капелек стекла во внутренней части зерен. Среди микролитов наблюдаются также табличатая форма и двойниковая структура. Замер на федоровском столике показал, что плагиоклаз содержит 72% анортитовой молекулы ($Ng' = 39^\circ$, $Nm = 65^\circ$, $Np = 61^\circ$, $2V = -86^\circ$), двойникование по карлсбадскому закону. Вкрапленники пироксена, размеров до 1.5 мм, имеют идиоморфные очертания и зональное строение. Более мелкие, в виде округлых зерен, собраны в кучки $2V = +56^\circ$. Вкрапленники оливина меньших размеров; они имеют форму округлых зерен и окружены тонкой рудной каемкой $2V = +82^\circ$. В двух случаях в шлифе были встречены таблички гиперстена, окруженного каемкой моноклинного пироксена. Поры в основной массе округлые, около них стекло окрашено в более темный, бурый цвет.

Внутренняя пузыристая зона отличается от плотной более темной и неравномерной окраской стекла, почти черного около пор. Стекло включает микролиты плагиоклаза, зернышки пироксена, иголки апатита и сыпь магнетита. Фенокристаллы представлены зональным плагиоклазом, зональным пироксеном и оливином, окруженным рудной каемкой. В пироксене и оливине много включений рудного минерала, который концентрируется в виде зон по периферии кристаллов.

По содержанию SiO_2 внешняя плотная и внутренняя пористая каемки не отличаются друг от друга; небольшое различие наблюдается в характере воды: во внешней оболочке вода выделяется при t° ниже 110° , во внутренней — выше 110° (см. табл. 10).

Таблица 10

Характеристика оболочек бомбы Тирануса

	SiO_2	$H_2O_{-110^\circ}$	$H_2O_{+110^\circ}$
Внешняя плотная оболочка . .	53.74	0.04	нет
Внутренняя пористая оболочка	53.80	нет	0.06

Из одновременно прорвавшихся кратеров Тиранус и Третий выделяли (в период наблюдений) значительно меньше газообразных продуктов, чем Билюкай и Козей. О количестве и концентрации газа можно судить по тому, что на лавовом потоке Тирануса мы совершенно не наблюдали продуктов сублимации, которые встречены были только в кратерном нагромождении и на стенках лавовых утесов. Качественно газ Тирануса сходен с газом Билюкай: в нем определены H_2O , HCl , SO_2 , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , N_2 . В табл. 11 приводится анализ газа.

Из возгонов химическим путем определены: $NaCl$, NH_4Cl , Na_2SiF_6 , $FeCl_3$, $Fe(OH)_3$, $MnO(OH)_2$. Минералогическим путем установлено присутствие только галита, сильвина, нашатыря и молизита.

Фумаролы на лавовых нагромождениях Тирануса принадлежат к двум типам: высокотемпературных (t° выше 500°) и низкотемпературных (около 300°). Первые расположены у основания лавовых утесов и дают газ бесцветный и без запаха; вокруг газовых струй обильные отложения галита с примесью сильвина. Фумаролы второго типа выде-

Таблица II

**Химический состав проб газа фумарол Тирануса, взятых
25 марта 1938 г. (в %)**

№ п.п.	Фумаролы	t°	H ₂ O в мг/л газа	HCl	SO ₂	CO ₂	CO	O ₂	N
1	№ 1	475	19.75	0.056	—	—	1.15	16.36	82.42
2	№ 2	—	—	—	0.5	—	0.52	19.1	79.88
3	Несколько фумарол (среднее)	125	15.50	0.3—0.4	—	—	—	19.5—19.8	78.2—80.5

Аналитики: 1) С. И. Набоко, 2) Газ. лаб. ИГН- 3) И. З. Иванов

ляют газ бесцветный, но с запахом хлора; количество возгонов вокруг газовых струй незначительное, преимущественно это яркожелтый и оранжевый молизит и белый нашатырь. Других минералов на Тиранусе обнаружено не было.

Качественный состав продуктов сублимации, определенный химическим и спектральным путем, следующий: Cl, N, H, O, F, Ag, Cu, Sn, V, Na, K, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si.

Активность Тирануса проявилась только один раз в момент его образования, после чего связь с магматическим очагом сразу прекратилась. Образование Тирануса рисуется следующим образом. Начало было положено взрывом, сопровождавшимся выбросом большого количества шлаковой лавы в полупластическом состоянии. Затем последовало излияние лавы из трещины и, вероятно, был выжат купол. Центром эксплозии и излияния лавы было место, где сейчас находится лавовое нагромождение с пятью утесами. После образования Тирануса в результате землетрясения на лавовом куполе образовались многочисленные трещины, по которым произошло оседание отдельных блоков.

Тип извержения Тирануса эффузивный. Количество лавы, излитой на дневную поверхность, равняется 600 000 м³. Количество эксплозивного материала составляет приблизительно 3000 м³ (радиус 100 м, толщина слоя в среднем 10 см). Эффузивный индекс $\frac{600\ 000 \cdot 100}{603\ 000} = 99$.

III. БИЛЮКАЙ

I. МОРФОЛОГИЯ БИЛЮКАЯ

Как было уже сказано, Билюкай прорвался 7 февраля 1938 г. у подножья Ключевского вулкана, в восточном секторе его, на высоте 900 м над уровнем моря. Момент прорыва нами не наблюдался, и подъехать к кратеру удалось только несколько дней спустя. К этому времени уже образовался конус высотой в 100 м, который со временем вырос до 200 м и несколько изменился в форме, но сохранил основные ее черты во все время извержения. До сентября 1938 г. Билюкай имел форму усеченного конуса с крутыми (в среднем 40°) склонами, с диаметром основания, равным 350 м, и диаметром вершины, равным 100 м (фиг. 9). С северной и западной сторон у основания конуса находилось два полукруглых валика диаметром в 40 м и высотой в 8 м, обращенных своими выпуклыми сторонами, соответственно, на запад и север — вероятно, реликты небольших кратеров, действовавших в первоначальный момент извержения. На вершине конуса находился основной кратер в виде чаши, открытой на восток, с крутой, почти вертикальной западной стенкой и более пологими северной и южной. Выход основного жерла на дневную поверхность не имел строго определенного положения; подъем его происходил медленно и почти непрерывно по мере роста из рыхлого материала внутреннего конуса; углубление жерла было связано с изменением



Фиг. 9. Извержение Билюкая в марте 1938 г.
Фото К. К. Турбабо.

характера его деятельности, а именно со сменой спокойной работы взрывами; наконец, перемещение по горизонтали было непрерывным, обусловленным ростом конуса и тем, что канал имел наклонное положение.

В первое посещение Билюкая 20 февраля 1938 г. выход Основного жерла нам видеть не удалось, так как наблюдения велись с северо-восточной стороны подножья Билюкая, а выход жерла, судя по направлению струи бомб, находился в северо-западной части кратера. Во вто-



Фиг 10. Конус Билюкая в марте 1938 г.
Фото С. И. Набоко.

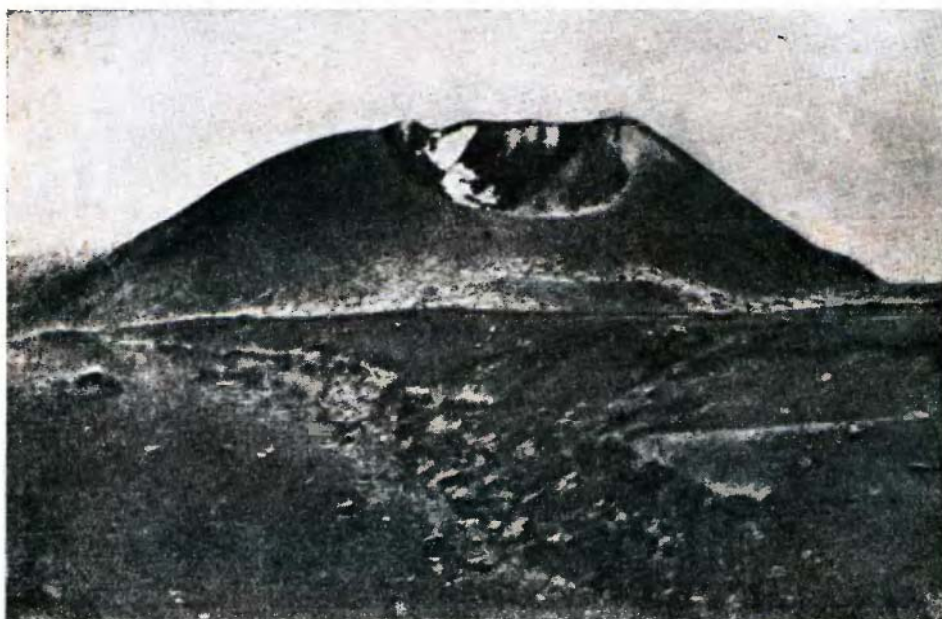
рую нашу поездку в марте 1938 г. Основное жерло находилось на дне кратера, открытого на северо-восток. 26 марта, после ночного излияния лавы, в Основном кратере образовалось новое жерло восточнее старого метрах в трех, и с этого момента газообразные и рыхлые продукты стали поступать только через это новое отверстие, а старое западное жерло стало засыпаться рыхлым материалом. С 28 марта вокруг нового жерла начал расти конус, и 5 апреля внутренний конус уже стал несколько возвышаться над старым кратером. 9 июля Основное жерло находилось на дне открытого кратера и хорошо было видно с подножья конуса, так как за 7 дней выход Основного жерла поднялся на 10 м и переместился несколько на юго-восток. Особенно заметен был рост конуса в ночь с 15 на 16 июля, когда он настолько вырос, что снова стал возвы-

шаться над краями старого кратера. Иногда наблюдался рост только одной стороны внутреннего конуса; так, 26 июня, после двухчасовой непрерывной деятельности Основного жерла, южная часть конуса заметно возвысилась над северной. За три месяца летних наблюдений внутренний конус несколько раз разрушался сильными взрывами и вновь воссоздавался. Чаще всего раздроблялась и выбрасывалась вверх восточная стенка кратера. Можно отметить, что неизменно проявлялась тенденция к образованию кратера, открытого на северо-восток (фиг. 10).

Форма и размер Основного жерла также не отличались постоянством. В марте, когда активность была понижена, нам удалось подняться на вершину конуса. Жерло имело тогда сечение трубы диаметром приблизительно в 20 м и было до краев заполнено красной лавой. В моменты часового покоя лавы в жерле тускнела, почти чернела (дном), но вспыхивала красным цветом, как только начинались взрывы. Не-

сколько другую форму жерла мы наблюдали в июле. В это время бомбы вылетали приплюснутый или, вернее, овальной струей, с большим диаметром широтного направления, причем струя направлялась наклонно на восток. 14 июля, когда нам удалось подойти совсем близко к жерлу, мы увидели, что оно имеет форму щели длиной до 4 м, протягивающейся в направлении с запада на восток. По тому факту, что струя бомб вылетала под углом к востоку, и по форме кратера, открытого на северо-восток, можно думать, что канал имел наклон на ЮЗЗ.

С обратной стороны конуса, западной, на высоте 40—50 м от основания, находится второй кратер, названный нами Соседом (фиг. 11). В марте Соседнее жерло не действовало, и мы спускались в кратер. Кратер тогда представлял чашу с диаметром в 10 м и глубиной 4 м,



Фиг. 11. Кратер Сосед в марте 1938 г. Фото С. И. Набоко.

стенки которой, особенно восточная, отличались крутизной. Дно кратера было сложено кусками лавы, скрывавшими жерло от наших наблюдений, но, судя по деятельности его в феврале, жерло должно было находиться на дне кратера в центральной части. В июле—сентябре, когда Сосед был очень активным, форма кратера несколько изменилась. В это время он имел почти вертикальную восточную стенку и очень крутую западную; жерло находилось в центральной части кратера. С 12 июля в продолжение нескольких дней действовало еще жерло, расположенное в южной стенке кратера. Рассмотреть форму жерла не удалось, так как каждый раз после взрыва оно засыпалось рыхлым материалом, но, судя по дымовому столбу, поднимавшемуся из жерла, оно должно было иметь сечение круга.

С восточной стороны конуса Билукая, у основания его, под основным находилось третье жерло, названное нами Лавовым, представлявшее собою озерко, диаметр которого колебался в пределах от 4 до 6 м. Уро-

вень Лавового жерла поднимался в связи с нагромождением изливающейся лавы.

Конус Билюкая сложен рыхлым материалом — блоками шлаковой лавы, лапилли и вулканическим песком. Цвет конуса черный, и только в западной части вокруг Соседнего кратера он переходит в серый цвет от бомб Соседа, покрытых сизым налетом.

Восточнее конуса Билюкая тянется лавовое поле. Общий уклон местности обусловил вытянутость лавового потока почти в широтном направлении. Контуры лавового потока, очень извилистые, неоднократно менялись в течение года и, вероятно, позднее. В феврале — марте ширина потока в устье и на противоположном конце была 0.5 км, а в центральной части составляла 2 км; длина его к концу марта достигала



Фиг. 12. Глыбовая лава Билюкая. Фото С. И. Набоко.

6 км. В начале августа длина потока дошла уже до 12 км. внешние же контуры февральского потока в средней части сохранились, в то время как у устья произошли расширение и утолщение его. К 17 января 1939 г. лавовый поток, по наблюдениям В. Ф. Попкова, растянулся на 16 км и спустился по склону до 335 м высоты. Излияние лавы продолжалось в течение года, и лавовое поле росло в длину, ширину и высоту, причем происходило это так, что новые порции лавы, переполнив русло, переливались через борта и, сползая к подножию лавового потока, текли вдоль него.

Лава имеет глыбовый характер типа «аа». Хаотическое, беспорядочное нагромождение глыб всевозможных размеров и разнообразной формы характерно для поверхности такого лавового поля. Высота потока неодинакова, большей частью она близка к 12 м, но есть участки, где эта цифра возрастает до 30 м или, наоборот, опускается до 5 м. В августе разрез потока у устья с севера на юг имел следующий вид: 1) вал из рыхлого материала, возвышающийся над местностью на 5 м; 2) поле



Фиг. 13. Лавовый пузырь Билюкая. Фото С. И. Набоко.



Фиг. 14. Грубоглыбовая лава, Билюкай. Фото С. И. Набоко.

глыбовой лавы, совершенно застывшей; 3) вал из обломков лавы и шлака, возвышающийся над лавовым полем на 6—8 м; 4) русло, по которому текли свежие порции лавы, то пустое, то заполненное текущей лавой; 5) снова шлаковый вал; 6) поле глыбовой лавы; 7) вал из рыхлого материала. Мы могли наблюдать все стадии формирования лавового потока, от жидкой, изливающейся, до совершенно застывшей и неподвижной массы. Грубо можно разбить все лавовое поле на 3 части: 1) застывший лавовый поток, совершенно неподвижный; 2) полузастывший поток, у которого внешняя корка затвердела, а под ней лава еще сохранила вязкость, продолжает перемещаться; обнаружит такое движение можно было в конце потока; 3) жидкий поток, изливающийся в момент наблюдения.



Фиг. 15. Лава „гармошка“, Билукай. Фото С. И. Набоко.

Для лавового потока характерны следующие элементы:

1) глыбы различной фантастической формы и различных размеров от нескольких сантиметров до нескольких метров в диаметре (фиг. 12);

2) лавовые столбы, разделенные поперечными параллельными трещинами;

3) лавовые нагромождения, возвышающиеся над общим лавовым полем на десятки метров; такие нагромождения чаще всего вырастают перед участками положительного рельефа (вблизи холмов);

4) шлаковые бугры;

5) шлаковые башни;

6) шлаковые валы;

7) лавовые пузыри (фиг.

13);

8) трещины: а) продольные, вытянутые по направлению движения потока и сосредоточенные преимущественно по краевым зонам; б) радиальные, сосредоточенные на заворотах лавового потока, и в) поперечные, в центральной части потока.

Лавовый поток имеет различные формы поверхности застывания: 1) грубоглыбовую (фиг. 14), 2) мелкообломочную, 3) грубоветвистую, 4) пенистую, 5) горизонтально расщепленную — гармошку (фиг. 15), 6) скрученную наподобие стружки. Отдельные формы поверхности встречаются в обособленных участках, и разнообразие их может быть объяснено различной вязкостью лавы в отдельных частях, которая в свою очередь зависит от неравномерного содержания газов по всему полю застывающего и оформляющегося потока.

Все лавовое поле было усеяно фумаролами в таком количестве, что учесть их было трудно. Больше всего фумарол находилось на лавовом потоке второй порции (в южной стороне потока, в расстоянии 6—10 км от кратера) и на валу, окаймляющем русло; меньше — на лавовом поле

первой порции; совсем мало — на вновь изливающимся и оформляющемся лавовом потоке.

Вокруг конуса Билюкая площадь радиусом около километра была покрыта слоем вулканического песка, толщина которого, превышавшая вблизи конуса полметра, с удалением от кратера постепенно уменьшалась. Рыхлый материал состоял главным образом из вулканического песка черного цвета; у самого подножья конуса и на нем встречались также шлак и блоки лавы. Кроме того, куски шлака и крупные лапилли — материал первого взрыва — были встречены на расстоянии 500 м от кратера.

В. Ф. Попков констатирует сортировку крупного обломочного материала вокруг конуса. Площадь радиусом в 100—150 м покрыта обломками плотной и шлаковой лавы диаметром 0.8—1.8 м, в удалении на 300—350 м — диаметр 0.4—0.6 м, в расстоянии 500—600 м — диаметр 0.2—0.3 и за пределами километра — 0.05—0.15 м.

С западной и юго-западной сторон конуса, у подножья его, площадь радиусом в 100—150 м усеяна воронками диаметром до 2 м, образовавшимися в результате падения тяжелых бомб из Соседнего жерла. Под слоем вулканического песка еще летом, в июле — августе, сохранялся снег, и горячая бомба углублялась протавиванием через него, что влекло за собой обвалы стенок, а отчасти и расширение воронки от действия энергично выделяющегося пара. Бомбы, падающие в песок, под которым не сохранилось снега, оставляли след канала с крутыми стенками. При углублении дна даже больших воронок мы находили куски лавы сравнительно малых размеров, всего в 10—15 см.

Билюкай был активен в продолжение года. Наблюдения над его деятельностью велись с перерывами, в зимнее время туда снаряжались экспедиции, летом были организованы стационарные наблюдения. Описание извержения по дням в течение всего времени дано в «Бюллетенях Вулканической станции» (Меняйлов и Набоко, 1939, б и в; Набоко, 1940), ввиду чего в настоящей работе приводится только краткая характеристика отдельных периодов и моментов извержения.

2. ХОД ИЗВЕРЖЕНИЯ БИЛЮКАЯ (ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ БИЛЮКАЯ С МОМЕНТА ЕГО ПРОРЫВА ДО ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ЗАТУХАНИЯ)

Мы видели, что прорыв кратеров начался сильной эксплозией с последующим изливанием лавы из трех кратеров — Билюкая, Тирануса и Третьего; из Козея изливания лавы не последовало. Землетрясение, сопровождавшее прорыв кратеров, было небольшого радиуса, всего около 20 км. В Ключах, расположенных в 30—35 км, землетрясение не ощущалось, о толчках (силой в 2 балла) сообщали только некоторые жители с. Камаки, расположенного от Билюкая на расстоянии 20 км. В районе самих кратеров землетрясение достигало, вероятно, более значительной силы, так как образовалось много трещин и обвалов. Количество рыхлого материала, выброшенного во время эксплозии при прорыве Билюкая, равнялось приблизительно 14 млн. м³. Пепел был разнесен на площадь в 20 000 км². По тому, что вокруг Билюкая лежит наиболее мощный слой рыхлого материала (у подножья конуса мощность около метра), можно вывести заключение, что взрыв при прорыве Билюкая был наиболее сильным. Одновременно со взрывом, а может быть спустя некоторое время, произошло изливание лавы. Нам удалось попасть к кратеру через несколько дней, когда деятельность Билюкая была еще очень сильной. Лавовый поток Билюкая протянулся

на 6 км. На потоках уже успела образоваться лавовая корка, но под ней продолжала течь лава; под ее напором глыбы отваливались и обнажали огненный материал, который и вспыхивал все новыми и новыми огоньками. Особенно красивое и грандиозное зрелище представлял самый кратер Билюкай. Из него под оглушительный грохот вылетала масса огненного материала, издали напоминая пламя гигантской свечи; это фонтанировала лава. Конус был покрыт сотнями искр, скатывавшихся к его подножью



Фиг. 16. Билюкай в состоянии повышенной активности—в феврале 1938 г. Фото А. А. Меняйлова.

огненным потоком. Над кратером, точно гигантский кочан капусты, нависла огромная кудрявая туча (фиг. 16), окрашенная в буро-розовый цвет. На снег и на зрителей вулкан бросал огненный отблеск. Билюкай действовал двумя жерлами. Из Основного жерла, находящегося на вершине конуса, вылетала на высоту 250—300 м струя расплавленного лавового материала, которая сверху рассыпалась на множество искр и огненным дождем падала вниз. Число раскатов (взрывов) иногда доходило до 25—30 в минуту. Одновременно из кратера поднимался столб белого пара, вверху вырастая в гигантскую кудрявую тучу.

Второй кратер, Сосед, действовал периодически: через 3—6 минут из него со свистящим звуком выбрасывался пар, и в кратере была видна в эти мгновения расплавленная лава.

Таким образом, деятельность Билюкая в этот про-

межуток времени можно характеризовать как смену фонтанирования лавы частыми и сильными эксплозиями Основного жерла и периодическим отделением пара из Соседа.

Наблюдения над деятельностью Билюкая удалось возобновить только через месяц. В конце марта была совершена вторая поездка, во время которой наблюдения велись в течение 10 дней. Билюкай был в состоянии ослабленной активности, но периоды покоя Основного жерла, когда только слегка выделялся белый пар, сменялись периодами повышенной деятельности. Лава в жерле, за время покоя покрывавшаяся тусклой и даже черной коркой, при первом взрыве взлетала огненными обломками, и с этого момента жерло в течение часа продолжало оставаться активным. В минуту обычно раздавалось 25—30 раскатов, т. е. происходило столько же взрывов. Только 25 марта вечером

(в 20 час.), после очередного перерыва, раздался сильный раскат-грохот, и из кратера вылилась небольшая порция лавы. Выжимание лавы происходило трижды, в результате чего получилось три ступени, хорошо видимые с расстояния 1.5 км, по различной степени яркости лавы. Всю эту ночь Билюкай непрерывно грохотал и выбрасывал бомбы, взлетавшие выше краев кратера и падавшие на склоны конуса. После ночного излияния лавы в кратере Билюкай образовался выступ и два отверстия: из восточного, нового, с сильными раскатами грохота вылетала красная лава; из западного, старого, выделялся только газ. Бомбы падали в кратер и заваливали старое отверстие. Постепенно из старого жерла стало выделяться все меньше и меньше газа, и, наконец, с 29 марта можно было считать, что действующим осталось только новое жерло. Внутри кратера, вокруг нового жерла, начал расти конус, который 5 апреля уже возвышался над старым кратером. Сосед в марте и апреле совершенно бездействовал и создавал впечатление потухшего кратера. Дно кратера было только слегка теплым, и мы свободно туда проникали. Спустя три месяца мы нашли Соседний кратер настолько активным, что к нему нельзя было даже подойти. В марте был период ослабления активности Билюкай.

К июлю, когда мы возобновили наблюдения над Билюкаем, лавовый поток удлинился на 4 км по сравнению с состоянием его в марте—апреле. Можно было сделать предположение, что в период между апрелем и июлем имело место излияние новой порции лавы.

В продолжение трех месяцев непрерывных наблюдений (июль, август, сентябрь) деятельность Билюкай несколько раз меняла свой характер, но все это время он был чрезвычайно активен. Работало три жерла: Основное, Соседнее и Лавовое. Описанию деятельности этих жерл предположим характеристику отдельных этапов извержения Билюкай.

С 9 по 12 июля происходили частые эксплозии Основного жерла средней силы. Это был обычный характер деятельности Билюкай, когда проявляло себя только Основное жерло, которое непрерывно выделяло белый пар, не заметный у основания, но скапливающийся наверху в кудрявую тучу. На таком фоне происходили частые взрывы (30—35 в минуту), сопровождавшиеся грохотом и выбросами на высоту 150—200 м раскаленных бомб. Иногда к белому пару примешивались рыхлые продукты, отчего он приобретал серый цвет, и тогда к основанию конуса падали шлаковые лапилли и песок.

Следующий период (с 12 до 14 июля) характеризуется вступлением в действие Соседнего жерла. Основное жерло не меняло характера своей активности и давало частые взрывы средней силы; зато Соседнее жерло, начиная с 9 ч. 20 м. 12 июля, стало чрезвычайно активным. Деятельность его заключалась в том, что через известные промежутки времени слышался рокот, иногда сопровождавшийся сотрясением почвы, и вверх стремительно взлетал кудрявый столб черного «дыма». Клубы дыма выходили из жерла в течение 3—4 секунд, после чего дымовой столб быстро рассеивался. Из жерла при этих взрывах со свистом вылетали на высоту 300—400 м куски лавы, ночью светящиеся тусклокрасным светом. Из дымового столба шел косой каменный дождь. Взрывы следовали один за другим через неправильные промежутки времени, иногда по несколько за час, иногда с перерывом в несколько часов. Связь между деятельностью Основного жерла и Соседнего уловить было трудно, но иногда здесь все же наблюдалась явная зависимость.

Через два дня после вступления Соседа в число активных жерл началось излияние лавы и из так называемого Лавового жерла. В этот месяц Билюкай был особенно активным.

Характер деятельности Билюкай несколько изменился 10 августа. В продолжение двух дней без перерыва Основное жерло, совершенно без грохота, что раньше бывало очень редко, выделяло клубы темного газа, насыщенного рыхлыми продуктами. Бомб вылетало много, и они нарушали необычную тишину звуком своего падения. На второй день деятельность Основного жерла оставалась такой же, но темный газ выделялся под непрерывный рокот. Газ при подъеме находился во вращательном движении, передававшемся до самого верха столба. Ночью было видно, что непрерывная струя бомб вылетала из южной части кратера под углом на восток. Скорость вылета бомб и выделений газообразных продуктов была очень большой, определить ее было трудно. Газовый столб имел высоту около 3 км; из него в продолжение трех дней шел дождь вулканического песка.

Лавовое жерло в эти дни также проявляло повышенную активность. Лава в нем вздымалась пузырем, издавая звук, напоминающий шум при отходе поезда. Над жерлом поднимался столб белого пара, который не смешивался с газовым столбом Основного жерла. И только деятельность Соседа оставалась неизменной: в нем продолжали периодически происходить взрывы с выбросами огромных черных столбов дыма — газа, нагруженного рыхлым материалом; в дымовом столбе сверкали молнии, раздавался сухой треск, шел косою каменный дождь.

Через 3 дня Основное жерло восстановило прежний характер своей деятельности. Возобновились взрывы — в минуту 22—25 грохочущих ударов, из кратера стали вылетать бомбы. У Соседа и Лавового жерла проявления активности были обычными: из первого периодически происходили взрывы, из второго непрерывно и спокойно вытекала лава. 21 августа наблюдалось ослабление деятельности Соседа; количество взрывов и сила их уменьшились, промежутков полнейшего затишья между взрывами не стало, в кратере все время стоял пар. С 24 августа ослабело излияние лавы из Лавового жерла, в связи с чем лава в главном русле, осела, обнажились борта, цвет ее потускнел. Зато Основное жерло с 22 час. 23 августа стало временно очень активным. Из него непрерывно вылетал раскаленный материал в виде монолитной струи, которая выше 20 м распадалась на массу отдельных кусков. Звук, сопровождавший фонтанирование лавы, можно сравнить с завыванием ураганной вьюги. Газообразные продукты серого цвета выделялись из жерла так же стремительно, непрерывной струей. Иногда наступали минутные перерывы, после чего опять с завыванием возобновлялось фонтанирование лавы. Ослабление фонтанирования на 2—6 м наблюдалось в связи с выбросами Соседа. Особенно отразился на активности Основного жерла один его выброс, когда из жерла взрывом был выброшен на высоту 100 м огненный столб из обломков красной лавы; в момент этого взрыва Основное жерло совершенно перестало действовать и только через шесть минут восстановило свою прежнюю деятельность. Так, в течение 50 час. продолжалось фонтанирование из Основного жерла.

С 26 августа деятельность Билюкай ослабела; Основное жерло стало грохотать прерывисто, то затихая, то разражаясь раскатами; из него выделялось необычайно много белого пара, который поднимался вверх толстым столбом. Взрывы из Соседа были редки, чаще он выде-

лял клубы серого пара. Излияния из Лавового жерла почти прекратились.

С 28 августа в продолжение трех дней характер деятельности Билюкая можно охарактеризовать следующими словами: взрывная деятельность Основного жерла (24—30 взрывов в минуту) и выдавливание из жерла миниатюрных экструзий, очень частые и сильные взрывы Соседа и прекращение излияния лавы из Лавового жерла. Так, например, 30 августа грохот Основного жерла был особенно сильным, в минуту происходило 24 взрыва, и каждый раз одновременно со звуком взрыва вылетал столб бомб. Газообразных продуктов при этом почти не выделялось, а потому над кратером не собиралась, как обычно, газовая туча. Из Соседа за 12 час. наблюдалось 65 выбросов, из них 45 сильных и 20 слабых. Очень сильный взрыв, сопровождавшийся сильным звуковым эффектом и сотрясением почвы, произошел в 17 ч. 30 м., когда из кратера Соседа вылетела большая глыба лавы. Из Лавового жерла лава почти перестала изливаться — красным осталось только жерло. Излияние возобновилось 31 августа. Главное русло быстро стало заполняться новой порцией светящейся лавы. Заполнив русло, лавовый поток перелился через борт и, пройдя с южной стороны конуса по старой лаве, вышел к подножью потока и направился по почве вдоль него. В течение первой половины сентября Основное жерло проявляло среднюю активность и попеременно то выделяло столб пара, то выбрасывало взрывами бомбы; Сосед периодически давал взрывы и выбрасывал столбы черного дыма.

На этом наши стационарные работы прервались. Дальнейшие наблюдения велись периодически новой сменой. Судя по данным В. Ф. Попкова, помещенным в статье «О деятельности Билюкая в 1938—1939 гг.», начиная с конца октября 1938 г. и до конца февраля 1939 г., Соседнее жерло совершенно бездействовало, а Основное и Лавовое оставались активными. Деятельность Билюкая за этот период характеризуется энергичными взрывами из Вершинного кратера (Основного жерла) и крупным излиянием лавы из бокового жерла (Лавового). Из новых явлений, наблюдавшихся В. Ф. Попковым, уместно отметить отдаление газообразных колец (31 октября 1938 г., в 19 ч. 27 м.) и выбросы вращающихся взрывных шаров (1 ноября в 4 часа) из Основного жерла.

В конце февраля 1939 г., т. е. спустя год после образования Билюкая, верхняя часть конуса обрушилась, после чего его взрывная деятельность прекратилась. Момент обрушения наблюдался из Ключей и так описывался Попковым: «23 февраля произошло землетрясение силой в 4 балла, при этом наблюдалось необычное явление в районе извержения Билюкая. Над его кратером появилось громадное облако высотой до 3000 м, освещенное красным светом. В бинокль было заметно падение искрящихся точек. Наблюдаемый эффект продолжался не более 2—3 минут, а затем все рассеялось».

Период после обрушения (2—3 марта) характеризуется парением кратерного провала и периодическим выжиманием небольших порций очень вязкой плотной лавы в виде последних выжимок. Этим закончилась и эффузивная деятельность Билюкая. Некоторое время кратерный провал продолжал парить (конец марта), а лавовый поток остывать. В мае, июле и сентябре 1939 г. лавовый поток уже почти не перемещался, и Билюкай перешел в фумарольную стадию. Фумаролы располагались в кратерном провале и по лавовому потоку. Температура некоторых из них была выше 500°, и, вероятно, несколько десятков лет понадобится на то, чтобы поток остыл совершенно.

3. ХАРАКТЕР ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОСНОВНОГО ЖЕРЛА

Несмотря на то, что три жерла Билюкая находились на очень близком расстоянии друг от друга (несколько метров), деятельность их строго индивидуализировалась.

Деятельность Основного жерла отличается своей непрерывностью. За все время наблюдений не было почти ни одного момента, когда жерло было бы совершенно спокойно. Только в марте, во время ослабленной активности Билюкая, характер деятельности Основного жерла был прерывистый: часовая активность сменялась часовыми паузами. В летний же период за июль — сентябрь, действительно было очень мало случаев, когда можно было сказать, что Основное жерло бездействует.

В зависимости от величины напряжения, развивающегося в магматическом очаге, в процессе извержения меняется характер проявления активности отдельных жерл. Описываемые ниже явления располагаются в порядке убывания силы напряжения.

1) Фонтанирование лавы

Наиболее сильным проявлением энергии в деятельности Основного жерла следует считать явления, сходные с фонтанированием лавы.

Подобие фонтанов из лавы мы наблюдали 20 февраля 1938 г., спустя десять дней после прорыва Билюкая. Под сильный, почти непрерывный грохот, на высоту приблизительно 250 м, из Основного жерла бил фонтан. Лава в основании фонтана близ жерла была сплошного желтого или почти белого каления. Вверху лава рассыпалась на множество искр и огненным дождем падала вниз. На фоне фонтанирования лавы происходили взрывы, и струя бомб вылетала под углом к востоку. Газообразные продукты поднимались тонким столбом и выше собирались в кудрявое облако, сходное с кочаном капусты.

Подобные явления мы наблюдали и в летнее время, но тогда фонтан лавы имел меньшую высоту. Так, 9 августа ночью с 21 ч. 30 м. до 23 ч. 30 м. под непрерывный раскатистый грохот выбрасывалась вверх струя лавы, у основания сплошная, выше распадающаяся на многочисленные куски шлака, которые падая усеивали конус массой красных искр, сползающих лавиной к основанию конуса. Точно так же 23 августа с 22 час. и в продолжение четырех дней почти непрерывно из Основного жерла била струя раскаленного материала. Звук, сопровождавший фонтанирование лавы, можно сравнить с завыванием ураганной вьюги. Верывов в Основном жерле за это время не происходило. Остальные два жерла во время этого наиболее сильного проявления деятельности Основного жерла обычно уменьшали свою активность.

Здесь рассматривает фонтаны как результат восходящих токов богатой газами магмы (эмульсии газа и расплавленной лавы). Он сравнивает выталкивание лавы, превращенной в эмульсию, с подбрасыванием вверх деревянного чурбана, опущенного на дно озера.

Судя по белому, слегка желтоватому цвету каления в основании фонтана, лава здесь имела наиболее высокую температуру (около 1200°) и была очень жидкой. Газы, под большим давлением выделяющиеся непрерывной струей, увлекали за собой жидкую лаву.

2) Непрерывное выделение газообразных продуктов, насыщенных рыхлым материалом

Иногда из основного жерла происходило непрерывное выделение газообразных продуктов, чаще всего насыщенных рыхлым материалом; в таких случаях над жерлом возвышался мощный столб черного дыма, расплывавшегося выше в большую тучу, из которой обычно шел дождь вулканического песка. Сопровождающее такое выделение дыма непрерывное рокотание напоминало звук, издаваемый при кипении жидкости в котле. Но иногда выделение газа с рыхлым материалом происходило беззвучно, и тогда тишина казалась необычной и зловещей.

Примерами подобного проявления активности кратера могут служить дни 14, 16, 24 июля, 10, 11, 12, 26 августа. 14 июля, в промежутке между периодами эксплозивной деятельности Основного жерла, с 8 ч. 15 м. до 10 час. без перерыва происходило беззвучное выделение черного дыма. 16 июля непрерывно в продолжение 2 ч. 15 м. (с 9 ч. 45 м. до 12 час.) из Основного жерла бесшумно выделялся черный, насыщенный рыхлыми продуктами газ. 24-го в 18 ч. 12 м. вдруг стало непривычно тихо — прекратились взрывы, и из Основного жерла пошли клубы совершенно черного дыма. Жерло дымило 18 мин., и из тучи, собравшейся над Билюкаем, пошел частый дождь вулканического песка. В 18 ч. 30 м. раздался первый оглушительный взрыв, и вверх взлетело большое число бомб, после чего газовые выделения стали белыми, а потом и вовсе прекратились. В августе такого характера деятельность Основного жерла продолжалась в течение трех дней. 10 августа в 12 час. Основное жерло, совершенно без грохота, начало выделять клубы темносерого газа, насыщенного рыхлыми продуктами. Необычную тишину нарушал только звук от падения многочисленных вылетающих бомб. Из тучи, скопившейся над Билюкаем, в продолжение трех дней шел грязевой дождь и дождь вулканического песка. 11-го общий характер деятельности несколько изменился. Из всего кратера, под сильный, непрерывный рокот, стал выделяться толстый столб белого пара, до самого верха находившийся во вращательном движении. Клубы газа и струя бомб вылетали с огромной скоростью из южной части кратера. Это непрерывно рокочущее выделение пара продолжалось и 12-го. Хотя газообразные выделения в продолжение последних двух дней и были светлыми, но из тучи, нависшей над нами, непрерывно, ночью и днем, шел дождь вулканического песка. Обычная эксплозивная деятельность Основного жерла восстановилась 12-го. Лавовое жерло в эти дни действовало с повышенной активностью. Лава в нем вздымалась пузырем и снова опускалась, издавая при этом чавкающий звук.

Такой характер деятельности Основного жерла по силе стоит на втором месте, уступая только фонтанированию лавы. Его можно сравнить с прочисткой и продувкой канала. Давление, господствовавшее в этот момент, было, вероятно, огромно, так как и газообразные и рыхлые продукты вылетали с исключительно большой скоростью (но, конечно, не порядка 8—11 км в секунду, как заключил В. И. Лодочников из образного выражения Перрета, касающегося извержения Везувия).

3) Эксплозия шлакового материала и непрерывное выделение газообразных продуктов

Наиболее характерными для Основного жерла были извержения эксплозивного типа. В минуту происходило от 15 до 35 взрывов, при которых вверх на различную высоту вылетала масса бомб. Газообразные

продукты выделялись непрерывной струей. Грохот при взрывах напоминал выстрелы орудий. Бомбы в редких случаях поднимались на высоту 600 м, чаще до 100 м. Ниже приведены некоторые подсчеты количества взрывов в минуту:

11	августа	в	7	час	35	взрывов
12	»		21	»	18	»
13	»		7	»	30	»
14	»		7	»	30	»
31	»		—	»	25	»

Этот обычный характер активности Основного жерла показателен для извержений средней интенсивности. Давление газообразных продуктов не настолько велико, чтобы поддерживать непрерывный фонтан лавы, но, скапливаясь, газообразные продукты повышают давление до предела, когда они прорываются со взрывом, увлекая за собой лаву. Пар, поднимающийся из кратера, при таком характере деятельности слабо насыщен рыхлым материалом и, соответственно, имеет белый или слегка желтоватый цвет, будучи часто невидим у основания. Выше газообразные продукты собираются в кудрявую тучу. Из такой тучи к подножью конуса иногда падают лапилли, но вулканический песок, как правило, не выпадает.

4) Эксплозии газообразных продуктов

В качестве примера выделения пара со взрывами можно привести некоторые моменты активности Основного жерла 26 июля, в течение которой деятельность его проявлялась весьма разнообразно. С 16 ч. 15 м. из жерла стали вылетать серые клубочки газа, которые не рассеивались, а собирались в цепочку, протянувшуюся далеко на юг. Отделение клубочков газа сопровождалось звуком, подобным хлопку. В минуту вылетало 24 газовых шарика; бомб при этом почти не выбрасывалось. Такой характер активности может быть объяснен лопанием газовых пузырей, поднимающихся к поверхности через жидкую лаву.

5) Эксплозии шлакового материала

Эксплозии шлакового материала с малым выделением газообразных продуктов очень редки. Примером такого проявления активности может служить деятельность Основного жерла 14 июля, когда оно с 11 час, под влиянием начала излияния лавы из Лавового жерла, понизило свою активность. Через небольшие промежутки времени происходили взрывы в Основном жерле, и вверх взлетали куски шлака, падавшие обратно в кратер. 28 июля с 15 ч. 35 м. до 16 ч. 15 м. также происходили эксплозии шлакового материала, причем газообразные продукты почти не выделялись. В этот день небо над Билукаем очистилось от газовых скоплений, что бывало очень редко. Сходный характер носила деятельность жерла и 30 июля, когда взрывы, в звуковом отношении сравнимые с выстрелами орудия, следовали друг за другом со скоростью 24 взрывов в минуту и каждый раз сопровождался выбросом столба бомб, при очень ограниченном количестве выделяющихся газообразных продуктов и отсутствии их скоплений над кратером. Ввиду того, что взрывы были очень частые, повторявшиеся каждые 2—3 секунды, отдельные партии бомб в воздухе переплетались: одни бомбы летели вверх, другие вниз, нагоняя и перегоняя друг друга, в воздухе над жерлом стоял страшный хаос беспорядочно мелькающих огненных глыб.

6) Одновременное непрерывное и взрывное выделение газообразных продуктов

26 июля с 17 ч. 12 м. и до 19 ч. 12 м. характер деятельности Основного жерла был необычен. В продолжение двух часов из него одновременно шел серый и черный, насыщенный рыхлыми продуктами газ. Газы резко отличались друг от друга как по цвету, так и по скорости подъема. Серый газ поднимался непрерывной струей со скоростью 10 м в секунду и отклонялся ветром почти от самого основания на юг; черный через короткие промежутки времени высвобождался со взрывами и поднимался со скоростью в два раза большей, чем первый, в виде вертикального столба из отдельных клубов, который не отклонялся ветром. На высоте 400—500 м черный дымовой столб разрастался полого и горизонтально уносился на юг. В результате получались две дымовые полосы, идущие почти параллельно.

7) Экструзия лавы

Экструзия из Основного жерла наблюдалась один раз. По наблюдению А. А. Меняйлова, 29 августа в 17 час. из жерла выпятилась красная лава и, продержавшись около 30 мин., опустилась снова в жерло. Сходные миниатюрные экструзии мы наблюдали несколько раз и из Соседнего жерла. Цвет лавы был при дневном освещении темнокрасный, температура ее была ниже 1000°. Скапливающиеся газы не могли, вероятно, раздробить лавовую пробку и выдавили ее в виде столбика. Соседнее жерло в этот день работало довольно интенсивно: с 8 до 20 час. из него произошло 60 выбросов, из них 23 слабых, остальные сильные, сопровождавшиеся взрывами. Лавовое же жерло понизило активность, и лава перестала выливаться. Это, повидимому, и обусловило образование экструзии.

8) Вскипание лавы

Вскипание лавы мы наблюдали в марте, в период общей пониженной деятельности Билюкая. В то время Основное жерло действовало периодически — часовые паузы сменялись часовой активностью. В некоторые паузы лава в Основном жерле совсем замирала и даже покрывалась черной коркой. В других случаях лава в жерле продолжала жить — она вздымалась, опускалась, шевелилась, как бы кипела. Кипение, сопровождаемое дребезжанием, прерывалось взрывом, и увлеченная им лава взлетала вверх.

9) Выделение паров из лавы

В некоторые дни особо пониженной активности Билюкая из Основного жерла непрерывно выделялся белый пар, как это наблюдалось нами в марте.

10) Пульсирующий розовый отблеск

Пульсирующий розовый отблеск на газообразных продуктах мы наблюдали 6 августа в 21 час. При ночном освещении газообразные продукты, выделяющиеся из Основного жерла, окрашивались в пульсирующий розовый цвет. Бомб при этом не вылетало. Выход Основного жерла в последнее время был скрыт образовавшимся вокруг него, замкнутым со

всех сторон конусом. Возможно, что шлак подбрасывался, но не взлетал выше краев новой чаши. Пульсирующее освещение могло быть вызвано такими слабыми взрывами.

4. ХАРАКТЕР ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОСЕДНЕГО ЖЕРЛА

В деятельности Соседнего жерла можно наметить 4 периода:

1. В феврале Соседнее жерло действовало периодически: через промежутки от 3 до 6 мин. оно выбрасывало белый газ под свистящий звук, напоминающий паровозный гудок. В моменты выбросов в кратере была видна расплавленная красная лава.

2. В марте Соседнее жерло совершенно бездействовало. Температура на дне кратера была низкая, свободно можно было брать руками куски



Фиг. 17. Сосед в состоянии повышенной активности — в августе 1938 г. Фото С. И. Набоко.

лавы. Ни по виду ни по запаху в кратере не обнаруживалось присутствие газа. Отсутствовали также на дне кратера возгоны на лаве. Сложилось мнение, что Соседнее жерло совершенно прекратило деятельность, — мнение, оказавшееся ошибочным, так как в июле активность его возобновилась.

3. В июле — сентябре активность Соседнего жерла была крайне повышенной. Выражалась она в периодических взрывах огромной силы, при которых вверх стремительно взлетал черный столб «дыма» (фиг. 17) или же непрерывно выбрасывался рыхлый материал в виде фонтана. В промежутки между отдельными взрывами Сосед бездействовал или, иногда, выделял клубы дыма и парил.

4. С ноября 1938 г. по февраль 1939 г. Сосед снова бездействовал.

1) Некоторые моменты деятельности Соседнего жерла в период июль — сентябрь

Количество взрывов в активные периоды деятельности Соседнего жерла значительно колебалось, как это видно из приведенных ниже подсчетов:

Месяц и число	Период	Колич. взрывов	Месяц и число	Период	Колич. взрывов
Июль			август		
24	12 час.	17	5	8 час.	20
25		24	6		18
26		21	9		20
27		25	14	3 ч. 30 м	17
28		18	21	8 час.	10
29		22	22	5 »	18
30		18	24	12 »	53
Август					
1	8 час.	24	25		19
2		21	29		60
3		11	30		65
			31		16

Чтобы дать представление о характере деятельности Соседа, приведем описание его работы за 1 августа. Наблюдения начались в 12 ч. 41 м. с лавового поля Тирануса, в 0.5 км от Соседнего кратера, откуда хорошо было видно строение кратера и действие жерла. В 12 ч. 41 м. произошел взрыв и из жерла вылетел пальцеобразный выброс черного дыма, переходивший выше в клубы. После этого короткое время из жерла сначала выделялись серые клубы, а затем поднималась розовая пыль от обвалов крутых стенок кратера. В 12 ч. 46 м. началось выделение из жерла белого пара, сменившееся в 13 ч. 07 м. выбросами серых клубов пара. В 13 ч. 20 м. кратер Соседа совершенно освободился от паров, и некоторое время жерло бездействовало. В 13 ч. 30 м. снова последовал взрыв и из жерла выскочил пальцеобразный столб черного дыма, переходивший в клубы. Одновременно вылетело много бомб, а в дымовом столбе мелькали молнии и слышен был сухой треск. В 13 ч. 32 м. один за другим вылетело три фонтана рыхлого материала, за которыми последовали клубы серого дыма; после этого жерло совершенно очистилось от газообразных продуктов. В 13 ч. 33 м. произошел опять взрыв и вверх взлетел большой, черный, кудрявый столб дыма; одновременно на землю полетели бомбы и пошел дождь песка. Через одну минуту дымовой столб рассеялся, еще в течение двух минут жерло выделяло клубы серого пара, а в 13 ч. 42 м. оно совершенно очистилось от газообразных продуктов и в продолжение 6 минут не действовало. В 13 ч. 48 м. произошел опять взрыв и из жерла поднялись газовые выделения в виде пик, после чего в продолжение 5 мин. жерло парило серым и белым паром до 13 ч. 55 м., когда оно совершенно очистилось, и наступил 2-минутный покой.

Таким образом, в продолжение дня происходил ряд взрывов, после них некоторое время из жерла выделялись серые клубы, их сменяли белые и, наконец, на некоторое время активность прекращалась. Скорость полета бомб при взрывах у Соседнего жерла больше, чем у Основного: у первого обычно вслед за быстро поднявшимся черным столбом дыма обнаруживается падение бомб, в то время как у Основного жерла хорошо виден взлет бомб и даже можно проследить их полет.

Деятельность Соседнего жерла может быть охарактеризована как деятельность спазмами — смена полного покоя взрывами.

2) Кудрявый столб

Обычным проявлением деятельности Соседнего жерла являются взрывы, сопровождающиеся быстрым подъемом кудрявого столба черного «дыма» — газа, сильно нагруженного рыхлым материалом. Цвет газа черный с пепельно-серым оттенком. После полного покоя или слабого парения жерла раздавался короткий выстрел низкого тембра, напоминающий выстрел артиллерийского орудия. Обычно взрыв сопровождался сотрясением почвы. Одновременно с выстрелом опять быстро вверх взлетал кудрявый столб черного дыма (фиг. 18). Подъем сопровождался треском или, вернее, тихим рокотом. О скорости подъема газообразных и рыхлых продуктов можно судить по тому, что глаз не в состоянии был следить за взлетом в начальный момент и только уже фиксировал определенную высоту порядка 2—3 км. Не мог быть прослежен обычно и полет бомб вверх. Скорость падения бомб была большей, чем у шлаковых бомб Основного жерла, падение сопровождалось свистом, и падающие бомбы глубоко зарывались в почву или в вулканический песок. Уже при подъеме столба дыма рыхлый материал — бомбы и песок — падал дождем вниз, и через полминуты или минуту над кратером не оставалось почти ничего, разве только наверху несколько минут держалась серая туча, из которой шел дождь песка, чаще мокрого, чем сухого. Обычно улавливался перерыв в выпадении рыхлого материала; почти одновременно, спустя всего момент, начинался каменный дождь, затем следовала небольшая пауза, а потом уже начинал падать песок, тоже очень непродолжительно, в течение всего нескольких секунд. Несмотря на силу взрыва, вскоре ни в кратере, ни над кратером от него не оставалось никакого следа. Иногда после взрыва и взлета столба некоторое время из жерла продолжали выделяться клубы пара, и тогда момент действия растягивался, но оставалось характерным то, что газообразных продуктов после взрыва над Билюкаем не скапливалось.

Высоту подъема столба в непосредственной близости от Билюкая определить было трудно, но при наблюдениях со станции эта высота определялась в 3 км. Такой столб поднимался обычно вертикально и не отклонялся ветром.

3) Пикообразные или пальцеобразные выбросы

Это явление характеризует наибольшую активность жерла. Скорость подъема пик настолько велика, что уловить его трудно и удается фиксировать только высоту взлета (около 3 км). Цвет пик черный от нагруженности газа рыхлым материалом. Такой дым уходил в небо щупальцами, теряя при подъеме рыхлый материал, так что уже через несколько секунд в кратере и над ним никаких следов его не оставалось.

4) Фонтаны рыхлого материала

Называть это явление фонтанированием рыхлого материала в полном смысле слова нельзя, так как фонтанировал газ, нагруженный рыхлым материалом. При этом песок, взлетев всего на несколько метров, сразу же опускался снова в кратер, а газ, количество которого было невелико, поднимался и рассеивался. Чаще всего фонтан бил не непрерывно, а отдельными порциями. Фонтанирование рыхлого материала



а



б



в



г



д

Фиг. 18. Деятельность Соседа в августе 1938 г. Фото С. И. Набоко.

проходило бесшумно, и вероятно, что это явление было более частое, чем мы наблюдали. Так как рыхлый материал падал назад в кратер, вполне возможно, что здесь имело место выбрасывание одной и той же порции песка.

Примером фонтанирования может служить деятельность Соседа 12 июля. После трех взрывов, следовавших один за другим через минуту в 9 ч. 20 м., 9 ч. 21 м. и 9 ч. 22 м., в кратере Соседа было обнаружено новое, второе жерло. В 12 ч. 15 м. из нового жерла в продолжение 4 мин. бил фонтан рыхлого материала. 12 августа фонтаны рыхлого материала мы наблюдали вблизи кратера. В 16 ч. 27 м. был выброс, состоявший из 5 следовавших один за другим фонтанов газа, переполненных рыхлым материалом. Молнии чаще всего возникали на границе соприкосновения двух фонтанов. В 16 ч. 34 м. снова последовал выброс из 11 следовавших друг за другом фонтанов; в 16 ч. 48 м. было 7, а в 16 ч. 52 м.— 9 фонтанов.

5) Экструзии

Небольшие экструзии из Соседнего жерла удавалось наблюдать несколько раз. Примером может служить деятельность Соседнего жерла 8 августа, отличающаяся тем, что не наблюдалось моментов полного покоя. В продолжение дня несколько раз били фонтаны рыхлого материала. В 16 ч. 57 м. из жерла поднялся столб красной лавы диаметром в 1 м и высотой до 2 м; непосредственно вслед за этим из жерла начал бить фонтан рыхлого материала, а затем пошли клубы темносерого газа, также насыщенного рыхлым материалом. Возможно, что такие экструзии бывают более часто, но остаются незамеченными, так как высота их незначительна, а наблюдения производились преимущественно с северной части Билюкая, откуда не было видно дна кратера.

Подъем лавы с образованием экструзий может быть объяснен тем, что давление газа не в состоянии было сразу раздробить и распылить пробку, а сначала приподнимало ее, чтобы затем в результате взрыва ее распылить.

При дневном освещении лава экструзии имела тусклокрасный, грязный цвет. Температура ее, вероятно, не превышала 900°.

6) Затягивание газообразных выделений Основного жерла Соседом

25 июля в 15 ч. 41 м. произошел взрыв одновременно в двух жерлах — Основном и Соседнем, после чего в верхней части перемычки между ними образовалась ложбинка. Газовые выделения Основного жерла при взрывах в Соседе стали направляться через ложбинку в его кратер и затем подниматься вверх, увлеченные газом последнего.

7) Дымовая лавина

16 июля в 9 ч. 20 м., единственный раз за все время наблюдений, при сильном взрыве в Соседнем жерле, когда вверх поднялся огромный столб кудрявого «дыма», часть газообразных продуктов не поднялась, а потекла вниз по конусу и спустилась в овраг.

5. ХАРАКТЕР ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛАВОВОГО ЖЕРЛА

Лавовое жерло было обнаружено только в июле, когда при нас из него начала изливаться новая порция лавы. Правда, уже 23 марта в

20 час. мы были свидетелями небольшого излияния лавы, но тогда наблюдения велись с большого расстояния и точно установить место выхода лавы не удалось (нам казалось, что она выливалась из Основного кратера). В июле — августе — сентябре излияние лавы происходило из обособленного отверстия — Лавового жерла, которое находилось у подножья конуса с восточной стороны, против Соседа, приблизительно на одной с ним высоте.

11 июля в 21 час, когда Основное жерло работало особенно интенсивно и под непрерывный рокочущий грохот из него вылетала масса красных бомб и поднимались клубы черного дыма, раздались оглушительные взрывы, и у основания конуса Билюкая с восточной его сторо-



Фиг. 19. Ночной снимок Билюкая. Основное и Лавовое жерла освещены. Фото А. А. Меньяйлова.

ны появилось огненно-желтое пятно. Лава вспыхнула на некоторое время и снова потускнела. Вероятно, была выдавлена небольшая первая порция ее. 13-го в 19 ч. 45 м. в том же самом месте появилось опять огненно-желтое пятно — новая небольшая порция лавы. Излияние лавы началось 14 июля в 11 час. Лава появилась снова в том же месте, отчасти расплавила глыбовые нагромождения старой лавы, отчасти протолкнулась через них и начала двигаться по старому руслу. С этого времени новое жерло, Лавовое, стало активным. Особенно хорошо Лавовое жерло вырисовывалось ночью (фиг. 19).

В продолжение двух месяцев деятельность жерла заключалась в том, что оно почти непрерывно изливало расплавленную жидкую лаву и иногда выделяло газообразные продукты голубоватого и густобелого цвета. Излияние лавы из жерла происходило бесшумно, лишь изредка сопровождаясь чавкающим звуком и вздыманием лавы в жерле.

1) Излияние лавы, сопровождаемое выделением голубого газа

Наиболее обычным проявлением активности Лавового жерла являлось непрерывное выдавливание лавы, причем над жерлом поднимался голубоватый газ. Ни Основное жерло, ни Соседнее не давали газа с та-

кны оттенком цвета. Излияние лавы происходило совершенно беззвучно, но при движении в русле лава издавала звенящий звук. Такой характер деятельности наблюдался 15—19, 24, 28 июля, 1—3, 22—23 августа и еще в некоторые другие дни.

2) Выделение столба белого пара

В некоторые дни, особенно в пасмурные, из Лавового жерла выделялся столб белого пара, который не смешивался с газообразными выделениями Основного жерла, а поднимался обособленной трубой.

3) Винтообразный столб белого пара

Часто выделявшиеся белые пары находились во вращательном, закручивающемся движении, передававшемся почти до самого верха столба. Диаметр вращающейся струи был около 3 м и, вероятно, соответствовал диаметру жерла. Высота такого столба составляла всего 100 м (21—22 июля).

4) Подъем и опускание лавы

Впервые движение лавы вверх и вниз мы заметили 22 июля. Лава в Лавовом жерле как бы дышала — подымалась и опускалась. Так, 6—7 августа, когда Лавовое жерло проявляло активность, лава в нем под звуки, напоминающие вздох гигантского животного, подымалась и опускалась, причем иногда куски красной лавы отрывались от общей массы и, подлетев всего на 1—2 м вверх, падали обратно в жерло. Газ приподымал лаву, образующиеся пузыри иногда лопались, и газообразные продукты, освобождавшиеся при этом, силой давления подбрасывали куски лавы, оторванные от стенок этих пузырей. Над Лавовым жерлом стоял столб белого пара. 7-го лава в жерле продолжала подыматься и опускаться со звуком, напоминающим вздох; за 10 сек. насчитывалось 15 таких вздохов.

5) Взрывы

Взрывы в Соседнем жерле происходили чрезвычайно редко. Только однажды наблюдателем Романовым был констатирован таковой. В 15 ч. 31 м. 23 августа в Лавовом жерле произошел взрыв и на высоту в несколько метров взлетела глыба красной лавы. В тот же день, несколько раньше, в 15 ч. 05 м., наблюдали огненную вспышку.

6) Усиленные подачи лавы

На фоне равномерного излияния лавы иногда происходили усиленные подачи новых порций ее, обычно сопровождавшие сильные взрывы в Соседнем жерле. Сравнительно вязкая лава накладывалась на движущийся лавовый поток и некоторое время перемещалась на поверхности потока выпуклым валом.

7) Пульсирующая подача лавы

Сходной с предыдущим случаем является пульсирующая подача лавы. 5 августа в 14 ч. 30 м., после сильного взрыва в Соседнем жерле, из Лавового жерла лава стала подаваться отдельными порциями, пульсируя. Поверхность лавового потока вблизи жерла покрылась валами, которые некоторое время продвигались вместе с потоком и затем расплывались и сливались с массой его.

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖЕРЛ

Несмотря на то, что выходы жерл находились друг от друга на расстоянии всего нескольких метров, деятельность их и даже вещественный состав извержений заметно отличались. Как видно из сказанного, лава прежде всего отличалась температурой. Кроме того, лава Лавового и Основного жерл была пузыристая, а лава Соседнего — плотная. Из данных табл. 11а это различие в характере деятельности трех жерл видно отчетливо.

Таблица 11а

Различия в характере деятельности и составе продуктов извержения жерл Билюкая

Основное жерло	Жерло Соседа	Лавовое жерло
Почти непрерывно со взрывами, следовавшими один за другим (30 в минуту), выделялись газообразные продукты с примесью шлака и другого рыхлого материала	Периодически со взрывами громадной силы выбрасывались огромные столбы совершенно черного дыма, нагруженного рыхлым материалом. В промежутках между взрывами жерло обычно совсем бездействовало	Почти непрерывно изливалась лава. Иногда жерло парило

Явления, сопровождавшие извержение

Грохот, напоминающий выстрелы, рокот. Дугообразные волны, наподобие радуг, скачкообразно поднимающиеся по газовому столбу. Иногда дождь лапилли и вулканического песка	Гул и сотрясение почвы до выброса; рокот, сопровождающий выброс. Электрические разряды. Каменный и грязевой дождь	Чаще беззвучно, иногда со звуком, напоминающим кипение густой каши
--	---	--

Продукты извержения

Газообразные продукты белого и серого цвета. Твердые продукты: шлак, вылетающий в полупластическом состоянии, лапилли кружевные из зеленого стекла, вулканический песок шлаковый	Газообразные продукты черного цвета от примеси рыхлого материала. Твердые продукты: бомбы в форме остроугольных обломков, выброшенных в твердом состоянии, слабо светящиеся, с плотной структурой, вулканический песок лавовый	Газообразные продукты белого и голубого цвета. Лава жидкая, лимонно-желтого свечения
--	--	--

Уловить зависимости в характере деятельности жерл было очень трудно. Жерла Соседнее и Лавовое действовали с перерывами, Основное жерло — все время от момента прорыва до окончательного обвала (в период непосредственно после прорыва Билюкая — 22 февраля 1938 г. и в летний период июль — август — сентябрь 1938 г.); два жерла — Основное и Лавовое — были в действии в конечный период (ноябрь 1938 г.) и одно, Основное жерло — в промежутки ослабления деятельности (март 1938 г.). Удалось подметить, что тогда, когда действовали три жерла, усиление излияния лавы сопровождалось усилением и учащением взрывов в Соседнем жерле, а иногда одновременно со

взрывом в Соседнем жерле наблюдались усиленные подачи лавы из Лавового жерла. Что касается зависимости в работе Соседнего жерла и Основного, то здесь связь уловить было трудно. Иногда бывало, что со взрывом в Соседнем жерле Основное, точно поперхнувшись, на момент переставало действовать, но это было редко, чаще же они действовали независимо друг от друга. В табл. 12 дается характеристика работы трех жерл в один из дней одновременной их активности.

Таблица 12

Характеристика одновременной работы жерл Билюкая

Время (часы— мин.)	Основное жерло	Соседнее жерло	Лавовое жерло
11—13	Выбросы клубов серого дыма с шипением	Не было действия	Выделение белых паров, излияние лавы
11—20	Выделение серого дыма и бомб	Начало выделения белых паров	То же
11—22	Начало выбрасывания клубов дыма без грохота	Не было действия	» »
11—32	Отдельные взрывы	Выделение белых паров	» »
11—40	» »	Выброс серого дыма	» »
12—00	Начало выбрасывания клубов дыма с рокотом	Не было действия	» »
12—39	То же	Выброс черного дыма	» »
12—56	Выброс черного дыма	Выброс черного дыма с бомбами	» »
13—50	Сильные выбросы клубов дыма без грохота	Не было действия	» »
14—02	Выделение пара	То же	Излияние лавы, выделений пара нет
14—08	» »	Выброс черного дыма с бомбами, электрические разряды	То же
14—15	» »	Выброс	» »
14—35	» »	»	» »
15—18	Начало выбрасывания клубов дыма	Не было действия	» »
15—20	К серым клубам примешивались бомбы	То же	» »
15—35	Выделение паров прекратилось, с грохотом вылетали бомбы	» »	Излияние лавы, выделение пара
15—48	То же	Выброс	То же
15—49	» »	Не было действия	» »
16—00	» »	Сильный выброс	» »
16—08	» »	Один за другим два выброса	» »
16—13	» »	—	Усиленное выделение газа

В этот день Основное и Соседнее жерла дважды одновременно начинали выбрасывать клубы дыма и дым их сливался, но в большинстве случаев взрывы, происходившие в Соседнем жерле, не отражались на деятельности Основного жерла. Два раза вслед за взрывами в Соседнем жерле из Лавового жерла выжималась усиленная порция лавы.

В следующем примере активности Билюкая (табл. 13) взаимозависимость в деятельности трех жерл не улавливается почти совершенно.

Таблица 13

**Характеристика одновременной работы жерл Билюкая
21 августа 1938 г.**

Время (часы-- мин.)	Основное жерло	Соседнее жерло	Лавовое жерло
11—18	Выбрасывание бомб под рокот, сходный с морским прибоем, газа мало	Столбик серого дыма; после этого клубок пара	Непрерывное излияние лавы, слабое выделение пара
11—32	То же	Снова столбик серого дыма, после чего клубок серого газа	То же
11—50	» »	Столб серого дыма	» »
12—11	Усиление грохота	То же	» »
12—13	То же	Взрыв со столбом серого дыма	» »
12—27	То же	Взрыв и выброс серого дыма с бомбами	» »
12—55	» »	Слабое выделение дыма	» »
13—14	» »	Вместе с бомбами выбрасывание клубов дыма	» »
13—27	Начало выделения белого пара	Фонтан рыхлого материала	» »
13—35	Выделение белого пара	Взрыв и выброс столба дыма с бомбами	» »
13—47	То же	Выброс серого дыма	» »
13—58	» »	Фонтан рыхлого материала	» »
14—11	» »	Клубы серого дыма	» »
14—40	» »	Выброс серого дыма с небольшим количеством бомб	» »
14—44	» »	Выброс, после него фонтан рыхлого материала	» »
14—49	» »	Тройной взрыв и выброс столба черного дыма с бомбами	» »
14—53	» »	Выброс кудрявого столба серого дыма	» »
15—11	» »	Выделение клубов серого дыма	» »
15—42	» »	Взрыв и выброс черного столба дыма с бомбами	» »
15—49	» »	Выделение клубов серого дыма	» »

При излиянии лавы, т. е. во время действия Лавового жерла, Основное жерло было очень активным. Наоборот, когда лава не изливалась, Основное жерло проявляло себя слабо. С излиянием лавы обычно связана и активность Соседнего жерла, хотя не всегда. Так, по наблюдениям В. Ф. Попкова, в ноябре 1938 г. лава продолжала изливаться, а Соседнее жерло бездействовало.

7. ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

1) Землетрясения

При отсутствии прибора для регистрации колебаний почвы трудно говорить о сейсмических явлениях в районе извержения. Можно лишь отметить, что количество вулканических землетрясений в этом районе весьма велико, если в число их включать колебания почвы при взрывах. (Ночью, лежа на походной кровати, мы ясно ощущали эти колебания почвы, но днем обычно их не замечали.) Более сильные землетрясения были зарегистрированы нами дважды: 7 и 9 августа. 7-го в 22 ч. 15 м. было 4 вертикальных толчка силой в 3 балла; 9-го в 14 ч. 46 м. мы услышали исключительно сильный подземный грохот, как будто на глубине под нами что-то обвалилось, и одновременно ощутили слабое землетрясение. Эпицентр землетрясения в обоих случаях безусловно находился под Билюкаем.

2) Подземный гул

Подземный гул мы слышали под ногами, когда находились на лавовом потоке. Происходил он, вероятно, при обвалах на глубине, в связи с излиянием лавы на дневную поверхность. Гул глухой, короткий.

3) Дрожание конуса

Деятельность Основного жерла вызывает дрожание конуса, вернее его сотрясение. В один из дней повышенной активности Основного жерла мы поднялись на склон конуса. Это было 31 июля. Шлаковый материал на поверхности конуса шевелился. Некоторые куски лавы срывались и скатывались вниз по склону. Конус при взрывах в Основном и Соседнем жерлах содрогался. В марте, в момент пониженной активности, дрожание конуса не ощущалось.

4) Воздушные волны

Воздушные волны мы ощущали в тот же день, что и дрожание конуса. В этот день грохот при взрывах был необычен. Он был не резкий, без оттенков металлического звука, а приглушенный и очень громкий. При таких взрывах мы ощущали удары волн по телу. Вероятно, они вызывали сотрясение воздуха. Стоять у основания конуса было трудно, так как мы рисковали оглохнуть.

5) Световые эффекты — радуги

25 июля в 16 ч. 41 м. нами впервые было замечено своеобразное явление: по белому столбу пара, поднимающегося из Основного жерла, при взрывах пробегали вверх белые выпуклые волны. Следуя взрывам,

волны как бы скачками распространялись друг за другом вверх по столбу. Причина этого явления так и осталась окончательно не выясненной. Можно предположить, что это радуги, которые появляются при прохождении лучей света через столб газа, насыщенного капельками воды. Но в таком случае непонятно, почему они совершенно белые при резком перемещении («скачками») реагируют на взрывы.

6) Электрические явления

Для многих мест полуострова Камчатки, и в частности для района Ключевского вулкана, атмосферные условия настолько специфичны, что грозы бывают исключительно редко. Но зато грозы в миниатюре, сопровождающие извержение Билюкая, принадлежат к очень частым явлениям. Электрические разряды происходили только в дымовом столбе, выброшенном из Соседнего жерла, и возникали, вероятно, от трения твердых частиц друг о друга. Грома, какой обычно сопровождает молнии при грозах, в нашем случае не было, а электрические разряды сопровождалась сухим коротким треском, слышимым на расстоянии всего лишь одного километра. Молнии были преимущественно линейные, очень редко шаровые. Линейные молнии, по нашим наблюдениям, возникали на границе двух столбов, выброшенных один вслед за другим. Электрических разрядов при извержении Главного кратера Ключевского вулкана мы не наблюдали, но при извержении Авачинского вулкана они имели место. Вероятно, это объясняется значительной высотой Ключевского вулкана (около 5000 м).

При исследовании магнитных свойств лав Билюкая было установлено, что эти электрические разряды слишком слабы, чтобы вызывать добавочное намагничивание лавы. Еще Левинсон-Лессингом (1933 г.) было доказано на лавах Карадага, что грозовые разряды могут добавочно намагничивать горные породы почти до полного их насыщения. В этом случае остаточная индукция в естественном состоянии и после воздействия на образец искусственного основного электрического поля остается без изменения, т. е. можно говорить об атмосферном магнетизме, наложенном на земной. В нашем случае мы этого не имеем (Набоко и Турцев, в печати).

7) Каменный и грязевой дождь

Каменный дождь, а также дождь лапилли и вулканического песка — обычное явление при извержении Билюкая. Каменный дождь шел из черного столба дыма Соседнего жерла, дождь лапилли — только из тучи основного жерла, а дождь песка — из выбросов обоих жерл, но чаще из Соседнего. Как уже говорилось выше, из черного столба дыма, вылетающего из Соседнего жерла, сразу же начинали падать в виде дождя куски лавы. Вниз они летели со свистящим звуком и, падая к подножью конуса, оставляли большие воронки в вулканическом песке. Так, куски лавы размером в 15—20 см давали воронки до 1.5—2 м.

Дождь лапилли мы наблюдали из белой тучи, скопившейся над Основным жерлом. Лапилли ввиду своей легкости (шлаковые — ажурные) падали медленно и достигали земли совсем охлажденными. Вулканический песок выпадал на площади радиусом в несколько километров. Песок из тучи Основного жерла был сухой, песок из дымовой трубы Соседнего жерла — мокрый.

8) Грохот

Непременным явлением при извержении был грохот разной силы и разных оттенков. Звуковые эффекты, сопровождавшие деятельность отдельных жерл, имели свои особенности, по которым можно было различить, какое из них действовало в данном случае. Так, активное состояние Основного жерла и, в частности, выделение струй газообразных продуктов с шлаком сопровождалось обычно грохотом с металлическим звуком. Такой металлический оттенок в тембре грохота характерен для Везувия, Стромболи и Килауза, отличающихся своими жидкими разбрызгивающимися лавами, и указывает на то, что жидкая лава находится вблизи поверхности. Вторым не менее распространенным звуковым эффектом был грохот, состоящий из отдельных выстрелов; в минуту насчитывалось от 26 до 32 выстрелов, иногда сдвоенных и строенных. Такой грохот сопровождал выбросы бомб. Иногда характер деятельности Основного жерла менялся — из него непрерывным потоком поднимался столб дыма. Звук, сопровождавший такое выделение газа, напоминал глухой рокот морского прибоя.

Соседнее жерло при взрывах издавало очень громкий грохот наподобие орудийного выстрела, взлет столба дыма сопровождался глухим шипением или рокотом.

Лава изливалась беззвучно, но иногда в Лавовом жерле был слышен чавкающий звук, какой издают лопающиеся пузыри при кипении густой каши. Такой звук указывал на значительную вязкость изливающейся из жерла лавы.

Грохот Билюкая распространялся на значительную площадь и доходил до с. Ключи, которые находились в 30 км от него.

8. РЕЗЮМЕ ПО ИЗВЕРЖЕНИЮ БИЛЮКАЯ

В деятельности Билюкая можно выделить следующие периоды:

I. Эксплозия большой силы и последующее изливание лавы (8 февраля 1938 г.).

II. Фонтанирование лавы с одновременными взрывами (до 30 в минуту) из Основного жерла и периодическое выделение пара из Соседнего (22 февраля).

III. Ослабление активности. Периодическое действие Основного жерла, когда часовые периоды покоя сменялись часовыми периодами активности, проявившейся в частых, но не сильных взрывах с выбросами бомб. Полное прекращение деятельности Соседнего жерла (конец марта и начало апреля).

IV. Изливание новой порции лавы (подробности неизвестны). Можно предполагать, что изливание, наблюдавшееся 25 марта, является началом этого периода.

V. Повышенная деятельность. Извержение через три жерла: Основное, Соседнее и Лавовое. Этот трехмесячный период делится на отдельные промежутки со своими характерными моментами.

1. Частые эксплозии Основного жерла средней силы. Полнейшая бездеятельность остальных жерл (9—12 июля).

2. Частые эксплозии средней силы Основного жерла и редкие, но чрезвычайно сильные эксплозии Соседнего (12—14 июля).

3. Переменная деятельность Основного жерла, появляющаяся в смене частых взрывов непрерывным и спокойным выделением пара, иногда нагруженного рыхлым материалом. Редкие и очень сильные эксплозии

Соседнего жерла. Непрерывное и спокойное излияние лавы из Лавового жерла (14 июля — 10 августа).

4. Непрерывное рокошущее выделение газообразных продуктов, насыщенных рыхлым материалом, из Основного жерла, редкие и очень сильные эксплозии из Соседнего жерла, усиленное излияние лавы из Лавового жерла (10—12 августа).

5. Переменная деятельность Основного жерла, более частые, но и более слабые эксплозии Соседа и уменьшение излияния лавы из Лавового жерла (13—15 августа).

6. Ослабление деятельности всех трех жерл (21—23 августа).

7. Фонтанирование лавы из Основного жерла, частые, но не сильные эксплозии из Соседнего, более слабая подача лавы из Лавового жерла (24—26 августа).

8. Эксплозии и появление миниатюрных экструзий из Основного жерла, частые и сильные эксплозии из Соседа и прекращение излияния лавы из Лавового (28—30 августа).

VI. Прекращение деятельности Соседнего жерла, эксплозии Основного жерла и излияние лавы из Лавового жерла (конец октября 1938 г.— февраль 1939 г.).

VII. Обрушение верхней части конуса и прекращение эксплозивной деятельности Билюкая (23 февраля 1939 г.).

VIII. Последние выжимки небольших порций лавы из Лавового жерла и парение из кратерного провала.

Таким образом, извержение побочного кратера Билюкая, в отличие от извержения Вершинного кратера Ключевского вулкана, у которого сила извержения нарастала постепенно до кульминационного периода и потом так же постепенно ослабевала, началось и кончилось катастрофически и происходило пульсируя. Извержение началось сильным взрывом с последующим излиянием лавы, после которого следовал период ослабления активности. В дальнейшем ходе извержения еще три раза наблюдались вспышки активности, сопровождавшиеся излиянием трех новых порций лавы. Извержение окончилось снова взрывом. Таким образом, и начало и конец извержения характеризуются взрывами, между которыми в ходе развития извержения происходило пульсирующее нарастание эксплозивной деятельности до наиболее сильной стадии в июле — августе 1938 г.; одновременно имело место ослабление эффузивной деятельности до минимума в эти же месяцы и последующее усиление их.

Здесь я не буду касаться вопроса, что обусловило прорыв новых кратеров и механизм образования их; он будет рассмотрен в конце настоящей работы. Но попытаюсь разобрать вопрос о механизме самого извержения Билюкая здесь своевременно.

Как уже было сказано, Билюкай действовал тремя жерлами. Лавовое и Основное жерла представляли ответвления от одного канала. Этот канал, шириной около 10 м, имел сечение круга и, судя по струе бомбы, вылетающей под углом к горизонту, был наклонен и как бы шел к центру Ключевского вулкана. Вблизи поверхности от основного канала шло ответвление на восток, выходящее у подножья конуса в виде Лавового жерла, которое имело также круговое сечение. Соседнее жерло являлось выходом самостоятельной трещины, параллельной основному каналу. В первый период лава после сильного взрыва поднялась по основному каналу, излилась на дневную поверхность и потекла вниз по склону. По трещине Соседа лава поднималась периодически через 3—6 минут, после того как скопившийся газ развивал дав-

ление до критического момента. Каждый раз при взрывном отделении газа в жерле была видна расплавленная лава. После излияния лавы в количестве 90 млн. м³ и исчерпания энергии очага лава перестала изливаться (март 1938 г.). Лава в трещине Соседа затвердела и закупорила трещину настолько, что из нее перестал выделяться газ и дно кратера приняло температуру воздуха. Газообразные продукты поднимались только по Главному каналу и освобождались или непрерывно или взрывно (до 30 взрывов в минуту) из Основного жерла. В дальнейшем, после накопления эффективной энергии, лава снова стала подниматься по каналу и изливаться через ответвление, выходящее на дневную поверхность у подножья конуса. Из Основного жерла по мере подъема все новых и новых порций лавы происходило отделение газовой фазы, так что лава из Лавового жерла вытекала в достаточной степени освобожденной от летучих компонентов. В это время в части очага под Соседним жерлом скапливались газы. Давление их возрастало до определенного критического момента, после чего они стали выделяться путем взрывов, увлекая с собой раздробленную затвердевшую лаву, выбрасываемую в виде остроугольных обломков. Взрывы происходили на глубине.

9. ОБЪЕМ ПРОДУКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Для побочного вулкана извержение Билюкая приходится считать очень сильным. Срок активности продолжительный — около года, масса продуктов извержения тоже значительная. За год действия нижний кратер Билюкай излил поток лавы длиной 16 км, шириной в среднем 1,5 км и высотой 10 м. Следовательно, объем излитой лавы равнялся 240 млн. м³.

Излияние лавы происходило четырьмя порциями: в момент прорыва кратера в феврале 1938 г. — 90 млн. м³; в период между апрелем и июлем 1938 г. — 60 млн. м³; с июля по сентябрь 1938 г. — 30 млн. м³; с октября 1938 г. по февраль 1939 г. — 60 млн. м³.

Количество взрывных продуктов значительно уступало количеству излитой лавы. Подсчет рыхлых продуктов более приближенный, так как они разносились на значительную площадь и учесть их было труднее. Всего выброшено 25 млн. м³. За период действия из рыхлых продуктов вырос конус в 200 м высоты с основанием 450 м (10 млн. м³). Вокруг Билюкач на площади радиусом в 1 км лег слой пепла мощностью у подножья конуса в 1 м (1 млн. м³). Кроме того, в момент прорыва кратеров пепел разнесся на большие расстояния и покрыл площадь радиусом в 30 км слоем в среднем в 5 мм (14 млн. м³). При последующем извержении рыхлые продукты рассеивались в небольшом количестве, и ими можно пренебречь, считая, что они шли в основном на образование конуса или выпали в пределах километрового радиуса. Как видим, эффузивного материала больше, чем взрывного. Эффузивный индекс =

$$= \frac{\text{количество эффузивного материала} \times 100}{\text{общее количество изверженного материала}} = \frac{240\,000\,000 \times 100}{265\,000\,000} = 90.6.$$

IV. ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ БИЛЮКАЯ

1. ЛАВА

Впервые огненно-жидкую лаву мы увидели 25 марта 1938 г. В этот день, в 20 час., у основания конуса Билюкая с восточной его стороны трижды вспыхивало огненно-желтое пятно. Лава в этот момент излилась тремя небольшими порциями, в результате чего образовалось как бы три ступени различной степени яркости окраски. Наблюдения велись тогда с километрового расстояния.

Более продолжительные наблюдения у самого Лавового жерла нам удалось организовать в июле — августе 1938 г. 11 июля, в 21 час. у подножья конуса, все в том же месте, как и в марте, опять вспыхнуло огненно-желтое пятно, которое, продержавшись очень непродолжительное время, потускнело. Излияния лавы на этот раз не произошло. Оно началось спустя три дня, 14 июля, и продолжалось непрерывно в течение нескольких месяцев. Лава все это время текла по руслу, проложенному в застывшем ранее лавовом потоке и представлявшем собой кашьюобразное ущелье глубиной в 5—6 м. Стенки русла были сглажены и покрыты продольными параллельными шрамами. Ширина дна лавовой реки у жерла достигала 80 м, вниз по течению она несколько раз менялась. Вдоль берегов протягивались шлаковые бугры.

Излияние лавы началось, следовательно, с того, что у основания конуса появилось огненно-желтое пятно, — это лава проплавила материал конуса; отсюда начала выжиматься лава. Ширина лавового ручья вначале была всего три метра и соответствовала, вероятно, диаметру жерла. На пути течения огненной массы находились нагромождения из застывшей ранее лавы; здесь поток разделился на два рукава. В 11 ч. 20 м. под сильным напором лава стала подниматься на глыбовые нагромождения и оттуда падать вниз огненными хлопьями. Через некоторое время глыба, не выдержав температуры и давления движущейся массы, начала ломаться и поглощаться огненной рекой, и после этого лава потекла непрерывным потоком, все расширяясь и расширяясь. Вначале лава текла по дну русла слоем толщиной около полуметра, но по мере излияния новых масс, ввиду замедления скорости течения лавы на более отдаленных от жерла участках, русло у жерла изо дня в день все больше и больше наполнялось лавой. Поверхность лавового потока на глазах непрерывно поднималась, и уже спустя полмесяца лава достигла берегов и начала переливаться через борта, в то время как в расстоянии 8 км от жерла русло было еще пустое. Различная скорость течения лавы наблюдалась вдоль

потока, поперек его и в глубину. Скорость движения более глубоких частей была большая, чем у поверхности, скорость течения в центральной части потока большая, чем у берегов. Таким образом, получилось расслоение, причем разные слои двигались с неодинаковой скоростью.

Поверхность лавового потока от жерла до места, находящегося на расстоянии 200 м, была ровной. На поверхности, почти от самого жерла, плыла масса обломков шлака, представлявших собой остатки разломанной лавовой корки. На некоторых участках на поверхности лавового потока наблюдались поперечные валы, образование которых было обусловлено двумя причинами: во-первых, как уже говорилось выше, валы возникали у жерла в те отрезки времени, когда лава подавалась из жерла пульсационно, толчками. Выжатые порции лавы ввиду своей вязкости некоторое время сохранялись на поверхности в виде гребней или волн и затем, на некотором расстоянии, расплывались в общей массе, так что поверхность лавового потока становилась ровной; во-вторых, волны появлялись на поверхности также в местах, где в рельефе имелся подъем. Здесь движение замедлялось, и новые порции лавы, двигаясь с большей скоростью и встречая препятствие, собирались в складки. Характер лавовой поверхности менялся на протяжении всего потока. Самое жерло представляло собой озерко, иногда с гладкой, иногда с пузыристой поверхностью. Вытекающая из жерла лава окружала выступ конуса, делала изгиб на север и затем текла прямо на восток. Здесь русло имело уклон около $10-12^\circ$, и на этом участке наблюдалось образование в шлаковой корке поперечных трещин. Спуск сменялся подъемом, что влекло за собой появление на лавовой поверхности волн. Метров через 30 подъем прекращался; лава текла по ровной местности, неся на своей поверхности массу шлаковых обломков. Дальше на пути потока встретилось большое лавовое нагромождение, и здесь новый лавовый поток терялся, вероятно проходил под этими нагромождениями. Вниз по течению через 1500 м снова обнаружилось русло и в нем лавовый поток. Лавовое русло на протяжении всего старого потока то терялось под большими лавовыми нагромождениями, то снова появлялось с резко выраженными крутыми берегами. В некоторых местах лавовая река разветвлялась на рукава.

Течение лавы сопровождалось характерными явлениями, в том числе звуковыми эффектами. Звук, очень типичный, напоминал звучание при перемешивании глиняных черепков и происходил от разламывания шлаковой корки, кусочки которой ударялись друг о друга. В самом Лавовом жерле иногда были слышны чавкающие звуки, возникавшие, когда подымались и лопались лавовые пузыри. В верховьях лавового потока над всей его поверхностью поднимался голубоватый газ; дальше от жерла, в расстоянии приблизительно 2—3 км, голубой газ исчезал и было видно только движение нагретого воздуха. Во время дождей и вскоре после них над текущим лавовым потоком поднимался густой белый пар от испарения дождевой воды. Взрывы на лавовой поверхности происходили очень редко; за месяц непрерывного наблюдения за течением лавы взрывы мы видели только в одном месте, а именно в месте ответвления от главного потока. Время от времени, через неправильные интервалы, слышался фукающий звук и вверх, вместе с клубком газа, взлетало несколько кусков лавы. Вообще же, как правило, выделение со взрывами газа из лавового потока наблюдалось редко, он выделялся из лавы спокойно. Признаком, по

которому мы определяли место дохождения лавы, являлись обвалы. Двигающаяся лава своим напором нажимала на берега и частично их подплавляла, в результате чего происходили обвалы застывшей лавы, поднимающие тучи розовой пыли.

Как было сказано, на поверхности лавового потока от самого жерла плыла масса кусочков шлака. По мере движения скорость у берегов замедлялась и шлак откладывался отдельными грядками на поверхности потока. Дальше, на расстоянии 2—2.5 км от жерла, на лавовом потоке двигалась уже масса более крупных глыб, а в расстоянии 4—5 км на поверхности потока плыли целые башни и скалы лавы. Масса материала, переносимого потоком, очень велика. Одна из двухжущихся башен на его поверхности имела 8 м в диаметре и высоту около 3 м, т. е. вес около 400 т. Скорость передвижения этой башни была 0.4 м в минуту.

1) Температура лавы

Температура лавы в жерле определялась приблизительно по цвету ее в ночное время, т. е. по цвету ее каления. Этим путем было определено, что температура лавы в жерле колеблется в пределах от 1200 до 900°. Через 10 дней после прорыва кратеров из Основного жерла бил фонтан лавы, имевший температуру около 1200°, так как в основании фонтана был почти белого цвета. Лава в Лавовом жерле в начальный момент излияния (14 июля) также имела температуру около 1200°, судя по ее светложелтому цвету. Во время некоторого затишья в активности Билюкая (в марте) температура лавы в Основном жерле была около 1000° (цвет ее был яркокрасный). Еще более низкую температуру имели лавовые экструзии из Основного и Соседнего жерл, когда цвет лавы был темнокрасный, что соответствовало температуре 900—1000°. Температура потока на различных участках была неодинаковая. Если в Лавовом жерле температура достигала 1200°, то в лавовом потоке, находящемся еще в состоянии движения (течения), она была значительно более низкой. Цвет текущей лавы в расстоянии 100—150 м от жерла был темнокрасный, что соответствует температуре около 900°.

По более точным данным химика И. З. Иванова, который измерял температуру лавы термопарой в расстоянии 600 м от кратера, лава, изливавшаяся в октябре, имела красное каление и находилась в состоянии движения при 870°. В 3000 м удаления от кратера лава продолжала двигаться, но с меньшей скоростью, была пластична и имела температуру 690°.

Интересно сопоставить эти цифры с данными Вольфа (Wolff, 1938) по другим вулканам. При извержении Санторинского вулкана андезитовая лава во время пароксизма имела температуру 900—950°, но, аналогично нашей билюкаевской, текла еще при 840°. Начальная температура купола запруживания лежала между 750—840°; пробка образовывалась при 756°. При пелейском извержении 1902 г. игла, выпятившаяся из жерла, по данным Лакруа, имела температуру около 840° (около точки превращения тридимита в кварц). Экструзия вязкотекучей пробки Лассен-Пик в 1914—1915 гг., по Дзю и Аллену, имела 600—750°. При излиянии магмы из Сакурэшима в 1914 г. измерение температуры лавы в трещине, находящейся в состоянии желтого каления, дало 995—1048°, а лавы красного каления — 857°. У вулкана

Азама (Hantke, 1939) поверхность лавовой пробки имела температуру 1000°.

Билукаевская базальтовая лава в связи с медленной отдачей газа продолжительное время находилась в пластическом текучем состоянии и характеризовалась широким температурным интервалом от 1200 до 690°.

2) Скорость течения лавы

В лавовом потоке, имеющем однородный состав, движение осуществлялось послойно. В различных точках, в зависимости от глубины, а также от удаления от бортов, скорость течения была неодинаковой. В верхнем слое скорость была меньшей, чем в более глубокой части потока, в центральной части — большей, чем у берегов. Кроме того, с удалением от жерла скорость течения лавы как на поверхности потока, так и в глубоких частях его уменьшалась. С течением времени на лавовом потоке образовывалась твердая корка, под которой продолжалось движение еще пластичной массы. Вообще, за исключением частей потока, непосредственно прилегающих к жерлу, передвижение совершалось в нижнем, способном к пластическим деформациям слое, под покровом верхней, застывающей и разламывающейся корки.

Изменение скорости течения лавы удалось произвести только на поверхности лавового потока. Скорость подсчитывалась так: измерялось определенное расстояние по борту потока на поверхность потока, приблизительно в центральную часть, бросали глыбу лавы и следили по секундомеру, за какое время она доплывала до намеченной точки. Измеренная таким путем скорость передвижения верхнего слоя лавового потока составляла:

Расстояние от жерла, м	10	30	50	100	200	1000	3000
Скорость, м/мин.	30	14	10	6	5	0.6	0.4

Измерения производились 15 и 23 июля 1938 г. Июльский лавовый поток начал изливаться 14-го в 11 час. и к вечеру (в 20 час.) достиг точки, расположенной в 1 км от жерла, т. е. за 9 час. прошел 1000 м. 16-го, в 20 час., конец потока находился уже в расстоянии 3000 м, т. е. за следующие двое суток (48 час.) он прошел еще 2000 м. Скорость потока замедлялась с удалением от кратера, а потому уровень лавы в русле вблизи жерла все время повышался.

С 22 августа лава начала переливаться через борта, спустилась к основанию конуса и пошла по песку вдоль старого потока. За сутки поток прошел 230 м, т. е. обладал скоростью значительно меньшей, чем в главном русле. За вторые сутки этот поток прошел еще 195 м и, наконец, за третьи сутки еще 24 м. 6 сентября к подножью спустился новый лавовый поток и направился вдоль старого. За 48 час. этот поток прошел 1200 м.

В июле — августе 1938 г., спустя полгода после прорыва кратера и излияния лавы, поток обнаруживал все стадии застывания: лава, излившаяся в момент прорыва Билукаея (февраль), к этому времени совершенно прекратила движение; лава, излившаяся в апреле, еще двигалась — конец этого потока за 15 дней продвинулся на 8 м; наконец, лава, излившаяся в июле — августе, перемещалась со скоростью до 30 м в минуту.

3) Вязкость лавы

О вязкости лавы мы могли судить только по косвенным признакам, поскольку не располагали в поле вискозиметром. К таким признакам относится, прежде всего, скорость течения лавы. Как было сказано, в расстоянии 20 м от жерла лава текла со скоростью 30 м в минуту по уклону в 8° и прошла всего 16 км по местности, имеющей средний уклон в 5° . По этим данным можно было судить, что лава обладала большой подвижностью. Вязкость лавы зависит от химического состава, в частности от количества летучих компонентов, и от температуры. Базальтовая магма Биллюкая содержала большое количество летучих компонентов, в том числе фтор, который очень сильно понижает вязкость. Так, например, по опытам Воларовича (1939), добавка CaF_2 при плавке диоритов в количестве 13,5% при температуре 1400° уменьшает вязкость в 7 раз, а при 1200° — в 17 раз. На вязкость лавы сильно влияет также присутствие паров воды, HCl и NH_4OH . Влияние газов на вязкость, по Воларовичу, выражается в случае H_2O и HCl в растворении газов, а в случае NH_4OH — в накоплении газов в виде пузырьков с образованием дисперсной среды типа жидкость — газ. Благодаря такому влиянию летучих на вязкость лава, имея температуру 690° , находилась еще в текучем состоянии.

Мы располагаем некоторыми данными, чтобы подсчитать вязкость по теоретическим формулам. Пальмер, применяя формулу Черн к извержению Мауна-Лоа в 1919 г., нашел, что поток воды в этих условиях должен был течь в 11 раз быстрее, чем наблюдалось для потока лавы. Принимая удельный вес лавы, обогащенной газами, в 1,4, он сделал заключение, что вязкость лавы в 15 раз больше, чем вязкость воды. Значительно раньше, в 1840 г., Беккер установил, что вязкость лавы Киллауэа в 60 раз больше вязкости воды. В обоих случаях авторами принималось, что поток лавы подчиняется законам турбулентного движения. Никольс (Nickols, 1939), критикуя подсчет Пальмера, подчеркивает, что экспериментальные данные определения вязкости сухих расплавов базальтов очень расходятся с данными, вычисленными по формулам турбулентного движения. Если же принять, что движение лавовых потоков ламинарное, то подсчеты по полевым наблюдениям согласуются с экспериментальными данными. Никольс применил формулу Джеффриса для лавового потока Алика и получил вязкость в 28 700 раз большую, чем подсчитал Пальмер. Пользуясь формулой Джеффриса для лавового потока Биллюкая, мы получаем вязкость равную $1,6 \cdot 10^4$, близкую к величине, полученной Воларовичем экспериментально в лаборатории.

Формула Джеффриса имеет следующий вид:

$$v = g \cdot \frac{\sin A \cdot d^2 \cdot p}{3\mu}$$

где v — средняя скорость на глубине (для Биллюкая 30 м в минуту), g — ускорение силы тяжести ($=981$), A — угол наклона местности (в месте измерения 10°), d — глубина (1 м), μ — коэффициент вязкости, p — удельный вес (1,4, по аналогии). Отсюда коэффициент вязкости для Биллюкая:

$$\mu = \frac{0,171 \cdot 10\,000 \cdot 1,4 \cdot 981}{150} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ пуазов.}$$

При этом методе подсчета вязкости не учитывается температура лавы, хотя вязкость лавы, как мы знаем, в первую очередь зависит от ее температуры. Правда, скорость лавового потока уже в некоторой степени отражает температуру, но зависимость этих факторов, вероятно, не простая, а сравнительно сложная. Вольф (Wolff, 1938) в одной из своих последних работ, посвященных подсчетам некоторых величин санторинского извержения 1925—1926 гг., дает формулу для подсчета коэффициента вязкости, в которой учитывается температура лавы, но формула эта очень сложная и требует знания многих величин, которые трудно определить при извержении того или иного вулкана, например напорную высоту, разницу давления в начале и конце трубы, т. е. в жерле и очаге, и т. д.

4) Остывание лавового потока

С течением времени лавовый поток остывает. Твердая лавовая корка, охлажденная до температуры воздуха, на некоторых участках лавового потока образуется скоро. Так, например, через 10 дней после прорыва Билюкая и излияния на дневную поверхность лавы, в отдельных местах на поверхности потока уже лежал и не таял снег, в то время как под лавовой коркой в продолжение нескольких месяцев сохранялась огненно-жидкая лава с температурой около 900°. Насколько быстро образовывалась шлаковая твердая корка, можно судить по тому, что она появлялась и тут же ломалась в расстоянии всего 100 м от места выхода лавы (жерла), но температура этой твердой корки была еще настолько высока, что бумага при соприкосновении с ней воспламенялась. В застывшей лавовой корке, на которой можно было свободно стоять, в трещинах видна огненно-красная пластическая лава.

Над температурным режимом застывающего лавового потока нами велись систематические наблюдения. Измерение температуры лавы производилось в 6 точках, расположенных линейно вдоль потока, причем в одной точке измерялась температура фумаролы, в трех — самой лавы и в двух — вулканического песка, через который просачивался газ. Хотя остывание лавового потока происходило неравномерно, можно сказать, что температурный режим этих точек близок и имеет общие моменты, находясь в зависимости главным образом от внешних атмосферных условий. Характер деятельности жерл Билюкая совершенно не отражался на температуре лавы и вулканического песка, температура же фумаролы колебалась в пределах нескольких градусов. Кроме того, было замечено, что при сильных взрывах в Основном жерле увеличивались порции газа, поднимающегося по трещине, и соответственно на несколько градусов возрастала температура. Продвижение изливающегося лавового потока тоже не влияло на температуру старой застывшей лавы, даже когда к градуснику очень близко подходила новая лава. Зато атмосферные условия определенно отражались на температурном режиме лавы. Так, например, 28 июля после дождя во всех точках температура значительно упала, примерно, с 135 до 50°. Прежняя температура восстанавливалась в различных точках не одинаково. В месте активно бьющей газовой струи она восстанавливалась на следующий день; в точках измерения температуры лавы — только через 4 дня; в вулканическом песке температурные условия резко изменились, так как после дождя образовалась цементированная корочка, прекратившая доступ вулканического газа. Лишь после того, как эта корочка была разбита, температура быстро восстановилась.

Таким образом, можно сказать, что температурный режим застывающего лавового потока зависит от атмосферных условий. Температура лавы не регулируется расстоянием от кратера; в местах прорыва лавового панцыря в удалении от кратера температура вытекающей лавы бывала значительно более высокой, чем в ряде точек, расположенных у подножья конуса.

5) Механизм образования «аа» лавы

Базальтовая лава, излившаяся из кратера Билюкая, застыла в лавовый поток «аа», иначе — образовала глыбовую поверхность с глыбами различной величины, от глыб диаметром в несколько метров до обломков в несколько сантиметров. Форма их самая разнообразная и причудливая, но обычно углы сглажены. Поверхность глыб или ровная, в случае плотной лавы, или шероховатая, когда лава пузыристая.

Нам удалось быть свидетелем формирования потока с глыбовой поверхностью. Нельзя отрицать роли движения в образовании глыбовой лавы: верхний слой лавы остывал, текущая под этим слоем пластическая масса разламывала корку и продвижение потока сопровождалось переваливанием глыб. Но такое состояние потока может иметь место только при неравномерном остывании и неодинаковой вязкости различных слоев, которая в свою очередь зависит от неравномерного распределения летучих компонентов. Верхний слой терял летучие, становился вязким и затвердевал; образовавшаяся корка задерживала выделение летучих; лава под коркой продолжительное время оставалась пластичной и при наличии уклона, хотя бы небольшого, продолжала двигаться. Под ее напором застывающая корка трескалась и ломалась, с образованием глыб.

В лавовом потоке Билюкая имеется несколько типов лавовых поверхностей. Нам удалось наблюдать следующие: 1) грубоглыбовую, 2) мелкообломочную, 3) ветвистую, 4) пенистую, 5) горизонтально-расщепленную («гармошка»), 6) вертикально расщепленную, изогнуто-зубчатую («книжка»), 7) в редких случаях скрученную («стружка»).

Обычно перечисленные формы поверхности встречались в обособленных участках на общем фоне беспорядочной глыбовой поверхности. Такое разнообразие форм проявления может быть объяснено упомянутой неодинаковой вязкостью лавы в различных частях потока, в свою очередь зависящей от неравномерного содержания газов по всему полю застывающего и оформляющегося потока.

Грубоветвистая и пенистая поверхности образуются при спокойном испарении газов из лавы, обогащенной ими. Лава в этом случае обычно шлаковая. Количество пузырьков значительное, приближается к 50%. Поры пустые, овальные или неправильной формы. Лава черная, и поры имеют глянцевую, стекловидную, как бы оплавленную поверхность. Глубже лава более плотная.

Горизонтально расщепленная форма присуща отдельным, обособленным в лавовом поле, вытянутым участкам, проходящим перпендикулярно или наискось к направлению потока, и вызвана вторичными лавовыми струями. В этом случае происходило, вероятно, разжижение лавы в результате скопления газов или газовых реакций. Разжиженная лава прорывала броню и выжималась отдельными пластами. Вследствие уменьшения объема при выделении газов происходило расслоение по плоскостям. Такие лавовые струи и были встречены нами несколько раз в 2—3 км от кратера. Наблюдалось несколько пластов

толщиной в 10—15 см отделенных друг от друга знающими трещинами, с шероховатой поверхностью ограничения, причем нижняя плоскость была более шероховатой и имела свисающие соски или ветки, напоминающие сталатиты. Лава темносерого цвета матовая в свежем изломе, пузырьки мелкие, удлиненные и вытянутые цепочкой параллельно плоскостям ограничения. Количество пузырьков не превышало 20—30%.

Вертикальное расщепление встречалось чаще, чем горизонтальное, притом по всему потоку, но приурочивалось к краевым частям. Лавовый покров расщеплен на пласты, в верхней своей части обычно закрученные — завернутые. Вверху толщина пластов до 10 см, книзу она увеличивается до 50 см. Пласты разделены зияющими трещинами, шириной в верхней части до 0.5 м. Направление трещин в различных частях лавового потока различное, хотя и параллельное между собой в отдельных зонах, чаще проходящее косо к направлению движения потока, иногда параллельно. Завертывание пластов в верхней части обратное направлению движения. Плоскости ограничения вертикальных пластов шероховатые, занозистые. Иногда от поверхности можно отделить тонкие шероховатые пластины. Такая форма поверхности напоминает свежевспаханное гигантским плугом поле. Вертикальное расщепление с заворотами образуется при передвижении более глубоких частей потока с несколько большей скоростью, чем верхних, как бы отставании в движении последних. Отсюда понятна и загнутость пластов в направлении, обратном движению. Естественно, что это явление связано уже с самым последним периодом остывания, когда верхние части затвердели, а более глубокие были еще настолько пластичны, что имели медленное поступательное движение. Аналогичные поперечные трещины возникали на наших глазах на поверхности изливающегося потока, о чем было сказано выше.

На лавовом потоке встречены также отдельности — скорлуповато-шаровая и столбчатая. Первая наблюдалась как в больших глыбах, так и в мелких. Скорлупы отделялись друг от друга и поверхности их покрывались красной пылью — окислялись по трещинкам. Несколько раз была встречена столбчатая отдельность в сочетании с плитчатой. Здесь имелись две системы трещин — горизонтальных и почти вертикальных, пересечением которых лавовые глыбы разбивались на кубы и призмы. Чаще же отдельности вовсе не проявлялись, и мы имели глыбы фантастической формы, нагроможденные друг на друга.

«Аа» лава характеризуется особым механизмом затвердевания, относительно сущности которого имеется несколько точек зрения. Вашингтон (Washington, 1923) видит различие между глыбовой и волнистой лавой не столько в химическом составе, сколько в значительно большей текучести «аа» лав благодаря повышенному содержанию газов и поэтому в более скорой их кристаллизации. При охлаждении «аа» лав их текучесть в продолжение большего промежутка времени уменьшается очень незначительно; лава течет при этом подобно глетчерному льду. С дальнейшим понижением температуры текучесть внезапно падает до очень малой величины, так как внезапно доходит до конца и выделение газов — все закристиаллизовывается. Меркалли (Mercalli, 1907) вывел правило, что лавы, богатые газами, быстро текущие и застывающие целиком или почти целиком в кристаллическую массу, представляют «аа» лаву, в отличие от лав, бедных газом, очень вязких, стеклообразно застывающих и образующих пахоухэу лаву.

Джагар считает, что отличительной особенностью типичной «аа»

лавы является расчленение поверхности, при ее сокращении, на отдельные участки — от нескольких сантиметров до нескольких метров в поперечнике. Каждый такой участок представляет одно законченное целое и обычно не имеет разбитых поверхностей. Рэк, описывая потоки лав Дафни, характеризующиеся хаотической глыбчатой поверхностью, считает, что напряжение, возникающее в застывающих стекловидных лавах, приводит к появлению трещин, при образовании которых некоторую роль играли также напряжения, возникающие благодаря текучести еще не застывшего, более глубокого слоя, и явления сдавливания вулканических пробок.

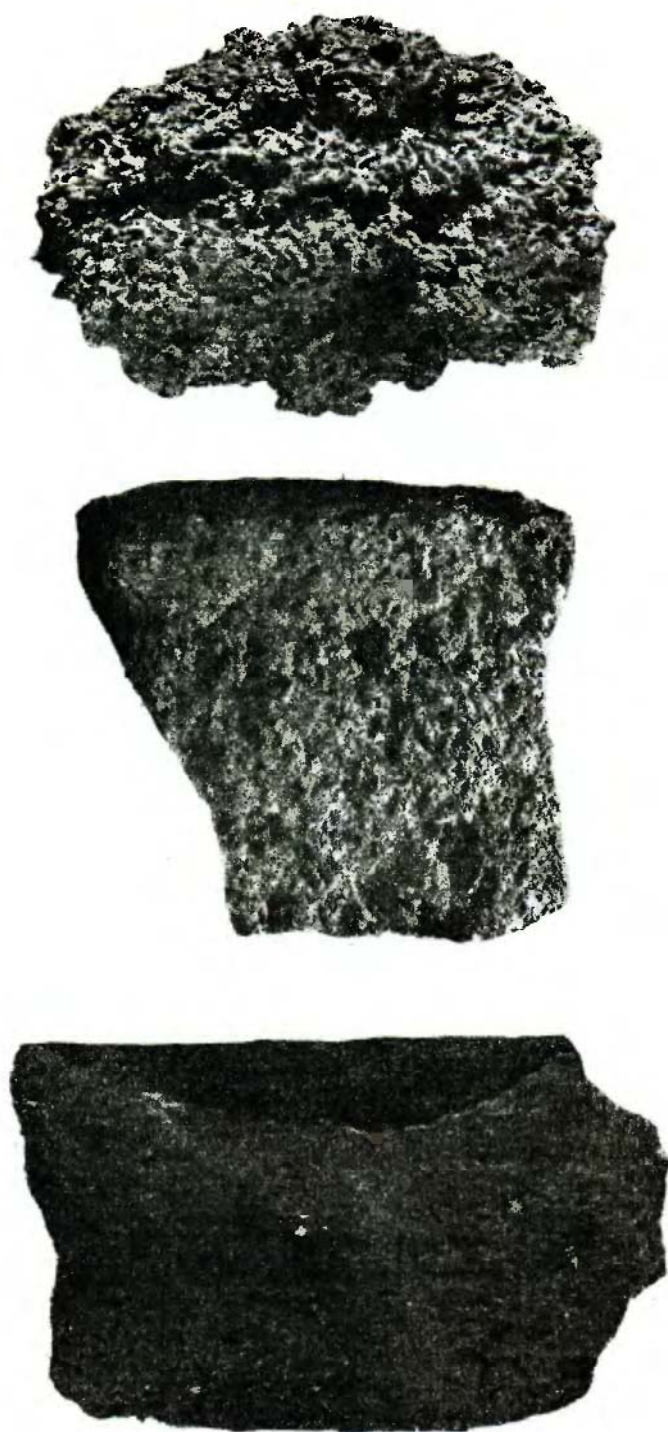
Финч (Finch, 1933) и Джонс (Johnes, 1937) проводят различие между «аа» лавой и глыбчатой. «Аа» лава у них характеризуется неровной шлаковой поверхностью обломков, глыбчатая лава имеет гладкие разломы. Вязкость глыбчатой лавы на месте ее выхода на дневную поверхность обычно значительно больше, чем у «аа» лавы.

Джонс считает, что все потоки близки к смешанному типу. Волнистая лава, образующаяся у устья, становится «аа» лавой при быстром движении по крутому склону при температуре, близкой к затвердеванию. Эмерсон указывает, что пахоухэу лава образуется при спокойном охлаждении, а «аа» лава — при охлаждении в процессе движения. Лакруа (Lacroix, 1936) при описании лавового потока вулкана Питон де ла Фурнез различает несколько типов лавовых поверхностей. Основную роль он приписывает газам в период раскристаллизации. В частности, глыбчатая лава имела более низкую температуру, легко теряла газ и лучше кристаллизовалась.

В. И. Влодавец (1940а) при описании потоков паразитических кратеров объясняет образование их тем, что потоки раздроблялись на обломки и в процессе движения преобразовывались в «аа» лавы. Лавовые потоки, разбитые на глыбы, но без нагромождений, Влодавец считает содержащими несколько меньше газа, чем «аа» лавы, и переходящими в твердое состояние после остановки их движения.

6) Петрографический состав лавы

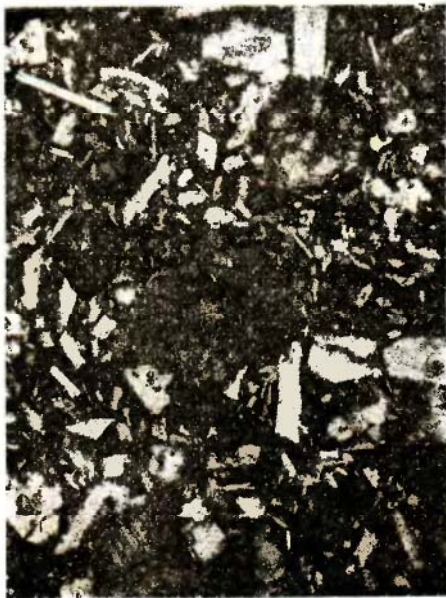
Лава из потока Билукая представляет темносерую породу с матовой поверхностью в свежем изломе, а иногда со стеклянным блеском. Плотность породы различная (фиг. 20): от шлаковой, для которой может быть применен термин «спумолитовая», данный А. Н. Заварицким пористым лавам независимо от их петрографического состава, когда объем пор не меньше, чем объем каменной массы, до совсем плотных, где поры не обнаруживаются и под микроскопом. Размер пор варьирует в широких пределах от 0.01 мм до нескольких миллиметров. Форма пор обычно неправильная, реже округлая. Ориентировку наблюдать удается редко. Невооруженным глазом на фоне однородной темной массы различаются мелкие вкрапленники, размером не превышающие 1 мм, светлосерого плагиоклаза, темнозеленого, почти черного пироксена и зеленого оливина. Такой характер лавы преобладает в потоке Билукая. Но встречается целый ряд участков лавы, имеющих несколько иной вид. Сюда можно отнести буро-коричневую шлаковую лаву с вкрапленниками черного пироксена или пузыристую лаву черного цвета, в которой внутренняя поверхность пузырей имеет как бы оплавленный вид, а поверхность сосочков глянцевая, что в свежем изломе придает породе блеск. Кроме того, встречаются участки очень плотной темносерой, почти черной лавы с почти полным отсутствием



Фиг. 20. Текстура лавы Билюк — различная степень пузыристости. Умен. в 1,5 раза.



Фиг. 21. Структура лавы Блюкая. Увел. в 30 раз.



Фиг. 21. Структура лавы Блюзая. Увел. в 30 раз.

пор, в которой ярко выделяются вкрапленники светлозеленого оливина с диаметром в 1—2 мм.

В лаве наблюдаются участки, переполненные мелкими ксенолитами более плотного и светлого базальта, а однажды был встречен агрегат кварца. В бомбах, выброшенных Соседним жерлом, были обнаружены зеленые включения размером 2×5 см, состоящие из зеленого оливина и розоватого пироксена. Вероятно, это первые продукты кристаллизации, которые благодаря закалке не успели расплавиться.

Микроскопическое исследование образцов из лавового потока показало полную однородность лавы в смысле минералогического состава. Отличие проявляется в структуре и в количественном соотношении минералов, вкрапленников и микролитов (фиг. 21).

Лавы обладает порфировой гипокристаллической структурой с гналопидитовой основной массой. Фенокристаллы плагиоклаза, пироксена и оливина плавают в основной массе. Последняя состоит из стекла разного цвета — от темнубурого, почти черного, совсем непрозрачного, до светлозеленого прозрачного. В стекло погружены микролиты плагиоклаза и пироксена. Количественные соотношения стекла и кристаллической части в основной массе колеблются от преобладания стекла — и тогда структура приближается к витрофировой — до преобладания кристаллического вещества, когда стекло занимает только промежуток между соприкасающимися друг с другом табличками плагиоклаза, — и тогда структура приближается к интерсертальной. Витрофировая и интерсертальная структуры встречаются редко; первая обнаруживается в бомбах, особенно в их внешней оболочке, и в закаленной лаве, интерсертальная — в плотном базальте из нижних частей потока. Наиболее распространенной является андезитовая структура.

Минералы по размерам резко разделяются на три группы: фенокристаллы плагиоклаза, пироксена и оливина диаметром до 2 мм, микролиты плагиоклаза и пироксена размером 0.1 мм и, наконец, видимые в стекле только с объективом № 7 тончайшие волокна плагиоклаза и пироксена. Чаще в породе имеются только две генерации — фенокристаллы и микролиты.

Из минералов, кроме перечисленных, постоянно присутствуют еще апатит, рудные минералы, в основном магнетит, и стекло. Количественно среди фенокристаллов почти всегда преобладает плагиоклаз, затем идут пироксен и оливин. Среди микролитов также преобладает плагиоклаз, пироксена меньше.

Плагиоклаз в фенокристаллах часто имеет идиоморфные очертания. Внутренние части кристаллов, как правило, переполнены включениями стекла, внешняя зона чистая, совершенно прозрачная. Степень загрязнения плагиоклаза стеклом различна, в некоторых случаях содержание включений достигает 50%. Часто встречаются фенокристаллы зонального строения с прямым и, реже, обратным порядком зон числом до 10 и больше. Погасание плагиоклазов иногда волнистое и секториальное. Встречаются разорванные фенокристаллы с оттянутыми частями. Кроме того, часто фенокристаллы корродированы — разъедены основной массой, так что их идиоморфные очертания ступеньчатые. Плагиоклаз фенокристаллов относится к битовниту и сдвойникован по альбитово-карлсбадскому и карлсбадскому законам. Микролиты в некоторых образцах более кислые и сдвойникованы также по карлсбадскому закону и закону $\frac{[001]}{(001)}$. В одном образце и вкрапленники и

микролиты имели одинаковый номер (№ 76—77) и были сдвойникованы по карлсбадскому закону.

В табл. 14 и 15 приводятся замеры плагиоклазов.

Таблица 14

Результаты замеров плагиоклазов из лавового потока Билюкая

№ обр.	Характер плагио-клаза	Ng	Nш	Np	2V	№	Закон
24	Вкрапленник . .	71°	29°	78°	+82°	80	Альбитово-карлсбадский ⊥ [001] (010)
	» . .	73	28	68	+80	75	То же
	Микролит . . .	56	53	57	+80	65	Ала-А ⊥ [100] (010)
846	Вкрапленник . .	56	81	87	+80	76	Карлсбадский [001]
	» . .	60	84	88	-88	77	То же
	Микролит . . .	73	40	56	+78	40	» »
879	Вкрапленник . .	57	82	36	-88	76	Карлсбадский [001]
	Микролит . . .	72	25	70	+84	77	» ⊥ [001] (010)

Таблица 15

Замеры плагиоклазов из лавы Билюкая в разрезах максимального угасания

№ обр.	Характер плагио-клаза	Угасание	Зона	№ плагио-клаза
874	Вкрапленник незональный	37°	⊥ PM	70
	То же	36	»	66
	Вкрапленник зональный:			
	ядро	38	»	75
	оболочка	33	»	60
	Вкрапленник незональный	38	⊥ M	75
867	Вкрапленник незональный	36	⊥ PM	66
	Вкрапленник зональный ядро	37	»	70
	Микролит	32	»	58
	Вкрапленник			
	ядро	37	»	70
	средняя зона	40	»	85
	внешняя »	34	»	62
	Вкрапленник зональный			
	ядро	40	»	85
	периферия	38	»	75
	Вкрапленник			
	ядро	32	»	58
	I зона от ядра	25	»	45
	II » » »	20	»	36
	III » » »	16	»	34

Из табл. 15 видно, что зональный плагиоклаз обычно имеет ядро с 70—85% и периферическую оболочку с 60—75% анортитовой молекулы. Но в табл. 15 приведены и замеры двух необычных вкрапленников — одного кислого, с ядром № 58 и периферией № 34, более кислой, чем даже микролиты, и второго с повторной зональностью, а именно: ядро № 70, первая зона более основная — № 85 и самая внешняя зона снова более кислая — № 62.

Трудно себе представить, чтобы подобная, неоднократно повторяющаяся зональность была обусловлена повторными явлениями переслаждения или повторным числом ассимиляций. В. Н. Лодочников считает, что такая зональность может быть вызвана и явлениями гидролиза плагиоклазов в связи с увеличением количества неоднократно прорывающихся из более низких горизонтов магмы паров и газов. По его мнению, такой гидролиз разлагает анортитовые молекулы сильнее, чем альбитовые, отличающиеся гораздо более трудной растворимостью, так что в момент увеличения количества паров должна будет возрасти кислотность отлагающихся в это время оболочек плагиоклазов по сравнению с тем их составом, который получился бы, если бы такого увеличения паров не происходило. В действительности пульсация газовых продуктов — постоянное явление при вулканических процессах, но повторяющаяся зональность плагиоклазов, в частности для нашего случая, явление редкое.

Пироксен в лавах Билукая только одного вида, моноклинный. Он обычно имеет идиоморфные очертания, но крупные вкрапленники чаще представляют собой агрегат зерен. Очень часты фенокристаллы пироксена двойниковой структуры и зонального сложения. Цвет очень светлый в желтовато-зеленых тонах, плеохроизм отсутствует. Количество его от 2 до 14%.

Оптические свойства пироксенов приведены в табл. 16.

Таблица 16

Результаты замеров пироксена из лавового потока Билукая

№	CNg	2V	Цвет	Ng	Nm	Np	Плеохроизм
874	42°	+64°	Светлозеленый	—	—	—	Отсутствует
	46	+66	»	—	—	—	»
	46	+62	»	—	—	—	»
879	46	+74	»	1.702	1.678	0.024	»
	48	+58	»	—	—	—	»

По оптическим свойствам, по форме и наличию широких двойников и по зональному угасанию пироксен ближе всего подходит к группе диопсидов.

Оливин встречается во всех образцах лавы, но количество его варьирует от 0.8 до 9.5%. Размеры в отдельных фенокристаллах, достигающие 2 мм, также непостоянны. Оливин прозрачен, трещиноват, почти всегда окружен тоненькой рудной каемкой или, реже, каемкой моноклинного пироксена. Форма округлая. Свойства обычные: 2V = — 80, — 82°; Ng = 1.694, Np = 1.658. По оптическим свойствам оливин типа хризолита и имеет в своем составе до 10% фаялита или же 50% MgO и 10% FeO (по показателям преломления).

Апатит в лавах Билокая является очень редким минералом. Он был встречен всего несколько раз в виде мелких зерен в основной массе, а также включенным в плагиоклаз и пироксен.

Рудный минерал, наоборот, распространен, но количество его подсчитать трудно, так как он обычно присутствует в виде сыпи в основной массе, иногда обнаруживаемой только с объективом № 7. Рудный минерал встречается также и в более крупных зернах, как в основной массе, так и в фенокристаллах пироксена, плагиоклаза и оливина, и, наконец, он очень распространен в виде каемки вокруг оливина.

Основная масса состоит из стекла разной окраски — от темно-рового, почти черного, слабо прозрачного, до светлозеленого, прозрачного. Показатель преломления колеблется в небольших пределах; он всегда выше, чем у канадского балзама.

Около пор стекло обычно более темноокрашенное. А. Н. Заварицкий наблюдал темноокрашенные ореолы стекла вокруг кристаллических выделений в лавах мергенских шихлунитов и объяснил образование их относительным обогащением железом ближайших участков раствора, прилегающих к растущим кристаллам. Темные же ореолы вокруг пор в наших лавах можно объяснить окислением стекла газами, скопившимися в пузырьках.

Особенностью структуры является, во-первых, флюидальность в некоторых участках лавы, обусловленная ориентированным расположением микролитов. Флюидальность определяется, кроме того, сменой изгибающихся полос более темноокрашенной и более светлоокрашенной основной массы, зависящей в свою очередь от различной окраски стекла и различной его раскристаллизованности. Часто микролиты обтекают фенокристаллы и окружают большие поры. Около таких пор, как уже было сказано, стекло обычно окрашено в более темный цвет.

Второй особенностью структуры является наличие гломеропорфировых элементов, когда вкрапленники сгруппированы в зернистые агрегаты. Обычно такая кучка минералов, величиной всего в 2.5 мм, состоит из десятка зерен пироксена, оливина и плагиоклаза, совместно или в отдельности, например из нескольких идиоморфных кристаллов плагиоклаза или из зерен пироксена.

Третьей особенностью структуры является наличие элементов катаклаза. Фенокристаллы плагиоклаза часто обнаруживают волнистое облучное угасание и разорваны, причем части зерен отделены друг от друга основной массой. Встречаются также и разорванные фенокристаллы оливина. Пироксен иногда имеет мозаичное погасание. Все это объясняется возникающим напряжением в находящемся еще в движении потоке, который достиг уже достаточной вязкости. То, что разрыв зерен вызван этими причинами, подтверждается отсутствием аналогичных явлений в закаленной лаве, взятой из жерла в жидком состоянии.

Не менее характерной особенностью является коррозия основной массой фенокристаллов, особенно плагиоклаза. Часты кристаллы плагиоклаза, наполовину разъеденные основной массой. Пироксен и оливин этим процессом затронуты мало.

Наконец, остается упомянуть о реакционных отношениях между оливином и пироксеном, в виде венчиков из моноклинного пироксена вокруг оливина.

Для полноты характеристики ниже приводится описание отдельных образцов.

Образец № 18. Обладает порфировой структурой с витрофирированной основной массой. Вкрапленниками являются плагиоклаз, пироксен и оливин. В основной стекловатой массе рассеяны микролиты плагиоклаза и пироксена. По количеству и величине минералы вкрапленников располагаются в следующем порядке: пироксен, плагиоклаз и оливин. Отношение вкрапленников к основной массе равно 1:5, отношение микролитов к стеклу — 1:1. Наблюдается коррозия минералов вкрапленников основной массой.

Пироксен иногда в форме идиоморфных кристаллов, но с округленными краями, чаще же в виде округлых зерен. Некоторые вкрапленники достигают 4 мм. Пироксен светлозеленого цвета без плеохроизма. Плагиоклаз встречается обычно в форме таблиц с длинной осью, равной 1—2 мм. Структура двойниковая, зональные кристаллы редки. Внутренняя часть таблиц включает мельчайшие капельки стекла, часто ориентированные по граням, во внешней же каемке таблиц включения встречаются реже. Вкрапленники содержат 62% анортитовой молекулы, микролиты 54%. Оливина в породе довольно много. Он встречается в идиоморфных кристаллах, но со сглаженными углами, а еще чаще в виде округлых зерен. Размер зерен 0.5—1 мм. Оливин всегда окружен тоненькой рудной каемкой. Оливин больше всех минералов подвергся нарушениям. Однажды встречен был разорванный и сдвинутый кристалл, залеченный плагиоклазом. Кроме разорванных кристаллов встречаются и наполовину раздробленные. Стекло основной массы темнобурое, непросвечивающее.

Этот образец оказался наиболее основным из всех образцов потока и даже более основным, чем лава Туйлы и Қиргурича, которые, по В. И. Влодавцу (1940б), считались самыми основными лавами, излившимися до 1932 г. из Ключевского вулкана. Химический состав данного образца и пересчеты его приводятся в табл. 17 и 18.

Таблица 17

Химический состав лавы Билюкая, образец № 18

(аналитик К. П. Сокова)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
Вес. %	51.03	1.00	17.03	3.58	5.23	0.35	6.75
Мол. колич.	850	013	167	023	072	005	168
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O _{-110°}	H ₂ O _{+110°}	Сумма
Вес. %	10.45	2.93	1.34	0.11	0.10	0.20	100.10
Мол. колич.	186	047	014	001	—	—	—

Этот образец, в отличие от всех других взятых в том же лавовом потоке, недосыщен кремнекислотой и нормативно содержит оливин, тогда как другие образцы из этого потока насыщены кремнекислотой и

Пересчеты анализа лавы Билюкая, образец № 18

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому	Магматическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу
$\left. \begin{array}{l} \text{or} = 7.8 \\ \text{ab} = 24.6 \\ \text{an} = 29.5 \\ \text{di} = 17.1 \\ \text{hy} = 11.1 \\ \text{ol} = 2.1 \\ \text{mt} = 5.3 \\ \text{il} = 2.0 \\ \text{op} = 0.3 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 61.9 \\ \\ \\ \\ \\ 37.9 \end{array}$ $\frac{\text{SAL}}{\text{FEM}} = \frac{61.9}{37.9} = 1.63$ $\frac{\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{CaO}} = \frac{61}{106} = 0.58$ $\frac{\text{K}_2\text{O}}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{14}{47} = 0.3$ Символ П. 5. 4. 4.	$\begin{array}{l} a = 8.3 \\ c = 7.3 \\ b = 25.4 \\ s = 59.0 \\ f' = 33 \\ m' = 45 \\ c' = 22 \\ n' = 77 \\ t = 1.5 \\ \varphi = 12 \\ Q = -5.9 \\ a/c = 1.1 \end{array}$	$2.6 \overline{\text{RO}} \cdot \text{R}_2\text{O} \cdot 4.5 \text{ SiO}_2$ $\text{R}_2\text{O} : \text{RO} = 1 : 7$ $\alpha = 1.60$

содержат кварц. Модальный состав везде одинаков, а именно во всех образцах содержится оливин, но и в этом образце количество оливина в породе значительно больше, чем можно было бы предполагать, исходя из химического состава.

Образец № 24 мало отличается от предыдущего: структура его витрофировая; вкрапленниками являются плагиоклаз, пироксен и оливин; в основной массе находятся микролиты плагиоклаза и пироксена. В количественном отношении минералы располагаются в следующем порядке во вкрапленниках — плагиоклаз, пироксен, оливин; в микролитах — плагиоклаз и пироксен. Ниже приводится количественный состав лавы, причем вкрапленники и микролиты пироксена подсчитывались одновременно: плагиоклаза во вкрапленниках 8.4%, плагиоклаза в микролитах 22.9%, пироксена всего 6.6%, оливина 4.9%, основной массы 57.2%. Наблюдается сильная коррозия всех минералов вкрапленников основной массой.

Плагиоклаз присутствует в форме таблиц размером 1—1.5 мм. Он обычно двойниковой структуры, зональный встречается редко. Вкрапленники плагиоклаза включают капельки стекла, которые или рассеяны по всему зерну, или сосредоточиваются в центральной части, или же находятся во внешней зоне. Вкрапленники плагиоклаза относятся к битовниту (№ 75—80), микролиты же к лабрадору (№ 65). В табл. 19 приведены замеры на федоровском столике.

Пироксен имеет грязнозеленый цвет и встречается в зернах неправильных очертаний. Встречено несколько вкрапленников размером до 3 мм, состоящих из мелких, округлых зернышек; скорее всего здесь большой кристалл раздроблен на мелкие частички. Оливин окружен рудной каемкой.

Химический анализ породы приведен в табл. 20, пересчеты его — в табл. 21.

Таблица 19

Результаты замеров плагноклаза из лавы Билюкая, образец № 24

	Ng	Nm	Np	2V	№	Закон
Вкрапленник . . .	71°	29°	73°	+82°	80	Альбит-карлсбадский $\perp \frac{[001]}{(010)}$
» . . .	73	28	68	+80	75	
Микролит	56	53	57	+80	65	Ала-А $\perp \frac{[100]}{(010)}$

Таблица 20

Химический состав лавы Билюкая, образец № 24
(аналитик К. Сокова)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
Вес. %	53.08	1.08	16.62	2.50	6.52	0.25	6.11
Мол. колич.	834	014	163	016	090	003	151
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O _{-110°}	H ₂ O _{+110°}	P ₂ O ₅	Сумма
Вес. %	8.80	3.08	1.08	0.14	0.59	0.25	100.10
Мол. колич.	157	050	012	—	—	002	—

Таблица 21

Пересчеты анализа лавы Билюкая, образец № 24

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому	Минералогическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу
$\left. \begin{array}{l} Q=2.8 \\ or=6.7 \\ ab=26.2 \\ an=28.1 \\ di=11.3 \\ hy=13.0 \\ mt=3.7 \\ il=2.1 \\ ap=0.5 \end{array} \right\} 63.8$ $\left. \begin{array}{l} SAL=63.8 \\ FEM=35.6 \\ Q=2.8 \\ F=61.0 \\ K_2O+Na_2O=62 \\ CaO=101 \\ K_2O=12 \\ Na_2O=50 \end{array} \right\} 35.6$ $\frac{SAL}{FEM} = \frac{63.8}{35.6} = 1.79$ $\frac{Q}{F} = \frac{2.8}{61.0} = 0.05$ $\frac{K_2O+Na_2O}{CaO} = \frac{62}{101} = 0.62$ $\frac{K_2O}{Na_2O} = \frac{12}{50} = 0.24$ <p>Символы Г. 4. 4. 4.</p>	$\begin{array}{l} a=8.5 \\ c=7.0 \\ b=22.8 \\ s=61.7 \\ f'=38 \\ m'=45 \\ c'=17 \\ n=81 \\ t=1.6 \\ \varphi=9.6 \\ Q=-0.6 \\ a:c=1.2 \end{array}$	$2.55 \overline{RO} \cdot R_2O_3 \cdot 4.9 SiO_2$ $R_2O : RO = 1 : 6.4$ $\sigma = 1.76$

Образец № 7 взят из центральной части глыбы диаметром 0,5 м. Порода черная, очень плотная, с неровным раковистым изломом. В свежем изломе в ней видны блесочки плагиоклаза и более крупные вкрапленники зеленого пироксена. В породе определены $\text{SiO}_2 = 52.12\%$, $\text{H}_2\text{O}_{+110^\circ} = 0.03\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-110^\circ}$ — нет. Под микроскопом порода обладает порфировой структурой с бифилитической основной массой, т. е. в основной массе присутствуют два поколения микролитов плагиоклаза, более крупные с идиоморфными очертаниями и более мелкие неправильной формы. Вкрапленники представлены пироксеном до 2—3 мм в диаметре, плагиоклазом и оливином. Пироксен светлозеленого цвета, неизменный; иногда вкрапленник состоит из нескольких различно ориентированных зерен. Плагиоклаз вкрапленников двойниковой структуры, реже зонального сложения. Встречено несколько зерен пироксена, включенных в фенокристаллы плагиоклаза. Оливин в форме неправильных округлых зерен, бесцветный, прозрачный; превращения в идингсит не наблюдается. Стекло буро-черное, непросвечивающее.

Периферическая часть глыбы представляет базальтовый шлак (обр. № 8). Под микроскопом порода обладает витрофировой структурой с пузырьстым сложением. Пустоты имеют разнообразную форму; часто встречаются сдвоенные и строенные пузырьки. Отношение пор в каменной массе 1 : 1. Стекло черное с коричневатым оттенком, непрозрачное.

Минералогический состав: вкрапленники плагиоклаза, пироксена и оливина, микролиты только плагиоклаза. Вкрапленники плагиоклаза размером 0,5—0,8 мм имеют форму таблиц, разъеденных основной массой, с заливчиками из стекла. Центральная часть таблиц обычно переполнена включениями черного стекла, но иногда зоны, переполненные стеклом, чередуются с зонами чистого плагиоклаза, а в отдельных кристаллах они окаймляют водяно-прозрачное зерно плагиоклаза. Количество включенного стекла бывает настолько велико, что преобладает над включающим его плагиоклазом. Микролиты плагиоклаза более чистые; их немного. Оливин и пироксен встречаются только во вкрапленниках; количество их незначительное, свойства обычные.

Образец № 623 представляет плотный темносерый базальт. Под микроскопом порода обладает витрофировой структурой с участками интерсертальной. Переходы между интерсертальной и витрофировой структурой постепенные.

Состав вкрапленников — плагиоклаз, пироксен и оливин; в основной массе находятся микролиты плагиоклаза и пироксена. Плагиоклаз вкрапленников в виде таблиц и зерен, двойниковой структуры и иногда зонального сложения. Часто попадаются крестообразные двойники. Плагиоклаз относится к лабрадору № 58—66 ($\perp \text{PM} = 32\text{—}36^\circ$). В участках с интерсертальной структурой длинные таблички плагиоклаза соединяются друг с другом, а пространство между ними заполнено ксеноморфным пироксеном и стеклом. В этих участках много рудного минерала.

Пироксен вкрапленников иногда в виде идиоморфных кристаллов, чаще в виде округлых зерен.

Оливин сохранился только в центральных частях зерен. Оливиновое ядро окружено каемкой из рудного минерала и внешней каемкой из мелкого агрегата зернышек пироксена. Часто оливиновое ядро отсутствует совершенно, а имеется только рудный минерал, окруженный каймой пироксена.

В шлифе встречаются зернистые участки, где зерна плагиоклаза и пироксена как бы находятся во взаимном прорастании.

Таким образом, особенностями образца являются: 1) наличие участков с интерсертальной структурой, 2) реакционные каймы из рудного минерала и пироксена вокруг оливина, 3) наличие крестообразных двойников плагиоклаза, 4) нахождение зернистых участков из плагиоклаза и пироксена, 5) обогащение рудным минералом.

Образец № 880 представляет серый ноздреватый базальт. Под микроскопом порода обладает андезитовой структурой с участками интерсертальной. В основной массе, в отличие от других образцов, наряду с микролитами плагиоклаза много микролитов пироксена. Вкрапленниками, как всегда, являются плагиоклаз, пироксен и оливин. Вкрапленники деформированы — плагиоклаз имеет волнистое угасание, пироксен раздроблен на отдельные участки, зерна оливина и пироксена окружены венчиком из мелких зернышек того же минерала. Все эти нарушения в фенокристаллах могли произойти в результате движения потока.

Образец № 846 обладает витрофировой структурой с вкрапленниками плагиоклаза, пироксена и оливина. В основной стекловатой массе много микролитов плагиоклаза и пироксена. Количественный состав следующий: плагиоклаз вкрапленников и микролитов 34.5%, пироксена 8%, оливина 2.7%, основной массы 53.5%, пор 1.3%.

Плагиоклаз в форме идиоморфных кристаллов, размер вкрапленников 1—1.5 мм, структура двойниковая, сложение зональное. В табл. 22 приводятся результаты замеров на федоровском столике.

Таблица 22

Результаты замеров плагиоклаза из лавы Билюкая, образец № 864

	Ng	Nm	Np	2V	N _z	Закон
Вкрапленник большой . . .	56°	81°	37°	+80	76	Карлсбадский [001]
» небольшой	60	84	33	—88	77	То же
Микролит	73	40	56	—	40	» »

Из замеров видно, что плагиоклаз вкрапленников содержит 76—77% анортитовой молекулы и двойникован по карлсбадскому закону, а микролиты, при том же законе двойникования, значительно более кислые, содержат только 40% анортитовой молекулы. Некоторые зерна богаты включениями стекла, которые сосредоточиваются в центральной части или же располагаются зонами.

Пироксен обычен, но разбит трещинами и часто имеет мозаичное угасание. Оливин встречается в форме идиоморфных кристаллов, а также в зернах с оплавленными округлыми краями, без реакционных каемок.

Образец № 861 отличается андезитовой структурой с участками, приближающимися к интерсертальной. Стекла меньше, чем кристаллического вещества. Вкрапленниками, как обычно, являются плагиоклаз, пироксен и оливин. Количество пироксена и оливина значительное, как это видно из количественного состава породы: плагиоклаза вкрапленников 6.6%, плагиоклаза микролитов 28.4%, пироксена 14.7%, оливина 6.1%, стекла с мельчайшими микролитами 44.2%.

Плагноклаз в форме таблиц, с двойниковой структурой. Встречаются крестообразные двойники. Плагноклаз чистый, включений стекла мало. Пироксен и оливин обычные.

Образец № 879 представляет очень плотный базальт серого цвета, обычного минералогического состава. Особенностью этого образца является его текстура, обнаруживающая флюидность, которая проявляется в различной степени раскристаллизации основной массы. В проходящем свете видны светлые полосы и извилистые участки, чередующиеся с участками более темными. Светлые участки отличаются от темных тем, что в них наряду с микролитами плагноклаза, такими же, как в темных участках, имеются еще мельчайшие, прозрачные, двупреломляющие кристаллические выделения, вероятно относящиеся также к плагноклазу. Стекла в светлых участках мало. Темные участки состоят из темнубурого стекла, в котором рассеяны микролиты плагноклаза. Стекла в них значительно больше, чем в светлых участках. Количество вкрапленников в светлых и темных участках одинаковое. Микролиты плагноклаза обтекают вкрапленники.

В отличие от предыдущих образцов, наиболее крупными являются вкрапленники пироксена, затем следуют вкрапленники оливина и, наконец, плагноклаза. Зато в основной массе в виде микролитов встречается почти исключительно плагноклаз.

Вкрапленники пироксена, размером до 4 мм, представлены в идиоморфных кристаллах. Цвет желтовато-зеленый, светлый; cNg 46—48°; $2V = +58^\circ$. Кроме идиоморфных выделений встречаются агрегаты из округлых зерен. Оливин ($2V = -80^\circ$) также обладает идиоморфизмом, но часто углы кристаллов оплавлены, так что получаются овальные зерна. Оливин окружен тоненькой рудной каемкой. В единичных случаях аналогичная рудная каемка окружает и зерна пироксена. Плагноклаз, в форме таблиц и квадратов, часто корродирован. Он чистый и только в редких случаях включает стекло, располагающееся зоной в центральной части кристаллов. Плагноклаз двойниковой структуры, зональный.

Образец № 850 был взят в виде красной, еще пластичной массы из текущего потока вблизи жерла и брошен в холодную воду с целью закалки. Отличие этого образца от лавы, застывшей в нормальных условиях охлаждения лавового потока, заключается в особенностях основной массы: стекло здесь светложелтого цвета, включает редкие микролиты плагноклаза в виде тончайших волокон; микролитов пироксена в этом образце очень мало. Что касается фенокристаллов, то они ничем не отличаются от предыдущих образцов. Рудная каемка вокруг оливина присутствует и здесь, но редко. Лава вытекает на дневную поверхность, уже содержащая фенокристаллы плагноклаза, пироксена и оливина. Рудная каемка вокруг оливина отчасти образуется в интра-теллургических условиях и поэтому оливин сохраняется при таком химическом состоянии лавы, когда он присутствовать не должен (нормативно присутствует кварц). В поверхностных условиях происходит некоторая кристаллизация плагноклаза и пироксена и застывание всего остатка в виде стекла.

Химический анализ данного образца и его пересчеты приводятся в табл. 23 и 24.

Образец № 867 также был взят из текущего лавового потока в виде расплавленной огненно-красной пластичной массы и брошен в холодную воду для закалки. Под микроскопом аналогично образцу № 850, основная масса состоит из стекла, которое почти не содержит

Таблица 23

Химический состав искусственно закаленной лавы Билюкая, образец № 850
(аналитик К. Сокова)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
Вес. %	53.46	1.01	15.37	2.59	6.13	0.19	8.12
Мол. колич.	890	013	151	016	085	003	201
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O _{-110°}	H ₂ O _{+110°}	P ₂ O ₅	Сумма
Вес. %	9.42	2.40	1.10	0.14	0.04	0.27	100.24
Мол. колич.	168	039	012	—	—	—	—

Таблица 24

Пересчеты анализа лавы Билюкая, образец № 850

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по А. Н. Заваридкому	Магматическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу
$\left. \begin{array}{l} Q = 3.4 \\ or = 6.7 \\ ab = 20.5 \\ an = 27.8 \\ di = 15.2 \\ hy = 20.7 \\ mt = 3.7 \\ il = 2.0 \\ ap = 0.7 \end{array} \right\} 58.4$ $\left. \begin{array}{l} SAL = 58.4 \\ FEM = 42.6 \\ Q = 3.4 \\ F = 55.0 \end{array} \right\} 42.3$ $\frac{K_2O + N_2O}{CaO} = \frac{51}{100} = 0.5$ $\frac{K_2O}{Na_2O} = \frac{12}{39} = 0.3$	$\left. \begin{array}{l} a = 6.8 \\ c = 6.7 \\ b = 26.0 \\ s = 60.5 \\ f' = 31 \\ m' = 52 \\ c' = 17 \\ n = 76 \\ t = 1.4 \\ \varphi = 8.2 \\ Q = -1.3 \\ a/c = 1.0 \end{array} \right\}$	$3.05 RO \cdot R_2O_3 \cdot 5.5 SiO_2$ $R_2O : RO = 1 : 9$ $\alpha = 1.82$

микролитов. Вкрапленниками же, как и в лаве из естественно застывшего потока, являются плагиоклаз, пироксен и оливины, с той лишь разницей, что пироксен здесь всегда представлен целыми кристаллами, вероятно потому, что раздробление вкрапленников пироксена и превращение их в агрегат зерен происходили при движении уже застывающего потока.

Коррозия вкрапленников плагиоклаза обнаруживается и здесь. Наблюдались случаи почти полного разъедания плагиоклаза, от кото-

рого оставались только каемки. Отсюда напрашивается предположение, что коррозия происходила в интрателлурическую стадию.

Ниже приводятся результаты измерений углов погасания плагиоклазов в сечениях \perp РМ:

первый вкрапленник: ядро — $40^\circ = \text{№ 70}$, зона I — $37^\circ = \text{№ 65}$, зона II — $35^\circ = \text{№ 63}$;

второй вкрапленник: ядро — $40^\circ = \text{№ 70}$, зона — $38^\circ = \text{№ 68}$;

третий вкрапленник: ядро — $32^\circ = \text{№ 58}$, зона — $25^\circ = \text{№ 45}$, зона II — $20^\circ = \text{№ 36}$, зона IV — $16^\circ = \text{№ 34}$;

микролит — $32^\circ = \text{№ 58}$.

Один из вкрапленников оказался ненормальным: его ядро по кислотности отвечало микролитам, зоны же, особенно периферическая, были значительно более кислые, чем микролиты.

Количественный состав породы следующий: плагиоклаза вкрапленников и микролитов 19.2%, пироксена 8%, оливина 4%, стекла 40%, пор 28.8%. Количество плагиоклаза здесь значительно меньше чем в других образцах, в связи с отсутствием кристаллизации в поверхностных условиях застывания.

В химическом составе отличий нет. $\text{SiO}_2 = 52.56\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-110} = 0.12\%$, $\text{H}_2\text{O}_{+110} = 0.27\%$.

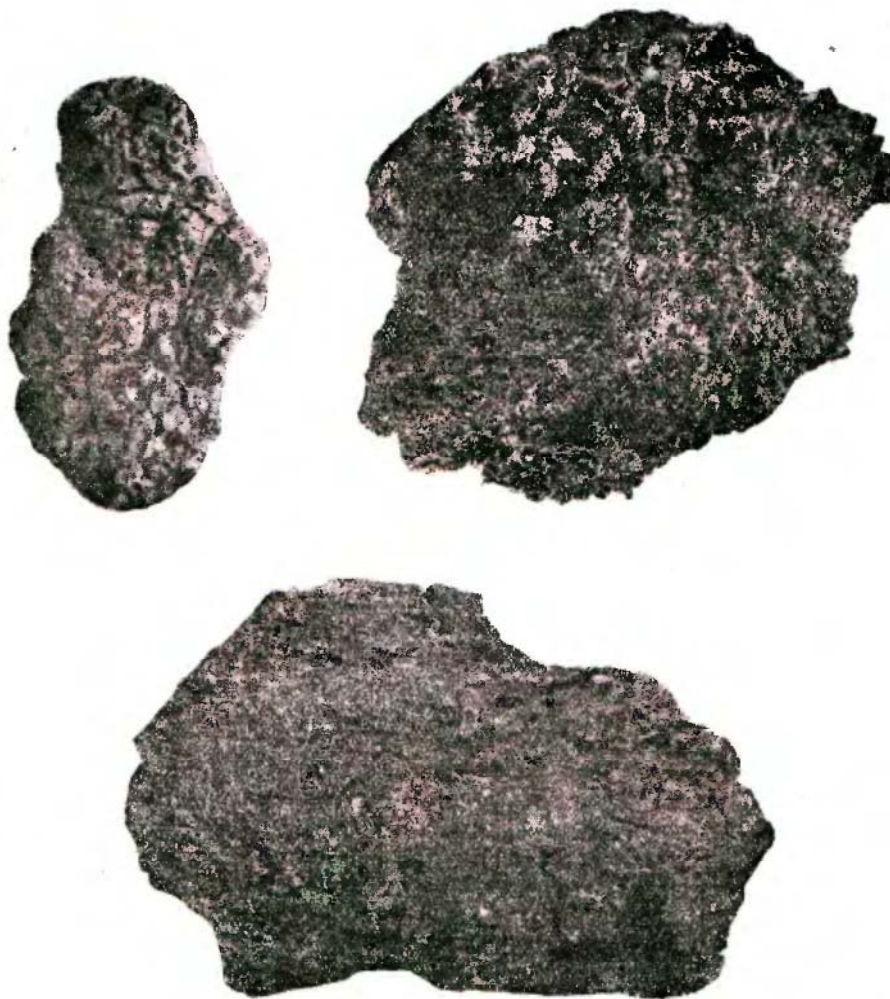
Образец № 34 представляет базальтовый шлак, взятый из фумаролы. Черная шлаковая лава покрыта тонким налетом нашатыря. Под микроскопом порода обладает порфировой структурой. Вкрапленниками являются, как обычно, плагиоклаз, пироксен и оливин. Основная масса состоит из бурого стекла, почти не содержащего микролитов. Поры овальные или амебообразные, ничем не заполнены.

Особенностью образца является, во-первых, то, что оливин превращен в бурое вещество, возможно идингсит, так что в зерне остаются только отдельные участки чистого оливина. Во-вторых, пироксен во внешней зоне становится более светлым, с углом погасания несколько большим, чем в центральной, неизменной части. Такие изменения оливина и пироксена могли произойти в результате воздействия на лаву газов фумаролы.

В лаве однажды было встречено включение кварца в виде округлого шпироподобного выделения размером 5×4 см, представляющего агрегат зернышек белого со слабым сероватым оттенком кварца с обычными оптическими свойствами.

2. ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ

К взрывным продуктам извержения относятся блоки, лапилли, песок и пепел. Бомб, застывших в каких-либо определенных формах, Билукай не выбрасывал. Взрывной материал Основного жерла и Соседнего обнаруживает различия как в форме обломков, так и в текстуре и структуре. Основное жерло выбрасывало куски шлаковой лавы, бесформенные, но с округлыми краями; они вылетали из жерла в состоянии красного свечения, полупластические. Соседнее жерло давало куски очень плотной лавы, почти совсем без пор, в виде остроугольных обломков (фиг. 22); они вылетали в отвердевшем состоянии. Химический и минералогический состав блоков этих двух жерл аналогичен и не отличается существенно также от состава лавы, изливавшейся из Лавового жерла.



Фиг. 22. Бомбы и блоки:

a — бомба типа хлебной корки Вершинного кратера Ключевского вулкана извержения 1937 г., умен. в 5 раз; *b* — шлаковая лава, выброшенная из Основного жерла Билюкая, умен. в 1,5 раза; *в* — плотная лава, выброшенная из Соседнего жерла Билюкая, умен. в 1,5 раза

1) Блоки

Блоки из Основного жерла под микроскопом ничем не отличаются от шлаковой лавы. Они обладают витрофировой структурой, вкрапленники в них представлены плагиоклазом, пироксеном и оливином, стекло коричневое, слабо просвечивающее, с микролитами плагиоклаза и редко пироксена. Поры неправильной формы. Отношение пор к каменной массе равно 1 : 1.

Блоки из Соседнего жерла отличаются от лавы из потока своей структурой и повышенным количеством оливина. Структурное отличие состоит в том, что в основной массе блоков очень мало микролитов и она почти целиком сложена из стекла. В этом отношении блоки

напоминают закаленную лаву. Ниже приводится описание нескольких образцов.

Образец № 874 взят из остроугольного обломка, выброшенного Соседним жерлом 7 августа 1938 г. Порода темносерого цвета, плотная, с 53% SiO_2 . Структура породы витрофировая. Основная масса состоит из светлосерого стекла с небольшим количеством микролитов плагиоклаза и зернышек пироксена и обильной сыпью рудного минерала. Вкрапленниками, как и в лаве, являются плагиоклаз, пироксен и оливин. Пироксен и оливин обычные, но, в противоположность лаве, не окружены рудной каемкой. Вкрапленники плагиоклаза содержат много включений капелек стекла, которые располагаются зонами, повторяя контуры кристаллов роста. Несколько раз в плагиоклазе встречены были включения алагита. Наблюдаются иногда зональные кристаллы. Замеры плагиоклаза вкрапленников: незональный фенокристалл — $\mu_{\text{PM}} 38^\circ$, что соответствует № 68; то же незональный — 37° = № 65; зональный фенокристалл: ядро — 38° = № 68, оболочка — 33° = № 55.

Пироксен имеет светлозеленый цвет. По оптическим свойствам близок к пироксену из лавы ($n_{\text{Ng}} = 45^\circ$, $2V = +66, +68^\circ$). Идиоморфные кристаллы редки, обычны округлые зерна. Крупные вкрапленники, размером до 4 мм, состоят из агрегата более мелких зерен. В пироксене много включений рудного минерала, имеющего форму кубиков.

Оливин в шлифе несколько больше, чем в образцах лавы. Он имеет округлую или овальную форму. Иногда окружен рудной каемкой. $2V = 80-82^\circ$; $n_{\text{Ng}} = 1.690$; $n_{\text{Pr}} = 1.654$; $n_{\text{G}} - n_{\text{Pr}} = 0.036$.

В образце № 877 из остроугольного блока, размером 10×15 см, выброшенного Соседним жерлом, встречено включение линзочек (2×1 см) оливинно-пироксенового агрегата. Базальт, аналогично образцу № 874, имеет витрофировую структуру при очень незначительном количестве микролитов плагиоклаза в основной массе и отсутствием микролитов пироксена. Вкрапленники пироксена и оливина собираются кучками, образуя гломеропорфировую структуру. Вкрапленники плагиоклаза имеют зональное сложение, включения стекла распределяются также зонально, причем внешняя зона плагиоклаза совершенно чистая. Некоторые вкрапленники плагиоклаза сильно разъедены основной массой. В базальте содержится SiO_2 53.65%, $\text{H}_2\text{O}_{-110^\circ}$ — нет, $\text{H}_2\text{O}_{+110^\circ} = 0.05\%$.

Образец № 898 также относится к остроугольному обломку, выброшенному Соседним жерлом 7 ноября 1938 г. Структура породы витрофировая. В основной массе преобладает стекло, микролитов мало. Вкрапленниками являются плагиоклаз, пироксен и оливин. Качественный состав: плагиоклаза вкрапленников и микролитов 23.8%, пироксена 8.5%, оливина 7%, стекла 57.7%, пор 3%.

Плагиоклаз присутствует в форме таблиц размером до 2 мм. Зональность — явление очень редкое. Коррозия проявлена слабо. Иногда наблюдается волнистое погасание. Пироксен — в виде округлых зерен размером 1×2 мм. Оливин также в виде крупных зерен размером до 2 мм, имеет форму овальных кристаллов. Рудных каемок вокруг оливина не обнаружено. Встречено одно необычное явление — зерно пироксена, обросшее каемкой оливина. $\text{SiO}_2 = 53.05\%$, $\text{H}_2\text{O}_{-110^\circ}$ нет, $\text{H}_2\text{O}_{+110^\circ} = 0.12\%$.

Образец № 830 в виде остроугольного обломка размером 15×20 см, выброшенного из Соседнего жерла при взрыве 23 июля в 14 час., взят в горячем еще состоянии (бумага обугливалась им), но совершенно отвердевшим. Поверхность была покрыта тончайшим белым

налетом. В свежем изломе порода темносерая, очень плотная, с раковистым изломом. Невооруженным глазом обнаруживаются вкрапленники светлозеленого оливина, бурого пироксена и черного плагиоклаза.

Химический анализ данного образца и пересчеты его даны в табл. 25 и 26.

Таблица 25

Химический состав блока из Соседнего жерла, образец № 830
(аналитик К. Сокова)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO
Вес. %	53.14	1.15	15.10	2.60	6.36	0.21	8.40
Мол. колич.	884	014	148	016	088	003	208
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	S	P ₂ O ₅	Сумма	
Вес. %	9.33	2.90	0.43	0.03	0.20	99.85	
Мол. колич.	166	047	004	001	001	—	

Таблица 26

Виртуальный состав и символы по американской системе	Числовая характеристика по А. Н. Заварицкому	Магматическая формула и коэффициенты по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу
$\begin{array}{l} Q = 2.9 \\ or = 2.2 \\ ab = 24.6 \\ an = 27.0 \\ di = 14.8 \\ hy = 21.8 \\ mt = 3.7 \\ il = 2.1 \\ ap = 0.3 \\ \hline SAL = 56.7 \\ FEM = \frac{42.7}{56.7} = 1.33 \\ Q = \frac{2.9}{56.7} = 0.05 \\ F = \frac{53.8}{56.7} = 0.95 \\ K_2O + Na_2O = \frac{51}{97} = 0.52 \\ CaO = \frac{4}{97} = 0.04 \\ Na_2O = \frac{47}{97} = 0.49 \\ \text{Символ — П. 4.4.4.} \end{array}$	$\begin{array}{l} a = 6.8 \\ c = 6.5 \\ d = 26.7 \\ s = 60.0 \\ f' = 31 \\ m' = 52 \\ c' = 17 \\ n = 92 \\ t = 1.6 \\ \varphi = 8.0 \\ Q = -0.1 \\ a c = 1.05 \end{array}$	$3.1 RO \cdot R_2O_3 \cdot 5.4 SiO_2$ $R_2O : RO = 1 : 9$ $\alpha = 1.77$

Под микроскопом порода обладает витрофировой структурой. Основная масса состоит из светлбурого стекла, в котором очень мало микрокристаллов плагиоклаза. Фенокристаллами, как обычно, являются плагиоклаз, пироксен и оливин.

Характерными особенностями блоков, выброшенных Соседним жерлом, являются:

1. Структура, отличающаяся от структуры лавы меньшей раскристаллизованностью основной массы. Микролитов плагиоклаза мало, а очертания их расплывчаты, часто в виде пятнышек. Микролиты пироксена представляют большую редкость. Сыпь рудного минерала очень обильная.

2. При одинаковом минералогическом составе несколько большее обогащение оливином, чем в лаве.

3. Деформация фенокристаллов, проявляющаяся в волнистом угасании вкрапленников плагиоклаза и, в некоторых случаях, в раздробленности на агрегат зерен крупных фенокристаллов пироксена. Много включений стекла в фенокристаллах плагиоклаза.



Фиг. 23. Шлаковые лапилли.
Нат. вел.

В блоках, выброшенных Соседом, были встречены включения, состоящие под микроскопом из оливина и пироксена. Оливин в виде округлых ксеноморфных мелких зерен собран в отдельные участки. Такая структура напоминает роговиковую. Оливин бесцветен, трещиноват, совершенно неизменный. Пироксен моноклинный, почти бесцветный, с слабым зеленоватым оттенком, с хорошей спайностью и косым угасанием. Выделения его также ксеноморфные, но размер зерен значительно больший. По всей пироксено-оливиновой массе рассеяна рудная сыпь. Среди минералов включений в двух случаях встречены участки базальта; контакт с породой извилистый, иногда основная масса входит заливчиками не только между минералами,

но и в минералы.

Оптические свойства оливина $N_g = 1.702$, $N_p = 1.672$, двупреломление 0.030. По показателям преломления оливин относится к разности более богатой железом, чем в базальте из потока.

Оптические свойства пироксена $N_g = 1.698$, $N_p = 1.672$.

По показателям преломления оливин и пироксен в шлифе близки к оливину и пироксену базальта.

2) Лапилли

Лапилли из выбросов Основного жерла были шлаковые (фиг. 23), очень легкие, падали они медленно и достигали земли совершенно остывшими. Форма их разнообразная, но все они состоят как бы из иголочек стекла, соединенных между собой наподобие кружев. Цвет зеленый. Невооруженным глазом не удается различить никаких минералов, видно только одно зеленое стекло. Под микроскопом в преобладающем светозеленом прозрачном стекле обнаруживаются иногда фенокристаллы плагиоклаза, моноклинного пироксена и оливина. Микролиты почти отсутствуют.

3) Вулканический песок

При изучении вулканических песков различных эксплозий Вершинного кратера Ключевского вулкана было установлено, что пески различаются по форме частиц, пузыристости их, механическому составу, количеству тяжелой фракции, химическому и минералогическому составу, количественному отношению между кристаллической и стекловатой частью, между зеленым неокисленным и бурым окисленным стеклом. Эти различия объясняются условиями образования вулканических песков. На основании всех перечисленных свойств пески разделяются на две большие группы — на аутогенные и аллотогенные, т. е. на пески из материала вулкана и на пески из чуждого материала. Аутогенная группа разделялась на пески ювенильные — магматические и резургентные — лавовые. В свою очередь внутри ювенильной группы намечались две подгруппы — выброшенных в пластическом состоянии и в отвердевшем.

Для Вершинного кратера изучение рыхлых продуктов имело большое значение, так как ввиду значительной высоты вулкана и трудностей, связанных с подъемом к кратеру, возможности сборов других продуктов извержения были ограничены. Изучение рыхлых продуктов давало отчасти ответы на такие вопросы, как, например, имел ли место подъем новых порций магмы, которая взрывом была разбрызгана; был ли перед взрывом период относительного ослабления деятельности, в течение которого магма успевала частично затвердеть в лавовую пробку. По рыхлым продуктам можно было судить об изменении механического и минералогического состава и консистенции магмы в процессе подъема все новых ее порций. Наконец, по составу песков мы могли судить о характере извержений, непосредственно наблюдать которые нам часто не удавалось.

Как уже ранее сказано, преобладающим материалом при извержении Билокая была лава; эксплозивные продукты значительно уступали ей. Среди эксплозивных продуктов преобладали блоки, более мелкий материал выбрасывался редко. Лапилли выпадали всего несколько раз, вулканический песок выпадал хотя и более часто, но в очень небольших количествах и на площади небольшого радиуса (0,5 км). Только при первой эксплозии, сопровождавшей прорыв кратеров, рыхлые продукты покрыли площадь слоем значительной мощности. Выбрасывался песок как Основным жерлом, так и Соседним. Песок этих двух жерл был несколько различен, главным образом, по форме частиц: из Основного жерла вылетали шлаковые песчинки, из Соседнего же остроугольные, плотные кусочки лавы.



Фиг. 24. Вулканический песок Ключевского вулкана. Увел. в 10 раз.

Песок Основного жерла состоял преимущественно из кусочков стекла бурого и зеленого цвета, причем зеленое стекло преобладало. Кроме того, обнаружено кристаллическое вещество, как отделенное от стекла, так и сросшееся с ним. Из минералов присутствовали те же, что и в лаве: плагиоклаз, пироксен и оливин (фиг. 24).

Стекло имеет форму черенков и обломков. Цвет его меняется от темнобурого до светлозеленого. Наибольшим показателем преломления обладает темнобурое стекло (1.574), меньшим — буро-зеленое (1.565 и немного больше) и наименьшим — светлозеленое (1.562). Колебания показателя преломления стекла от 1.562 до 1.574 соответствуют, по кривой George (1924), колебаниям SiO₂ от 50 до 54%. Такие колебания показателя преломления стекла в одном и том же образце могли быть вызваны тем, что выбрасываемые частицы стекла имели различный размер и, возможно, температуру и при соприкосновении с воздухом в различной степени окислялись.

Кроме гомогенного стекла встречаются обломки, включающие минералы. Плагиоклаз, и отделенный, и включенный в стекло, относится по показателю преломления (Ng = 1.571) к лабрадору. Он с двойниковой структурой, иногда окрашен в бурый цвет. Микролитов плагиоклаза в стекле мало.

Пироксена значительно меньше, чем плагиоклаза. Подобно плагиоклазу, он встречается в форме обломков — и отделенный от стекла, и сросшийся с ним (последнее было редко). По показателям преломления (Ng = 1.714, Nr = 1.686) он не отличается от пироксена лавы.

Оливина еще меньше, чем пироксена; он бесцветный, прозрачный, каких-либо изменений в нем не обнаружено. По показателям преломления (Ng = 1.710, Nr = 1.658) он также отвечает оливину из лавы и относится к типу хризолита.

Ромбического приоксена в песке не обнаружено.

Описание дано по двум образцам песка. Песок образца № 827 выброшен из Основного жерла 19 июля 1938 г. в 19 час., песок образца № 863 также выброшен из Основного жерла, но 12 дней спустя, 31 июля, между 11 и 12 час. По форме частиц и петрографическому составу они ничем не отличаются друг от друга.

В табл. 27 приводится содержание кремнекислоты и воды в песках, выпарших в различные дни.

Таблица 27

Содержание кремнекислоты и воды в вулканических песках (в %)

№ обр.	Время выпадения	Жерло	SiO ₂	H ₂ O - 110°	H ₂ O +110°
828	21 июля 1938 г. 18 час.	Основное	53.62	0.20	0.27
863	31 июля 1938 г. 11—12 час.	Соседнее	52.16	0.23	0.10
875	7 августа 1938 г.	»	52.86	0.28	0.20

4) Некоторые данные по золовой дифференциации

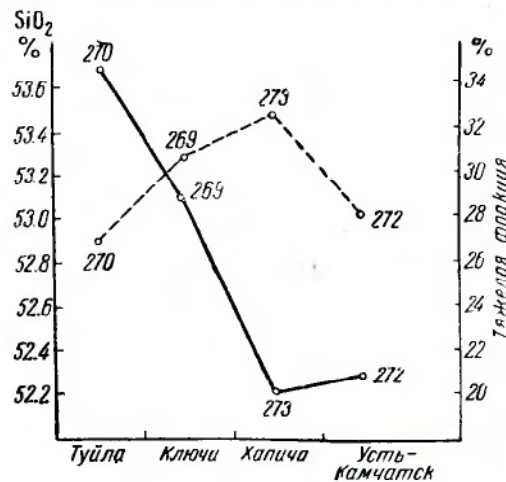
Из литературы известно, что условия транспортировки вулканических рыхлых продуктов, зависящие в основном от атмосферных явлений — силы и направления ветра, существенно влияют на их механический, хи-

мический и минералогический состав. Благодаря золотой дифференциации тяжелые компоненты (обычно цветные и рудные минералы) при переносе вулканических рыхлых продуктов выпадают первыми, а легкие компоненты относятся дальше. Отсюда следует, что вулканический песок, упавший в непосредственной близости от вулкана, должен быть более основным, чем исходная магма, представленная в лавовом потоке и выбрасываемая в виде бомб. По мере удаления песка от места эксплозии он становится более кислым. Для иллюстрации этого положения Ларсон (Larson, 1937) приводит данные по извержениям некоторых вулканов. При извержении 30 августа 1902 г. вулкана Мон-Пеле содержание SiO_2 в бомбах составляло от 62.55 до 63.10%, а в пепле одновременного извержения, собранном в непосредственной близости от вулкана, — 59.95, 60.25 и 61.35%. При извержении Кракатау в июле 1938 г. андезитовая пемза содержала SiO_2 68.51 и 69.4%, а пепел, выпавший на острове, — 63.13 и 65.04%. При извержении Лассен-пик 1 июня 1915 г. в стекловатой пироксено-андезитовой пемзе содержалось SiO_2 67.16%, а в андезитовом пепле только 64.72%.

Из этих примеров мы видим большую разницу в содержании SiO_2 в лавах и бомбах, с одной стороны, и в вулканических песках одновременного извержения — с другой. Для Кракатау эта разница составляет 9%, для Лассен-пик — около 2.5%, для Мон-Пеле — до 3%.

В нашем случае извержения побочного кратера Виллюкая данные химического состава лавы, бомб и вулканического песка одновременного происхождения как бы не подтверждают этого положения. Так, например, лава, излившаяся 31 июля 1938 г., содержит SiO_2 52.56%, а вулканический песок, выброшенный из жерла в момент излияния этой лавы и выпавший к подножью конуса, — 52.16%, т. е. меньше всего лишь на 0.4%. Второй пример: бомба, выброшенная Соседом 7 августа 1938 г., содержит SiO_2 53.0%, а песок одновременной эксплозии, упавший тоже к подножью конуса, — 52.86%, всего на 0.14% меньше.

Отсутствие более крупных колебаний в содержании кремнекислоты не опровергает теории золотой дифференциации применительно к продуктам вулканического извержения. Вероятно здесь большую роль играет состав вулканического песка: в случае наличия в песке значительного количества кристаллического вещества — минералов, можно ожидать золотую дифференциацию; в случае же преобладания в песке вулканического стекла такое разделение по силе тяжести, влияющее на химический состав песков, может и не быть или приведет к небольшим изменениям. Однако хотя и небольшие, но вполне закономерные изменения количества тяжелой фракции и SiO_2 мы имеем при эксплозии Вер-



Фиг. 25. Влияние золотой дифференциации на содержание кремнекислоты и тяжелой фракции в вулканических песках Ключевского вулкана:

..... содержание кремнекислоты; — содержание тяжелой фракции.

шинного кратера Ключевского вулкана 2 октября 1937 г. Из табл. 28 и диаграммы фиг. 36 видно, что в песках, выпавших в точках, различно удаленных от центра эксплозии, наблюдаются изменения в содержании SiO_2 и в количестве тяжелой фракции (фиг. 25).

Таблица 28

Характеристика вулканического песка, выпавшего в разных расстояниях от центра эксплозии

Место взятия образца	Расстояние от кратера, км	Направление от кратера	SiO_2 , %	Тяжелая фракция, %
Кратер Туйла . . .	20	С	52.9	35.61
Село Ключи	33	»	53.3	28.44
Река Хапича	50	СВ	53.5	20.14
Усть-Камчатск . . .	80	В	53.9	20.58

Только песок, выпавший в г. Усть-Камчатске, несколько нарушает проявляющуюся закономерность. Но здесь необходимо учитывать особенности атмосферных условий: песок несло с моря, т. е. со стороны, обратной расположению центра эксплозии — Ключевского вулкана, так как верховой ветер (на высоте кратера — 5000 м) был восточным, а низовой западным.

3. ПОРЯДОК КРИСТАЛЛИЗАЦИИ БАЗАЛЬТА

В свое время А. Н. Заварицкий указал, что в базальтах Ключевского вулкана оливин нельзя предвидеть из валового состава и потому эти породы могут быть отнесены к группе доломорфных. Это распространяется и на лавы побочных кратеров. Лавы Билюкая в химическом отношении насыщены кремнекислотой, так как все образцы, за исключением одного, нормативно содержат кварц в количестве до 4%. В результате же кристаллизации образуется порода, относительно богатая оливином, количество которого иногда не уступает количеству пироксена и доходит в некоторых образцах до 5% (или до 12% от кристаллической части). Оливин в наших базальтах не находится в равновесии с пироксеном, а заменяет его на ранней стадии кристаллизации и находится в реакционном отношении к жидкости и пироксену. Почти все зерна оливина окружены каемкой из рудного минерала, а иногда и пироксена, и поэтому оливин сохранился.

Оливин находится в породе только в виде фенокристаллов; в более поздней стадии, т. е. в основной стекловатой массе, его, как правило, нет. За кристаллизацией оливина следует кристаллизация пироксена и плагиоклаза. Как обычно в эффузивных породах, в наших базальтах резко намечаются две стадии кристаллизации — интрателлурическая и в условиях земной поверхности. Фенокристаллы оливина, плагиоклаза и пироксена присутствовали уже до того, как лава стала изливаться на дневную поверхность, что определенно доказано закалкой расплавленной лавы, вытекающей из Лавового жерла с температурой 850—900° (см. табл. 29). В ранней стадии кристаллизации за оливином выделялся пироксен, а за ним уже плагиоклаз, судя по тому, что зерна пироксена

были встречены включенными в таблицы плагиоклаза. В тех случаях, когда в фенокристалле пироксена наблюдались как бы включенные таблички плагиоклаза, всегда удавалось обнаружить заполненную плагиоклазом трещинку, идущую к включенному плагиоклазу. Наблюдаются случаи одновременной кристаллизации плагиоклаза и пироксена — прораствания.

Таблица 29

Сравнительная характеристика лавы, застывшей при разных условиях охлаждения

	Лавы из нормально застывшего потока	Закаленная лавы из Лавового жерла (t° лавы 900 $^{\circ}$)	Блоки из Соседнего жерла
Текстура	Пузыристая и плотная	Пузыристая	Плотная
Структура	Витрофирующая, андезитовая, интерсертиальная	Витрофирующая, бифилетическая	Витрофирующая, бифилетическая
Основная масса	В стекле много микролитов плагиоклаза и пироксена	Преобладает стекло, микролитов плагиоклаза мало, микролиты пироксена почти отсутствуют	
Стекло	Темнобурое	Светлобурое	
Плагиоклаз	Включает капельки стекла, корродирован и деформирован		
Пироксен	Фенокристаллы разбиты на агрегаты зерен		Фенокристаллы в виде идиоморфных вкрапленников
Оливин	Окружен реакционной каймой		
Рудный минерал	Редко присутствует рудная сыпь	Рудная сыпь более богатая	
Количественный минералогический состав, пересчитанный без учета пор, %	pl 34.9—31.9 py 8.1—6.3 ol 2.8—5.3 Основная масса = 54.2—56.5	pl—27.1 py—11.3 ol—4.8 Стекло = 56.8	pl—24.5 py—8.5 ol—7.5 Стекло = 59.5

Наши наблюдения несколько расходятся с теоретическими данными исследования Барта (Barth, 1936) о порядке кристаллизации базальта, по мнению которого состав базальта определяет, какой минерал будет выделяться первым. Барт принимал нормативные минералы ab , an , di , hy за углы тетраэдра и построил для кристаллизации базальтов поверхность, отделяющую поле плагиоклаза от поля пироксена. Эта пограничная поверхность определяется суммой $ab + 2di + 2.3hy = 123$. При сумме, равной 123, базальт падает на пограничную поверхность, и в таких базальтах следует ожидать одновременной кристаллизации pl и py . Если сумма меньше 123, состав базальта попадает в поле pl , и это вызывает раннее выделение pl , до тех пор пока жидкость не достигнет того состава, который позволяет одновременно выделяться pl и py . В случае, если сумма больше 123, необходимо ожидать раннего выделения py . В наших базальтах f близко к 100 или несколько больше, т. е.

точка нашего состава ложится в поле плагиоклаза. Отсюда для наших базальтов, согласно исследованиям Барта, необходимо ожидать или одновременного выделения плагиоклаза и пироксена, или более раннего выделения первого, до тех пор пока жидкость не достигнет того состава, который допускает одновременное выделение плагиоклаза и пироксена. Но судя по микроскопическим данным, у нас первым в интрателлурическую стадию выделяется пироксен в виде первых мелких его выделений, после чего идет одновременная кристаллизация крупных фенокристаллов плагиоклаза и пироксена, обнаруживающих взаимное прорастванение в кристаллических участках.

После того как магма излилась на дневную поверхность, пироксен в процессе кристаллизации опять-таки выделяется в ранние моменты, может быть и одновременно с плагиоклазом. Об этом можно судить по тому, что в закаленной лаве, наряду с очень незначительным — по сравнению с лавой, застывшей в нормальных поверхностных условиях — количеством микролитов плагиоклаза, все же, хотя и в небольшом количестве, присутствуют зернышки пироксена. Таким образом, резюмируя порядок выделения минералов, можно сказать, что в интрателлурическую стадию, т. е. до того как лава излилась на дневную поверхность, происходила кристаллизация, при которой первым выделялся оливин, и хотя по химическому составу магмы его и не должно быть в породе, он сохранился благодаря оболочке из рудного минерала и пироксена, образовавшейся вокруг его зерен в результате реакции с расплавом. Кристаллы оливина частично опускались в более глубокие участки, судя по тому, что лава, выбрасываемая Соседним жерлом, по нашему предположению, из более глубоких участков, содержит повышенное количество оливина и сегрегации из оливина и пироксена.

За кристаллизацией оливина следует выделение пироксена — он окружает оболочкой кристаллы оливина и образует также самостоятельные мелкие зерна. Когда выделение пироксена еще не закончилось, началась кристаллизация плагиоклаза, и в дальнейшем их выделение шло одновременно. При росте кристаллы плагиоклаза захватывали стекло. В интрателлурических условиях происходила коррозия кристаллов плагиоклаза (обнаружена в закаленной лаве).

Магма вытекала на дневную поверхность, уже имея кристаллическое вещество — фенокристаллы оливина, пироксена и плагиоклаза, но была достаточно жидкодна. После излияния магмы кристаллизация ее продолжалась. Пироксен и в поверхностных условиях выделялся, вероятно, первым — его зернышки были обнаружены в закаленной лаве, в которой вообще успело образоваться очень мало микролитов, а все застыло в виде стекла.

Образование пузыристости происходило в процессе застывания лавы уже в поверхностных условиях, а отчасти в устье жерла. Пузыристость может появляться тогда, когда магма становится достаточно вязкой. Первое впечатление было такое, что лава приобрела пузыристость еще на глубине, так как из Лавового жерла она вытекала, уже будучи пузыристой. Нам удавалось видеть и брать лаву огненно-красную в расстоянии всего лишь 3—5 м от места ее выхода на дневную поверхность, т. е. от жерла; в поверхностном, уже вязком слое она была пузыристой. Но по наличию в лавовом потоке участков очень плотного базальта, в котором даже под микроскопом не было обнаружено пор, и по плотной структуре блоков, вылетающих из Соседнего жерла, можно сделать заключение, что магма на глубине (по блокам Соседа), а иногда

и достигшая поверхности, не была пузыристая. Пузыристость появляется в результате выделения летучих компонентов в лаве, уже ставшей достаточно вязкой в поверхностных условиях.

По этому поводу в литературе высказывается два мнения: Эрдмансдорфер считает, что пузыристость на значительных глубинах не вызывает сомнений. Шеферд и другие полагают, что простой арифметический расчет доказывает невозможность образования пузырей на большой глубине. Боуэн также считает, что лава не была пузыристой, когда достигала земной поверхности, и не могла терять газы путем образования пузырей, находясь вблизи поверхности, так как в нижних слоях лавовых потоков пузыристость отсутствует. По Ниггли, в достигших поверхности лавах пористая структура наблюдается до глубины 320 м. По В. Н. Лодочникову, пузыристость появляется тогда, когда магма становится достаточно вязкой. Если магма жидкостная, пузыристость при выделении газа не может возникать.

Если судить по материалам извержения Билюкая, магма на глубине не обладала пузыристостью. Последняя появилась в результате выделения летучих компонентов тогда, когда магма стала достаточно вязкой при остывании ее. Пузыристость могла образоваться при выходе магмы на земную поверхность и отчасти еще в жерле.

В базальтах из нижних кратеров — Билюкая и Тирануса — присутствует только один моноклинный пироксен, в лавах же верхних кратеров — Третьем и Козее — наряду с моноклинным пироксеном встречается и ромбический. Барт (1936) указывал, что базальтовая лава наиболее часто содержит только одну пироксеновую фазу по составу от диопсида до пиджонита. Этот тип пироксена был встречен в базальтах Тихого океана, Южной Африки, Индии, островов Зеленого мыса, Ферос, Исландии и Восточной Гренландии. В некоторых же базальтах было встречено два вида пироксена — моноклинный и ромбический. Цзубои на основании изучения японских андезитов пришел к выводу, что пироксеновые компоненты в этих породах в плутонической стадии являются только частично смешиваемыми, тогда как в эффузивной стадии они вполне смешиваемы. Барт применил выводы Цзубои к базальтовым магмам и сделал следующие выводы, в частности для Тихоокеанской области. В японских андезитах в устойчивом парагенезисе пироксенов находятся гиперстен и диопсид, пиджонит же появляется как метастабильная фаза при быстрой кристаллизации. Различие в поведении пород в краевой и внутренней зоне Тихоокеанской области объясняется тем, что японские андезиты, принадлежащие к более поздней стадии магматических реакционных рядов, чем базальты внутри Тихоокеанской области, лежат вполне внутри гиперстенового поля, тогда как кристаллизация из более горячих, собственно базальтовых магм происходила, по крайней мере частично, выше температуры превращения гиперстена в пиджонит.

В диабазовом силле Палисад, который тянется в виде полосы вдоль р. Гудзон на протяжении 70 км при мощности в 350 м, Уокер (Walker, 1940) констатирует четыре вида пироксенов — гиперстен, авгит, пиджонит и клиногиперстен. Верхние две трети слоя содержат моноклинный пироксен с малым $2V$, ниже в слое у клинопироксена $2V$ увеличивается и появляется гиперстен. Пиджонит преобладает вверху слоя. Стабильность пиджонита вверху автор связывает не с температурными условиями, как результатом быстрой кристаллизации, а с обилием летучих компонентов.

В базальтах нижних кратеров Билюкая присутствует только моноклинный пироксен ряда диопсид — геденбергит. В бомбах верхних крате-

ров Тирануса и Третьем наряду с моноклинным пироксеном присутствует в незначительном количестве и ромбический пироксен в виде гиперстена. В лавах Козея и Вершинного кратера Ключевского вулкана ромбического пироксена много. В взрывных продуктах Вершинного кратера, кроме того, встречен еще пиджонит. Из взаимоотношений минералов видно, что гиперстен как бы выделяется первым. Так, в бомбе и лаве Третьего были встречены таблички гиперстена, окруженные тоненькой каемкой моноклинного пироксена. В бомбе Тирануса таблички гиперстена окружены широкой зоной моноклинного пироксена. В лавах Козея и Вершинного кратера гиперстен встречается в виде самостоятельных табличек. Как объяснить эти взаимоотношения? Возможно, что гиперстен выкристаллизовался как более поздний член в верхних краевых частях магматического очага и конвенционными потоками был занесен в более высокотемпературные участки, где начинали выпадать более ранние члены ряда, и являлся ядром, вокруг которого они могли отлагаться. Таким образом, объясняется неправильная зональность в плагиоклазе, когда более поздний член (плагиоклаз, более богатый альбитом) окружен зоной более раннего члена (менее богатого альбитом). Последующая зональность у них правильная.

Итак, надо принять, что в магматическом очаге до эффузивного периода уже происходила кристаллизация. Протекала она в условиях постоянного перемешивания благодаря выделению летучих компонентов и конвенционным потокам. В результате перемешивания происходил вынос мелких кристаллов более позднего члена, в частности гиперстена, из верхних частей очага, где кристаллизация зашла дальше. Эти кристаллы служили ядрами для роста кристаллов более позднего члена.

4. ГАЗООБРАЗНЫЕ ПРОДУКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ

1) Состав газообразных продуктов

Из продуктов извержения вулканов меньше всего изучены газообразные; это целиком относится и к Ключевскому вулкану с его паразитическими кратерами. Обычно исследованию подвергались газы, выходящие из фумарол в лавовом потоке или же из кратера, но не в момент пароксизма. Кроме того, при сборе проб газа не удается избежать смешения его с воздухом, что обычно вызывает ряд реакций, которые изменяют внутримолекулярное состояние. Неизбежны также реакции между отдельными компонентами в газовой смеси при существующем состоянии неравновесия. Наконец, газы, выделяющиеся из лавы, не вполне характеризуют состав газовой фазы магмы, так как часть их удерживается лавой. Таким образом, количественный и качественный анализ проб газа дает только частичное представление о составе летучих компонентов в магме.

Газ, выделяющийся в виде фумарол из Билюкая, состоит преимущественно из паров воды. Из других компонентов определены HCl , SO_2 , H_2S , CO_2 , CO , CH_4 , H_2 , O_2 , N_2 , F_2 . Кроме того, в газах Вершинного кратера установлено присутствие благородных газов Ar , Kr , Xe , He , Ne . Концентрация газов в фумаролах различная. Около некоторых фумарол нельзя было находиться продолжительное время, газ раздражал слизистую оболочку глаза и носа и вызывал кашель. Около других фумарол можно было оставаться в продолжение нескольких часов, так как газ был очень разрежен.

В табл. 30 приводятся анализы газа Билюкая, произведенные в большей своей части на вулканологической станции.

Таблица 30

Сводка анализов газов фумарол билюкая

№ п. п.	Название фумаролы	Время взятия пробы	Температура фумаролы, °С	Содержание отдельных компонентов в газовой смеси, %								
				H ₂ O, мг/л газа	HCl	SO ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂
1	1	1938 20.II	Выше 50	—	0.35	—	—	1.35	—	—	78.64	19.64
2	2		250	—	5.51	—	—	1.00	—	—	74.94	18.53
3	3		225	—	0.81	—	—	2.74	—	—	77.80	18.66
4	Красная	26.III	475	2.24	0.70	—	—	0.24	—	—	79.83	19.83
5	Белая		350	0.50	0.65	—	—	1.15	—	—	82.49	16.36
6	Водяная	14.VII	320	42.6	1.6	—	—	0.46	—	—	77.17	20.07
7	»	31.VII	234	22.46	0.89	—	—	0.55	—	—	82.46	17.19
8	»	12.VIII	20	—	0.22	0.26	1.1	0.52	0.0	0.0	82.0	15.0
9	Желтая	14.VII	220	77.70	0.29	—	—	0.31	—	—	78.84	20.85
10	»	31.VII	164	69.18	0.11	—	—	0.30	—	—	79.50	20.20
11	»	12.VIII	—	—	0.0	0.50	0.0	0.52	0.0	0.0	79.0	19.0
21	№ 1	2.XI	150	100	0.6	—	—	0.4	—	—	79.6	19.4
13	№ 2		290	1600	1.0	—	—	—	—	—	78.7	20.3
14	№ 3		465	10	0.2	—	—	—	—	—	80.1	19.7
15	№ 4		240	100	0.8	—	—	—	0.01	—	79.3	19.9
16	№ 5		265	16000	0.7	—	—	—	—	—	79.0	20.3
17	№ 6		275	33	0.1	—	—	—	—	—	79.8	19.8
18	№ 7		400	3.5	0.6	—	—	0.001	—	—	79.9	19.5
19	№ 8		800	1000	0.5	—	—	—	—	—	78.5	21.0
20	№ 9	1939 16.I	225	407	3.2	—	—	—	—	—	80.5	16.5
21	№ 10		350	250	2.4	—	—	0.607	—	—	79.69	17.3
22	№ 11		335	200	—	—	—	—	—	—	79.3	20.7
23	№ 12		475	500	0.3	—	—	—	—	—	80.1	19.6
24	№ 13		205	805	0.1	—	—	—	—	—	79.9	20.0
25	№ 14		250	715	0.4	—	—	—	—	—	80.4	19.2
26	№ 15		25	60	0.4	—	—	—	—	—	80.5	19.1
27	№ 16		205	25	0.1	—	—	—	—	—	79.8	19.2
28	№ 17		525	800	1.82	—	—	—	—	—	80.16	18.02
29	№ 18		450	500	0.49	—	—	—	—	—	80.01	19.5
30	№ 20	1.III	50	15	—	—	—	—	—	—	79.8	20.2
31	№ 21		50	54	0.24	—	—	—	—	—	80.06	19.7
32	№ 22		37	20	0.46	—	—	—	—	—	79.74	19.8
33	№ 23		500	100	0.12	—	—	—	—	—	79.88	20.0
34	№ 24		550	540	1.4	—	—	—	—	—	79.8	18.8
35	№ 25	29.III	500	50	0.6	—	—	—	—	—	80.24	19.2
36	№ 26		525	75	—	—	—	—	—	—	79.60	20.4
37	№ 27		75	10	0.2	—	—	—	—	—	79.60	20.2
38	№ 28	30.III	250	15	0.4	—	—	—	—	—	79.60	20.0
39	№ 29		225	400	1.72	—	—	—	—	—	79.98	18.3
40	№ 30		200	600	0.9	—	2.1	—	—	—	79.5	17.5
41	№ 31		225	1000	0.3	—	0.5	—	—	—	80.07	19.2
42	№ 32		255	150	0.58	—	3.0	—	—	—	78.23	18.19
43	№ 33		150	100	—	—	—	—	—	—	79.4	20.6
44	№ 34		160	10	—	—	—	—	—	—	79.5	20.5

Анализы 1—7, 9 и 10 выполнены аналитиком С. И. Набоко; 12—44 — И. З. Ивановым; 8 и 11 — газовой лабораторией ИГН.

В сублиматах определены: NH₄Cl, Na₂SiF₆, FeCl₃, NaCl, CuCl₂ · 2H₂O, Fe(OH)₃, C, CaF₂ (химическим путем).

В большинстве анализов производилось определение общего количества кислой части, которая считалась за HCl, но качественно в кислой части кроме HCl всегда присутствуют еще SO₂, H₂S, CO₂.

Отдельно о воде

Преобладающим компонентом в газовой смеси наших фумарол, как указывалось выше, являются пары воды. В литературе нет до сих пор твердо установившегося взгляда на происхождение воды. Некоторые авторы, как, например, Готье, считали всю воду газовых струй вулкана



Фиг. 26. Газообразные продукты, выделяющиеся из Основного жерла, невидимые у кратера.
Фото С. И. Набоко.

глубинной магматической. Чемберлен склонялся к мнению, что значительная часть воды, участвующей в выбросах вулканов, выделяется непосредственно из пород, залегающих на глубине и нагреваемых магмой. Брен в своих исследованиях старался показать, что в эксгаляциях, связанных со стадией пароксизма, не встречается соединение H₂O, и из этого делает вывод, что в самой магме не содержится воды. Дэй и Шеферд в своих наблюдениях над лавовым озером Галемау-мау у Килауэа (Гавайские острова) и путем взятия проб газа из пузырей, образующихся над жидкой магмой, пытались доказать, что вода образуется из магмы, и считали, что нет ни одного факта, который доказывал бы, что в действительности большие извержения или выделение газов лавового озера Килауэа не сопровождались эксгаляциями водяного пара: Как

вполне убедительно говорит Ниггли (1937), не может быть и речи о том, что магма является безводной. Вода считается отщепленной от магмы, а первичная ли она или вторичная — это решить трудно, да и не имеет особо важного значения с физико-химической точки зрения.

То, что магма Билиюкая водная подтверждают следующие наблюдения: 1) во время пароксизмов выделяющийся из Основного жерла столб газообразных продуктов часто был совершенно невидим у основания, из чего следует, что он состоял преимущественно из паров воды (фиг. 26); 2) в дымовом столбе, поднимающемся из Основного жерла, часто были видны дугообразные радуги; 3) вулканический песок, выпадающий из дымового столба над Соседним жерлом, обычно влажный, иногда из дымового столба выпадает даже грязевой дождь (в солнеч-

ную погоду); 4) основное то, что во всех фумаролах, независимо от температуры, в газовой смеси преобладают пары воды. Кроме того, по данным химика И. З. Иванова, в фумароле, имеющей температуру 800°, было определено до 1000 мг воды в 1 л газа. Все эти данные убеждают нас в том, что преобладающей составной частью среди летучих компонентов магмы являются пары воды.

Аллен и Зайс установили, что при выбросе фумаролами Долины десяти тысяч дымов, содержащих свыше 99% паров воды, глубинный источник воды для их образования недостаточен. При этом ими была подмечена некоторая связь между количеством выбрасываемой фумаролами воды и количеством выпадающих осадков. Такой связи мы не обнаружили, хотя и вели специальные наблюдения: производился анализ газа одной и той же фумаролы при различных атмосферных условиях — в дождливую погоду, после дождя, в ясную солнечную погоду, при различных атмосферных давлениях, температурах и влажности воздуха. Ниже дается таблица анализов и диаграмма, на которой нанесены данные определения количества H_2O и HCl , температура фумаролы и атмосферные данные.

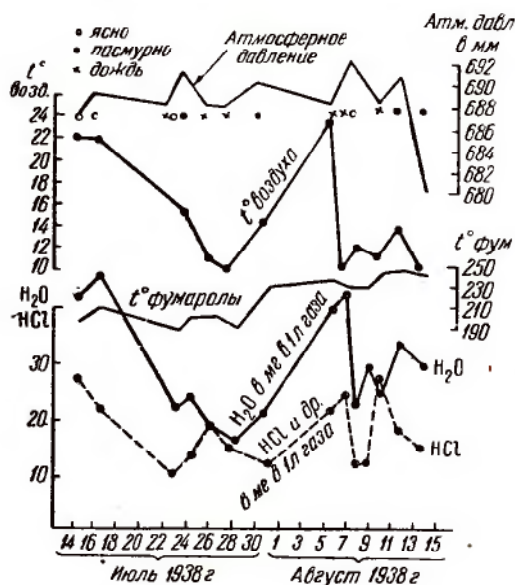
Таблица 31

Содержание H_2O и HCl в фумаролах Билукая и атмосферные условия в дни взятия проб

Время взятия пробы	t° воздуха	Давление воздуха в мм ртутного столба	Погода за день		t° фумаролы	H_2O , мг/л газа	HCl , мг/л газа	Отношение H_2O к HCl
			первая половина	вторая половина				
Июль								
14	22	687	Ясно	Пасмурно	200	42.6	27.1	1.6 : 1
16	22	689	»	Ясно	210	45.8	22.3	2 : 1
23	16	688	Ясно после дождя	ночного дождя	188	22.2	10.1	2.2 : 1
24	15	691	Пасмурно	Облачно	200	24.6	12.5	2 : 1
26	11	688	Дождь	Пасмурно	200	19.6	19.6	1 : 1
28	10	688	Дождь		187	15.3	14.7	1 : 1
31	15	690	Слегка облачно		233	20.9	10.7	2 : 1
Август								
6	24	688	Моросит дождь		240	40.8	22.2	1.9 : 1
7	8.5	690	После сильного ночного дождя		212	42.9	24.8	1.7 : 1
8	12.5	692	Ясно	Облачно	232	21.7	10.6	2 : 1
9	—	—	Пасмурно		234	28.8	11.6	2.4 : 1
10	11.5	688	Моросит дождь		240	23.2	26.6	1 : 1
12	14.5	690	Пасмурно		246	33.7	18.4	1.8 : 1
14	10.5	690	Слегка облачно		250	29.9	15.0	2 : 1

Как видно из таблицы, количество воды колебалось в различных пробах от 15.3 мг на 1 л газа до 45.8 мг, соответственно HCl от 10.1 до 27.1 мг на 1 л газа. Если бы атмосферные осадки влияли на состав газа фумарол, то мы должны были бы иметь весьма значительное увеличение относительного количества паров воды в фумароле во время или непосредственно после выпадения атмосферных осадков. Этого мы не наблюдали, так как происходило сильное испарение воды с поверхности потока, но в фумароле из глубоких трещин количество H_2O резко не увеличивалось.

При рассмотрении диаграммы (фиг. 27), на которой нанесены атмосферные данные (давление, температура, облачность), а также температуры фумаролы и количество H_2O и HCl в мг на 1 л газа, мы видим параллельность кривых H_2O и HCl , которым параллельна также кривая температуры воздуха. Это объясняется тем, что с понижением температуры воздуха фумарола действовала менее интенсивно и в пробе было больше воздуха.



Фиг. 27. Изменение во времени содержания HCl и H_2O в фумароле Билюкая.

Все эти данные — присутствие паров воды в газообразных выбросах из жерла вулкана в момент пароксизма, нахождение большого количества паров воды в фумароле из расплавленной лавы при температуре 800° и, наконец, некоторое постоянство отношения количества паров воды к кислой части в фумароле на небольшом отрезке времени и независимость колебаний содержания воды от атмосферных осадков — говорят о том, что вода находилась в магме и выделялась из нее в процессе извержения, являясь преобладающей составной частью летучих веществ.

Осталось рассмотреть вопрос о роли воды при эксклюзиях. Его можно осветить на примере извержения Вершинного кратера Ключевского вулкана. В табл. 32 и диаграмме (фиг. 28) приведены результаты определения воды, выделяющейся из вулканического песка при температуре выше 500° . Определения велись с помощью трубки Пенфелда (аналитик П. С. Лазаревич).

Таблица 32

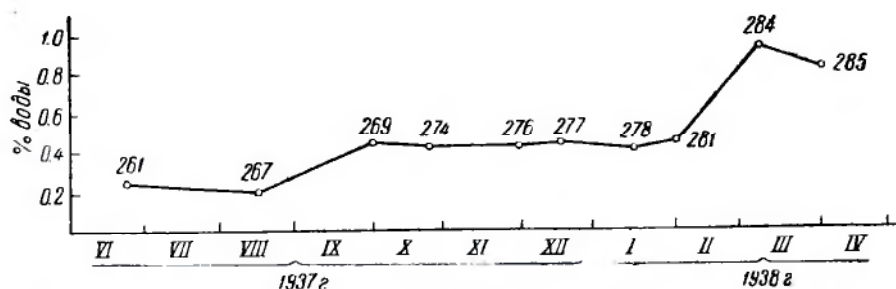
Содержание воды в пробах вулканического песка из Вершинного кратера

№ образца	Время эксплозии	H_2O , %	№ образца	Время эксплозии	H_2O , %
	1937			1938	
261	24.VI . . .	0.24	278	19.I	0.40
267	23.VIII . . .	0.22	281	30.I	0.46
269	2.X	0.47	284	6.III	1.00
274	22.X	0.44	285	7.IV	0.90
276	30.XI	0.44			
277	19.XII	0.45			

Наши 10-месячные наблюдения отчетливо показывают, как в процессе извержения увеличивается содержание H_2O в выбросах вулкана. Обратную зависимость установил Джонстон Левис (Johnston-Lavis,

1909). По мнению этого автора, нормальная последовательность продуктов выброса вулканического извержения, имеющего характер пароксизма, отчетливо обнаруживает уменьшение содержания газа. Он полагает, что магма во время интрателлурического перемещения вверх легко абсорбирует летучие вещества, особенно воду, из боковых пород. Абсорбция воды из богатых ею пород близ поверхности была большей, чем в контакте с породами, находящимися на глубине. Поэтому, по мнению автора, первоначально выброшенные порции лавы содержат больше воды, чем последующие.

Выделение летучих веществ из магмы регулируется температурой и давлением. В вулканических явлениях магматические процессы происходят при низких давлениях и высоких температурах. В зависимости от



Фиг. 28. Изменение содержания воды в вулканических песках Ключевского вулкана за период его извержения в 1937—1938 гг.

этих факторов, часть летучих компонентов может остаться в магме, которая при пароксизмах распыляется и выбрасывается в виде вулканического песка. В начальный момент выделение газов связано с понижением давления, вызванным подъемом магмы из более глубоких частей поверхности; дальнейшее выделение летучих компонентов регулируется изменением (в данном случае понижением) температуры, вызванным началом остывания верхних частей лавовой колонны. Увеличивающаяся вязкость, в связи с понижением температуры, и образование лавовой корки препятствовали выделению газообразной фазы, и часть летучих компонентов удерживалась лавой. Таким образом, можно ожидать — и это подтверждается на примере извержения Ключевского вулкана — увеличения содержания летучих компонентов, в частности паров воды, абсорбированных лавой, по мере развития извержения.

По содержанию воды рыхлые продукты отчетливо разделяются на три группы, соответствующие трем главным периодам извержения вулкана. В песках докульминационного периода количество воды минимальное (0,22—0,24%). Это был период эффузий, подъема все новых и новых порций лавы, переноса тепла и свободной дестилляции летучих. В песках послекульминационного периода количество воды скачкообразно возросло (0,40—0,47%). Это был период частых эксплозий, когда в результате понижения температуры магмы и увеличения вязкости ее газообразная фаза не могла свободно выделяться, а скапливалась до определенного предельного момента повышения внутреннего давления. Такие условия способствовали некоторому удержанию летучих компонентов в магме. Наконец, в песках последней группы количество воды максимальное (0,9—1,0%). Эти пески соответствуют периоду редких эксплозий, когда, судя по лавовому характеру песков, между отдельны-

ми explosionsми успевала образовываться лавовая корка или пробка. Газы, поднимающиеся из более глубоких частей магматического очага, накапливались под лавовой коркой до определенного критического момента, при котором происходил пароксизм. Такие условия способствовали еще большему задержанию летучих в магме в верхних частях канала.

Абсорбция воды застывающей лавой влекла за собой падение энергии извержения. Действительно, мы видели, что по мере развития извержения количество паров воды, выделяющихся из жерла вулкана, уменьшалось. Это находит свое объяснение при пересчете воды, абсорбированной лавой (находящейся в вулканическом песке), на пар. Если, например, остановиться на эксплозии средней силы, давшей 30 млн. м³ рыхлых продуктов, то количество паров воды, удерживаемых песком, будет равняться в начале извержения 170 млрд. л пара, после кульминации — 350 млрд. и в конце извержения — 760 млрд. л пара. Для сравнения скажем, что из Основного жерла Билюкая в момент сильного извержения его за 2 часа выделилось 2.5 млрд. л газа.

Таким образом, связь абсорбированной лавой воды с мощностью извержения говорит о том, что вода является составной частью магмы и служит одной из движущих сил извержения.

Отдельно о хлоре

Хлор является преобладающим компонентом кислой части газовой смеси и в виде соляной кислоты определен во всех газовых струях Билюкая. О том, что он преобладает, свидетельствует также обильное образование хлоридов вокруг фумарол. Повышенное содержание HCl, по мнению А. Н. Заварицкого (1935а), говорит о близости нахождения магматического очага. Это положение доказывается данными извержения Ключевского вулкана. Так, в кратерах, действующих одновременно и питающихся из одного магматического очага, количество HCl в фумаролах уменьшается в зависимости от гипсометрического уровня, на котором находится кратер: в фумаролах Билюкая HCl больше всего, в Тиранусе несколько меньше, в Третьем еще меньше, в воронках взрыва и Козее HCl встречается только в виде следов, а преобладают H₂S и SO₂. Таким образом, с удалением от магматического очага количество HCl уменьшается. Проследить по фумаролам Билюкая изменение количества HCl во времени не позволил короткий срок наблюдений.

С хлором из лавы Билюкая в виде хлоридов летят преимущественно Na, K, NH₃, Fe, в меньшей степени Al, Ca, Mg. Хлориды первой группы элементов в виде галита, сильвина, нашатыря и молизита преобладают среди сублиматов, в то время как Al, Ca и Mg летят в основном с серой с образованием сульфатов пиккерингита, эпсомита и др. Щелочи и железо в соединении с серой встречаются реже.

Хлор считается нормальным элементом основной магмы.

Отдельно о фторе

В газах и продуктах сублимации побочных кратеров Ключевского вулкана распространенным элементом, наряду с хлором, является фтор. Качественный анализ газа Билюкая и Туйлы дает сильную реакцию на фтор. Среди сублиматов на лавовом потоке присутствуют и фтористые соединения, причем найдено несколько фумарол, где образуются только они. Наконец, в вулканической бомбе определено 0.6% F.

Обычно принято считать, что фтор является одним из тех элементов, которые характеризуют кислую магму и определяют собой весь ход выделения летучих компонентов в ней (А. Е. Ферсман, 1934). В. Н. Лодчиков отмечает присутствие фтора в некоторых магмах, давших гиперосновные породы. Д. П. Григорьев (1939) в работе, посвященной искусственному получению амфиболов, причисляет фтор к тем 15—20 элементам, которыми определяется химия земной коры, и подчеркивает, что он является довольно обычной составной частью многих горных пород различного химического состава и генезиса. Для иллюстрации этого положения автор приводит список минералов из 172 названий, в которые входит фтор. В. И. Влодавец (1940а), характеризуя сублиматы паразитических кратеров, прорвавшихся в 1932 г. на склоне Ключевского вулкана, отмечает, что среди элементов возгонов наряду с элементами основной магмы встречаются элементы и кислой магмы — Рb, Zп, Sn, F, H. Вероятно, в кислых, средних и основных магмах присутствуют все элементы, различаясь только в количественном отношении. Для бильюкаевской базальтовой магмы характерно обогащение фтором.

2) Характер фумарол

В литературе имеется много попыток классификации фумарол, причем в основу обычно кладется их температура, в зависимости от которой меняется химический состав газа и, соответственно, сублиматов.

Так, Фуке различает 4 типа фумарол: 1) Фумаролы, обладающие наивысшей температурой — 650—1000° и больше. Они состоят главным образом из хлоридов, затем из HCl, SO₂ и CO₂, а во время стадии пароксизма также из H₂O. При сублимации образуются щелочные хлориды, сульфиды, сульфаты. 2) Фумаролы типично кислые. Они состоят из водяного пара, соляной кислоты и сернистых кислот. При более высоких температурах господствует HCl, при более низких — SO₂. Температура 400—500°. 3) Фумаролы более щелочные. Присутствуют нашатырь и аммониевый карбонат. Сернистые кислоты и сероводород наряду с CO₂ и H₂O являются главными составными частями. Температура 100—200°. 4) Фумаролы и мофетты, состоящие из чистого водяного пара и CO₂.

Классификация Саппера близка к классификации Фуке и тоже различает 4 типа фумарол: 1) Сухие нейтральные фумаролы, выделяющиеся из расплавленной лавы, — хлориды Na, K, Fe и Mn. 2) Кислые фумаролы — соляно- и сернокислые соли, реже сероводородные и углекислые сублиматы, хлориды железа и нашатырь. Температура 360—500°. 3) Щелочные фумаролы — водяные пары, аммиак, карбонаты аммония, сероводород и углекислота. Температура выше 100°. 4) Холодные фумаролы и мофетты с температурой ниже 100° — углекислота, водяные пары, сероводород, углеводы.

А. Н. Заварицкий, основываясь на многочисленных анализах фумарол, показывает, что по составу в них можно различать 3 группы компонентов: 1) Группа хлора: HCl и ряд хлоридов — NaCl, KCl, NH₄Cl, FeCl₂, CaCl₂, MgCl₂, AlCl₃, FeCl₃, к этой группе примыкают F и J и их соединения. 2) Группа серы: H₂S, SO₂, H₂SO₄, SO₃ и разные соли. К этой группе относятся также соединения AS, Se и др. В некоторых находится H₃BO₃; 3) Группа углерода: преобладает CO₂, встречаются CO и углеводороды, прежде всего метан CH₄.

Обычно фумаролы различных вулканов имеют свои особенности. На Везувии при извержении 1906 г. Лакруа установил 4 типа фумарол: 1) Фумаролы с кали-натровыми солями, с температурой 655° (аналогичны сухим фумаролам). 2) Кислые фумаролы с температурой ниже 412° (соответствуют 2-й группе Саппера). 3) Аммиачные фумаролы с температурой $100\text{--}200^{\circ}$. 4) Сероводородные фумаролы с температурой ниже 100° .

Фумаролы Санторинского вулкана извержения 1925 г. делятся Георгаласом и Лиатскиасом на 3 группы: 1) фумаролы с температурой выше 300° с нейтральной реакцией; присутствуют водяные пары и углекислота; сублиматы не обнаружены. 2) Кислые фумаролы с температурой $100\text{--}300^{\circ}$ — Cl, CO_2SO_2 ; сублиматы представлены хлоридами Fe, сульфатами Fe, окислами и солями серной кислоты, особенно CaSO_4 . 3) Слабо кислые фумаролы с температурой ниже 30° — водяные пары, CO_2 , H_2S , SO_2 .

В паразитических образованиях Ключевского вулкана 1938 г. мы имеем большое разнообразие фумарол. Прежде всего наблюдаются территориальные различия в составе фумарол: фумаролы поля Билюкая, Тирануса и Третьего относятся к фумаролам группы хлора, фумаролы воронок взрыва и Козея — к фумаролам группы серы.

Фумаролы лавового поля Билюкая в свою очередь разделяются на 5 групп: 1) Водяные фумаролы. Температура около 800° . Присутствует большое количество паров воды. Сублиматы не обнаружены. Газ выделяется из изливающейся лавы. 2) Галитовые фумаролы — температура выше 500° . Реакция нейтральная. Сублиматы — галит и сильвин. Спектральным путем определены следующие элементы: Ag, Cu, Co, Ni, V, Sa, Na, K, Ba, Cr, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si. Паров воды и газа мало. 3) Смешанные фумаролы. Температура $300\text{--}500^{\circ}$. Реакция кислая. Сублиматы — хлориды NH_3 , Fe, Al, Mg в виде нашатыря, молизита; сернокислые соли редки и представлены гипсом. Спектральным путем определены Cu, Co, Ni, V, Cr, Ir, Ga, Na, Ba, Sr, Ca, Mg, Fe, Mn, Ti, Si. 4) Нашатырные фумаролы. Температура $150\text{--}465^{\circ}$. Реакция у фумарол щелочная, у других — кислая. В виде сублимата встречается исключительно нашатырь. Спектральным путем определены: Cu, Ni, V, Cr, Ir, Na, Be, Sr, Co, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si. 5) Фтористые фумаролы. Температура $100\text{--}150^{\circ}$. Сублиматы — фториды Na, Ca, Mg и Fe. Спектральным путем определены: Be, Cu, Co, Ni, Cr, Sr, Ga, Na, K, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si.

1-й тип фумарол встречается в жидком лавовом потоке; 2-й — в начинающем застывать, но еще подвижном лавовом потоке; 3-й — в лавовом потоке на расстоянии не свыше 1—1.5 км от кратера; 4-й — нашатырные фумаролы, наиболее распространенные, встречаются по всему лавовому полю; отложения нашатыря в некоторых фумаролах значительны; 5-й тип — поля фтористых фумарол, редки, но обособлены; кроме фтористых, других минералов в них не встречается.

Количество фумарол очень велико. Ниже приводится описание некоторых фумарол, подобранных таким образом, чтобы дать представление о разнообразии их.

Фумаролы бокового вала (выход № 1). Лавовый поток у самого подножья конуса с северной стороны нес вал вулканического песка, под которым была скрыта застывающая лава. По валу, на протяжении 20—30 м, расположились несколько выходов газа, отмеченных цветными плотными корочками из вулканического песка, сцементированного белыми, желтыми и оранжевыми продуктами возгона.

Постоянных, ярко выраженных выходов газа было три. Первый, восточный, самый близкий к конусу, нами был констатирован еще в феврале, в первое наше посещение Билюкая. Здесь впервые была взята проба газа и замерена температура, которая оказалась выше 500° . У места выхода газа наблюдался тонкий налет белого галита, оранжевого порошковатого минерала молизита и белого нашатыря. Цвет газовой струи был голубоватый, отличный от цвета других фумарол, аналогичный цвету газа, который выделялся из кратера. Газ был едким, раздражающим дыхательные пути и вызывающим слезы на глазах. Спустя месяц, т. е. в конце марта, мы опять посетили эту фумаролу. Песок был уже сцементирован в плотную бугристую корочку оранжевого и красного цвета. Из отверстия, пробитого в корочке, пошла струя белого газа. Температура корочки была 400° , газа — 475° . Качественно в газе были обнаружены: H_2O , HCl , SO_2 , CO_2 , F , NH_3 ; реакция кислая. В июле — августе температура упала до 240° , корочка сохранилась, но возгонов на ее поверхности не образовывалось. Они были обнаружены с внутренней стороны, где наряду с оранжевыми минералами появилось много белого нашатыря.

Второй выход находился в расстоянии 10 м на запад от первого и отличался от него цветом корочки, по которому фумарола была названа белой. В феврале здесь выделялся не голубой газ, как у первого, а белый; возгонов не было совсем. К марту образовалась корочка толщиной 2—3 см из белого кристаллического нашатыря, кристаллики которого располагались перпендикулярно к плоскости отложения. Температура в марте составляла 350° , реакция газа была щелочная. Газ был настолько концентрирован, что при введении в него металлического прибора на нем немедленно отлагался нашатырь. В июле — августе температура фумаролы упала до 240° , временами понижаясь до 100° . Такие резкие колебания температуры фумарол песчаного вала объясняются цементацией песка и засорением выхода газа.

Третья фумарола, самая западная, была обнаружена только в июле. Площадь приблизительно в 1 м^2 парила белым газом, издававшим запах хлора. Песок, сцементированный в корочку, с поверхности ничем не отличался от окружающего песка. На обратной же стороне корочки находились обильные кристаллы белого нашатыря, желтой прозрачной серы и оранжевого порошковатого молизита, а самая корочка представляла собой песок, цементированный преимущественно нашатырем. Температура корочки 90° , газа — 250° .

Между первой и второй фумаролами из песка выступала большая глыба лавы, разбитая глубокой трещиной, из которой в марте выделялась с шумом струя горячего газа. Стенки трещины были покрыты тонким налетом белого нашатыря. Газ был густой, молочно-белого цвета, сильно пахнущий хлором. В июле — августе из этой трещины газ совсем не выделялся и возгоны пропали.

Фумарола водяная (выход № 2). За этой фумаролой укрепилось название водяной оттого, что на ней в продолжение месяца ежедневно или через день брались пробы газа на воду и кислую часть. Фумарола располагалась у подножья вала, образующего северный берег лавового русла, в расстоянии 200 м от лавового жерла. Обнаружена она была только в июле, а в августе уже перестала существовать, так как была залита новой порцией лавы, перелившейся через береговой вал. Газовая струя выходила здесь из трещины, в продолжение июля — августа очень энергично выделявшей газ белого цвета с сильным запахом хлора. На глыбах лавы и особенно под глыбами обнаружены были

большие количества возгонов, состоящих из оранжевого порошковатого минерала молизита, белого и желтого кристаллического нашатыря и других неопределенных минералов. Температура выхода газа в начале июля была 315°, потом упала до 250°.

На этой фумароле было подмечено, что взрывы Основного и Соседнего кратеров Билюкая сопровождались выталкиванием усиленных порций газа из этой трещины. Таким образом, при частых раскатах грохота газовые выделения из трещины как бы пульсировали.

Выход № 3. В расстоянии 500 м от конуса, за первым овражком, по северному краю лавового потока, обнаружено значительное фумарольное поле. Лава здесь глыбовая, разбита системой трещин различных направлений, имеющих глубину около 3 м. Из многих трещин выделялся белый газ, а на стенках вертикальных трещин имелись налеты желтого порошковатого фтористого минерала. Температура фумаролы 190—200°. Здесь же из-под больших глыб лавы выделялся молочно-белый газ и под ними были обнаружены большие скопления снежно-белого нашатыря. На развале глыб встречена плотная корочка в 2—3 см толщиной, состоявшая из фтористого минерала; с поверхности корочка имела белый цвет, с внутренней же стороны, в местах примыкания к лаве, она была буро-коричневая. Выделяющийся газ невидим, но раздражает слизистую оболочку дыхательных путей. За время сборов возгонов под ногами очень часто раздавался глухой, раскатистый грохот.

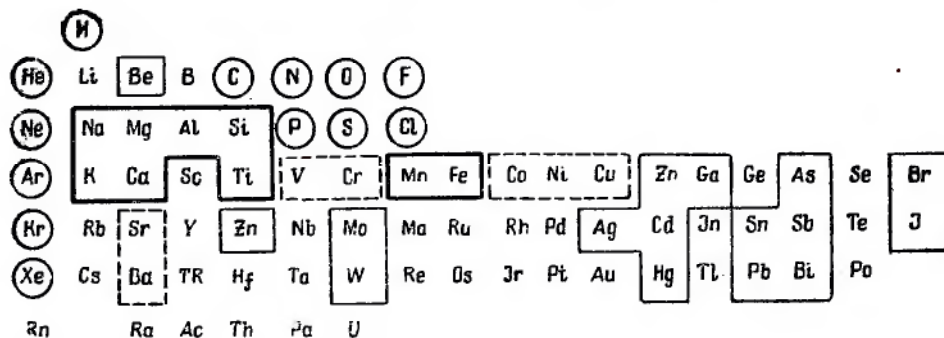
Фантастическая фумарола (выход № 4). В том же расстоянии от кратера, что и выход № 3, но в глубь потока, почти в его центральной части, из-под большой глыбы лавы диаметром 4—5 м очень энергично выделялся молочно-белый газ, сильно пахнущий аммиаком. Под глыбой находилась пещера, стенки которой были покрыты толстым налетом белого или слегка желтого нашатыря. С потолка пещеры свисали сталактиты кристаллического нашатыря белого, розового, желтого и оранжевого цвета. Вид этой пещеры действительно фантастический; долго оставаться в ней не позволял удушливый аммиачный газ. Сверху, с внешней стороны глыбы, имелся налет желтого хлористого железа. Вокруг основного выхода газа, на площади в 5—10 м радиусом, находилось еще несколько более мелких выходов. Газ выходил через трубы, стенки которых были покрыты нашатырем. Внутренняя стенка трубы была сложена из плотного нашатыря белого цвета, который ближе к наружной стенке становился пузыристым, сотового сложения, и окрашенным в желтый и оранжевый цвет. В еще нагретом состоянии нашатырь, взятый непосредственно из газового выхода, был мягок и пластичен; пролежав на воздухе некоторое время, он застывал в твердую массу. Температура фумаролы достигала 152°.

Грот-фумарола (выход № 5). На расстоянии 800 м от конуса, в северной части лавового поля, у подножья берегового лавового вала, имелось несколько выходов газа. Наиболее интенсивно газ выделялся из лавовой скалы, напоминавшей грот. На висячей стенке скалы находились большие скопления белого и лимонно-желтого нашатыря и желтого молизита. Температура выхода газа здесь превышала 400°. Вокруг грот-фумаролы располагались более мелкие выходы, также отмеченные отложениями корочек нашатыря. С поверхности на этих корочках отлагались зеленые лохматые сосочки. В широтном направлении от грот-фумаролы проходила лавовая гряда, почти вся парящая белым паром и покрытая тонким налетом белого нашатыря, желтого молизита и буро-коричневых окислов железа (лимонита).

Выход № 6. На расстоянии 3.5 км от конуса, в северной части лавового поля, на площади 20 × 20 м, в нескольких местах на больших глыбах лавы были обнаружены белые и желтые налеты, состоящие из фтористого минерала.

Выход № 7. На береговом валу, на том же расстоянии от конуса, что и выход № 6, находился целый ряд выходов газа молочно-белого цвета с запахом аммиака. Температура его 200°. Береговой вал состоял из обломков лавы, мелкого шлака и красной пылевидной массы. В местах выходов газа рыхлый материал сцементирован нашатырем, количество которого здесь значительно.

Выход № 8. На расстоянии 4 км от конуса холмик коричнево-красной лавы парил молочно-белым газом, пахнущим хлором. Обломки лавы на вершине холмика были покрыты тонким налетом хлопьевидного нашатыря. У подножья холмика проходила трещина, в которой видна была расплавленная красная лава; трещина выделяла бесцветный,



Фиг. 29. Распределение элементов в возгонах в зависимости от температуры fumarолы.

но сильно едкий газ, вызывающий слезотечение. Температура его пре-
вышала 500°. На стенках трещины осела тончайшая пленка порошко-
ватого светлорозового фтористого минерала и почти белого галита с
примесью сильвина.

Выход № 9. В 500 м от выхода № 8 в лавовом потоке первой пор-
ции обнаружен огромный лавовый пузырь диаметром до 4 м. На вну-
тренней стенке пузыря, на сталактитах из лавы, отложился тонкий на-
лет белого нашатыря. Стенки пузыря слегка парили белым газом.

Выход № 10. Не доходя 500 м до конца лавового потока, в цен-
тральной части его, находилась чаша диаметром в 2 м, которая с гудя-
щим шумом выделяла белый пар с температурой 250°. На глыбах лавы
в чаше наблюдались скопления белого хлопьевидного нашатыря. Во-
круг этой чаши имелось еще несколько трещин, из которых также энер-
гично выделялся газ. Эта fumarола, по интенсивности выделения газа
занимавшая первое место, видна была издали. На одной из глыб обна-
ружен налет зеленого гигроскопического мылоподобного минерала, ко-
торый расплзлся на воздухе и не мог быть сохранен. Вероятно, чаша
представляет собой вторичный кратер на лавовом потоке.

Выход № 11. На самом конце лавового потока второй порции,
на расстоянии 10 км от конуса, обнаружено очень активное fumarоль-
ное поле. Молочно-белый газ выделялся из трещин в лаве. Выходы газа
были окружены нашатырем. Температура газа доходила до 300°.

Здесь приведено описание всего нескольких выходов газа из огромного числа наблюдавшихся фумарол.

Среди минеральных образований фумарол, которые де Фиори по генетическому признаку делит на 4 группы, мы имеем:

1) продукты обыкновенной сублимации — нашатырь, галит, сильвин, молизит;

2) продукты газовых реакций — серу и графит;

3) продукты разрушения пород фумаролами — фториды и гипс;

4) продукты преобразования трех первых категорий — лимонит.

Спектральным анализом в сублиматах обнаружено 24 элемента. Все же в газах и возгонах известно 40 элементов. На прилагаемой таблице (фиг. 29) кружками обозначены элементы, обнаруженные в вулканических газах; толстой линией обведены элементы, встречающиеся в сублиматах в количествах, превышающих 1%; жирным шрифтом обведены элементы, встречающиеся в количествах менее 1%, и тонкой линией — элементы, обнаруженные в сублиматах в следах.

3) Минералогия сублиматов

Минералогия сублиматов на лавовых полях побочных кратеров разнообразна, но многие минералы нам не удалось определить. Все встреченные минералы можно разбить на 4 группы:

I. Самородные — сера и графит.

II. Галоиды:

1) хлориды — галит, сильвин, молизит, нашатырь;

2) фториды — новый минерал.

III. Сульфаты — пиккерингит, эпсомит, галотрихит, алуноген, чермигит, моренозит, буссенготит, гипс.

IV. Гидроокислы — лимонит.

Ниже дается описание только нескольких минералов, которые были нами изучены лучше. Многие минералы не получили названий, так как по установленным иммерсионным методом показателям преломления их было трудно отнести к тому или иному виду. Возможно, что некоторые из них встречены впервые, как, например, фтористый минерал.

Самородные элементы

Из самородных элементов среди сублиматов Билюкая были встречены только сера и графит.

Графит был обнаружен впервые химиком И. З. Ивановым в виде тонкого налета черного цвета на спекшихся кусках нашатыря. Из собранного графита им было выделено незначительное количество маслянистой жидкости в виде высших углеводов, застывших при комнатной температуре. Температура фумарол 200—250°.

В сублиматах Билюкая графит, вероятно, органического происхождения. Лавовый поток на своем пути заваливал растительность и при сгорании ее углерод переносился газовой струей и отлагался в виде налета графита на продуктах сублимации, в частности на нашатыре.

Сера на Билюкае встречена в небольших количествах в некоторых фумаролах в виде примеси к хлоридам и в одной фумароле самостоятельно с примесью ряда сульфатов.

Сера в этой фумароле тонкоиглочатого строения, изумрудно-зеленого цвета. Температура фумаролы была 240°. Через некоторое время на стенках закрытой пробирки, где сохранялся возгон серы, образо-

вался интенсивно синий налет, а сама сера потеряла зеленый цвет и стала желтой. Зеленая окраска, по Уклонскому (1940), зависит от примеси битумов. Совместно с серой находится целый ряд других минералов: алуноген, чермигит $(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, моренозит. Спектральным путем в этой сере обнаружены Mg, Al, Fe, Si.

В значительно больших количествах сера встречается в воронках взрыва. Там она обнаружена в двух видах: 1) в виде грязножелтых нацветов и 2) в виде табличатых кристаллов чисто желтого цвета, образующих щетки на стенках скалы, находящейся на дне кратера Козея. Сера здесь совершенно чистая, без каких-либо минеральных примесей.

Г а л о и д ы

Хлориды являются наиболее распространенными минералами среди сублиматов лавового потока Билюкая. Среди них преобладает нашатырь, менее обычны молизит и галит, редко встречается сильвин. Преобладают фумаролы, где отлагается чистый нашатырь, совершенно без каких-либо примесей других минералов. В некоторых фумаролах, особенно в устьевой части лавового потока, одновременно отлагался целый ряд хлоридов.

Хлориды металлов при вулканических явлениях и изобилии существуют в фазе пара наряду с H_2S , SO_2 , HCl .

Нашатырь является наиболее распространенным минералом в возгонах. Он встречен в фумаролах по всему лавовому потоку Билюкая на протяжении 10 км, но совершенно не был обнаружен в воронках взрыва и в Козее. Температурный интервал выделения его очень широкий, от 150 до 475°. Так, нами были встречены фумаролы с температурой 150, 220, 265, 285, 300, 320 и 475°. Форма выделения и цвет нашатыря разнообразны; нами наблюдался нашатырь аморфный, ватобразный, пластинчатый, волокнистый, ячеистый (фиг. 30), окрашенный в белый, медово-желтый, янтарный, буро-коричневый и оранжевый цвет. Вкус горько-соленый; хорошо растворяется в воде.

Под микроскопом минерал прозрачен, изотропен, с показателями преломления, равными 1.638.

Спектральный анализ трех образцов нашатыря дает содержание в нем еще Cu, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti и Si. Исключение составляет нашатырь № 893, где кроме перечисленных элементов обнаружены также Co, Ni, V, Cr, Zr, Na, Ba и Sr. Макроскопически последний отличается от первых двух своим цветом, а именно: в то время как № 892 и № 20 снежно-белые, № 893 буро-коричневый, может быть благодаря наличию этих примесей.

Кроме того, в Биогеохимической лаборатории им. академика В. И. Вернадского Селивановым был произведен ряд анализов нашатыря на Cl, Br, J и подсчитаны отношения Cl к Br. Ниже приводится анализ одного из образцов:

№ 215 Cl = 62.25%. Отношение Cl к Br равняется 490 : 1

$$\text{Br} = 1.27 \cdot 10^{-1} \%$$

$$\text{J} = 1 \cdot 10^{-4} \%$$

По Ниггли, образование нашатыря только отчасти интрателлурическое, но чаще связано с воздействием лавового потока на растительность. Это справедливо и для Билюкая, и для кратеров 1932 г., где больше всего нашатыря встречается в лавовых потоках, которые



Фиг. 30. Суолиматы нашагыря. Умен. в 1.5 раза.
1 — сахаровидный нашатырь; 2 — ятечный нашатырь; 3 — сотовидный нашатырь.

залили растительность, в то время как в лавовых потоках Тирануса, Третьего, воронок взрыва, Козей, на потоках западного склона и Вершинного кратера, находящихся выше зоны растительности, нашатыря мы не находим совершенно. Это подтверждает, кроме того, нахождение графита в виде налета на отложениях нашатыря.

Галит встречается реже, чем нашатырь. Больше всего его встречено на вновь изливающимся потоке Билюкая и в кратере Тирануса. В обоих случаях цвет его белый с слегка сероватым оттенком, вкус соленый, строение тонкокристаллическое, он хорошо растворяется в воде. Температура его образования около 500° и выше.

Под микроскопом минерал — изотропный, мутный; показатель преломления 1.510. Наряду с галитом встречается другой, тоже изотропный минерал, но с меньшим показателем преломления, относящийся, вероятно, к сильвину, так как спектральный анализ показал в этих возгонах большое количество калия. Спектральным анализом в галите обнаружены следующие элементы: Ag, Cu, Sn, V, Na, K, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si.

Любопытно, что в обоих образцах галита обнаружено серебро, которого больше ни в каких возгонах замечено не было. Кроме серебра, в галите с Тирануса установлено еще присутствие олова. Образование галита происходило при высокой температуре — он обычно образуется на лавовом потоке, только что излившемся, причем большое количество его приходится на первый период излияния лавы. Значительных скоплений галит не образует ввиду хорошей растворимости в атмосферных осадках.

Фториды

Среди сублиматов на лавовом потоке Билюкая фтористые минералы довольно распространены.

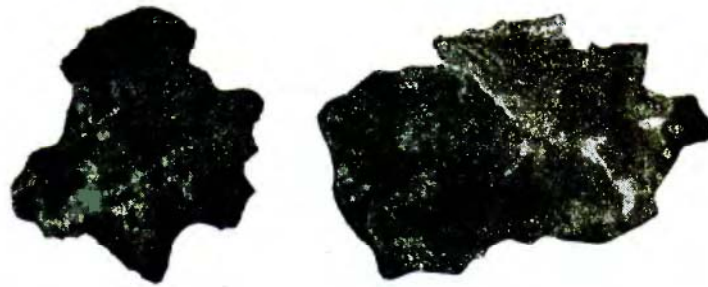
Фтористые минералы известны среди продуктов сублимации ряда вулканов. Так, например, де Фриори на вулкане Вулкано определил гьератит $2\text{HF} \cdot \text{SiF}$, а Ниггли — виллиомит NaF и селлаит MgF_2 . На Везувии, по данным Замбонини (Zambonini, 1935), встречено несколько фтористых минералов: селлаит MgF_2 , флюорит CaF_2 , ферручит NaBF_4 , авогадрит KBF_4 , криптогалит $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_4$, малладрит Na_2SiF_6 , хондродит $\text{Mg}_3\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{F}, \text{OH})_2$, гумит $3\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{F}, \text{OH})_2$, клиногумит $4\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{F}, \text{OH})_2$. За последнее время список фтористых минералов на Везувии, вероятно, еще увеличился.

На Билюкае фтористые соединения встречались среди отложений газовых струй, температура которых не превышала 200° , т. е. фуларол более низкотемпературных, чем те, к которым приурочены, например, хлориды. Одна из разновидностей фтористых сублиматов Билюкая, отличавшаяся однородностью, была изучена более детально.

Образец был взят на лавовом потоке Билюкая в 500 м от кратера среди развала глыб, где на площади радиусом в 25 м имеется несколько выходов газа. Газ бесцветный, без запаха, но сильно раздражающий слизистую оболочку носа. Под глыбами лавы и у самого выхода газа обнаружены скопления светложелтого вещества, представляющего собой фтористый минерал. Чаще всего он образует на лавовых глыбах плотную корочку, и в этих случаях внешняя поверхность корочки светложелтая, а поверхность, прилегающая к лаве, окрашена в буроватый цвет (фиг. 31). Кроме такой формы нахождения минерал встречался в виде щеточек на глыбах, в порошковатом состоянии и как цемент

обломочков лавы. Во всех случаях он однороден. Температура газовых струй у поверхности была 98—170°.

А. Н. Заварицкий объясняет натечную форму серы, встречающейся на Авачинском вулкане, переплавлением под влиянием температуры фумаролы и последующим застыванием (Заварицкий, 1935а). Возможно, что и здесь происходили аналогичные процессы. Такой же фтори-



Фиг. 31. Сублиматы фтористого минерала. Умен. в 1.5 раза.

стый минерал с теми же оптическими свойствами был встречен еще в 3 точках на лавовом потоке Билюкая и описан как неопределенный минерал (Боровик и Набоко, 1941)

Для химического анализа была отобрана чистая проба. Результат анализа приведен в табл. 33.

Таблица 33

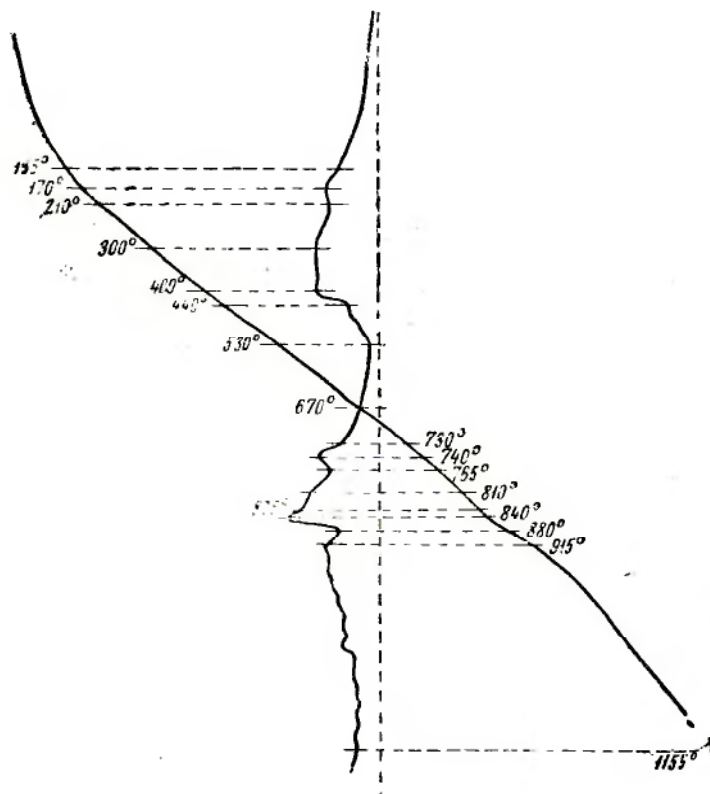
Химический состав фтористого минерала
(аналитик В. Некрасова)

Вес. %	Вес. % в пересчете на элементы	Мол. кол-во.	
SiO ₂	1.80	Al 14.96	0.5555 } 0.5809
Al ₂ O ₃	28.26	Fe 1.42	
Fe ₂ O ₃	2.04	Mg 5.22	0.2146 } 0.4140
MgO	8.65	Ca 7.99	
CaO	11.15	Na 3.43	0.1492 } 0.1720
Na ₂ O	4.62	K 0.89	
K ₂ O	1.07	H ₂ O { 1.86	0.7471 } 0.7471
H ₂ O _{-110°}	1.86		
H ₂ O _{+110°}	11.60	F 43.40	2.2892 } 2.3121
F	43.40	Cl 0.81	
Cl	0.81		
Сумма	115.26		
		Поправка на F 18.16	
		» на Cl 0.19	
		91.58	

Из этих цифр минералогическую формулу можно представить в виде (Na, K)₅(Ca, Mg)₁₂Al₁₆F₆₇·22H₂O, причем фтора не хватает, чтобы связать все катионы (F₆₇ против F₇₇). Если принять количество Na + K за единицу, получим более упрощенную формулу: NaCaMgAl₃F₁₄·4H₂O. В этом случае количество F соответствует количеству анионов.

В табл. 34 даны весовые проценты элементов, вычисленные из минералогической формулы в обоих вариантах (№ 1 и 2), параллельно с данными анализа (№ 3). Формула $(\text{Na}, \text{K})_5, (\text{Ca}, \text{Mg})_{12}\text{Al}_{16}\text{F}_{67} \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ более соответствует данным химического анализа.

Спектральным путем во фтористом минерале дополнительно определены Be, Cu, Co, V, Cr, Zr, Ga, Ba и Sr (анализ производился в лаборатории спектрального анализа С. А. Боровика). Минерал разлагается крепкой соляной кислотой и не растворяется в других кислотах.



Фиг. 32. Кривая нагревания фтористого минерала (Лабор. эксперим. петрографии ИГН АН СССР, 17.VIII. 1942).

Под микроскопом вещество однородное, светложелтого цвета, прозрачное или замутненное мельчайшими включениями. Оптически минерал изотропен с показателем преломления, близким к 1.383.

Рентгеновские исследования порошка методом дебаеграммы установили, что минерал кристаллический; так как он изотропный, то относится к кубической сингонии.

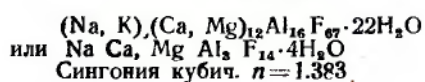
Кривая нагревания для минерала довольно сложная, с несколькими эндо- и экзотермическими остановками. Наиболее отчетливо выражены три эндотермические остановки — при 170, 740 и 840° и одна экзотермическая при 880° (фиг. 32). Прогиб в левой части диаграммы сходен с флюоритовым — это отражает химический состав, и в минералогическую формулу, вероятно, входит флюоритовая молекула.

Из известных фтористых минералов по химическому составу и оптическим свойствам описанный минерал ближе всего подходит к ральстониту (см. табл. 34, № 4 и 5).

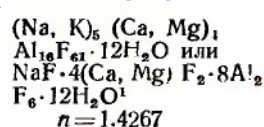
Таблица 34

	Наш минерал			Ральстонит	
	вес. %, вычисленные из формулы (Na, K) ₅ (Ca, Mg) ₁₂ Al ₁₆ F ₆₇ ·22H ₂ O	вес. %, вычисленные из формулы NaCaMgAl ₃ F ₁₄ ·4H ₂ O	вес. % по анализу	вес. % по Nordenskyöld (Doelter, 1931)	вес. % по Brande (Doelter, 1931)
	1	2	3	4	5
Na	3.43	3.43	3.43	4.66	5.50
K	0.89	0.89	0.89	сл.	—
Mg	5.12	4.18	5.22	5.52	3.56
Ca	8.17	6.90	8.60	1.99	1.53
Al	14.86	13.93	14.96	22.90	22.14
Fe	—	—	1.43	—	—
F	43.79	47.78	43.40	50.05	57.12
H ₂ O	13.63	12.39	13.46	14.81	10.00
Cl	—	—	0.81	—	—
Mg:Ca	0.6:1	0.6:1	0.6:1	4:1	4:1

Формула:



Формула:



Сравнивая химические и оптические свойства ральстонита и нашего минерала, мы видим, что наш минерал отличается от ральстонита в основном повышенным содержанием Ca (8 против 1.99%) и пониженным Al (15 против 22%). В минералогических формулах различие соответственно выражается в коэффициенте при основаниях (12 вместо 4). По оптическим свойствам ральстонит имеет повышенный показатель преломления — 1.4267 против 1.383. Исходя из этих различий, мы вправе утверждать, что имеем новый фтористый минерал.

Группа сульфатов

Сульфаты были встречены главным образом в воронках взрыва и в кратере Козея. До того в области Ключевского вулкана присутствие сульфатов не было известно. Значительные количества (килограммы) их отлагались в 1938 г. вокруг газовых струй на дне кратера Козея. Температура газовых струй колебалась в пределах 120—280°. Цвет сублиматов — сульфатов преимущественно белый или слегка желтоватый в воронках взрыва и бурый или коричневый на Козее. Строение волокнистое или массивное. Большинство образцов хорошо растворяется в воде, жирны на ощупь, обладают кислым вяжущим вкусом.

Под микроскопом сублиматы обычно оказываются состоящими из смеси минералов. Проба, в которой определено только два минерала, была анализирована.

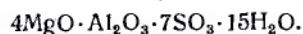
¹ Формула рассчитана из анализа № 2.

Химический анализ сульфата из кратера Козея следующий (в весовых %):

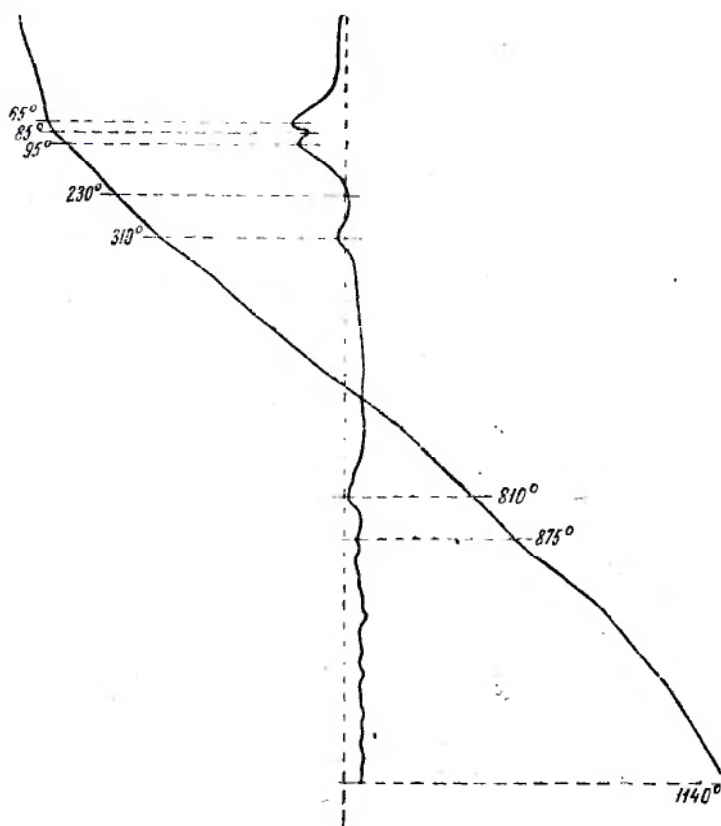
Al ₂ O ₃	8.88	Na ₂ O	0.30
Fe ₂	0.28	H ₂ O	23.47
MnO	0.15	SO ₃	50.59
MgO	15.52	Cl	0.81

(Аналитик Шумило.)

Пересчет на минералогическую формулу:



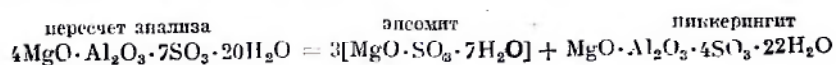
Спектральным анализом определены дополнительно следующие элементы: Cu, Co, Ni, Pb, V, Cr, Zr, Ga, Na, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Ti, Si. Обращает на себя внимание присутствие в сульфатах свинца,



Фиг. 33. Кривая нагревания сульфатов (Лабор. эксперим. петрографии ИГН АН СССР, 17.VIII. 1942).

молибдена, висмута и повышенное количество Co и Ni. Повышенное количество Ga в сульфатах может быть объяснено близостью ионных радиусов у Ga и у Al, которого здесь много.

Под микроскопом обнаружено два минерала, по оптическим свойствам близкие к пиккерингиту и эпсомиту. Пересчеты химического анализа образца также дают два этих минерала:



Недостаток воды в анализе по сравнению с минералогической формулой может быть объяснен тем, что проба была сильно гидролизована и получить постоянный вес не удалось. На кривой нагревания (фиг. 33) имеется 5 эндотермических остановок при температуре 65, 95, 310, 810, 875°. Первые три соответствуют эпсомитовым остановкам. Экзоконтактных остановок две: при 85 и 230°.

Пиккерингит — бесцветный и слабо желтоватый, лучистый, тонко волокнистый, со слабым дупреломлением и косым погасанием; показатель преломления близок к 1.483.

А. Н. Заварицкий в сублиматах Авачинского вулкана описал изоморфную смесь галотрихита и пиккерингита. Пийп обнаружил и описал смесь галотрихита и пиккерингита в горячих источниках (1938 г.). Вертушков, изучающий минералы колчеданных пожаров Урала, обнаружил пиккерингит с 25—75% галотрихита и назвал этот минерал ферропиккерингитом, считая, что это самостоятельный минеральный вид. В нашем сублимате пиккерингит находится, вероятно, чистый; если в нем и есть галотрихитовая молекула, то в очень незначительном количестве, так как в химическом анализе всего 0.36 Fe₂O₃.

Второй минерал по оптическим и химическим свойствам относится к эпсомиту. Он прозрачный, двусный, с высоким дупреломлением. Встречаются разрезы в виде восьмиугольников и квадратов. Наибольший показатель преломления $n_g = 1.456$. Кривая нагревания дала отчетливые эндотермические остановки эпсомита при 65 и 95° и высокую при 310°.

Другие образцы сульфатов из кратера Козья имеют большее разнообразие минералов. Цвет их буро-коричневый, вкус кислый, жирные на ощупь, растворяются в воде. В горячем состоянии у газовой струи пробы были мягкие и в пробирке на холоде затвердевали. Химический анализ одного из таких сублиматов приведен в табл. 35.

Таблица 35

Компоненты	Вес. %	Мол. колич.	Компоненты	Вес. %	Мол. колич.	Компоненты	Вес. %	Мол. колич.
SiO ₂	0.74	—	MgO	5.19	0.130	SO ₃	34.96	0.437
TiO ₂	0.11	—	CaO	0.56	0.009	Cl	1.66	—
Al ₂ O ₃	16.81	0.160	Na ₂ O	4.17	0.067	P ₂ O ₃	0.22	—
Fe ₂ O ₃	6.24	0.039	K ₂ O	0.21	0.002			
FeO	2.00	0.028	H ₂ O _{-110°}	14.06	1.594	Сумма	100.33	—
MnO	0.16	—	H ₂ O _{+110°}	13.74				
						Поправка на Cl	$\frac{0.38}{99.95}$	

(Аналитик В. Некрасова)

Под микроскопом в анализированном образце обнаружен пиккерингит, аналогичный вышеописанному; кроме того, встречен минерал с высоким дупреломлением, облачным погасанием, с хорошей спайностью, косым угасанием. Наивысший показатель преломления 1.474. По оптическим свойствам близок к алуногену. Третий минерал близок по оптическим свойствам к галотрихиту.

Минералогия сублиматов Козея очень близка к минералогии вулкана Авачи: здесь также встречены самородная сера, алуноген, пиккерингит, галотрихит, гипс, андигрит, но в наших сублиматах не обнаружены вольтаит и сассолин, хотя следы бора качественно в сублиматах Козея и были определены.

А. Н. Заварицкий при изучении сублиматов Авачинского вулкана обратил внимание на то, что в вынесенных на поверхность отложениях сульфатов относительные количества оснований следуют приблизительно тому же порядку, в каком мы их находим в первоначальной породе, а именно: Al, Fe, Mg, Ca, Na, K. При этом, как отмечает автор, неизбежна некоторая дифференциация этих оснований с отклонением от первоначальных отношений; так, в случае Авачинского вулкана происходит значительная фиксация Ca в виде гипса. Сопоставляя состав выцветов сульфатов около fumarol с характером изменения пород, через которые пробиваются газы, автор делает предположение, что вещество выцветов заимствовано из пород.

Для рассмотрения с этой точки зрения наших сублиматов в табл. 36 приведены данные пересчета к 100% количеств окислов без SiO₂ базальта и сублиматов.

Таблица 36

Весовой % окислов в сульфатах

Компоненты	Базальт	Фтор. мин.	Смесь сульфатов	
Al ₂ O ₃	33.3	50.1	47.3	40.6
Fe ₂ O ₃	5.6	3.6	18.0	10.4
FeO	13.3	—	5.7	—
MgO	17.6	15.4	14.8	23.0
CaO	20.4	19.7	1.6	1.2
Na ₂ O	5.2	8.2	12.0	12.8
K ₂ O	2.4	1.9	0.6	2.0

Порядок убывания окислов

Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
CaO	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO
MgO	MgO	MgO	Fe ₂ O ₃
Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O
Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O
K ₂ O	K ₂ O	K ₂ O	CaO

Как видно из таблицы, количества основных окислов у фтористого минерала и базальта не только распределяются в одинаковом порядке, но и очень близки друг к другу; особенно это относится к Ca и Mg. Al несколько больше у фтористого сублимата за счет Fe, которого в нем значительно меньше, чем в базальте. Что касается сульфатов, то в них, при сохранении распределения окислов в одинаковом порядке с базальтом, вместо Fe, как у фтористого сублимата, отсутствует Ca, аналогично сульфатам Авачинского вулкана. В этом различии надо видеть особенность воздействия газов, богатых, с одной стороны, фтором, с другой — сернистым ангидридом, на базальт. В случае воздействия на базальт фтористых газов из породы выносятся Fe; при воздействии сернистых газов — Ca.

V. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ В МАГМАТИЧЕСКОМ ОЧАГЕ, ИМЕЮЩЕМ СВЯЗЬ С ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В вулканическом очаге, как и в каждой жидкой интрузии, может происходить дифференциация, по существу мало отличающаяся от дифференциации в условиях отсутствия связи с поверхностными излияниями (Niggli, 1937). В обоих случаях действие факторов дифференциации направлено к тому, «чтобы привести к неоднородности магматического бассейна с расположением более кислых и легких частей вверху и более основных и тяжелых внизу» (Заварицкий, 1935б). Известно немало примеров, когда в одной и той же вулканической области имеется большое разнообразие лав.

Общая картина дифференциации во многих вулканических районах отличается большой сложностью. Как указывает А. Н. Заварицкий (1940), «в вулканических явлениях имеет большое разнообразие последовательность извержения лав различного состава, более запутанная, чем последовательность интрузии в сплошных интрузивных массивах, обусловленная соотношениями между скоростью течения процесса дифференциации, с одной стороны, и частотой прорывавших его непрерывное течение эруптивных актов и интенсивностью — с другой», или, как он говорит в более ранней работе (Заварицкий, 1935б), «большую сложность в последовательности извержений различных лав по сравнению с последовательностью образования пород интрузивных следует связывать с тем, что акты извержений прерывают нормальное течение процесса дифференциации в магматическом очаге». Если в историческое время у вулканов наблюдается определенное постоянство состава изверженных масс, то это постоянство, выражаясь геологическим языком, распространяется на очень незначительный промежуток времени, в течение которого явления дифференциации проявляются далеко не везде.

Для Ключевского вулкана некоторые особенности характера извержения, происходившего одновременно из 10 кратеров на 15-километровом горизонтальном протяжении при значительных различиях в гипсометрических уровнях, говорят в пользу наличия дифференциации в вулканическом очаге и в канале этого вулкана. К такого рода признакам можно отнести:

- 1) изменение химического и минералогического состава лавы в зависимости от места выхода ее на дневную поверхность — расстояния от центрального канала вулкана и гипсометрического уровня;
- 2) изменение состава вулканического газа и продуктов сублимации в зависимости от тех же причин;

3) изменение состава продуктов извержения Вершинного кратера и Билюкая в зависимости от времени.

Остановимся подробнее на соответствующих данных.

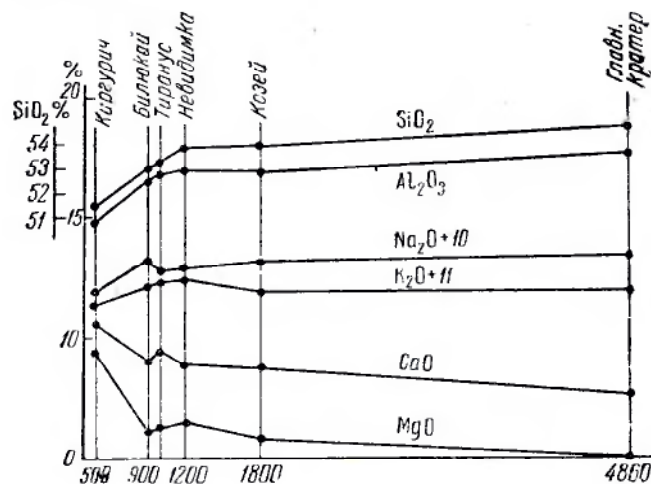
Изменение химического состава лавы, излившейся почти одновременно из различных кратеров, видно из сводной таблицы химических анализов (табл. 37).

Таблица 37

Химические анализы лав Вершинного и побочных кратеров Ключевского вулкана (вес. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	54.45	54.38	53.93	53.48	53.17	51.03	53.46	52.34	51.51
TiO ₂	1.10	0.76	1.14	0.93	0.88	1.00	1.01	0.95	0.57
Al ₂ O ₃	17.42	18.31	16.91	16.53	14.27	17.03	15.37	14.57	14.91
Fe ₂ O ₃	2.45	2.98	3.45	4.12	5.92	3.58	2.59	2.69	3.09
FeO	5.94	5.37	5.51	5.64	5.92	5.23	6.13	6.09	6.26
MnO	0.29	0.15	0.20	0.16	0.16	0.35	0.19	0.11	0.20
MgO	3.12	4.50	5.74	6.56	6.35	6.75	8.12	9.89	9.37
CaO	8.31	8.64	8.57	8.80	9.40	10.45	9.42	9.76	10.80
K ₂ O	1.19	1.54	1.07	1.46	1.23	1.34	1.10	0.67	0.63
Na ₂ O	3.43	3.16	3.23	2.56	2.58	2.93	2.40	2.54	2.15
BaO	0.01	0.02	0.04	—	—	—	—	—	—
S	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—
H ₂ O _{-110°}	Нет	—	—	—	0.04	0.10	0.14	0.03	—
H ₂ O _{+110°}	0.12	0.43	—	—	—	0.20	0.04	0.48	0.32
P ₂ O ₃	0.32	—	0.27	—	—	0.11	0.27	0.11	—
Cl	—	—	—	—	—	—	—	—	—

1—лава из Вершинного кратера (на высоте 4860 м), извержение 1937 г.; 2—лавила из Вершинного кратера, извержение 1937 г.; 3—кратер Козей (на высоте 1800 м), извержение 8 февраля 1938 г.; 4—кратер Третий (на высоте 1160 м), извержение 8 февраля 1938 г.; 5—кратер Тиранус (на высоте 1000 м), извержение 8 февраля 1938 г.; 6—кратер Билюкай (на высоте 900 м), извержение 8 февраля 1938 г.; 7—кратер Билюкай (на высоте 900 м), извержение 1938 г.; 8—кратер Туйла (на высоте 500 м), извержение 1932 г.; 9—кратер Киргурич (на высоте 500 м), извержение 1932 г.



Фиг. 34. Диаграмма изменения состава лав Ключевского вулкана извержения 1937—1938 гг. в зависимости от места ее выхода.

В таблице 37 даны химические анализы лав всех кратеров — Вершинного, находящегося на высоте 4860 м, Козея — на 1800 м, Третьего — на 1160 м, Тирануса — на 1000 м, Билюкая — на 900 м, Киргурича и Туйлы — на 500 м.

Из табл. 37 и диаграммы фиг. 34, на которой нанесено содержание главных окислов, мы видим тенденцию к увеличению SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O и к уменьшению CaO и MgO по мере перехода от лав нижних кратеров, наиболее удаленных от центра вулкана, к лавам верхних кратеров, расположенных ближе к каналу. На диаграмме фиг. 35, построенной так, что по абсциссе отложено содержание кремнекислоты, возрастающее с повышением уровня выхода лавы, а на ординате количество других окислов, мы видим увеличение Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 и уменьшение CaO и MgO от нижних кратеров к верхним. Такое изменение соответствует нормальному ходу гравитационной дифференциации.

Числовые характеристики химического состава тех же пород по А. Н. Заварицкому даны в табл. 38.

Таблица 38

Числовые характеристики лав Ключевского вулкана по А. Н. Заварицкому

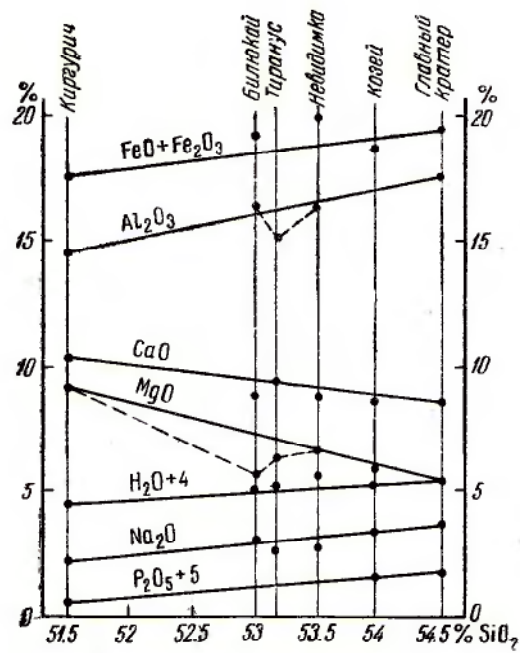
a	c	b	s	f'	m'	c'	n	t	φ	Q	a/c
9.4	7.1	19.9	63.6	41	44	15	81	1.5	11	1.3	1.3
9.3	7.7	19.6	63.4	46	39	15	76	1.1	13	0.5	1.2
8.8	7.0	21.6	62.6	39	45	16	71	1.5	13	0.6	1.2
7.8	7.2	23.6	61.4	38	47	15	82	1.2	15	0.0	1.1
7.4	5.7	26.8	60.1	40	40	20	86	1.2	18	-0.3	1.3
8.3	7.3	25.4	59.0	33	45	22	77	1.5	12	-5.9	1.1
6.8	6.7	26.0	60.5	31	52	17	76	1.4	8.2	-1.3	1.0
6.3	6.2	29.2	58.3	27	55	18	75	1.4	7.7	2.2	1.0
5.3	7.1	29.8	57.8	29	52	19	85	0.8	8.5	2.1	0.75

Из таблицы 38 мы видим колебания числовых характеристик в наших породах в следующих пределах:

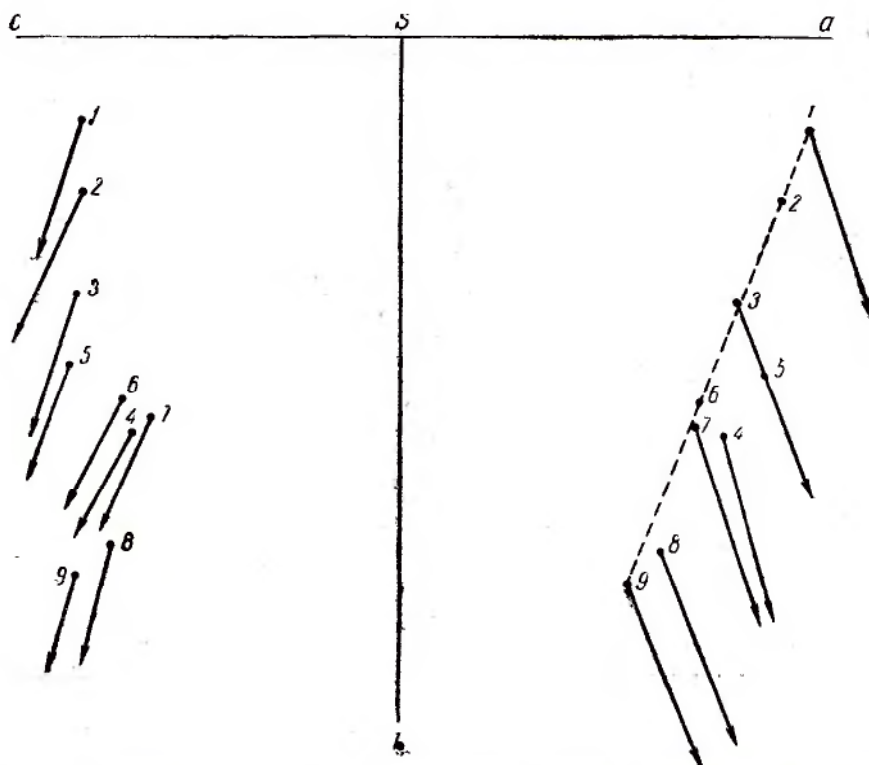
a . . .	от 5.3 до 9.4	f' . . .	от 27 до 46	t . . .	от 0.8 до 1.5
c . . .	» 5.7 » 7.7	m' . . .	» 39 » 55	φ . . .	» 7.7 » 18
b . . .	» 19.6 » 29.8	c' . . .	» 15 » 22	Q . . .	» 5.9 » 1.3
s . . .	» 57.8 » 63.6	n . . .	» 72 » 85	a/c . . .	» 0.75 » 1.3

В наших лавах от нижних кратеров, наиболее удаленных от канала вулкана, к верхним закономерно увеличивается относительное число атомов щелочных металлов, входящих в алюмосиликаты (a), и уменьшается относительное количество металлических атомов, не входящих в алюмосиликаты, т. е. феррическая часть породы (b). Относительное количество атомов Ca, входящих в алюмосиликаты, т. е. апортитовая молекула (c), колеблется. Кроме того, наблюдается тенденция убывания количества атомов магния (m') и кальция (c') и увеличения железа в феррических компонентах.

При нанесении числовых характеристик наших пород на диаграмму А. Н. Заварицкого — типов изверженных горных пород, получивших особое название, лава Вершинного кратера по своему составу оказывается близкой к лаве кварцевого базальта, лава Третьего и Тирануса — к габбро, Билюкая — к диабазу и Туйлы и Киргурича — к оливи-



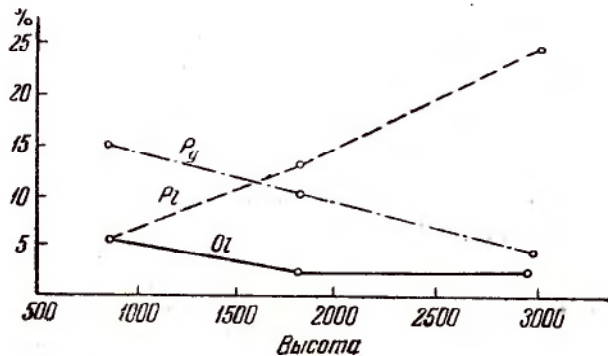
Фиг. 35. Диаграмма изменения состава лав Ключевского вулкана извержения 1937 — 1938 гг.



Фиг. 36. Диаграмма состава лав Ключевского вулкана, построенная по методу академика А. Н. Заварицкого.

новому габбро. Таким образом, дифференциация привела к разнообразию типов пород по химическому (но не по минералогическому) составу от кварцевого базальта до оливинного габбро.

На фиг. 36 дана диаграмма химического состава, построенная по методу академика А. Н. Заварицкого. Диаграмма прекрасно показывает распределение фигуративных точек по прямой и смещение линии дифференциации в зависимости от высоты выхода лавы на дневную поверхность и удаленности его от главного канала. От нижних кратеров к верхним идет неуклонное увеличение числа атомов щелочных металлов, входящих в алюмосиликаты в комбинации с Al,—щелочная молекула (а); уменьшение числа атомов кальция, соединенных в алюмосиликатах с алюминием,—анортитовая молекула (с); уменьшение относительного числа всех металлических атомов, не входящих в алюмосиликаты,—фермическая молекула (b) и увеличение атомов кремнекислоты. Векторы имеют одинаковую длину и параллельны друг другу.



Фиг. 37. Диаграмма изменения минералогического состава лав Ключевского вулкана извержения 1937—1938 гг.

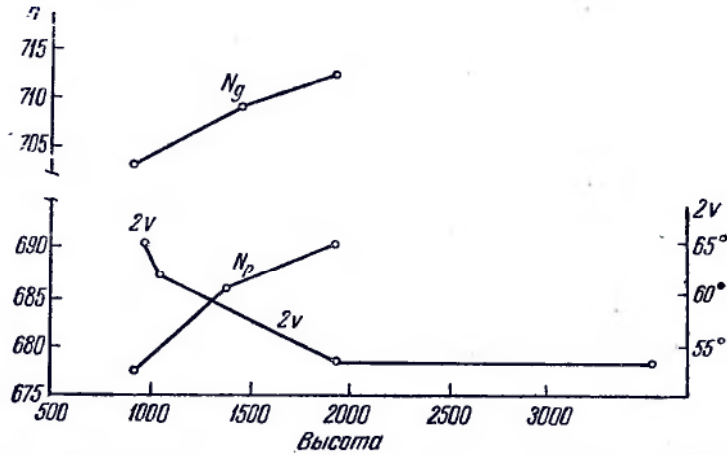
Изменение минералогического состава лавы выражается в том, что в верхних кратерах появляется гиперстен. В то время как лавы нижних кратеров (Туйла, Киргурич, Билюкай, Тиранус) имеют в своем составе плагиоклаз, моноклинный пироксен и оливин, в лавы верхних кратеров (Третий, Козей и Вершинный) наряду с перечисленными появляется ромбический пироксен, а количество оливина в них соответственно уменьшается (см. табл. 39 и диаграмму процентного состава лав — фиг. 37).

Таблица 39

Количественный минералогический состав лавы побочных кратеров (в %)

	Западный склон	Козей (№ 886)	Билюкай		
			№ 324	№ 861	
Основная масса (с микролитами)	62.8	76.7	80.1	73.6	
Вкрапленники	$\left\{ \begin{array}{l} pl \\ py \\ ol \end{array} \right.$	25.1	13.8	8.4	6.6
		4	16.0	6.6	14.7
		2.5	3.5	4.9	6.1

Изменение состава минералов, определяемое по оптическим свойствам, можно видеть из табл. 40 и диаграмм фиг. 38 и 39. Изменение пироксена ряда диопсид — геденбергит идет в сторону увеличения железистой молекулы в зависимости от высоты выхода лавы.



Фиг. 38. Диаграмма изменения оптических свойств пироксена в лавах Ключевского вулкана извержения 1937—1938 гг.

Таблица 40

Оптические свойства минералов лавы побочных кратеров

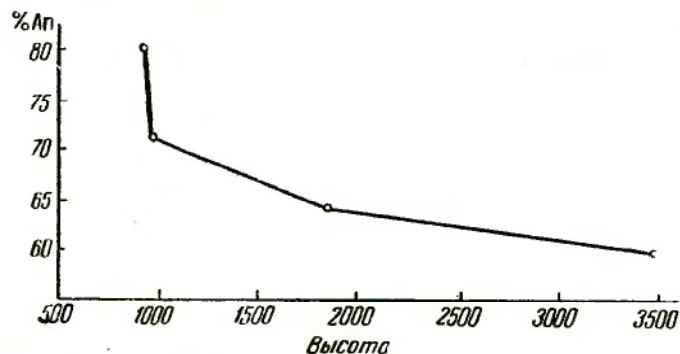
	Плагиоклаз		Пироксен				Оливин		
	вкрапленники, №	микролиты, №	Ng	Np	2 V	c Ng	Ng	Np	2 V
Главный кратер	58—60	—	—	—	—	—	—	—	—
Западный склон	65	50	—	—	+54	30	—	—	—
Козей	64	70	1.714	1.690	—	44	—	—	—
Третий	80	75	1.710	1.686	+54	39	—	—	+80
Тиранус	70—72	70	—	—	+57—62	42	—	—	+88
Билукай	77—80	65	1.702	1.678	+58—66	30	1.694	1.658	80—82

Законмерное изменение плагиоклазов наблюдается только во вкрапленниках. Вкрапленники Вершинного кратера более кислые, в нижних кратерах они становятся более основными, т. е. в составе их увеличивается анортитовая молекула. В микролитовой фазе этой закономерности мы не наблюдаем.

Таким образом, изменение химического состава лавы согласуется с изменением состава интрателлурических минералов.

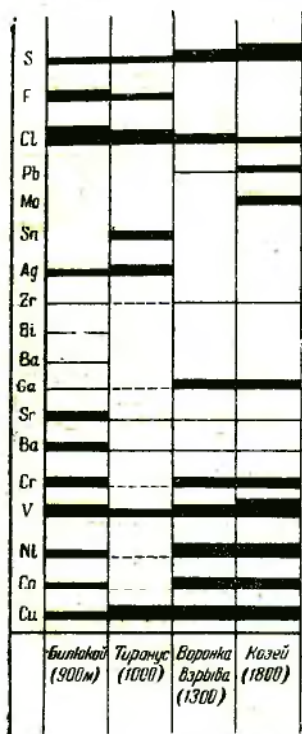
Изменение состава вулканического газа. Наряду с неоднородностью твердых продуктов извержения — неоднородностью характеризуется и газовая фаза. Так, в нижних кратерах с первого момента извержения и во все последующее время кислая часть газа в основном состояла из Cl (кратеры 1932 г., Билукай, Тиранус, Третий), а в верхних кратерах — из SO₃ и H₂S (воронки взрыва, Козей, Вершинный кратер). Об этом свидетельствует обильное образование сульфатов в верхних кратерах и хлоридов в нижних.

Для разъяснения этого факта может быть выдвинуто два объяснения: 1) Различие температурного режима и влияние фактора времени. Это объяснение, приводящееся обычно во всех случаях наличия неоднородности фумарол, должно отпасть, поскольку на лавовом поле Билюкая мы имеем фумаролы с очень широким температурным диапазоном, как с более высокой, так и более низкой температурой, чем у фумарол воронок взрыва. Что же касается возраста фумарол, то все кратеры прорвались одновременно, а на лавовом потоке Билюкая мы имеем фумаролы и в только что излившейся лаве, и на остывающем потоке. 2) Условия выхода фумарол. Фумаролы Билюкая расположены на лавовом потоке, фумаролы воронок взрыва и Козея — на дне кратеров. Это обстоятельство отчасти должно сказаться на характере газовой фазы, поскольку фумаролы на дне кратера могут выражать состав газа, выделяющегося из магмы, а фумаролы на лавовом поле выражают только состав газа, выделяющегося при застывании потока. Но в нашем примере это условие не решающее, поскольку в кратерах Тирануса и Третьем сублиматы исключительно хлориды. Для кратеров Билюкая яркo-оранжевый цвет сублиматов (извлечь которые нам не удалось) говорит о том, что это также преимущественно хлориды, а в кратере Соседнем совершенно отсутствовали сублиматы. Остается объяснить это различие правилом Сан-Клер-Девиля, согласно которому изменение газовой фазы происходит в зависимости от удаления вулканических газов от очага.



Фиг. 39. Диаграмма изменения состава плагиоклаза в лавах Ключевского вулкана извержения 1937—1938 гг.

родности фумарол, должно отпасть, поскольку на лавовом поле Билюкая мы имеем фумаролы с очень широким температурным диапазоном, как с более высокой, так и более низкой температурой, чем у фумарол воронок взрыва. Что же касается возраста фумарол, то все кратеры прорвались одновременно, а на лавовом потоке Билюкая мы имеем фумаролы и в только что излившейся лаве, и на остывающем потоке. 2) Условия выхода фумарол. Фумаролы Билюкая расположены на лавовом потоке, фумаролы воронок взрыва и Козея — на дне кратеров. Это обстоятельство отчасти должно сказаться на характере газовой фазы, поскольку фумаролы на дне кратера могут выражать состав газа, выделяющегося из магмы, а фумаролы на лавовом поле выражают только состав газа, выделяющегося при застывании потока. Но в нашем примере это условие не решающее, поскольку в кратерах Тирануса и Третьем сублиматы исключительно хлориды. Для кратеров Билюкая яркo-оранжевый цвет сублиматов (извлечь которые нам не удалось) говорит о том, что это также преимущественно хлориды, а в кратере Соседнем совершенно отсутствовали сублиматы. Остается объяснить это различие правилом Сан-Клер-Девиля, согласно которому изменение газовой фазы происходит в зависимости от удаления вулканических газов от очага.



Фиг. 40. Распределение элементов в возгонах различных кратеров группы Билюкая

Кроме того, в продуктах сублимации газовых струй наблюдается зональное распределение элементов (фиг. 40). В нижнем кратере, Билюкаяе, сублиматы, представленные в основном хлоридами Na, K и Fe, обогащены Ba, Sr, Be и Bi; с сублиматах Тирануса, состоящих из хлоридов Na и Fe, наблюдается

повышенное количество Ag, Sr, Cu, Co, Ni; наконец, в сублиматах верхнего кратера, Козея, состоящих из сульфатов Al и Mg, наблюдается обогащение Cu, Co, Ni, Mo, Pb. Подобно тому как в рудных месторождениях осаждение руд в пространстве происходит в зависимости от растворимости металлов (наименее растворимые отлагаются первыми), так и в нашем случае зональное отложение сублиматов в разном расстоянии от очага регулируется, вероятно, различной их летучестью.

Изменение состава твердых продуктов извержения в зависимости от времени мы можем проследить на продуктах извержения Билюкая.

Таблица 41

Порции	№ образца	%	Среднее для отдельных порций
Первая	7	52.12	52.08
	24	53.08	
	18	51.03	
Вторая	820	52.72	53.34
	859	52.96	
Третья	850	53.46	53.01
	874	53.00	

В табл. 41 видно, что первые порции лавы имели более основной характер, последующие порции были более кислые.

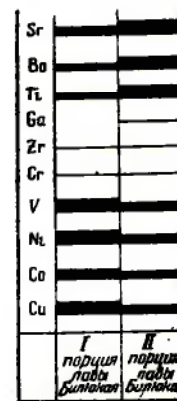
Такое изменение лавы — от более основной к более кислой — может быть объяснено притоком материала из верхних частей магматического очага по мере излияния больших масс из нижнего горизонта, обнажаемого Билюкаем.

Кроме того, продукты сублимации первой порции лавы, по сравнению с последующими порциями, обогащены Cu, Co, Ni и Sr и соответственно обеднены Ti, Ba и Sr (см. диаграмму фиг. 41).

Подытоживая описанные факты, нужно признать в магматическом очаге Ключевского вулкана неоднородность состава, т. е. наличие процесса дифференциации в этом очаге, имеющем связь с дневной поверхностью.

О какой дифференциации в магматическом очаге, имеющем связь с поверхностью, может идти речь? В литературе имеются сведения о значении гравитационной дифференциации как в магматическом очаге, так и в отдельных частях очага и об излившихся на дневную поверхность потоках.

Лавы, излившиеся из вулкана Питон де ла Фурнез (1936 г.), распадаются на два типа: 1) мегакратовые лабрадорские базальты и 2) меланократовые океаниты, богатые оливином и авгитом. Лакруа дает объяснение образованию различных лав из одного вулкана дифференциацией магмы на глубине путем гравитации. Примером гравитационной дифференциации более мелкого обособления магмы может служить дифференциация, о которой уже однажды упоминалось, в диабазе Палисад (Walker, 1940). Там диабазовый силл тянется в виде полосы около 70 км длины и 350 м мощности. Вдоль нижнего лежащего бока силла тянется пласт диабаз,



Фиг. 41. Распределение элементов в возгонах лав различных порций излияния.

обогащенного оливином. Боуэн и Уокер приписывают главную роль гравитационному осаждению кристаллов оливина. Поуэрс и Лейн (Powers и Lane, 1916) изучили из буровой скважины в 170-метровом потоке триасовый базальт и установили обогащение кристаллами оливина и пироксена более глубоких частей. Ритман (Rittmann, 1936) так рисует дифференциацию в магматическом очаге. При истощении извержения вулкана, когда канал засорится пробкой вследствие прекращения локальной концентрации газов и прекращения конвекционных потоков, в магматическом очаге происходит гравитационная дифференциация. В вулканическом канале, вследствие конвекционных токов газовых масс при выходе, магма всегда смешивается и всякая дифференциация здесь в зародыше подавляется. Однако данные эксперимента Григорьева (1939) говорят о том, что перемещение газов снизу вверх не останавливает опускания кристаллов. Автор делал эксперимент получения сплава с летучими компонентами ($\text{SiO}_2 = 35.1\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.6\%$, $\text{CaF}_2 = 4.1\%$, $\text{MgO} = 26.1\%$, $\text{K}_2\text{CO}_3 = 11.1\%$, $\text{NH}_4\text{F} = 10\%$). Сплав оказался полностью закристаллизованным, поры и пустоты сконцентрировались в верхней части — 24 против 6%. Сплав оказался дифференцированным: верх сплава — шпинель 10%, слюда 90%; низ сплава — шпинель 28%, слюда 72%. Неоднородность сплава в вертикальном направлении автор объясняет гравитационно-кристаллизационной дифференциацией. Вместе с Дели он считает, что летучие способствуют дифференциации.

Летучим компонентам в процессе дифференциации магмы многие авторы придают большое значение. Так, В. Н. Лодочников считает первой причиной всех изменений в первоначально однородной магме изменения температуры, а второй — наличие в магме газов. Оба эти условия, по его мнению, создают то, что при малейшем различии температур в разных частях магмы, — т. е. при зарождении самого небольшого температурного потенциала, — начинаются потоки вещества, весьма облегченные и обусловленные наличием газов и паров и приводящие к неизбежной дифференциации даже в еще очень жидкой массе.

Некоторые авторы приписывают газам роль переносчика. Так, Феннер (Fenner, 1925) считает, что дифференциация происходит в результате передвижения пузырей газа. Процесс переноса в газообразном состоянии является главным фактором дифференциации. Боуэн считает, что перенос силикатов происходит отчасти в летучем состоянии.

Действительно, роль газов в процессе дифференциации огромна, и различные авторы основываются на разнообразных их свойствах. Наличие летучих компонентов, влияя на вязкость, облегчает и обуславливает потоки вещества в магматическом очаге (Лодочников); в процессе дифференциации остаток делается все более богатым кремнеземом и растворимыми в нем летучими составными частями, понижающими температуру кристаллизации (Заварицкий, 1940); силикаты могут переноситься в летучем состоянии (Феннер, Боуэн); газам принадлежит роль переносчика — дифференциация происходит в результате передвижения пузырьков газа (Феннер); подвижные металлоиды с другими элементами дают легколетучие соединения, форма которых легко мигрирует (Сауков).

В нашем случае надо признать, что, во-первых, легколетучим принадлежит роль фактора, понижающего вязкость магмы и облегчающего движение кристаллов вниз; во-вторых, часть элементов с легколетучими компонентами дает летучие соединения, которые мигрируют к поверхности и отлагаются в виде продуктов сублимации зонально, в зависимости от расстояния от магматического очага; наконец, легколетучим ком-

понентам принадлежит ведущая роль двигательного импульса извержения.

В результате кристаллизационно-гравитационной дифференциации в магматическом очаге Ключевского вулкана произошло расслоение материала. Выделяющиеся ранние кристаллы оливина, погружаясь в более глубокие части очага, вызывали обеднение их кремнекислотой и обогащение железом и магнием. Кристаллизация пироксена происходила уже в условиях неоднородности состава расплава, а потому пироксены верхних частей очага были обеднены железом, а нижние обогащены им (увеличение геденбергитовой молекулы). Соответственно шла кристаллизация и плагиоклаза. Плагиоклазы верхних слоев были обеднены анортитовой молекулой. Передвижение летучих компонентов к каналу вулкана способствовало дифференциации, так как уменьшало вязкость и тем самым облегчало передвижение кристаллов вниз. К моменту извержений последних лет мы можем говорить уже о наличии этого расслоения в магматическом очаге, а не о дифференциации в момент извержения. Прорыв кратеров на 15-километровом горизонтальном протяжении и на различных гипсометрических уровнях дал возможность подняться магме из различных слоев магматического очага. Через кратеры, наиболее удаленные от центрального канала и находящиеся на наиболее низких гипсометрических уровнях (Туйла, Биокось — на высоте 500 м), излилась лава из более глубоких частей очага, обедненная SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O и Na_2O и обогащенная CaO и MgO . В минералогическом отношении в этих лавах среди фенокристаллов наблюдалось обогащение оливином. Лава, излившаяся из кратеров 1938 г. на различных расстояниях от центрального канала и гипсометрических уровнях, как уже было сказано, отражала закономерное и постепенное изменение химического состава магмы, изливающейся из различных слоев магматического очага. Хотя колебания в химическом составе и очень незначительны, но такая строгая закономерность не может быть случайной, а потому необходимо согласиться с наличием расслоения в магматическом очаге, имеющем связь с дневной поверхностью и происходящем в результате кристаллизационно-гравитационной дифференциации.

VI. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ И ИЗВЕРЖЕНИЯ ПОБОЧНЫХ КРАТЕРОВ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА

Камчатские вулканы входят в Тихоокеанское вулканическое кольцо, являющееся местом сосредоточения огромного количества вулканов. Географическое распределение вулканов тесно совпадает с географическим распределением землетрясений и с районами современных и недавних движений земной коры. По Сапперу (Sapper, 1927), из 430 вулканов, относительно которых имеются указания на извержения в историческое время, 336 расположены в тихоокеанской половине земного шара. Из 2500 известных извержений 2000 имели место на Тихом океане и вокруг него. Из 76 вулканов, находившихся в 1937—1939 гг. в стадии повышенной деятельности, 62 вулкана лежат в области Тихоокеанского кольца.

Камчатская вулканическая зона представляет собой продолжение Японских и Курильских островов, весьма активных в сейсмическом и вулканическом отношении. С другой стороны, от Камчатки на восток идет дуга Алеутских островов с их продолжением на полуостров Аляску. Такое исключительное положение Камчатки в структуре всего Тихоокеанского вулканического пояса — в точке смыкания под прямым углом Алеутской и Курильской дуг — своеобразно отражается на расположении вулканов. А. Н. Заварицкий намечает два главных направления: одно продольное — северо-восточное, второе широтное — северо-западное. В. И. Влодавец (1941) для Ключевской группы вулканов отмечает наличие радиальных и круговых трещин и развитие блоковой структуры в данном районе. А. А. Меняйлов (1947) из анализа извержения Ключевского вулкана в 1937—1938 гг. делает заключение о приуроченности вулканических проявлений к направлениям, выделенным А. Н. Заварицким. Прорыв паразитических и побочных кратеров в 1937—1938 гг. был связан с трещинами направления, близкого к широтному и северо-западному.

Не касаясь геологических процессов, приведших к образованию серии вулканов Ключевской группы и давших лавы различного химического состава от дацитов до базальтов, рассмотрим процессы, которые вызвали к жизни Ключевской вулкан с серией побочных кратеров.

Из резервуара расплавленной магмы, лежащего на значительной глубине под Ключевской группой вулканов, по трещинам поднялся расплав и образовал отдельные очаги, питающие, в частности, Ключевской вулкан, Толбачик и другие вулканы этой группы. Возникает вопрос, следует ли рассматривать эти очаги как замкнутые физико-химические

системы охлаждающегося силикатного расплава, или они сохранили связь с магматическим резервуаром, находящимся на большой глубине.

Для Ключевского очага связь с резервуаром на глубине была, вероятно, прервана и получилась замкнутая физико-химическая система. Это доказывается постоянством вещественного состава извержений последнего исторического периода, а колебания в составе лав, которые наблюдаются у выходов, различно удаленных от главного канала или, вернее, от центральной части очага, вполне объясняются процессами гравитационной дифференциации в этой замкнутой системе, приведшей к неоднородности в составе вследствие слоистого распределения материала.

Некоторое представление о величине магматического очага Ключевского вулкана дает размещение многочисленных его побочных кратеров, через которые разряжается часть энергии этого очага. По карте, составленной В. И. Влодавцем (1940а), кратеры рассеяны на площади, простирающейся в северо-восточном направлении на 25 км и в широтном — на 12 км. Отсюда можно сделать вывод, что очаг в верхней своей части имеет сечение минимум 25×12 км.

То обстоятельство, что на склонах находится много побочных кратеров, изливающих лаву, и воронок, получившихся в результате газовых взрывов, подтверждает вывод, что очаг находится на незначительной глубине. В вулканологии прибегают к двум методам определения глубины очага. Первый основан на геологических данных. Так, например, для Везувия Ритман подсчитал, что очаг находится на глубине 5—5.5 км, основываясь на том, что в выбросах пород из вулкана нет кристаллических сланцев и осадков древнее, чем доломиты, т. е. что очаг залегает непосредственно под верхним триасом. Вторым методом — математический — основан на определении некоторых элементов извержения. Таким путем Вольф (1938) определил глубину очага Санторинского вулкана в 980 м, исходя из диаметра жерла и массы лавы, выжатой из ствола вулкана.

В нашем распоряжении не было данных для подсчета глубины, на которой находится очаг, но предположительно можно определить ее в 1 км ниже уровня моря.

Извержение 1937—1938 гг. было подготовлено тектоническим землетрясением, в связи с которым переоткрылась трещина широтного направления и магма поднялась по главному каналу, вызвав красное освещение над кратером. Извержения тогда не последовало. В ближайший после землетрясения период происходило накапливание энергии в магматическом очаге, отголосками чего являлось оживление фумарольной деятельности побочных кратеров, прорвавшихся пятью годами раньше, и возрастание активности Вершинного кратера. Начало извержения сказалось в активировании трещин широтного простирания.

Эруптивная сила в магматическом очаге продолжала постепенно нарастать и сопровождалась непрерывным возрастанием силы извержений до определенного кульминационного периода, к которому приурочено открытие на западном склоне трещины юго-восточного направления и эффузии через бокки, образовавшиеся на ней. До кульминационного периода преобладали эффузии, в последующий же период ведущая роль перешла к эксплозиям, и с ослаблением эруптивной силы магматического очага на трещине, близкой к широтному направлению, возник ряд побочных кратеров. Таким образом, по мере исчерпания вулканической энергии, эруптивной силы стало недостаточно, чтобы поднять магму на высоту Вершинного кратера (4860 м выше уровня

моря), и вулкан вступил в стадию боккового извержения, когда лава стала изливаться через бокки — сначала на высоте 4600 м (Камули), потом 3600 м (Радист) и, наконец, 2400 м (Перевальный). Магма в этот период поднималась по главному каналу, и характер извержения бокков стоял в строгой связи с извержением Вершинного кратера. После бокковых излияний наступил период заключительной эксплозии через Вершинный кратер, и к этому моменту приурочено образование побочных вулканов на восточном склоне Ключевского вулкана, на трещине направления, близкого к широтному, на высоте сначала 1800, затем 1260, 1000 и, наконец, 900 м. Вулкан вступил в стадию эксцентрического извержения. Магма поднималась по самостоятельным каналам, причем извержение наиболее активного побочного вулкана Билокая продолжалось год, независимо от извержения Вершинного кратера (Главного вулкана), который в это время был в стадии парения.

Движущей силой извержения служили легколетучие компоненты. В силу химических реакций, ближе нам не известных, в периоды затишья, перемежающиеся у Ключевского вулкана с периодами извержений в 5—22-летних циклах, происходило постепенное обогащение легколетучими компонентами магматического очага, который имел характер замкнутого резервуара. Под влиянием возрастающей роли летучих магма становилась более подвижной и способной к эрупции. Изменение напряжений в земной коре, в частности для извержения 1937—1938 гг., как следствие тектонического землетрясения, могло явиться толчком для начала разрядки вулканической энергии. Правда, ноябрьское землетрясение с этой точки зрения было преждевременным, не повлекшим за собой извержения, однако оно к нему подготовило почву, изменив напряжения и переоткрыв трещины в земной коре. Катастрофичности в извержении Ключевского вулкана не проявлялось; наоборот, сила извержения возрастала постепенно. Тип извержения определялся физическим и химическим состоянием магмы, а также высотой вулканической постройки и, следовательно, расстоянием от магматического очага. Здесь необходимо вспомнить и об образовании вулканических пробок в канале вулкана. Для Ключевского вулкана связь с поверхностью не прерывалась и весь период между циклами извержения вулкан находился в стадии «относительного» покоя: Вершинный кратер почти непрерывно парил, а иногда происходили и небольшие эксплозии рыхлого материала. В случае полной закупорки канала начало извержения должно было бы характеризоваться катастрофичностью, т. е. сильным взрывом.

К началу извержения в магматическом очаге в результате кристаллизационно-гравитационной дифференциации произошло расслоение. В интрателлурическую стадию началась кристаллизация, давшая фенокристаллы оливина, пироксена и плагиоклаза, интрателлурическое происхождение которых доказано закалкой расплавленной лавы, вытекающей из жерла. В начальный период извержения лава поднималась из верхних частей магматического очага, характеризующихся более кислым составом. По мере подъема все новых и новых порций из более глубоких частей магматического очага на земную поверхность изливались лавы более основного характера. Кратеры, находящиеся на различных гипсометрических уровнях и, следовательно, в разном удалении от центральной части магматического очага, доставляли на дневную поверхность лаву из различных его слоев.

Законмерное изменение оптических свойств фенокристаллов, отражая изменение их химического состава и, соответственно, химического

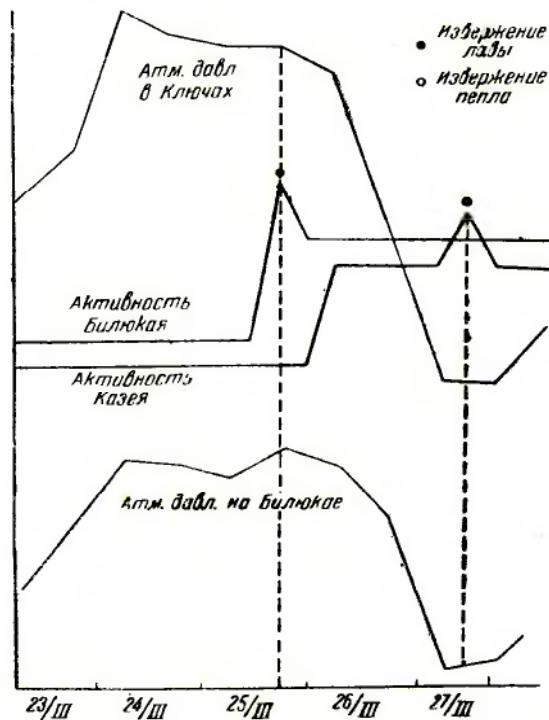
состава самой лавы, изливающейся из различных кратеров, дает представление о нормальном ходе кристаллизационно-гравитационной дифференциации в магматическом очаге.

Изменение во времени химического состава у лавы, изливавшейся из самого нижнего побочного кратера — Билюкая, шло в другом направлении, чем у лавы, поднимавшейся по главному каналу и изливавшейся из Вершинного кратера. В последнем случае, как уже говорилось, кислые лавы сменялись основными; у Билюкая же, наоборот, лавы становились все более кислыми. В излияниях Вершинного кратера по мере израсходования лавы верхнего слоя происходил подъем все новых порций из более глубоких частей очага, в то время как в случае Билюкая на место изливающейся лавы нижнего слоя лава притекала из верхних, более кислых частей очага.

Хотя характер извержения, т. е. его тип, в основных чертах определяется физическим состоянием магмы, нельзя пренебрегать и той внешней средой с определенной температурой, давлением и концентрацией атмосферы, в которой протекало извержение и которая, конечно, не могла не влиять на характер его проявления. По А. А. Меняйлову, придававшему большое значение атмосферным условиям, у Ключевского вулкана между атмосферой и магмой вулканического очага или лавовой колонной устанавливалось некоторое равновесие, с чем вполне согласен и автор (Меняйлов и Набоко, 1939). Не переоценивая роли атмосферных условий, можно утверждать, что если в основном извержение протекает под влиянием внутренних причин, в частности взаимодействия между труднолетучими и легколетучими компонентами, все же, в некоторый момент, когда уже в процессе извержения и разряджения энергии очага наступает равновесие с внешними условиями, особенно с атмосферным давлением, последние отражаются на характере извержения.

Так, например, на Билюкае, после полуторамесячного излияния лавы и выделения в большом количестве газовых компонентов, наступил момент равновесия между давлением очага и внешним атмосферным давлением, и магма, не изливаясь из жерла, заполнила канал до самого уровня поверхности. При таком состоянии атмосферные условия резко сказывались на магме в канале и, тем самым, влияли на характер деятельности Билюкая. В качестве примера можно привести наблюдения в марте 1939 г. 23-го атмосферное давление начало повышаться, действие Билюкая стало прерывным, полное спокойствие сменилось взрывами с выбросами бомб и большими газовыми выделениями. 24-го установилось высокое атмосферное давление, действие Билюкая ослабло, периоды покоя удлинились, периоды взрывов, наоборот, уменьшились. 25-го давление продолжало несколько повышаться до 20 час., после чего наступил перелом, и давление начало падать. В момент перелома атмосферного давления раздался сильный грохот, и из кратера Билюкая излилась лава в виде трех небольших порций. 26-го давление продолжало падать, все кратеры стали активными: Билюкай сильно и непрерывно грохотал и выбрасывал большое количество взрывных продуктов, Тиранус сильно парил, Козей действовал пароксизмами, давая сильные взрывы, сопровождавшиеся выбросами большого количества рыхлого материала. 27-го атмосферное давление упало до минимума. Билюкай действовал взрывно, причем рыхлых продуктов выбрасывалось много, а газообразных мало. Козей в этот день был особенно активен; черные выбросы из кратера следовали друг за другом с перерывами от 3 до 25 минут.

На диаграмме фиг. 42 нанесены кривые атмосферного давления в районе Билюкая и в Ключах и кривые активности Билюкая и Козея за время с 23 по 27 марта 1938 г. На этой диаграмме отмечена связь излияния лавы с началом понижения атмосферного давления в момент высокого стояния ртутного столба; ослабление внешнего давления нарушило существующее равновесие, и порция лавы излилась на дневную поверхность. С другой стороны, на диаграмме отмечена связь эксплозивной деятельности с установлением минимального внешнего атмосферного давления. Но нельзя упускать из виду, что такая зависимость характера деятельности кратеров от внешних условий, в частности от



Фиг. 42. Диаграмма зависимости активности Билюкая от атмосферных условий в марте 1938 г.

атмосферного давления, здесь сказалась в момент установившегося равновесия между давлением магматического очага и атмосферным давлением. При очередном оживлении деятельности Билюкая, несмотря на очень тщательные круглосуточные наблюдения в течение двух месяцев, уловить какую-либо связь деятельности вулкана с атмосферными условиями не удалось. Магматический очаг находился в состоянии особого напряжения, которое и разряжалось через выводные каналы путем излияния лавы, эксплозий огромнейшей силы, фонтанирования лавой и т. д., совершенно независимо от изменения атмосферных условий, в частности от изменения атмосферного давления.

Таким образом, внешние атмосферные условия влияют на ход извержения постольку, поскольку они являются внешней средой со своей температурой, давлением и концентрацией, в которой непосредственно протекают явления уже начавшегося на глубине процесса. Особенно

сказывается влияние внешних условий на характере извержения в момент достижения равновесия между газовым давлением очага и атмосферы. В таких случаях изменение внешних условий вызывает изменения в поведении газообразной и даже жидкой среды вулкана. Форма и высота выделений газов, начало эффузий и эксплозий часто определяются внешними условиями. Самое же извержение, динамика его и характер продуктов деятельности определяются физическим состоянием магмы, тектоническими условиями, а также такими данными, как, например, глубина очага, форма уже сложившейся вулканической постройки и т. д.

В заключение необходимо коснуться вопроса о происхождении побочных кратеров. Ключевской вулкан, подобно Этне, характерен наличием большого количества побочных кратеров, через которые разряжается часть вулканической энергии. Такой характер извержения возможен при условии: 1) нахождения вулканического очага на небольшой глубине, 2) наличия вулканической надстройки такой высоты, что прорыв ниже осуществляется легче, чем подъем до Вершинного кратера, 3) наличия соответственной тектонической обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

- Боровик С. А. и Набоко С. И. О распределении элементов, содержащихся в возгонах. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1941, № 9.
- Боуэн Н. Л. Эволюция изверженных пород. М.—Л., 1934.
- Вертушков Г. Н. Пиккерингит и ферропиккерингит — минералы колчеданных пожаров Урала. ДАН СССР, 1941, т. XXX; № 4.
- Влодавец В. И. Об одном из современных камчатских базальтов. Тр. Петри-ин-та, 1934, в. 6.
- Влодавец В. И. Ключевская группа вулканов. Тр. Камч. вулк. ст., М.—Л., 1940а.
- Влодавец В. И. Химический облик изверженных пород Камчатки. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1940 б, № 5.
- Влодавец В. И. О кайнозойском вулканизме на Камчатке. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1941, № 9.
- Воларович М. П. Исследование вязкости расплавленных горных пород. Зап. Всес. мин. об-ва, ч. 69, 1940 а, № 2—3.
- Воларович М. П. и Корчемкин Л. И. О влиянии газов на кристаллизацию расплавленных горных пород. Тр. Ин-та геол. наук, сер. петрогр. (8), в. 25, 1940 б.
- Воларович М. П., Леонтьев А. А., Корчемкин Л. И., Фридман Р. С. О влиянии плавикового шпата на плотность и вязкость расплавленного двюрита. Тр. Ин-та геол. наук, сер. петрогр., в. 20, 1939, № 6.
- Гольдшмидт В. М. Геохимия. Сб. статей по геохимии редких элементов. М.—Л., 1938.
- Григорьев Д. П. Искусственное получение амфиболов. Зап. Всеросс. мин. об-ва, ч. 68, 1939, № 2.
- Григорьев Д. П. и Гельмонт А. Я. Гравитационно-кристаллизационная дифференциация в силикатном расплаве с летучими компонентами. Изв. АН СССР, сер. геол., 1939, № 4.
- Дели Р. А. Изверженные породы и глубины земли. ОНТИ, 1936.
- Заварицкий А. Н. Физико-химические основы петрографии изверженных горных пород. 1926.
- Заварицкий А. Н. Некоторые вулканические породы окрестностей Ключевской сопки на Камчатке. Зап. Всеросс. мин. об-ва, ч. IX, 1931, в. 2.
- Заварицкий А. Н. Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г. Тр. ЦНИГРИ, в. 35, 1935 а.
- Заварицкий А. Н. Северная группа вулканов Камчатки. М.—Л., АН СССР, 1935 б.
- Заварицкий А. Н. Линейное расположение вулканов Камчатки. Тезисы доклада на XVII Межд. геол. конгр. 1937.
- Заварицкий А. Н. Вулканы окрестностей Мергэня и их лавы. Сборник, посвящ. академику В. А. Обручеву к 50-летию научной и педаг. деят., 1939 а.
- Заварицкий А. Н. Лавы и связанные с ними горные породы Соммы и Везувия и диаграмма, выражающая особенности их химического состава. Зап. ЛГИ, т. XII, 1939 б, в. 2.
- Заварицкий А. Н. О вулканах Камчатки. Камч. сб., т. I, 1940.
- Иванов И. З. Газы и возгоны Билокая и Туйлы, побочных кратеров Ключевского вулкана. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1940, № 8.
- Иванов И. З. Газы и возгоны побочных вулканов Ключевской сопки. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1941, № 9.
- Кулаков В. С. Паразитные кратеры, возникшие в 1932 г. у подножья Ключевского вулкана на Камчатке. Зап. ЛГИ, т. VIII, 1934.

- Лебедев П. И. Вулкан Алагез и его лавы. Л., изд. АН СССР, 1931.
- Лебедев П. И. Задачи экспериментальных исследований в области вулканологии. Тр. Госл. асс., 1935, в. 3.
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю. Петрография. Л.—М., ГГИИ, 1933 г.
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю. и Дьяконова-Савельева Е. Н. Вулканическая группа Карадага в Крыму. Л., изд. АН СССР, 1933 г.
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю. и Миткевич В. Ф. Опыты намагничивания горных пород. Изв. Геол. ком., т. 44, 1925, № 5.
- Лодочников В. Н. Серпентины и серпентиниты ильчирские и другие и петрологические вопросы, с ними связанные. Л.—М., ОНТИ, 1935.
- Меняйлов А. А. Извержение Ключевского вулкана и деятельность некоторых камчатских вулканов в 1937 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1938, № 4.
- Меняйлов А. А. Динамика и механизм извержения Ключевского вулкана в 1937—1938 гг. (рукопись, 1940).
- Меняйлов А. А. и Набоко С. И. Деятельность некоторых камчатских вулканов в конце 1937 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1939 а, № 5.
- Меняйлов А. А. и Набоко С. И. Деятельность камчатских вулканов за первый квартал 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1939 б, № 6.
- Меняйлов А. А. и Набоко С. И. Деятельность Ключевского вулкана с апреля по 1 октября 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1939 в, № 7.
- Набоко С. И. Газы и температура фумарол Туйлы в 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1939, № 7.
- Набоко С. И. Деятельность побочного кратера Билюкая в период июль—сентябрь 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1940, № 8.
- Набоко С. И. и Турцев А. А. О магнитности лав Ключевского вулкана. Сборник физ.-хим. петрогр., посвящ. академику Д. С. Белянкину. 1946.
- Набоко С. И. О новом фтористом минерале в продуктах сублимации Билюкая. ДАН СССР, 1942.
- Набоко С. И. О воде в газах Ключевского вулкана. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1946, № 12.
- Набоко С. И. О лавах извержения 1938 г. Сборник физ.-хим. петрогр., посвящ. академику Д. С. Белянкину. 1946.
- Новограбленов П. Т. Извержение Пацана и Фанны на Камчатке. Изв. Русск. геогр. об-ва, LXV, 1933, в. 5.
- Пийп Б. И. Термальные Ключи Камчатки. М.—Л., Изв. АН СССР, сер. камч., 1937, в. 2.
- Пийп Б. И. Извержение Авачи в 1938 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1941, № 10.
- Попков В. Ф. Деятельность Ключевского вулкана за первый квартал 1939 г. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1941, № 9.
- Попков В. Ф. Деятельность Билюкая. Бюлл. Вулк. ст. на Камч., 1946, № 12.
- Сауков А. А. Геохимия (рукопись).
- Тиррель Г. В. Вулканы.
- Уклонский А. С. Парагенезис серы и нефти. Узб. фил. АН СССР, 1940.
- Ферсман А. Е. Пегматиты СССР. М.—Л., 1934.
- Эйтель В. Физическая химия силикатов. Л., 1938.
- Varth P. W. The crystallisation process of basalt. Amer. Journ. of Sci., 1936.
- Brin A. Recherches sur l'exhalaison volcanique. Genève, 1911.
- Day and Allen E. T. Carnegie Inst. of Washington, 1925. Publ. 360.
- Doelter C. und Leitmeier H. Handbuch der Mineralchemie, Bd. IV. T. III, 1931.
- Fenner C. N. Journ. of Geol., v. 34, 1926.
- Finch R. H. Block lava. Journ. of Geol., v. 41, 1933, N 7.
- Ja'ggar T. A. Magmatic gases. Amer. Journ. of Sci., v. 238, 1940, N 5.
- Johnston-Lavis H. Mechanism of volcanic action. Geol. Magaz., 1909.
- Jones A. E. The formation of basaltic lava flows. Journ. of Geol., v. 45, 1937, N 8.
- Krokstrom. The Hällefors dolerite dike and some problems of basaltic rocks. Univers. of Upsala. Geol. Inst. Bull., v. 26, 1937.
- Lacroix. Les mineraux des fumaroles de l'ataption du Vesuve au Avril 1806.
- Larson W. Vulkanische Asche vom Ausbruch des Chilenischen Vulkans Quizapu (1932) in Argentina. Gesammelt. Univers. Upsala, Geol. Inst. Bull., v. 26, 1937.
- Mercalli J. Vulcani attivi della Terra. Milano, 1907.
- Nickols R. L. Viscosity of lava. Journ. of Geol., v. 47, 1939, N 3.
- Niggli. Das magma und seine Producte, unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der leichtflüchtigen Bestandteile. 1937.
- Perret F. A. The lava fountains of Kilauea. Amer. Journ. of Sci., v. 35, 1913.
- Perret F. A. Carnegie Inst., 1924. Publ. 339.
- Powers A. C. Lane. Magmatic differentiation in effusive rocks. Trans. Amer. Inst. Eng., 1916.

- Preston and Turner W. S. Journ. Soc. of Glass Technol., v. 16, 1932, N 219.
 Reck H. Santorin. Der Werdegang eines Inselvulkans und sein Ausbruch. 1925—1928. Brl., D. Reimer, 1936, Bd. 1—3.
 Rittmann A. Vulkane und ihre Tätigkeit. Stuttgart, F. Enke, I, 1936.
 Sapper K. Vulkankunde. Stuttgart, 1927.
 Spurr J. E. Geology of the Tenopaming district Nevada. U. S. Geol. Survey, 1905, N 42.
 Walker F. Differentiation of the palisade diabase. Bull. of the Geol. Soc. of Amer., v. 51, 1940, N 7.
 Washington H. S. The formation of Laa and Pahochoc. Amer. Journ. of Sci., v. 6, 1923.
 Wolff F. Der Vulkanismus. Bd. I, 1914; II, 1923.
 Wolff F. Die Zustandsgrößen des Santorinausbruchs 1925—1926. Ein Beitrag zur Theorie andesitischer Vulkanausbrüche. Journ. of Geol., 1938, IV—V.
 Zambonini. Mineralogia Vesuviana. 1935.

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	
7	1 св.	вулканов	вулканского	
17	8 сн.	«с»	«с'»	
18, 22, 26, 76, 77, 81, 85	}	$\frac{K_2O + Na_2O}{CaO}$	$\frac{K_2O' + Na_2O'}{CaO'}$	
19		8 св.	Sa	Sc
19		20 сн.	1260	1160
22		1 сн.	$\frac{6000 \cdot 100}{63000} = 93$	$\frac{60000 \cdot 100}{63000} = 95$
50		18 сн.	Соседнем	Лавовом
62	21 св.	изменение	измерение	
95	3 сн.	годовой	газовой	
102	27 св.	Sa	Sc	
102	18 сн.	Sr, Ga,	Sc, Ga,	
104	17 сн.	сложеная	сложения	
107	8 св.	нацветов	выцветов	
109	19 сн.	$(NH_4)_2 Si F_6$	$(NH_4)_2 SiF_6$	
113	4 св.	Fe ₂ 0.28	Fe ₂ O ₃ 0.36	
114	6 св.	экзоконтактных	экзотермически х	
120	4 сн.	62.8	68.4	
120	4 сн.	76.7	70.7	
120	2 сн.	16. 0	12.0	
120	1 сн.	6.1	5.1	
123	22 сн.	Cr	V	
120	8 сн.	оксаниты	оксанины	
128	10 св.	1260	1160	
129	18 сн.	1939	1938	

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	5
I. Извержение Ключевского вулкана в 1937—1938 гг. и его продукты	7
II. Побочные кратеры Ключевского вулкана, образовавшиеся в 1938 г.	12
1. Район прорыва кратеров	12
2. Изменения в рельефе, вызванные прорывом кратеров	12
3. Описание отдельных кратеров, прорвавшихся одновременно с Билюкаем	14
III. Билюкай	28
1. Морфология Билюкай	28
2. Ход извержения Билюкай	34
3. Характер деятельности Основного жерла	39
4. Характер деятельности Соседнего жерла	43
5. Характер деятельности Лавового жерла	47
6. Взаимодействие жерл	50
7. Явления, сопровождающие извержения	53
8. Резюме по извержению Билюкай	55
9. Объем продуктов извержения	57
IV. Продукты извержения Билюкай	58
1. Лава	58
2. Эксплозивные продукты извержения	81
3. Порядок кристаллизации базальта	89
4. Газообразные продукты извержения	93
V. Дифференциация в магматическом очаге, имеющем связь с дневной поверхностью	116
VI. Механизм образования и извержения побочных кратеров Ключевского вулкана	126

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР

*

Редактор издательства И. З. Френкин
Технический редактор В. Н. Диков

*

РИСО АН СССР № 2676: А-09376. Тип. заказ
№ 2972. Подп. к печ. 16/IX 1947 г. Форм. бум.
70×108¹/₁₆. Печ. л. 8¹/₂. Уч.-издат. 12. Тираж 1200

2-я тип. Издательства Академии Наук СССР
Москва, Шубинский пер., д. 10