

Ю. М. Дубик, И. А. Меняйлов

## НОВЫЙ ЭТАП ЭРУПТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННОГО

### Введение

В 1955 г. ожил считавшийся потухшим вулкан Безымянный. 30 марта 1956 г. произошло одно из крупнейших в историческое время извержений. Вершина вулкана была уничтожена, на ее месте образовался кратер диаметром 1,5 км и глубиной до 600 м; общий объем изверженного материала составил около 3 км<sup>3</sup>.

В последующее десятилетие эруптивная деятельность вулкана Безымянного была связана с формированием внутрикратерного экструзивного купола. Отмечается отчетливая периодичность эруптивной деятельности: как правило, извержения происходят весной, реже — осенью. Наиболее крупные извержения произошли в марте 1961 г., в мае 1962 г., в июне 1963 г., в июле — сентябре 1964 г. и последнее — в марте 1965 г. Извержения обычно начинаются мощной эксплозивно-пепловой фазой, затем следует фаза образования пирокластических потоков<sup>1</sup>, после чего активность вулкана стабилизируется и выражается в образовании многочисленных раскаленных лавин, не выходящих за пределы агломератовой мантии купола. Через месяц, иногда через два после извержения, вулкан возвращается в свое обычное состояние, характеризующееся умеренной фумарольной деятельностью. Каждое извержение было связано со значительными изменениями в строении экструзивного купола, который частично разрушался, и формировании новых блоков купола новыми порциями лавы. В результате к моменту последнего извержения купол Новый состоял из нескольких тесно слившихся блоков, образующих веерообразную структуру, на две трети высоты погребенную под мощным чехлом агломератово-брекчиевой мантии. Материал первых порций купола представлен ро-говообманковыми андезитами, а последующих сформировавших центральный, южный и восточный блоки купола и многочисленные пирокластические потоки извержений 1961 — 1964 гг. — двупироксеновыми андезитами.

<sup>1</sup> Пирокластическими потоками мы называем отложения мощных раскаленных лавин объемом свыше 0,005 км<sup>3</sup> и протяженностью не менее 3 км.

подавляющая часть ювенильного материала, поступающего на поверхность, расходовалась на формирование экструзивного купола: в настоящее время его объем вместе с агломератовой мантией составляет  $0,5 \text{ км}^3$ . Суммарный объем образовавшегося в процессе извержений пепла не превышает 3 млн.  $\text{м}^3$  ( $0,003 \text{ км}^3$ ). Форма частиц пепла (исключительно обломочная) свидетельствует о том, что дробление происходило к моменту полного затвердевания материала. Около 12 млн.  $\text{м}^3$  составляет объем пирокластических потоков. Таким образом, общий объем извергнутого ювенильного материала равен  $0,515 \text{ км}^3$ . В составе фумарольных газов пирокластических потоков и агломератовой мантии купола отмечается увеличение роли галоидных газов, главным образом хлора в 1960—1964 гг. В фумаролах вершинной части купола в 1963—1964 гг. был впервые в существенных количествах обнаружен фтор.

В тех случаях, когда извержение сопровождалось подъемом новой порции материала, оно отчетливо предварялось сейсмической подготовкой; если же оно было связано с разрушением части купола, вызванным какой-либо внешней причиной, сейсмическая подготовка отсутствовала. В общем характер деятельности вулкана Безымянного в описываемый период наиболее близок к типу Мерапи.

Материалы для настоящей статьи были получены в ходе облетов вулкана 10 и 11 марта и экспедиционных работ в марте — апреле 1965 г.

### Описание извержения 1965 г.

Первым признаком приближающегося извержения было усиление сейсмической активности. На сейсмограммах станции Ключи первые землетрясения, относимые к источнику под вулканом Безымянным, зарегистрированы 3 марта 1965 г. В тот же день наблюдалось землетрясение с четким вступлением волны  $P$ , что дало возможность определить  $S - P = 7,2 \text{ сек}$ . Эта величина характерна для землетрясений с очагом под вулканом Безымянным. За период с 3 по 8 марта было отмечено девять таких землетрясений. Кроме того, 5 и 7 марта на сейсмограммах появлялось слабое прерывистое дрожание с амплитудами  $0,1—0,4$  и. 8 марта количество и энергия землетрясений увеличились, периодическое вулканическое дрожание перешло в непрерывное, максимальные амплитуды достигли  $0,6—0,7\text{м}$ . Первые сведения о начавшемся извержении получены от группы сотрудников Ключевской вулканологической станции. Лаборант-сейсмолог В. Широков 9 марта около 16 часов по местному времени услышал глухой гул первого взрыва со стороны вулкана, затем гул повторился в 16 часов и в 16 часов 35 минут. Начавшийся примерно через полчаса пеплопад к вечеру усилился и продолжался всю ночь. По сведениям В. Широкова, примерно в 2 часа произошел сильный взрыв, сопровождавшийся толчком.

Все это время вулкан и долины рек Сухая и Большая Хапица были закрыты пепловой тучей. В первую половину дня 9 марта резко возросли количество и энергия землетрясений с очагом под вулканом Безымянным. Сейсмические станции «Апахончич», «Ключи» и «Козыревск» зафиксировали десять таких землетрясений. От более ранних их отличают интенсивные поверхностные волны, что, возможно, связано с миграцией очага землетрясений в верхние части канала вулкана.

Во второй половине дня 9 марта на сейсмограммах появилось непрерывное вулканическое дрожание, отдельные цуги которого достигают максимальной амплитуды 0,6—0,7 м.

Судя по описанию В. Широкова, наиболее сильный взрыв произошел примерно в 2 часа 10 марта. На барограмме Козыревской гидрометеорологической станции в 2 часа 10 минут зафиксировано резкое падение давления с амплитудой 1 мб. Кроме того, взрыву предшествовало землетрясение в районе вулкана Безымянного, происшедшее в 2 часа 4 минуты. Поэтому с уверенностью можно классифицировать колебание давления на Козыревской барограмме как запись наиболее сильного взрыва на вулкане Безымянном. 10 марта наблюдения за извержением велись в Ключах и на сейсмостанции «Апахончич». С утра эруптивная туча темно-серого цвета, закрывшая вершину Ключевского вулкана и протянувшаяся в сторону хребта Кумроч, была видна из пос. Ключи. На сейсмостанции «Апахончич», находящейся в осевой части пепловой тучи, продолжался пеплопад, над вулканом были видны молнии, но сам вулкан был закрыт. С 15 часов 30 минут до 18 часов производился облет вулкана В. А. Ермаковым, который отметил, что над куполом вулкана Безымянного поднималась гигантская колонна серого цвета, состоящая из сильно сжатых газов, насыщенных пеплом. Высота ее достигала 7 км; в верхней части колонна, расширяясь, превращалась в эруптивную тучу, которая сносилась ветром к востоку. Выделение газов и пепла в основании колонны шло непрерывно. На этом фоне иногда происходили чисто газовые выбросы белого цвета, высота их не превышала 2 км. Над восточным подножием вулкана поднимались серые пеплово-газовые тучи, очевидно связанные с лавинами. К вечеру 10 марта из Ключей видны были отблески сильных электрических разрядов в темной газовой-пепловой туче. В этот день произошло три толчка с эпицентрами в районе вулкана Безымянный. Продолжалось вулканическое дрожание, амплитуда его то возрастала до 1,0 м, то падала до 0,2—0,3 м. К исходу суток было отмечено ослабление и затем полное прекращение дрожания.

11 марта группой сотрудников Института вулканологии был совершен облет активных вулканов восточной зоны. Вулкан Безымянный находился в состоянии извержения, характеризующегося деятельностью вулканского типа. Светло-серые, преимущественно газовые, с небольшим содержанием пепла выбросы следовали один

за другим почти непрерывно, поднимаясь на высоту 1—1,5 км над вершиной купола. Материал выбросов быстро сносился сильным ветром к востоку, благодаря этому удалось рассмотреть западную часть купола. Здесь образовался эксплозивный кратер диаметром 150—200 м, являвшийся главным источником газового и пеплового материала. Активной была и вся верхняя, монолитная часть купола, особенно ее юго-восточный сектор, где происходило интенсивное выделение густого белого пара. На юго-западном и западном внешних склонах вулкана были заметны узкие, длиной до 1,5 км грязевые потоки. Западная половина атрио вулкана между куполом и стенкой эксплозивного кратера 1956 г. была заполнена массой свежего пирокластического материала мощностью не менее 100-150 м.

11 марта на ближайших сейсмических станциях было зарегистрировано два землетрясения, связанных с извержением вулкана Безымянного. Из с. Камаки и с Усть-Камчатской гидрометеорологической станции поступили сообщения о выпадении небольших количеств пепла.

В промежутке между 12 и 20 марта 1965 г. наблюдения велись с сейсмостанции «Апахончич» (наблюдатель В. Широков), а в последующие дни из окрестностей вулкана. Над западной частью купола постоянно и равномерно выделялись газы, образующие столб высотой 0,5—1,5 км, на этом фоне временами происходили выбросы более значительных количеств газа. Активным был не только тот участок купола, где образовался эксплозивный кратер, но и юго-восточный и северо-восточный секторы, где находилось большое количество фумарол, выделяющих высокотемпературные, голубоватые газы. Именно на этих участках купола в течение всего периода наблюдения зарождались многочисленные раскаленные лавины. Распределение во времени раскаленных лавин было неравномерным: как правило, после периода относительного покоя (несколько часов) наступал период, когда лавины следовали одна за другой. Такую периодичность, очевидно, следует связывать с неравномерным выжиманием ювенильного лавового материала. При движении каждой лавины образовывалось небольшое газопопеловое облако, которое быстро рассеивалось; иногда в пределах кратера выпадало немного очень мелкой светло-серой вулканической пыли. В таком состоянии, характерном для стадии затухания извержения, вулкан находился до 1 апреля. За весь этот период зарегистрировано всего лишь одно землетрясение с эпицентром в районе Безымянного, происшедшее 13 марта. С вечера 30 марта активность вулкана несколько повысилась, что выразилось в увеличении объема газовых выделений и количества лавин. 1 и 2 апреля она неуклонно возрастала, появились газопопеловые выбросы, над вершиной вулкана нависла эруптивная туча, медленно сносимая к северо-востоку. В 3 часа 50 минут 3 апреля на барограмме Козыревской ГМС было зарегистрировано резкое колеба-

ние давления с амплитудой около 1 мб. С 4 часов сейсмические станции снова начали фиксировать непрерывное вулканическое дрожание. В секторе, расположенном между реками Сухая Хапица и Киргурич, рано утром начался пеплопад, который продолжался в течение нескольких часов. Произошел второй пароксизм в ходе весеннего извержения 1965 г. В течение следующей недели активность вулкана характеризовалась преимущественно образованием раскаленных лавин. 8 апреля наблюдался третий максимум активности. На этот раз он выразился в деятельности исключительно вулканического типа с образованием небольшого количества пепла. Затем начался окончательный спад активности, и к лету 1965 г. вулкан вернулся в обычное для межэруптивных периодов состояние.

### Систематизация явлений эруптивной деятельности

Анализ фактического материала визуальных наблюдений и некоторых физических явлений (сейсмическая активность и воздушные волны) позволяет нам выделить в настоящем извержении четыре стадии. Длительность всего цикла составляет около месяца.

**Стадия подготовки извержения** охватывает промежуток времени между первыми признаками сейсмической активности и началом собственно эруптивного процесса (3—9 марта). За этот период было зарегистрировано 9 землетрясений с эпицентрами в районе вулкана Безымянного, причем никаких внешних проявлений активности не наблюдалось. Нужно отметить, что длительность стадии подготовки заметно сократилась по сравнению с предыдущими извержениями. Если в 1955, 1959 и 1961 гг. первые предшествующие извержению вулканические землетрясения отмечались за 3—4 недели до открытия эруптивного процесса, то в 1965 г. этот период сократился до одной недели. Возможно, это связано с повышением температуры ювенильного материала, представляющего более глубокие уровни магматической колонны; в результате рост и разрешение напряжений в верхних частях канала происходят в более короткий срок. По сравнению с 1959 и 1961 гг. сокращается количество и суммарная энергия землетрясений, что может быть вызвано уменьшением вязкости лавы. При этом характер нарастания количества толчков остается прежним — непосредственно перед извержением оно увеличивается, а затем резко убывает. Г. С. Горшков (1961), изучавший связь сейсмических и вулканических явлений во время извержения 1955—1956 гг., отмечает, что кульминационный взрыв наступил во время спада сейсмической активности.

Таким образом, открытие канала ведет к разгрузке напряжений, возникающих в его верхней части перед извержением. Непо-

средственной причиной сейсмической активности могут быть подвижки вязкой лавы в результате усиления процесса выжимания магматической колонны.

**Эруптивная стадия вулканского типа** характеризуется тем, что к моменту начала извержения напряжение в верхней части канала достигает предела и происходит разрушение застывшей лавовой пробки. В результате активная, газонасыщенная лава оказывается непосредственно на поверхности, в условиях с резко пониженными температурой и давлением. К этому времени 65— 68% материала уже закристаллизовано в форме вкрапленников I и II генераций. Летучие компоненты, растворенные в небольшом объеме остаточного расплава, попадают в крайне неравновесные условия; в результате происходит их бурное выделение, затрагивающее только самую верхушку лавовой колонны. Дальнейший ход извержения зависит уже от скорости подъема магматической колонны: если она достаточно велика, процесс пеплообразования происходит непрерывно, взрывы следуют один за другим, образуется единая эруптивная колонна из газов и пепла. Зная общий объем извергнутого пирокластического материала, размеры эксплозивного кратера, продолжительность извержения и учитывая объем выделившихся газов, можно рассчитать скорость выжимания лавовой колонны. Продолжительность эксплозивно-пепловой стадии извержения устанавливается с достаточной степенью достоверности по визуальным и сейсмическим наблюдениям, в частности по продолжительности пеплопада, как явления, наиболее характерного для вулканского типа извержения. Пеплопад начался около 17 часов 9 марта и прекратился примерно в это же время следующего дня. Сведения о характере и высоте эруптивной тучи над вулканом дают близкий к этому результат. Таким образом, вулканская фаза извержения продолжалась в течение 24—25 часов. Источником газового-пеплового материала был новообразованный экс-пловивный кратер в северо-западной вершинной части купола. Кратер имеет овальную форму, площадь его сечения  $0,015 \text{ км}^2$ . В виде вулканического песка и пепла за весь этот период было извергнуто 350 тыс.  $\text{м}^3$  материала, причем подавляющее его количество ювенильного происхождения. Таким образом, можно вычислить среднюю скорость подъема материала, участвовавшего в извержении; она определена нами в 9—10  $\text{м/час}$ . В ходе извержения на фоне постоянной эксплозивной деятельности происходили пароксизмальные взрывы, например взрыв в 2 часа 10 минут 10 марта, зарегистрированный на барограмме. Такие явления можно связать с неравномерностью подачи ювенильного материала из вулканического канала, в результате чего создаются условия для образования лавовой пробки в кратере. Напряжение в верхней части канала снова нарастает, и, очевидно, те редкие вулканические землетрясения, которые регистрируются уже в ходе извержения, приурочены именно к таким периодам.



Рис. 1. Общий вид вулкана Безымянного  
Слева — главная ветвь

Но наиболее характерным сейсмическим проявлением для эксплозивной вулканской стадии является вулканическое дрожание. Вулканическое дрожание сопровождало и предыдущие извержения вулкана Безымянного. Так, вслед за отчетливой сейсмической подготовкой (21 марта — 13 апреля 1960 г.) с резким максимумом количества и энергии толчков утром 13 апреля в И часов появилось вулканическое дрожание, продолжавшееся около суток (Токарев, Борисова, 1961). В разное время многими авторами на вулканах с самыми различными типами извержений отмечалось вулканическое дрожание, однако интерпретация этого явления до сих пор затруднительна. Нужно все-таки отметить одно обстоятельство: в большинство случаев дрожание совпадало непосредственно с процессом извержения, как это подчеркивается для кратера Былинкиной (Горшков, 1954). То же самое с полной уверенностью можно отнести и к настоящему извержению вулкана Безымянного. Что касается механизма дрожания, несомненно одно — прямой или косвенной его причиной является подъем магмы в вулканическом канале. При этом возможны следующие варианты: либо колебания вызываются непосредственно подвижками магмы, либо взрывами в верхней части канала. Во втором случае сами взрывы могут быть источником вулканического дрожания, или же они возбуждают ко-



после извержения 1965 г. пирокластического потока

лебания верхней части магматической колонны. Более точная корреляция сейсмических наблюдений с ходом извержения послужит одним из путей решения вопроса о причинах вулканического дрожания.

Последствиями вулканической стадии извержения явилось разрушение некоторых частей купола (преимущественно северной его половины), образование кратера, выпадение лапилли, вулканического песка и пепла из эруптивной тучи. О составе газов, участвовавших в извержении, мы имеем лишь косвенные сведения (по водным вытяжкам из пеплов).

Стадия извержения пирокластических потоков проявлялась на фоне постепенно ослабевающей активности вулканического типа. Сам вулкан и его окрестности были закрыты эруптивной пепловой тучей, поэтому мы не располагаем точными данными о начале этой фазы. Во всяком случае, во время облета 11 марта были отмечены пирокластические потоки в Южной долине и грязевые потоки в Восточной долине, следовательно, к этому моменту формирование потоков в основном закончилось. Из опыта предыдущих извержений (1961, 1962 гг.) и изучения пирокластических потоков вулканов Безымянного и Шивелуча мы приходим к выводу о том, что их образование не одноактный процесс, а определенный этап в

ходе извержения. Переход от вулканского типа извержения к активности типа Мерапи, по всей видимости, обусловлен изменением физических свойств ювенильного материала, а именно: уменьшением газонасыщенности и вязкости магмы. Количество газов, участвующих в этой стадии извержения, недостаточно велико для превращения всей массы материала в пепел. В то же время температура его увеличивается, а вязкость уменьшается, так как на поверхность поступают все более глубокие порции магмы. В связи с этим, вероятно, увеличивается и скорость подъема материала. Все это создает достаточные условия для изменения типа извержения. Подобные закономерности отмечаются японскими авторами (Aramaki, Yamasaki, 1964), устанавливающими определенную последовательность в ходе извержений вулканов Асама (1783 г.), Комагатаке (1929 г.). Такая же последовательность характерна и для настоящего извержения вулкана Безымьянного. Более того, в пределах даже одной стадии — пирокластических потоков — можно отметить уменьшение вязкости и газонасыщенности материала к ее концу. По целому комплексу признаков (механический и минералогический состав, пористость, температура, состав фумарольных газов) выделяются две серии пирокластических потоков. Потоки первой серии ничем не отличаются от потоков извержений 1961, 1962 и 1963 гг. Пирокластический материал при выходе из кратера благодаря особенностям рельефа дробится на несколько ветвей и в силу своей чрезвычайной подвижности растекается по прилегающим долинам (рис. 1). Небольшая часть самого мелкого материала выносится выделяющимися в процессе извержения газами и выпадает затем в виде пепла в окрестностях вулкана. Подъем газовой-пепловой тучи над поверхностью быстро движущегося пирокластического потока — наиболее эффективное явление при извержениях типа Мерапи, но по существу это процесс второстепенный. Преобладающая масса извергнутого материала движется в виде лавины по русловым участкам долин, с характерными «захлестами» бортов долины на поворотах. При этом нижний (высотой в несколько десятков метров) слой газовой-пепловой облака, наиболее насыщенный пеплом, движется более независимо от характера рельефа и дает своеобразные отложения в виде плотной маломощной (10—15 см) корки, состоящей исключительно из мелкого пылевидного материала. Такие корки в непосредственной близости от отложений пирокластических потоков покрывают бор-та долин до высоты 30—50 м над их поверхностью, а выше постепенно переходят в обычные пепловые отложения.

Наиболее тяжелая, нижняя, часть лавины, представляющая главную массу изверженного материала, формирует отложения пирокластических потоков (рис. 2). Потокам первой серии свойственны все особенности, наблюдавшиеся ранее. Это в первую очередь крайняя неоднородность материала по размеру — от крупных глыб объемом 40—50 м<sup>3</sup> до пылеватых частиц (рис. 3). Вдоль бо-

ковых границ потоков и у их окончания наблюдаются характерные нагромождения, состоящие преимущественно из валунов и глыб. Кроме того, по всей площади потоков и особенно в осевых их частях встречаются такие же гряды, параллельные направлению движения материала, что, по нашему мнению, свидетельствует о неоднократности излияния пироклаستيку. Каких-либо закономерностей в распределении материала по размеру ни в вертикальном разрезе потока, ни по мере удаления от источника извержения

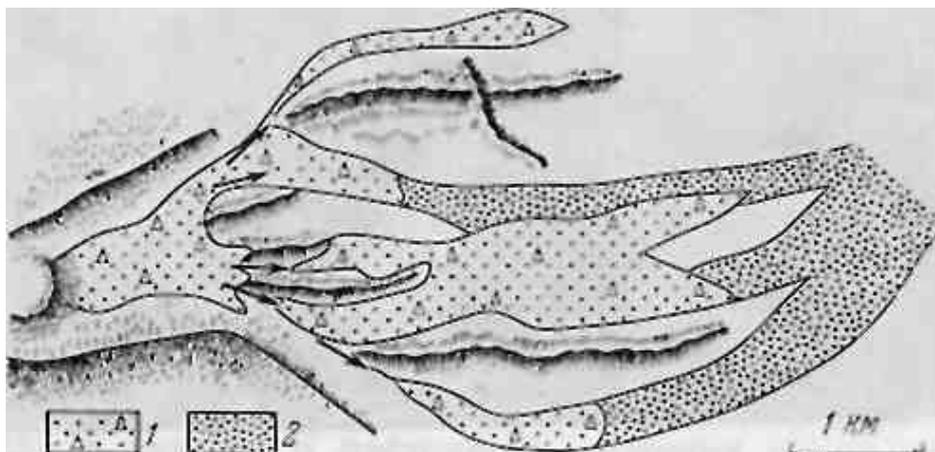


Рис. 2. Схема распространения пирокластических (1) и грязевых (2) потоков извержения 1965 г.

не наблюдается. Повсеместно обломки, валуны и глыбы, слегка окатанные, округлой формы, погружены в песчано-пылевой материал заполнителя. По гранулометрическому составу заполнитель потоков первой серии крайне неоднороден, преобладания какой-либо одной фракции не отмечается.

Следующим этапом извержения явилось излияние пирокластических потоков второй серии, частично перекрывших ранее образовавшиеся потоки. Они отмечаются при извержениях вулкана Безымянного впервые. Главная их отличительная особенность — более высокая температура и пониженная по сравнению с потоками первой серии и предыдущих извержений газонасыщенность. Прямыми количественными данными мы не располагаем, но есть косвенные признаки: так, впервые в потоках второй серии глыбы имеют поверхность типа «хлебной корки», что может быть вызвано более высокой температурой материала и как следствие этого — уменьшением его вязкости. По гранулометрическому составу заполнитель потоков второй серии заметно отличается от предшествовавших потоков: резко уменьшилось количество пылеватого материала, около 80% заполнителя представлено фракциями 3—0,5 мм, т. е. степень дробления материала в этом случае меньше. Кроме того, об уменьшении газонасыщенности свидетельствует отсутствие характерных морфологических особенностей в потоках второй серии, подвижность материала уменьшилась. Авторы полагают, что подвижность пирокластического потока есть



Рис. 3. Поверхность пирокластического потока первой серии

результат флюидизации твердого горячего материала выделяющимися из него газами. Эти же газы способствуют дроблению ювенильного материала. Если же объяснять подвижность потоков флюидизацией их фронтальной части захваченным воздухом, отрицая роль газов, как это делает Мак Таггарт (McTaggart, 1960), то останется открытым более важный вопрос о способе извержения и дробления пирокластического материала. Несомненно, захват воздуха массой пирокластике происходит, но определяющим фактором является автоэксплозивность — процесс, приводящий к дроблению ювенильного материала и одновременно обеспечивающий высокую подвижность потоков благодаря выделяющимся магматическим газам. Высокая температура и значительная площадь распространения материала пирокластических потоков способствовали бурному таянию мощного снегового покрова, в результате чего образовались грязевые потоки, достигшие русла р. Сухая Хапица в 12—15 км от кратера вулкана. На этом наиболее активный этап извержения закончился.

Стадия затухания извержения характеризовалась образованием многочисленных раскаленных лавин. Активизация экструзивного процесса завершается внедрением в тело купола новых порций андезитовой лавы, уже не способных к извержению. Тем не менее материал этот даже на поверхности сохраняет в какой-то степени активность. Температура 700—750° отмечалась на некоторых светящихся по ночам участках купола в течение 2—3 месяцев после извержения. При подвижках в куполе отдельные блоки свежей

лавы обрушиваются на склоны купола и по мере движения вниз под действием силы тяжести дробятся, разрываются и распыляются, образуя иногда отложения, сходные по внешнему виду и по гранулометрическому составу с Пирокластическими потоками. От последних их отличает гораздо меньший объем.

### Геологический эффект извержения

Главными последствиями извержения было выжимание новых блоков экструзивного купола, формирование отложений пирокластических потоков и пепловых отложений. Экструзивный процесс происходит параллельно с разрушением старых блоков купола, поэтому количественно оценить прирост купола трудно. Тем не менее, совершенно очевидно, что юго-юго-восточная и северо-восточная части купола после извержения заметно выдвинулись. Именно в этих секторах зарождались многочисленные раскаленные лавины. Выжимание новых блоков купола связано с общим подъемом материала в канале. К настоящему времени купол достиг, очевидно, критической высоты и растет главным образом вширь, постепенно заполняя эксплозивный кратер 1956 г.

Первая стадия извержения характеризовалась образованием и последующим переносом и отложением значительного количества пепла. Западный ветер умеренной силы определил направление и форму всей зоны пеплопада (рис. 3).

Южная граница зоны проходит вдоль северного подножия Зиминых сопок, пересекает хребет

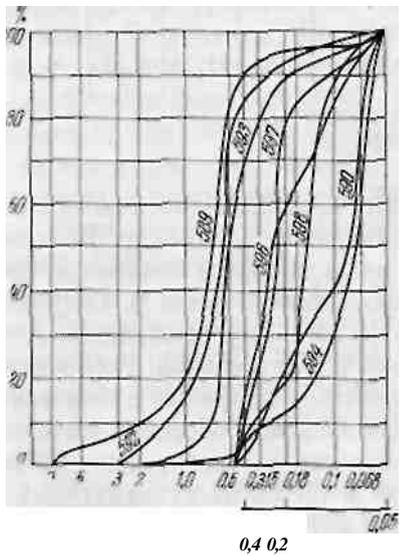


Рис. 4. Кумулятивные кривые гранулометрического состава пеплов извержения 1965 г.

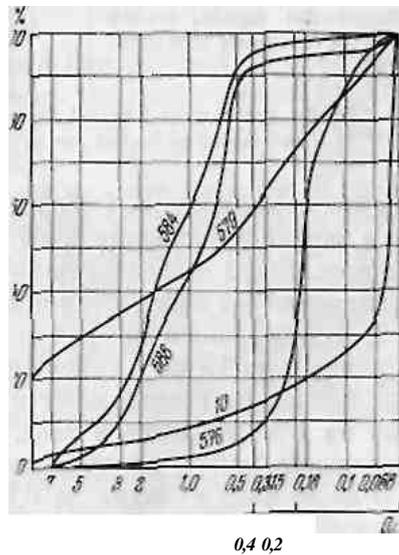


Рис. 5. Кумулятивные кривые гранулометрического состава заполнителей пирокластических потоков

Кумроч южнее горы Шиш и выходит к побережью Тихого океана в районе устья р. Андриановки. Северная граница зоны идет через вершины Камня и Ключевского, затем по сухой р. Киргурич и далее параллельно р. Камчатке и немного южнее ее до Усть-Камчатска. Таким образом, общая площадь района, охваченного пеплопадом, составляет 3600 км<sup>2</sup>. Распределение пепла по количеству, выпавшему на единицу площади в пределах всего этого района,

Таблица 1

Распределение пепла в различных точках зоны пеплопада

	588 *	589*	590	591	592 *	593*
Расстояние от вулкана, км	2	4,7	10	12	10	16
Количество пепла, выпавшего на единицу площади, кг/м <sup>2</sup>	102,15	67,12	4,28	19,78	34,5	21,5

Таблица 1 (окончание)

	594	595	596	597*	593*	599
Расстояние от вулкана, км	18	16,8+10**	26	29	39,5	46+10**
Количество пепла, выпавшего на единицу площади	1,63	0,71	7,46	11,33	2,32	0,69

- \* Пробы, отобранные в осевой части зоны пеплопада.
- \*\* 10 — расстояние от осевой линии пеплопада.

крайне неравномерно. Отбор пепловых проб проводился нами только в западной половине зоны, ограниченной долиной р. Большая Хапица. Были исследованы пеплы вдоль оси зоны пеплопада, проходящей через сейсмостанцию «Апахончич» и устье р. Голубельной, и поперечным профилям — на 15 км к югу от станции «Апахончич» и на 15 км к северу от устья р. Голубельной. Распределение пеплов по продольному и поперечным профилям в килограммах на 1 м<sup>2</sup> показано в табл. 1. Для подсчета общего количества выпавшего пепла, ввиду неравномерности его распределения (от 100 кг/м<sup>2</sup> близ вулкана до 0,8 кг/м<sup>2</sup> в 50 км от вулкана), район пеплопада был разделен на зоны, для которых средние количества выпавшего пепла составляли 50, 20, 5 и 0,5 кг/м<sup>2</sup>. Площадь этих зон равна 12, 55, 240, 3300 км<sup>2</sup>, а количество выпавшего пепла — соответственно 600 тыс., 1100 тыс., 1200 тыс., 1650 тыс. т. Таким

образом, одним из наиболее существенных результатов извержения было отложение 4550 тыс. *t* или 3500 тыс.  $m^3$  ( $0,0035 км^3$ ) пепла при удельном весе  $1,3 г/см^3$ . Данные по гранулометрическому составу пеплов приведены на рис. 4, 5. По характеру кумулятивных кривых можно судить о хорошей сортированности пепловых проб, собранных в каждой отдельной точке. Значительный разброс кумулятивных кривых для пеплов извержения 1965 г. отражает процесс эоловой дифференциации. Пеплы, отобранные на максимальном удалении от вулкана — в конечных точках продольного и поперечных профилей, отличаются лучшей сортированностью и преобладанием фракций  $0,2—0,1 мм$ . По гранулометрическому составу к пеплам вулканической стадии близки и пепловые отложения, образовавшиеся в результате извержения пирокластических потоков и раскаленных лавин (обр. 10, 576). Однако кумулятивные кривые не дают четкого представления о характере эоловой дифференциации. В этом отношении большой интерес представляет поведение каждой, отдельно взятой фракции по мере удаления от вулкана. Результаты такого анализа для изученного нами 40-километрового профиля в осевой части зоны пеплопада нанесены на график (рис. 6). Оказывается, для каждой фракции существует отчетливо выраженный максимум, охватывающий полосу в 6—8 км, где выпадает подавляющая часть пеплового материала данного размера. В пределах опробованного профиля наблюдаются последовательно максимумы для фракций  $0,5; 0,2; 0,1 мм$ ; величина сдвига соседних максимумов составляет 10—15 км. Материал более мелких фракций был вынесен дальше, за пределы изученной зоны. Такие особенности в процессе переноса и отложения пепла отражаются не только на гранулометрическом их составе, но, как это будет видно, и на минералогическом и химическом составе пеплового материала.

Однако подавляющая масса ювенильного материала была вынесена Пирокластическими потоками. Самый крупный поток протяженностью около 5 км при ширине 300 м прошел вдоль правого борта Восточной долины. Мощность пирокластики колеблется в значительных пределах в зависимости от уклона местности, пер-

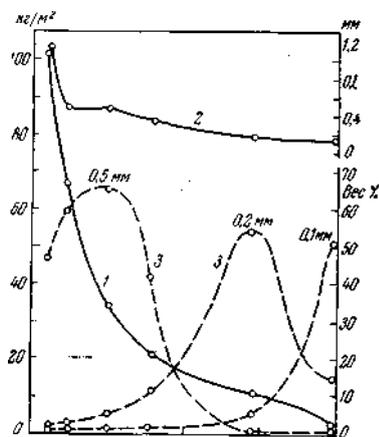


Рис. 6. Изменение количества выпавшего пепла (1), среднего размера зерен (2) и содержания отдельных фракций (3) по мере удаления от вулкана



Рис. 7. Купол Новый после извержения 1965 г.  
На склоне купола — отложения раскаленных лавин

воначального рельефа и характера движения потока; за среднюю мощность мы принимаем 5 м, тогда объем материала составит 7500 тыс.  $m^3$ . Пирокластический поток, занявший осевую часть Восточной долины и слившийся с описанным, имеет протяженность более 5 км, ширина его 400 м; средняя мощность в связи с большим уклоном составляет 3 м, а объем — 6000 тыс.  $m^3$ . Оба потока относятся к первой серии. Отложения первой серии пирокластических потоков заметно изменили рельеф открытой (восточной) половины кратера и прилегающих долин. Так, в верховьях Восточной долины отложения сравнялись с бортами долины, и это определило пути движения потоков второй серии. Один из них спустился в Южную долину, длина его достигла 2 км, объем равен 3000 тыс.  $m^3$ , второй поток перекрыл северо-восточную часть кратера. Одна его ветвь прошла 2,5 км по узкой Южной долине, отложив 8000 тыс.  $m^3$  материала; другая спустилась по Лагерной долине; площадь ее составила 8000 тыс.  $m^2$ , объем — 4 млн.  $m^3$ . Как крупные глыбы, так и заполнитель потоков второй серии представлены исключительно ювенильным материалом. Отложение крупных масс пирокластики в условиях мощного снежного покрова вызвало образование грязевых потоков (рис. 2). Как правило, грязевые потоки имеют в истоках четко выраженные русла и боковые нагромождения валунов и глыб диаметром до 1 — 1,5 м. Ниже по течению грязевые потоки широко разливаются по долинам, почти

не расплавляя снежный покров и откладывают на его поверхности преимущественно тонкий материал. На выходе из Восточной долины отдельные ветви потоков слились в единый грязевой поток, который вынес уже незначительную примесь мелкого вулканического материала в долину р. Сухая Хапица. Учесть количества материала грязевых потоков не удалось, так как через несколько дней после извержения они были засыпаны снегом. Общий объем материала пирокластических потоков составляет 21 млн.  $m^3$  ( $0,021 км^3$ ), что при удельном весе  $1,8 г/см^3$  равно  $4 \cdot 10^6 т$ .

В потоках и первой и второй серии отсутствуют какие бы то ни было признаки спекания материала. Препятствием для спекания, вероятно, является высокая степень раскристаллизованности материала (60—65%).

Раскаленные лавины последнего этапа извержения образовали характерные отложения на склонах купола (рис. 7). Объем их не превышает 500 тыс.  $m^3$ .

### **Минералогическая, петрографическая и химическая характеристика продуктов извержения**

К твердым продуктам настоящего извержения относятся пеплы, лавы и заполнители пирокластических потоков и лавы экструзивного купола. Наиболее полно изучены лавы пирокластических потоков первой и второй серии, последние одновременно характеризуют и экструзивные лавы.

В лавах **пирокластических потоков первой серии** даже при макроскопическом изучении можно выделить разновидности роговообманково-двупироксеновых и двупироксеновых андезитов, соответствующие тем или иным одновременным порциям экструзивного купола Нового. Таким образом, в потоках первой серии заметная роль принадлежит материалу, захваченному из старых блоков купола, из агломератово-брекчиевой мантии купола и из более ранних отложений пирокластических потоков. Поэтому в этих отложениях можно выделить следующие разновидности лав: 1) пористые, иногда шлаковидные серые и коричневатые-серые пироксен-роговообманковые андезиты, 2) плотные светло-серые роговообманково-пироксеновые андезиты с крупными вкрапленниками плагиоклаза (обе эти разновидности были свойственны извержениям 1959—1961 гг.), 3) плотные светло-серые пироксеновые андезиты с редкими вкрапленниками роговой обманки и без нее, относящиеся к извержениям 1962—1964 гг., 4) пористые серые пироксеновые андезиты, представляющие ювенильный материал. В потоках перечисленные разности отличались и по другим признакам. Глыбы, представленные первыми тремя разновидностями, были холодными, характеризовались отсутствием фумарол и трещин температурного выветривания. Глыбы, сложенные ювенильным материа-

лом, сохраняли довольно высокую температуру (около 100° на поверхности, до 400° — в трещинах), были покрыты налетами возгонов, имели на поверхности характерные оплавленные шрамы и трещины температурного выветривания. Именно этот материал изучался нами как новая порция лавовой колонны, поступившая на поверхность на данной стадии извержения.

Микроскопическое изучение позволяет отнести ювенильный материал к двупироксеновым андезитам с кристаллитовой, местами гиалопилитовой и микролитовой структурой основной массы. Важной структурной особенностью этих пород является наличие двух генераций среди вкрапленников породообразующих минералов. Выделяемые нами вкрапленники I генерации представлены нормальными фенокристаллами, размеры которых колеблются от нескольких до нескольких десятых долей миллиметра. Вкрапленники II генерации могут быть названы субфенокристаллами, их размеры не превышают 100 мк. Изучение взаимоотношений вкрапленников I и II генераций определенно указывает на более позднее выделение последних. Количественно-минералогический состав лав (среднее из подсчетов по 3—4 шлифам) приведен в табл. 2. Главную роль среди минералов вкрапленников играет плагиоклаз (рис. 8).

Таблица 2

Количественно-минералогический состав лав последних извержений вулкана Безымянного

Характеристика образцов	Стек.ю	Плагиоклаз I генерации	Плагиоклаз II генерации	Пироксен I генерации	Пироксен II г.н.р.ации	Роговая обманка	Магнетит
Лавы купола, 1964 г. . . .	26,7	28,15	21,85	7,8	13,6	—	1,95
Лавы пирокластических потоков первой серии, 1965 г.	32,61	20,51	26,3	1,3	16,0	0,34	1,0
Лавы пирокластических потоков второй серии, 1965 г.	35,0	20,1	25,0	0,2	18,76	0,38	0,8

**Плагиоклаз I генерации** образует таблитчатые кристаллы, большей частью оплавленные, округлые. Средний размер их 0,7 мм. Для них чрезвычайно характерно зональное строение, причем неодинаковое в пределах более небольшого участка шлифа. Отмечается почти полное отсутствие прямой зональности. Обычно зоны основного и более кислого состава чередуются, иногда ядро

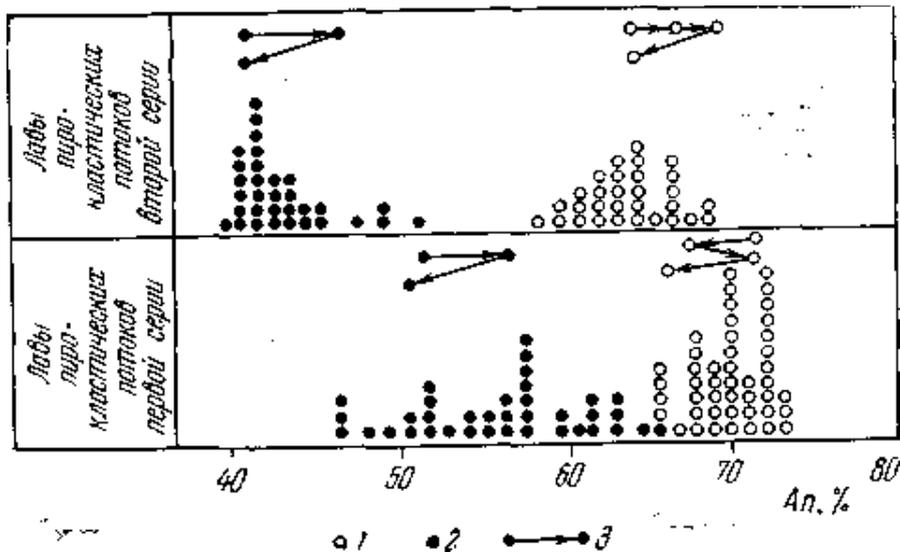


Рис. 8. Состав плагиоклазов в лавах извержения 1965 г. 1 — вкрапленники I генерации; 2 — вкрапленники II генерации; 3 — изменение состава в зональных вкрапленниках

и внешняя зона имеют одинаковый состав. В других случаях внешняя зона кристалла содержит анортитовой молекулы на 5—8% меньше, чем ядро.

Следует подчеркнуть несоответствие между общим кислым обликом породы и высокой основностью плагиоклаза. Средний номер плагиоклазов I генерации описываемой породы (из 35 замеров на федоровском столике) — равен 69, причем колебания в составе невелики (65—74). Значит, ядра плагиоклазов формировались из расплава в стабильных равновесных условиях. Затем они неоднократно попадали в новые условия, соответственно наращивались разные по составу зоны, происходило частичное оплавление, резорбция. Подтверждением этому являются обильные включения стекла, приуроченные к границам некоторых зон или заполняющие какую-либо зону целиком; ядро же обычно остается чистым. Включения, как правило, отсутствуют и в самой внешней зоне. В некоторых вкрапленниках наряду со стеклом включения представлены апатитом, магнетитом и изотропным минералом с низким показателем преломления, возможно флюоритом.

**Плагиоклаз II генерации** представлен таблитчатыми, столбчатыми и изометричными псевдогексагональными разрезами с четко развитыми гранями. Кроме ясности кристаллографических очертаний от вкрапленников I генерации их отличают размеры, не превышающие 150 мк; средний же размер кристаллов составляет 80 мк. Включения для II генерации плагиоклазов нехарактерны, но зональные кристаллы встречаются, причем промежуточная зона более основная по отношению к ядру и краю, имеющих обычно одинаковый состав. Это явление может быть связано с резким изменением состава расплава в результате массового выделения минералов II генерации. Состав вкрапленников II генерации ко-

леблется в широких пределах (от № 47 до № 65), среднее значение из 30 замеров составляет № 58.

Пироксен I генерации представлен и ромбической, и моноклинной разностями. Количество его слишком мало, чтобы выяснить соотношение между ними. Моноклинный пироксен встречается в виде гломеропорфировых сростков, неправильных округлых зерен и реже — в виде четко ограненных короткопризматических кристаллов. Средний размер выделений моноклинного пироксена составляет 0,45 мм. По оптическим свойствам ( $2V$  по пяти замерам колеблется от 48 до 55°;  $N_g - N_p = 0,020-0,024$ ;  $C : N_g = 40-45^\circ$ ; чуть заметный плеохроизм в зеленовато-желтых тонах) следует отнести его к диопсид-авгиту, который был характерен для лав более ранних извержений.

Частично пироксен I генерации представлен гиперстеном, отличающимся более четкими кристаллографическими очертаниями, прямым угасанием в разрезах зоны [100], низким двупреломлением ( $N_g - N_p = 0,012$ ), заметным плеохроизмом. Колебания величины угла оптических осей незначительны ( $2V$  равно 62—64° по шести замерам), однако встречаются зональные вкрапленники, имеющие более магнезиальное ядро.

Пироксен II генерации отличается явным преобладанием гиперстена, равномерно распределенного в основной массе в виде удлинённых призматических субфенокристаллов. Размеры последних колеблются от 120 до 30 мк, средний размер, вычисленный для 500 зерен, составляет 70 мк. Встречаются гломеропорфировые сростки гиперстена и реликты крупных зерен роговой обманки, нацело замещенные гиперстеном II генерации. Характерно присутствие в пироксенах обеих генераций включений апатита; в зональных кристаллах эти включения концентрируются на границе зон.

Роговая обманка является спорадическим минералом. Единичные крупные зерна ее, как правило, оплавлены и опацифицированы, частично или полностью замещены мелкими выделениями пироксена. По оптическим свойствам она близка к ранее описанным окисленным роговым обманкам купола Нового (Горшков, Богоявленская, 1965).

Магнетит, слагающий около 1 % породы, рассредоточен в основной массе в виде мелких (30—50 мк) правильных кристаллов, или же приурочен к вкрапленникам пироксенов в виде более крупных, неправильной формы выделений.

Апатит в виде очень мелких (единицы микрон) включений развит в плагиоклазах и пироксенах обеих генераций и также в стекле.

Вулканическое стекло цементирует вкрапленники и субфенокристаллы, слагая около 33% всего объема породы. Свойства стекла, а также степень и характер его раскристаллизации меняются достаточно заметно даже в пределах поля зрения микро-

скопа. Участки чистого стекла встречаются редко, большей частью основная масса на 80—90% состоит из микролитов плагиоклаза и пироксена. Развиты и кристаллиты, обычно в виде спиккулитов. В зависимости от степени раскристаллизации и окисленности стекла меняется его окраска, встречаются участки прозрачного бесцветного, бурого и серого стекла; переходы между ними постепенные. При больших увеличениях в буром стекле обнаруживаются скопления очень тонких микролитов цветного минерала, серое стекло обогащено выделениями магнетита и плагиоклаза. Разновидности вулканического стекла, выделенные по цветовому признаку, отличаются и по показателям преломления: наименьший показатель преломления у бурого стекла ( $n = 1,497—1,500$ ), самый высокий — у бесцветного или слабо окрашенного ( $n = 1,507—1,510$ ).

**Лавы пирокластических потоков второй серии** характеризуются однородностью: практически весь материал потоков является ювенильным. Это серые пористые пироксеновые андезиты с очень редкими вкрапленниками роговой обманки и мелкими кубическими кристалликами пирита. В них присутствуют те же главные минералы, что и в лавах потоков первой серии, и теми же структурными особенностями (две генерации плагиоклазов и пироксенов). В то же время материал потоков второй серии отличается минералогическим составом и оптическими свойствами отдельных минералов.

Прежде всего четко обособляются две разновидности вулканического стекла. Зеленовато-бурое стекло образует ясно очерченные глобулы размером от 5 до 30 мк; форма их чаще всего изометричная, в виде правильных окружностей. Отдельные глобулы зеленовато-бурого стекла вытянуты в линзы, параллельные общему направлению флюидальности во вмещающем стекле. Вещество глобул абсолютно изотропно, показатель преломления его ( $1,516 \pm 0,002$ ) заметно превышает показатель преломления вмещающего стекла (1,495—1,497). В последнем отдельные участки окрашены в зеленоватый цвет; показатель преломления несколько больше (1,500—1,507); они связаны постепенными переходами с низко-преломляющим бесцветным стеклом и содержат большое количество кристаллитов и рудной пыли.

Порция расплава, давшая высокопреломляющее стекло глобул, видимо, обладала низкой кристаллизационной способностью. Стекло это однородное, чистое, почти не содержит кристаллитов, только изредка в центральных участках глобул наблюдаются скопления кристаллитов чешуйчатой формы. Встречаются единичные глобулы, целиком заполненные этими образованиями, возможно, это результат дальнейшей раскристаллизации. Высокопреломляющее стекло характеризуется полным отсутствием газовых включений и пор, последние сосредоточены исключительно в кислом вмещающем стекле. Такое распределение летучих компонен-

тов расплава могло быть причиной и расщепления, и различной кристаллизационной способности разных его порций.

Интересны структурные взаимоотношения высокопреломляющего стекла с субфенокристаллами. По отношению к вкрапленникам плагиоклаза II генерации оно почти всегда ксеноморфно, а по отношению к пироксенам II генерации отмечается одинаковая степень идиоморфизма. Можно считать, что обособление и затвердевание глобулей основного стекла начиналось почти одновременно с выделением вкрапленников II генерации и, во всяком случае, до затвердевания низкопреломляющего стекла основной массы. Последнее отличается явными признаками флюидальности, содержит большое количество кристаллитов (главным образом спиккулитов), ориентированных параллельно граням вкрапленников и краям глобулей и пор.

Присутствие в основной массе двух четко обособленных разновидностей стекла мы рассматриваем как результат ликвации — расщепления остаточного расплава на две несмешиваемые жидкости. В лавах потоков первой серии и более ранних извержений вулкана Безымянного подобных явлений не наблюдалось. Одна из главных особенностей лав последнего этапа извержения — содержание значительных количеств фтора. Экспериментальными работами Ершовой и Ольшанского (1957, 1958) установлено, что в присутствии летучих, особенно фтора, несмешиваемость двух жидкостей проявляется резче и границы области несмешиваемости расширяются. Учитывая эти данные, мы считаем, что именно появление фтора в лавах настоящего извержения тем или иным образом привело к расщеплению остаточного расплава на два стекла.

Другой особенностью лав в пирокластических потоках второй серии является заметное изменение состава плагиоклаза. Это относится как к вкрапленникам I генерации (содержание анортитовой составляющей на 7—8% меньше по сравнению с плагиоклазами лав в потоках первой серии), так и к вкрапленникам II генерации (содержание анортитовой составляющей на 10—15% меньше). Такое резкое изменение состава плагиоклазов в продуктах извержения вулкана Безымянного за последнее десятилетие отмечается впервые. Этот факт наряду со многими другими — еще одно доказательство того, что мы имеем дело с качественно новой порцией магматической колонны.

Оптические свойства и формы выделений пироксенов не изменяются. Единичные зерна роговой обманки сильно опацифицированы и частично подверглись диссоциации.

Отличительной особенностью описываемых лав нужно считать появление в основной массе микролитов апатита. Некоторые выделения апатита достигают 100—150 *мк* в поперечнике и, возможно, являются пневматолитовыми.

Количественно-минералогический анализ лав потоков второй серии (см. табл. 2) также указывает на ряд изменений в процессе

их кристаллизации. Снижается содержание вкрапленников плагиоклаза и особенно пироксена I генерации; с другой стороны, количество стекла и вкрапленников II генерации увеличивается. Для пирокластических потоков второй серии характерно присутствие в лавах до сих пор не встречавшихся в продуктах извержений вулкана Безымянного ксенолитов пироксеновых базальтов и пироксенитов. Интересно, что еще в потоках первой серии подобные ксенолиты совершенно отсутствуют. Ксенолиты пироксеновых базальтов достигают в поперечнике 20—25 см, ксенолиты пироксенита значительно меньше (3—4 см) и встречаются реже. Химические анализы пироксеновых базальтов (табл. 3) отличаются резко пониженным содержанием глинозема и повышенным — окиси магния. Возможно, это основные дифференциаты из глубоких частей фундамента Ключевской группы вулканов. Следует отметить почти полное отсутствие переработки ксенолитов андезитовой магмой. Контактново-реакционный процесс выразился в амфиболизации пироксенов и частичном ороговиковании основной массы в сравнительно тонкой (несколько миллиметров) внешней зоне ксенолитов. Контакт с вмещающими андезитами резкий, без каких-либо изменений в последних. Изменение минералогического состава, оптических свойств и состава отдельных минералов по сравнению с лавами предыдущих извержений, так же как и различия между продуктами начальных и конечных стадий настоящего извержения по-прежнему не отражены в химизме лав. Содержание кремнекислоты (да и всех других окислов) практически не изменяется. Фигуративные точки лав последних извержений на диаграмме Заварицкого располагаются на участке, отвечающем по составу среднему андезиту. Как и все продукты извержений вулкана Безымянного, эти лавы являются типичными представителями известково-щелочной серии.

В конечных продуктах извержения происходит смена ролей закисного и окисного железа. Если обычно главную роль играло окисное железо, то в данном случае наблюдается явное преобладание закисного. Очевидно, этот факт отражает условия в определенной части канала, а именно: понижение парциального давления кислорода. Лишним подтверждением этому служит уменьшение газонасыщенности последних порций лавы и обнаружение мелких выделений пирита.

Петрографическая и химическая характеристика лав извержения 1965 г. свидетельствует об отсутствии процесса дифференциации на данном участке вулканического канала и о различных условиях кристаллизации на разных его уровнях.

Таблица 3.

## Химический состав лав и ксенолитов вулкана Безымянного (извержение 1965 г.)

Номер образца	Химический состав												% у м а
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-	H <sub>2</sub> O+	
583	58,26	0,6	17,75	2,98	4,57	—	3,41	7,74	3,63	1,11	0,04	0,41	100,50
126а	58,72	0,76	16,58	5,01	3,33	0,17	3,40	6,89	3,78	1,27	0,07	0,16	100,05
126б	58,64	0,71	17,06	4,53	3,24	0,17	4,09	7,20	3,64	1,22	0,06	0,05	100,61
586	50,66	0,6	10,87	4,32	6,95	—	11,81	10,98	2,28	0,77	0,05	0,84	100,13
580в	48,28	0,85	12,15	6,57	5,95	—	8,72	13,76	2,54	1,01	0,03	0,38	100,24

	Числовые характеристики, по А. П. Заварицкому											
	a	c	b	s	Q	a/c	f'	m'	e'	n'	t	φ
583	9,8	7,2	15,3	67,7	+8,6	1,3	46,1	38,5	15,4	83,0	0,8	17,2
126а	10,3	6,0	15,6	68,1	-9,6	1,7	48,5	37,0	14,5	81,3	1,0	26,3
126б	9,8	6,5	16,3	67,4	+8,7	1,5	43,7	42,4	13,9	81,8	0,9	23,9
586	5,7	3,8	36,6	53,9	-7,4	1,5	25,9	50,7	23,4	81,0	0,9	9,3
580в	6,8	4,4	35,6	53,2	-11,6	1,5	27,7	39,6	32,7	78,8	1,2	12,7

Примечание. Обр. 583 — андезит извержения 1965 г.; обр. 126а — андезит «звержения 1963 г.; обр. 126б — пемзовый андезит извержения 1963 г.; обр. 586 — ксенолит, пироксеновый базальт; обр. 580в — ксенолит, пироксеновый базальт.

Обр. 583, 586, 580в — аналитик О. М. Табакова; обр. 126а, 126б — аналитик И. В. Воронова.

## Вулканический пепел

Минералогия, морфология и химизм пеплов заслуживают отдельного рассмотрения, так как они служат ценным источником информации о процессах извержения, переноса и отложения вулканического материала.

**Минералогический состав пеплов** соответствует составу исходной породы. Главным компонентом пеплов являются частицы основной массы породы, сложенные гомогенным стеклом, микролитами плагиоклаза и пироксена и включениями рудного минерала. Гомогенное стекло слагает лишь незначительные, микроскопические участки основной массы. Даже в пределах одного зерна отмечаются заметные колебания в окраске стекла и соответственно в величине показателя преломления ( $n = 1,497—1,505$ ). Микролиты плагиоклаза и пироксена и кристаллиты составляют иногда до 90% объема основной массы.

Кристаллическая часть пеплов представлена фенокристаллами и обломками кристаллов плагиоклаза и пироксена с незначительной примесью роговой обманки. Плагиоклаз — главный кристаллический компонент пеплов. Он встречается в виде таблитчатых и короткостолбчатых кристаллов; цвет зерен плагиоклаза варьирует от белого, почти прозрачного до желтоватого в тех случаях, когда зерно переполнено включениями стекла. Определение величины

Таблица 4

Содержание минералов и некоторых окислов в пеплах (588—599),  
заполнителях пирокластических потоков (584, 579) и в отложениях  
«палящих туч» (10), %

Номер пробы	Основная масса	Плагиоклаз	Пироксен	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
588	41,6	47,6	10,8	—	3,82	1,26
589	45,5	35,7	18,8	—	—	—
590	41,8	42,2	16,7	—	—	—
591	27,1	55,0	17,9	—	—	—
592	30,3	50,9	18,8	—	—	—
593	26,2	57,0	16,8	58,78	3,78	1,25
594	66,3	29,6	4,1	—	—	—
595	59,9	35,8	4,3	61,10	3,65	1,30
596	36,7	47,0	16,3	—	—	—
597	49,9	35,0	15,8	58,40	3,78	1,20
598	64,4	28,4	7,2	50,95	3,78	1,26
599	52,1	44,7	3,2	59,80	3,78	1,34
584	39,4	44,9	15,7	—	3,71	1,34
579	38,1	46,4	15,5	—	3,78	1,25
10	58,2	28,9	12,9	—	3,71	1,34

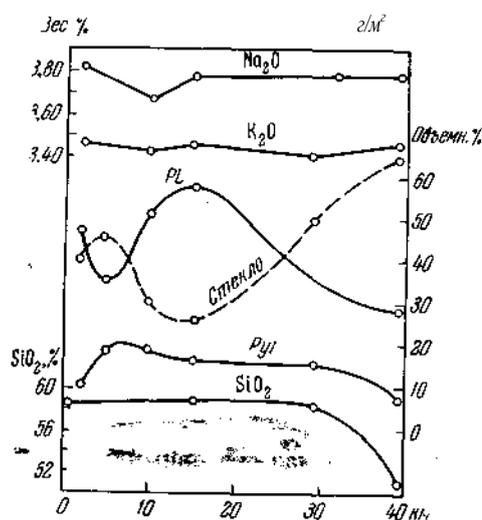


Рис. 9. Изменение минералогического состава пеплов в фракции 0,18 мм и поведение некоторых окислов в пеплах вдоль оси пеплопада

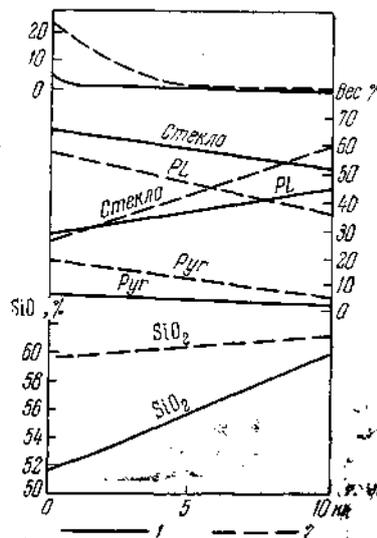


Рис. 10. Изменение количества выпавшего пепла, его химического и минералогического состава в поперечных профилях зоны пеплопада  
1 — поперечный профиль в 40 км от вулкана; 2 — поперечный профиль в 16 км от вулкана

показателей преломления проводилось на крупных кристаллах, относящихся заведомо к I генерации вкрапленников:  $N_g = 1,570$ ;  $N_p = 1,562$  (что соответствует содержанию 67% An).

Пироксены представлены ромбической и моноклинной разностями. Моноклинный пироксен встречается преимущественно в виде округлых, нечетко оформленных зерен, включающих иногда мелкие кристаллики апатита. Показатели преломления по осям  $N_g$  и  $N_p$  соответственно равны 1,692 и 1,670. Ромбическая разность относится к гиперстену ( $N_g = 1,715$ ;  $N_p = 1,726$ ).

Присутствие повышенного по сравнению с лавами количества роговой обманки в пеплах связано с тем, что материалом для образования пепла служили отчасти старые лавы купола, выжимавшиеся в 1956—1964 гг. и содержащие роговую обманку в качестве породообразующего минерала.

По минералогическому составу материал заполнителей пиро-кластических потоков практически не отличается от пеплов.

Количественно-минералогический подсчет, при котором учитывались три главных компонента пеплов — основная масса, плагиоклаз и пироксен, позволяет сделать определенные выводы относительно процесса дифференциации в пепловой туче (табл. 4). По-

ведение отдельных компонентов вдоль оси пеплопада отображено на рис. 9. В непосредственной близости от вулкана содержание отдельных компонентов резко колеблется, что отражается на графике ясно выраженными минимумами и максимумами на отрезке 5—15 км от центра извержения. Главная масса выпадающего здесь пепла представлена материалом крупных фракций (до 0,5 мм); влияние удельного веса минералов сказывается слабо. Далее вдоль оси пеплопада процесс дифференциации минералов по удельному весу проявляется четко: закономерно увеличивается количество наиболее легких пепловых частиц, представленных пористым стеклом и, наоборот, содержание пироксенов и плагиоклазов заметно снижается (табл. 5).

Таблица 5  
Количественно-минералогический состав пеплов в различных фракциях

№мер образца	Состав	Фракции, мм				
		0,068	0,1	0,18	0,2	0,315
593 (16 км от кра- тера)	Основная масса	31,4	27,5	—	48,5	49,4
	Плагиоклаз	55,9	58,0	—	33,9	33,6
	Пироксен	12,7	14,5	—	17,6	17,0
597	Основная масса	—	35,3	49,9	65,3	64,8
	Плагиоклаз	—	53,8	35,0	26,3	30,2
	Пироксен	—	10,9	15,8	8,4	5,0

То же отмечается и в поперечном профиле зоны пеплопада в 16 км от вулкана, тогда как в 40 км от центра извержения наблюдается обратная картина (рис. 11). Данные химического анализа пепловых проб на содержание кремнекислоты находятся, на первый взгляд, в противоречии с результатами количественно-минералогического подсчета. Увеличение количества частиц стекла в пеплах вдоль оси пеплопада должно повысить содержание  $\text{SiO}_2$ ; на самом деле оно понижается. Остается предположить, что изменение валового состава пепла зависит и от других причин. С этой целью проведено изучение его состава в различных фракциях одной и той же пробы (рис. 11). Оказывается, размер частиц сильно влияет на минералогический состав; например, содержание плагиоклаза в одной и той же пробе увеличивается почти вдвое при уменьшении размера частиц в два раза.

Выпадение материала из пепловой тучи сопровождается отчетливой дифференциацией его по размерам частиц (табл. 6). На расстоянии 30—40 км от вулкана наблюдается максимум выпадения пепла размером 0,1 мм; именно в этой фракции резко уменьшается содержание стекла, а отсюда и  $\text{SiO}_2$ .

Гранулометрический состав и средний размер пеплов вулкана Безымянного 9—11 марта 1965 г.

Номер образ- ца	Фракция, мм													Средний размер зерна
	0,05	0,068	0,10	0,18	0,20	0,315	0,40	0,50	1,00	2,00	3,00	5,00	7,00	
10	69,38	8,49	3,83	0,91	1,60	0,63	0,84	5,95	1,94	4,00	1,40	0,29	0,74	0,24
576	1,74	10,43	29,26	25,14	19,82	3,86	3,78	5,15	0,55	0,17	0,05	0,05	—	0,16
579	20,10	10,98	28,78	8,39	7,77	3,29	3,62	2,67	5,18	4,06	0,94	3,43	0,79	0,40
584	0,63	—	0,08	0,15	0,81	1,29	3,23	37,93	23,72	19,94	9,99	—	2,23	1,05
588	3,68	1,03	0,46	0,14	0,86	1,22	2,90	46,78	22,61	1,24	7,45	12,11	0,52	1,11
589	1,14	0,76	0,54	0,24	2,31	4,19	10,35	55,11	10,89	5,79	—	—	—	0,47
590	35,28	22,20	11,60	4,92	15,74	5,77	3,86	0,40	0,17	—	—	—	—	0,11
591	10,10	11,92	7,46	4,32	10,22	2,57	1,65	36,14	10,95	3,99	0,68	—	—	0,36
592	3,14	2,29	1,34	1,04	4,07	2,04	6,45	64,86	10,82	3,66	0,29	—	—	0,47
593	5,90	3,32	1,98	1,35	10,62	11,94	20,34	43,84	0,63	0,08	—	—	—	0,33
594	34,96	36,39	13,85	4,65	2,66	3,68	2,76	1,05	—	—	—	—	—	0,08
596	4,34	12,48	15,45	4,39	32,49	16,22	14,63	—	—	—	—	—	—	0,18
597	4,80	5,18	5,09	9,95	54,88	14,84	4,91	0,35	—	—	—	—	—	0,18
598	8,22	—	51,45	16,53	15,65	—	7,82	0,23	—	—	—	—	—	0,13

Изучение пеплов по поперечному профилю в 16 км от вулкана еще раз подтверждает высказанную точку зрения. Средний размер частиц пепла на этом участке составляет 0,3 мм, а, как следует из графика, содержание стекла в этих фракциях наиболее высокое. Химические анализы указывают и на максимальное содержание  $\text{SiO}_2$  (59—61%) в этой части зоны пеплопада.

Таким образом, в процессе переноса пеплового материала происходит его заметная эоловая дифференциация, вызванная не столько простым различием минералов по удельным весам, сколько неравномерным распределением их в различных фракциях и определенными закономерностями в распределении материала по размеру в зоне пеплопада. Суммарный эффект этих явлений приводит к резким колебаниям в содержании отдельных компонентов пеплов, причем колебания эти не-однозначны; возможно и уменьшение содержания  $\text{SiO}_2$  и увеличение его почти на 10% в материале одного и того же пеплопада.

Ранее было выделено два типа эоловой дифференциации (Гущенко, 1965): один — с увеличением, другой — с уменьшением содержания  $\text{SiO}_2$  по мере удаления от вулкана. Различия объяснялись разными типами самих извержений. Наши данные говорят

о том что даже при одном и том же извержении, более того, в материале одного пеплопада наблюдается повышение содержания  $\text{SiO}_2$  на одних участках и понижение — на других. Мы считаем, что это явление зависит от неравномерности распределения минералов по фракциям и выпадений тех или иных фракций из пепловой тучи. Резкие различия в составе пеплов одного и того же пеплопада должны учитываться при изучении древних извержений. Сорбционные процессы, происходящие в газовой-пепловой туче, нами специально не изучались, однако обращает на себя внимание тот факт что содержание отдельных микрокомпонентов в некоторых пепловых пробах повышено по сравнению с исходной породой (табл 7). Такое обогащение могло произойти в результате сорбирования пеплами отдельных катионов из первичных вулканических газов.

Что касается морфологии пепловых частиц, то нужно подчеркнуть что во всех просмотренных под биноклем пробах практически отсутствуют формы, указывающие на пластичное состояние

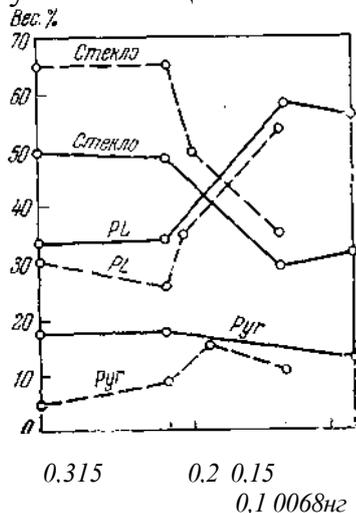


Рис. 11. Содержание минералогических компонентов пеплов в зависимости от размера зерна во фракциях

Таблица 7

Результаты спектральных анализов образцов лав, пещла и возгонов извержения вулкана Безымянного 1965 г.  
(анал. Г. И. Арсанова)

Номер образца	Be	Pb	Zn	Cu	V	Ga	Ln	Cr	Co	Ni	Sc	Y	Yb	Ti	Zr	Rb	Sr	Ba
576	сл.	сл.	—	0,001	0,01	0,003	—	0,00	сл.	сл.	0,00	0,002	0,00	0,2	0,00	—	0,0	0,04
584	сл.	сл?	—	0,0008	0,005	0,003	—	0,00	сл.	сл.	0,00	0,0015	0,00	0,1	0,00	—	0,0	0,04
579	сл.	—	—	0,0008	0,005	0,003	—	0,00	сл.	сл.	0,00	0,003	0,00	0,0	0,00	—	0,0	0,03
588	сл.	сл?	—	0,001	0,006	0,003	—	0,00	сл.	сл.	сл.	0,0015	0,00	0,15	0,00	—	0,0	0,03
580—B	сл?	—	—	0,0005	0,01	0,003	—	0,0	0,002	0,002	0,00	0,0015	0,00	0,2	0,00	—	0,0	0,01
586	сл?	сл?	—	0,001	0,01	0,003	—	0,0	0,003	0,007	0,00	сл.	—	0,2	0,00	—	0,0	0,025
583	сл.	сл?	—	0,0009	0,006	0,002	—	0,00	сл.	сл.	—	0,001	0,00	0,06	0,00	—	0,0	0,03
592	сл.	—	—	0,0008	0,006	0,003	—	0,00	0,001	сл.	0,00	0,002	0,00	0,1	0,00	—	0,0	0,04
597	сл.	—	—	0,0009	0,006	0,003	—	0,00	0,001	—	0,00	0,003	0,00	0,2	0,00	—	0,0	0,04
595	сл.	—	—	0,0008	0,004	0,003	—	0,00	сл.	сл.	—	0,001	0,00	0,3	0,00	—	0,0	0,05
599	сл.	—	—	0,0008	0,006	0,003	—	0,00	сл.	сл.	сл?	0,002	0,00	0,2	0,00	—	0,0	0,04
598	сл.	—	—	0,0009	0,006	0,003	—	0,00	сл.	сл.	сл?	0,002	0,00	0,2	0,00	—	0,0	0,03
593	сл.	—	—	0,0008	0,006	0,002	—	0,00	сл.	сл.	сл?	0,003	0,00	0,1	0,00	—	0,0	0,1
B—I	сл.	—	сл.	0,0005	0,005	0,005	сл?	0,00	сл.	сл?	сл.	0,001	0,00	0,2	0,00	0,00	0,0	0,1
B—II	сл.	—	сл.	0,001	0,005	0,005	сл.	0,00	0,001	сл.	0,00	0,002	0,00	0,2	0,00	0,00	0,0	0,1
B—III	сл.	—	сл?	0,001	0,005	0,002	—	0,00	0,001	сл?	0,00	0,001	0,00	0,2	0,00	0,00	0,0	0,1
B—IV	сл.	—	сл.	0,0005	0,002	0,002	сл?	0,00	0,001	сл?	0,00	0,001	0,00	0,2	0,00	0,00	0,0	0,1
ПВ—I	сл.	—	сл?	0,001	0,005	0,005	сл.	0,00	0,001	0,001	0,00	0,002	0,00	0,2	0,00	0,00	0,0	0,1
ПВ—II	сл.	—	сл.	0,0005	0,005	0,005	сл?	0,00	0,001	0,001	0,00	0,002	0,00	0,2	0,00	сл.	0,00	0,1
ПВ—III	сл.	—	сл.	0,0005	0,002	0,005	сл?	0,00	0,001	0,001	0,00	0,001	сл.	0,2	0,00	сл.	0,0	0,1
ПВ—IV	сл.	—	сл.	0,001	0,005	0,005	сл.	0,00	0,001	0,001	сл.	0,001	сл.	0,2	0,00	сл?	0,0	0,1

вещества в момент пеплообразования. Частицы пепла, представленные минералами — вкрапленниками и их обломками, обычно имеют правильную, четко очерченную форму; представленные стеклом — изометричную форму с неровными краями. Последние отличаются высокой пористостью. Изучение морфологии пепловых частиц приводит нас к выводу о том, что к моменту взрыва исходный материал находился в затвердевшем уже состоянии, но содержал значительное количество газов в незакристаллизованном стекловатом остатке.

### Вулканические газы

**Газы эксплозий.** О составе летучих, высвобождающихся при извержении Безымянного, можно судить по газам эруптивной тучи, которые адсорбируются на поверхности пепловых частиц. О близости химического состава водных вытяжек свежих пеплов и газов и эруптивных туч говорят исследования Л. А. Башариной (1958) во время извержения Безымянного весной 1956 г. С этой точки зрения интересен состав водных вытяжек пеплов, собранных нами через несколько дней после описываемого извержения (табл. 8). Образцы пеплов 595 и 599, отобранные на значительном расстоянии от вулкана и расположенные поперек оси пеплопада, содержали незначительные количества вулканического материала, поэтому был проанализирован снег, с которым пепел был смешан, а результаты химического анализа его сведены в табл. 9.

Судя по данным таблиц, состав эксгаляций, выделяющихся в вулканскую стадию извержения Безымянного, был сложным; наряду с соединениями серы, которые преобладали, в газах эруптивного облака были обнаружены галоиды — хлор и в небольших количествах фтор.

Такой же характер эксгаляций наблюдается на стадии образования пирокластических потоков. Химический анализ водных вытяжек заполнителя пирокластических потоков как первой, так и второй серий (см. табл. 8, № 579, 584), несмотря на резко различные гранулометрический состав и количества отдельных компонентов, показывает одинаковые отношения летучих в газопепловом облаке (например, отношение S/C1 в первом случае равно 4,70, а во втором — 4,10).

Однако в газах, адсорбированных мелким материалом пеплово-газового облака раскаленных лавин и обнаруженных химическим анализом водных вытяжек этого материала (см. табл. 8, № 10 и 576), наблюдается обратная величина отношения S/C1, равная для потоков первой серии 0,15 и второй — 0,73, что говорит о преобладании в газах галоидных соединений и, в частности, HCl.

Таким образом, как в стадию вулканических взрывов, так и в стадию образования пирокластических потоков в эксгаляциях Безымянного преобладают газы группы серы. Согласно исследованиям

Таблица 8

Состав водных вытяжек пеплов вулкана Безымянного, мг/100 г воздушно-сухой пробы

Номер пробы	Катионы							Анионы					
	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B	S/Cl
10	6,75	25,99	5,40	0,08	16,23	2,95	Не обн.	0,84	27,30	24,2	54,16	0,02	—
	—	1,130	0,138	0,010	0,809	0,242	» »	0,040	0,770	0,397	1,127	—	0,73
576	7,3	7,0	1,10	0,17	1,45	0,27	Не обн.	0,2	6,4	12,20	2,47	0,02	—
	—	0,304	0,028	0,010	0,073	0,020	Не обн.	0,010	0,181	0,200	0,051	—	0,15
579	6,45	1,05	0,37	—	0,45	—	Не обн.	0,15	0,55	2,44	4,52	0,02	—
	—	0,045	0,010	—	0,020	—	—	0,010	0,010	0,040	0,094	—	4,70
584	4,4	1,4	0,85	0,50	17,78	0,52	Не обн.	0,15	4,95	0,0	48,55	0,02	—
	—	0,061	0,020	0,030	0,886	0,040	Не обн.	0,010	0,139	—	1,011	—	4,01
588	5,35	6,87	3,50	0,52	16,83	2,92	Следы	1,25	12,87	3,66	50,20	0,06	—
	—	0,298	0,090	0,030	0,839	0,239	—	0,065	0,363	0,060	1,045	—	1,43
589	6,5	8,15	1,39	0,0	1,90	0,52	Не обн.	0,15	6,47	10,98	6,58	0,02	—
	—	0,355	0,035	0,0	0,095	0,040	—	0,010	0,182	0,180	1,136	—	0,37
590	6,6	17,5	5,28	0,06	4,21	1,70	Не обн.	0,73	11,89	18,51	28,33	0,03	—
	—	0,761	0,135	0,030	0,210	0,140	—	0,040	0,335	0,303	0,548	—	0,82

Таблица 8 (окончание)

Номер пробы	Катионы							Анионы					
	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B	S/Cl
591	5,25 —	8,95 0,389	2,39 0,060	0,66 0,030	11,25 0,561	2,32 0,190	Следы	0,95 0,051	8,21 0,231	1,23 0,020	48,99 1,040	0,03 —	— 2,25
592	4,95 —	7,5 0,325	2,55 0,065	0,44 0,020	9,36 0,467	2,55 0,210	Сл. следы	1,75 0,092	7,85 0,222	— —	44,85 0,934	— —	— 2,10
593	6,00 —	4,65 0,202	1,50 0,038	0,10 0,010	4,31 0,215	1,31 0,108	Не обн.	0,37 0,020	3,44 0,097	2,44 0,040	16,87 0,351	0,06 —	— 1,81
594	6,35 —	9,65 0,420	2,23 0,057	1,1 0,061	1,33 0,066	— —	Не обн.	0,89 0,050	11,86 0,335	14,49 0,237	Не обн. —	0,15 —	— —
596	5,8 —	4,19 0,182	1,74 0,044	0,50 0,030	0,63 0,030	0,39 0,030	Не обн. Не обн.	0,13 0,010	6,46 0,182	2,45 0,040	3,59 0,074	0,04 —	— 0,20
597 *	5,7 —	6,04 0,262	1,43 0,036	1,32 0,073	2,32 0,111	0,91 0,080	Следы	0,44 0,020	4,80 0,136	6,46 0,106	9,44 0,197	0,01 —	— 0,72
598	6,1 —	4,52 0,197	2,26 0,057	— —	5,72 0,285	0,27 0,020	Не обн.	0,54 0,030	6,38 0,180	10,51 0,172	7,09 0,147	0,10 —	— 0,40

Состав атмосферных осадков в районе вулкана Безымянного,  
 мг/л; мг экв/л; мг экв % (анал. В. И. Капустина)

Номер пробы	Общ. мин.	$\frac{\text{Cl}}{\text{Na} + \text{K}}$	$\frac{\text{SO}_4}{\text{Cl}}$	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
595	115,64	0,91	0,28	4,9	27,4	10,62	0,50	1,8
					1,19	0,27	0,01	0,09
					71,68	16,27	0,60	5,42
599	94,77	0,82	—	6,2	23,00	5,55	0,15	1,8
					1,00	0,14	0,01	0,09
					74,62	10,45	0,75	5,72
110	236,58	0,64	0,41	5,1	66,00	22,00	0,7	3,81
					2,87	0,56	0,04	0,19
					12,66	14,18	1,01	4,81

Таблица 9 (окончание)

Номер пробы	Общ. мин.	Mg <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B
595	115,64	1,22	0,6	34,69	Не обн.	29,29	9,87	—
		0,10	0,03	0,98		0,48	0,20	
		6,03	1,78	57,99		28,40	11,83	
599	94,77	1,22	0,6	23,40	Не обн.	39,05	Не обн.	0,1
		0,10	0,03	0,66		0,64		
		7,46	2,26	49,62		48,12		
110	286,58	3,53	1,0	56,71	2,40	107,39	23,04	—
		0,29	0,05	1,60	0,06	1,76	0,48	
		7,34	1,27	40,51	1,52	44,55	12,15	

(Lovering, 1961), сера менее растворима в магме и при поступлении последней на поверхность выделяется из нее в первую очередь, в отличие от более растворимого хлора.

На рис. 12 видно закономерное уменьшение количества  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  в образцах пеплов по мере удаления от вулкана. Наибольшая концентрация летучих в пеплово-газовой туче была близ эруптивного центра.

Кроме того, кривые, отражающие количество каждого отдельного компонента, ведут себя по-разному. Причину этого нужно искать в изменении минералогического состава пеплов в пробах, отобранных на различных расстояниях от вулкана. Образцы 588, 592, 593, 597, 598 (см. табл. 4) отобраны строго вдоль оси пеплопада.

Сравнивая количество анионов в водных вытяжках пеплов, представленных на рис. 13, с изменением минералогического состава этих же образцов, можно отметить некоторую зависимость. Так, кривые для  $\text{Cl}^-$  и  $\text{F}^-$  близки к кривой, отражающей изменение количества плагиоклаза в зависимости от места отбора образца (см. рис. 12). Наоборот, кривые для  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$  близки к кривым для пироксена и стекла. Наблюдается избирательная сорбция  $\text{Cl}^-$  и  $\text{F}^-$  на зернах плагиоклазов и  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$  — пироксенов и стекла. И. И. Гуценко (1965) и Л. А. Башарина (1958) считают, что анионная часть водных вытя-

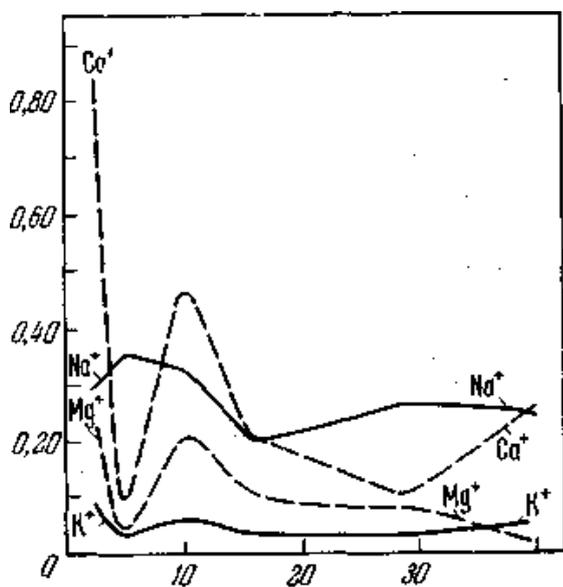


Рис. 12. Изменение состава катионов в водных вытяжках из пеплов в зависимости от места взятия проб

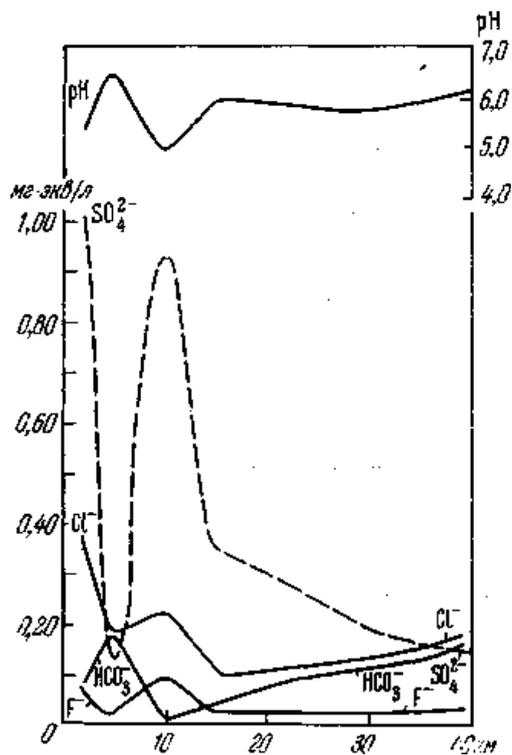


Рис. 13. Изменение анионного состава и pH водных вытяжек из пеплов по мере удаления от вулкана

жек может рассматриваться как сорбированная из эруптивного облака и должна отражать состав летучих, выделяющихся во время извержения.

Количество катионов в водных вытяжках пеплов зависит от величины рН раствора, что, в свою очередь, связано с концентрацией анионов. Увеличение количества  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и других анионов понижает рН раствора и способствует интенсивному пере-ходу в раствор катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , которые ведут себя приблизительно одинаково, и их кривые соответствуют кривой для стекла. То же можно сказать и о щелочах, хотя их кривые приближаются к кривой для плагиоклаза. Происхождение катионной части в водных вытяжках пеплов неясно, но не исключена возможность выщелачивания из них металлов водой, интенсивность же выщелачивания зависит от величины рН раствора.

Газы фумарол пирокластических потоков первой и второй серии. Во время нашего посещения вулкана Безымянного пирокластический поток первой серии был еще достаточно нагрет, сформировавшихся пазовых выходов было мало. Фумаролы тяготели к местам с большей мощностью потока и формировались среди навалов, где преобладал более крупный материал. В таких случаях газы с шумом вырывались из щелей между глыбами лавы, выдувая песок и пепел. Температура фумарол была наиболее высокой и равнялась  $400\text{--}450^\circ$ , газ был сухим, с незначительным содержанием влаги, резко ощущался запах хлора.

Таблица 10

Состав фумарольных газов вулкана Безымянного, объемные % (анал. Г. В. Кац)

Номер пробы	Место и дата отбора пробы	T,°C	HF	HCl	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
1	Пирокластический поток первой серии Фумарола 1, 25 марта 1965 г.	400	0,005	0,05	0,285	2,71	2,04	94,91
2	Пирокластический поток первой серии Фумарола 2 25 марта 1965 г.	250	0,33	8,17	2,26	5,59	6,02	77,63
3	Пирокластический поток второй серии. 26 марта 1965 г.	420	2,25	4,43	0,69	2,72	2,61	87,30

Газы таких фумарол (табл. 10, проба 1) на 97% состояли из паров воды и воздуха. O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>, по-видимому, атмосферного происхождения; отмечается значительный избыток азота в фумарольных газах по сравнению с кислородом. Среди кислых составных основ-

ная роль принадлежит  $\text{CO}_2$ , присутствуют  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ; отмечается отсутствие  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . Наличие в газовой фазе больших количеств  $\text{HF}$  приводило к интенсивному изменению окружающих пород.

В песке и более мелком материале часто встречались обособившиеся трубчатые отверстия фумарол с температурой на выходе  $250\text{--}300^\circ$ . Вулканические газы таких фумарол (табл. 10, № 2) составляли 16,35 от общего объема пробы. Наибольшее значение имели галоидные газы; отношение  $\text{HCl}/\text{HF} = 24,7$ . Из газообразных соединений серы обнаружен  $\text{SO}_2$ .

Таблица 11

Состав конденсатов фумарольных газов пирокластических потоков вулкана Безымянного (мг/л; мг экв/л) (анал. В. И. Капустина)

Номер пробы	Место и давление	Дата отбора	Объем	$T_{\text{фум}}, ^\circ\text{C}$	$\text{pH}/\text{H}^+$ , мг-экв	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{F}^-$	$S_{\text{общ.}}$ , мг/л
1	Пирокластический поток первой серии, фумарола 2, $p = 624$	25.III	51,0	$250^\circ$	$\frac{0,44}{361,08}$	12463,14 351,5	424,42 10,6	267*	178,62
2	Пирокластический поток второй серии, фумарола 3, $p = 594$	26.III	52,0	$420^\circ$	$\frac{0,85}{142,8}$	3652,07 103,0	25,63 0,64	920,0	27,48

\* Определено полуколичественным методом.

В искусственном конденсате пара ( $\text{pH} = 0,44$ ) описываемых фумарол (табл. 11, проба 1) преобладали, как и в газовой фазе, галоиды; сера присутствовала в подчиненных количествах. Обращает внимание наличие ионов фтора. Небольшое количество конденсата не позволило провести полного определения всех компонентов.

При сопоставлении состава газов и конденсатов пара фумаролы (см. табл. 10, проба 2 и табл. 11, проба 1) и снега (см. табл. 9, проба 110), отобранного в 3—4 м от выхода фумаролы, наблюдалась аналогия в относительных количествах S, Cl и F. Следовательно, атмосферные осадки способны растворять или сорбировать вулканические газы, и отражают их качественный состав.

Около газовых выходов с температурой  $200\text{--}300^\circ$  изменения пород под действием фтора не происходило. Были обнаружены только зеленые возгоны хлоридов, белые и желтые — сульфатов.

Иногда газы выделялись непосредственно из трещинок в крупных глыбах андезитовой лавы. Температура почти невидимого

газа была 180—200°. Глыбы в месте выхода газов превращены в тонкий темно-зеленого цвета агрегат, состоящий из хлоридов и в меньшей степени — фторидов. Поверхну сублимировались сульфаты и хлориды. Фумаролы пирокластических потоков второй серии обычно располагались над засыпанными крупными глыбами и формировали отверстия в песчаном материале. Температура фумарол на выходе колебалась от 400 до 450°. Газ бесцветный, с удушливым запахом. По сравнению с аналогичными по температуре фумаролами на потоках первой серии, газы потока второй серии содержали значительно больше влаги. Так, во время отбора проб за одно и то же время в первом случае сконденсировалось 6,6 мл конденсата, а во втором — 23,0 мл.

В газах из фумаролы с температурой 450° (см. табл. 10, № 3) кроме паров воды и воздуха, которые составляли 89,91% общего объема газов, содержались значительные количества галоидов. Отношение  $\text{HCl}/\text{HF} = 1,97$ . Из газов группы серы, находящихся в подчиненном отношении к галоидным, обнаружен только  $\text{SO}_2$ . Отношение  $\text{HCl} + \text{HF}/\text{SO}_2 = 9,54$ ;  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  отсутствуют. Отношение  $\text{N}_2/\text{O}_2 = 33,56$ , что значительно выше, чем в воздухе.

В искусственном конденсате пара этой фумаролы (см. табл. 11, № 2) с  $\text{pH} = 0,85$  в анионной части преобладал  $\text{Cl}^-$  и  $\text{F}^-$ . Необходимо отметить большое количество фтора как в газе, так и в искусственном конденсате фумарол потока второй серии.

Рассматривая результаты анализа газов (см. табл. 10) и конденсатов пара (см. табл. И), можно видеть, что газовый состав фумарол пирокластических потоков в пределах одинаковых температур был схожим. Общим для фумарол пирокластических потоков обеих серий являлось высокое отношение  $\text{N}_2/\text{O}_2$ , что говорит, вероятно, об интенсивных окислительных процессах, происходящих в газовой системе фумарол. Величина  $\text{N}_2/\text{O}_2$  находилась в прямой зависимости от температуры фумарол. Все пробы вулканических газов и искусственных конденсатов содержали большое количество галоидных газов по сравнению с газообразными соединениями серы: такой газовый состав типичен для фумарол начальной стадии остывания пирокластического и лавового материала. Величина отношения  $\text{HCl}/\text{HF}$  выше для газов фумарол с более низкой температурой. Из газов группы серы основным являлся  $\text{SO}_2$ , количество которого уменьшается с увеличением температуры. Если  $\text{SO}_2$  продукт окисления (White, 1963), то его присутствие и отсутствие  $\text{H}_2\text{S}$  в наших газах объяснялось высоким значением  $\text{N}_2/\text{O}_2$ .

В местах, где расположены обособившиеся трубкообразные выводы газов, происходило интенсивное изменение породы. Зона изменения распространялась на незначительное расстояние в стороны от газового выхода (до 1,5—2 м) и представляла собой чаще всего почти правильный круг, который выделялся яркой окраской на фоне материала пирокластического потока.

В месте с наибольшей температурой газа (выше 400°) около самого выхода фумаролы порода превращена в сухую твердую сплошную корку, состоявшую из фтористых минералов ( $n < < 1,400$ ). Цвет перерожденной породы менялся от темно-коричневого до желтого. На расстоянии 5 —10 см от выхода газа, где температура колебалась от 250—300°, порода была превращена в рассыпчатую влажную массу темно-зеленого цвета, представляющую собой смесь хлоридов и фторидов. Далее образовывался только налет белого и желтого цветов из сульфатов и хлоридов.

Наибольшее количество фтора зафиксировано у устья фумаролы, что говорит о переносе его в газовой фазе и малой растворимости его соединений. Количество хлора возрастает с понижением температуры, что происходит, очевидно, в зоне конденсации фумарольных паров, количество же серы остается постоянным. Увеличение количества  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  понижает здесь величину pH, хотя на концентрацию металлов это, по-видимому, не влияет. Количество  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  уменьшается к зоне с низкой температурой. Рассматривая данные спектрального анализа свежих и измененных лав вулкана Безымянного, можно судить о формах и условиях переноса микроэлементов фумарольными газами.

Be, Sr, V, Co, Ni, Zr, Ga определены в одинаковых количествах; в возгонах всех зон независимо от температуры образования и их химического состава. Наибольшее количество Be, Sc, Pb, Sn определено в наиболее высокотемпературных зонах, связанных с фторидами и хлоридами; по мере удаления от фумаролы и уменьшения температуры образования возгонов количество упомянутых микроэлементов уменьшается. Наоборот, количество Mo, Cu, Zn, Cr увеличивается по направлению к низкотемпературным зонам, где преобладают хлориды и сульфаты.

На потоках второй серии часто встречались довольно большие (до 2,5 м в поперечнике), слегка парящие участки зеленого цвета, не приуроченные к выходу газов. Вокруг таких участков материал был сухим и нагретым до 300—350°. Вероятно, в образовании их заметную роль играли влажные газы, просачивающиеся из толщи агломерата и рассеивающиеся в нем. Зеленая масса, в которую изменена порода, представляет собой смесь хлоридов.

Таким образом, фумарольная деятельность на пирокластических потоках вела к дифференциации летучих в зависимости от температуры как самого материала потоков, так и фумарольных газов. В районе фумарол с более низкими температурами около выхода газа происходило изменение породы, характерное для данной температуры. Процесс изменения характеризовался привнесением и выносом вещества газом, существованием в местах с меньшей температурой ультракислых жидких растворов, осаждением на поверхности пирокластических материалов выцветов в результате испарения этих растворов. На потоках второй серии масштабы из-

менения породы были заметно выше, чем на потоках первой серии, по-видимому, из-за большей влажности фумарол. Как известно, присутствие в вулканических газах перегретых паров воды при высоких температурах усиливает реакции между летучими и нелетучими компонентами.

### Выводы

1. Весеннее извержение 1965 г. по целому ряду особенностей можно рассматривать как новый этап в эруптивной деятельности вулкана. В ходе извержения на поверхность поступали все менее газонасыщенные лавы. Это определило закономерную смену стадий извержения.

2. Особенности ювенильного материала отражают условия кристаллизации в верхних участках вулканического канала. Происходит дальнейшее накопление вкрапленников плагиоклаза и пироксена II генерации. Количество вкрапленников плагиоклаза и пироксена I генерации, остававшееся в течение последнего десятилетия стабильным, в лавах настоящего извержения несколько снизилось. В лавах пирокластических потоков второй серии отмечено явное покисление плагиоклазов на 7—15 номеров.

3. Большой интерес представляет наблюдавшееся впервые в продуктах исторического извержения обособление в основной массе двух разновидностей стекла. Возможность ликвации мы связываем с присутствием значительного количества фтора в лавах последнего этапа извержения.

4. В лавах заключительного периода извержения, также впервые для этого вулкана, отмечено появление ксенолитов пироксеновых базальтов и пироксенитов из более глубоких частей фундамента Ключевской группы вулканов.

5. Выявлены четкие закономерности в распределении пеплового материала. Влияние эоловой дифференциации сказывается в первую очередь на гранулометрическом составе пеплов. Для каждой фракции существуют четкие максимумы на определенном расстоянии от вулкана при отложении пеплового материала из эруптивной тучи. В то же время в зависимости от гранулометрического состава резко колеблется минералогический состав пепла. Суммарный эффект этих двух процессов сказывается на общем минералогическом и, следовательно, химическом составе пеплов, что необходимо учитывать при изучении древних пепловых отложений.

6. Изучение состава летучих, (Выделившихся в результате весеннего извержения Безымянного, показало, что как в стадию вулканских взрывов, так и в стадию образования пирокластических потоков основная роль принадлежит газам группы серы; количество галоидов значительно меньше. Начальная, высокотемпературная стадия остывания лавового материала пирокластических по-

токов характеризуется галоидным составом фумарольных газов, среди которых впервые в значительных количествах обнаружен фтор.

7. Механизм настоящего извержения (как, впрочем, и механизм всех однотипных извержений) нам представляется следующим: в результате выделения и накопления летучих в верхней части канала происходит разрушение лавовой пробки и начинается процесс выжимания магматической колонны, уравниваемый постоянным удалением верхних ее порций в результате взрывного выделения газов, содержащихся в каждой такой порции. Таким образом, на поверхность поступают все более высокотемпературные и менее газонасыщенные лавы, что приводит к изменению типа извержения. В конце концов на поверхности оказывается материал, уже неспособный к эксплозии и формирующий очередной блок экструзивной лавы в куполе. При сечении канала  $0,015 \text{ км}^2$  (в пределах экструзивного купола) и  $0,25 \text{ км}^2$  под куполом (основной канал) высота магматической колонны, участвовавшей в извержении, не превышает  $0,5 \text{ км}$ .

8. Судя по тому, что переход от экструзивного процесса к эффузивному во всей геологической истории вулкана был постепенным, таким же он может быть и на современном этапе активности,

### Литература

- Башарина Л. А.* Водные вытяжки пепла и газы пепловой тучи вулкана Безымянного.— Бюлл. Вулканол. ст., 1958, № 27.
- Горшков Г. С., Былинкина А. А.* Наблюдения над извержением вулкана Шивелуч в 1948—1950 гг.— Бюлл. Вулканол. ст., 1954, № 20.
- Горшков Г. С.* О связи вулканических и сейсмических явлений при извержении вулкана Безымянного (1955—1956 гг.).— Бюлл. Вулканол. ст., 1961, № 31.
- Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955—1963 гг. М., изд-во «Наука», 1966.
- Гуценко И. И.* Пеплы Северной Камчатки и условия их образования. М., изд-во «Наука», 1965.
- Елисеева О. П.* Об образовании шаровых лав в простейших фторсиликатных системах.— Докл. АН СССР, 1957, т. 114, № 6.
- Ершова З. П., Ольшанский Я. И.* Равновесие несмешивающихся жидкостей в системах типа  $\text{MeF}_2\text{—MeO—SiO}_2$ .— Геохимия, 1957, № 3.
- Ершова З. П., Ольшанский Я. И.* Равновесие двух жидких фаз во фторсиликатных системах, содержащих щелочные металлы.— Геохимия, 1958, № 2.
- Мархинин Е. К., Токарев П. И., Пугач В. Б., Дубик Ю. М.* Извержение вулкана Безымянного весной 1961 г.— Бюлл. Вулканол. ст., 1963, № 34.
- Aramaki S., Yamasaki M.* Pyroclastic flows in Japan.— Bull, volcanol., t. 26, 1963.
- Lovering T. S.* Sulfide ore formed from sulfide deficient solutions.— Econ. Geol., v. 56, 1961, N. Y.
- McTaggart K. C.* The mobility of nuee ardents.— Amer. J. Sci., v. 258, 1960.
- White D. E., Waring G. A.* Volcanic emanation.— U. S. Geol. Surv., Profess. Paper, 440-K, 1963.