

УДК 551.21

© 1996 г. ОЗЕРОВ А.Ю., КАРПОВ Г.А., ДРОЗНИН В.А.,
ДВИГАЛО В.Н., ДЕМЯНЧУК Ю.В., ИВАНОВ В.В., БЕЛОУСОВ А.Б.,
ФИРСТОВ П.П., ГАВРИЛОВ В.А., ЯЩУК В.В., ОКРУГИНА А.М.

ДИНАМИКА ИЗВЕРЖЕНИЯ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА 7 СЕНТЯБРЯ – 2 ОКТЯБРЯ 1994 г. (КАМЧАТКА)

С 7 сентября по 2 октября 1994 г. происходило вершинное эффузивно-эксплозивное извержение Ключевского вулкана, имеющее в основном стромболианский характер. На заключительном этапе произошло значительное увеличение его мощности и извержение приобрело субплинианский характер. Объем излившейся лавы 0,02–0,04 км³, объем пепла 0,05 км³. Продукты извержения по составу соответствуют типичным для Ключевского вулкана высокоглиноземистым базальтам. В работе использованы данные, полученные сотрудниками вулканологического отряда Института вулканологии РАН, проводившими изучение этого извержения, материалы визуальных наблюдений Камчатской вулканологической станции, а также информация Опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН.

THE KLYUCHEVSKOI VOLCANO ERUPTION OF SEPTEMBER 7 TO OCTOBER 2, 1994, KAMCHATKA, by O z e r o v A. Yu. *, K a r p o v G. A. *, D r o z n i n V. A. *, D v i g a l o V. N. *, D e m y a n c h u k Y u. V. *, I v a n o v V. V. *, B e l o u s o v A. B. **, F i r s t o v P. P. **, G a v r i l o v V. A. ***, Y a s h c h u k V. V. **** and O k r u g i n a A. M. * A summit effusive-explosive eruption took place on Klyuchevskoi Volcano during September 7 to October 2, 1994. The eruption was mainly of Strombolian type. It terminated in a burst of activity, thus acquiring a subplinian character. The volume of erupted lava was 0.02–0.04 km³, that of ash was 0.05 km³. The ejecta correspond to high alumina basalts typical of Klyuchevskoi eruptions. This study draws on data collected by personnel of the Volcanological Party, Institute of Volcanology, materials of visual observations at the Kamchatka Volcanological Station, as well as the information supplied by the Technique Testing Seismological Team, Russian Acad. Sci. Geophysical Service.

(Received August 1, 1995)

* *Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

** *Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

*** *Kamchatka Center for Monitoring Seismic and Volcanic Activity, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

**** *Technique Testing Seismological Team, Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

Вулкан Ключевской – один из самых активных вулканов мира. На его долю приходится почти половина ювенильного материала, поступающего на поверхность в пределах Курило-Камчатской вулканической области; расход магмы ~ 6 · 10⁷ т в год [9].

Вулкан Ключевской входит в одноименную группу, состоящую из 12 вулканов, среди которых такие известные активные вулканы, как Безымянный и Толбачик. Эта группа вулканов расположена в пределах Центрально-Камчатской депрессии, на сочленении Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Ключевской вулкан образовался в голоценовое время, его возраст 6–7 тыс. лет [1]. Он представляет собой стратовулкан центрального типа, осложненный многочисленными шлаковыми конусами. Постройка вулкана сложена лавовыми потоками, прослоями пирокластики и льда.

Абсолютная высота вулкана до извержения 1994 г. (по состоянию на 3 августа 1993 г.) составляла 4822 м, относительная – 2900 м. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, ~750 м. Северо-западная кромка кратера имеет небольшое понижение; отсюда берет начало Крестовский желоб, прорезающий склон вулкана в северо-северо-западном направлении до абсолютной высоты 3200 м. Глубина желоба до извержения 1994 г. была ~50 м, ширина в прикратерной части достигает 700 м, вниз по склону он сужается и постепенно выклинивается.

Характерной чертой эруптивной деятельности Ключевского вулкана являются как вершинные, так и побочные извержения. Предыдущее извержение (в марте – сентябре 1993 г.) происходило из вершинного кратера и имело эффузивно-эксплозивный характер.

Извержения Ключевского вулкана, как правило, предваряются повышением сейсмической активности, что проявляется в увеличении числа вулканических землетрясений типов I–III (по классификации П.И. Токарева [7]).

Для наблюдения за сейсмической активностью вулканов Ключевской группы используется радиотелеметрическая сеть, состоящая из девяти сейсмических станций с центром сбора информации в г. Ключи. В сети использован комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2 [2]. Каждая станция сети совместно с аппаратурой центра сбора информации обеспечивает трехкомпонентную регистрацию скорости смещения грунта. Сейсмометрические каналы имеют столообразную амплитудно-частотную характеристику в диапазоне частот 0,8–20 Гц. Регистрация сейсмических данных проводится прецизионными магнитографами и регистрирами видимой записи. Для обработки вулканического дрожания и роев землетрясений используют методику, описанную в работе [11]. При этом в автоматическом режиме определяли среднеквадратичное значение скорости смещения грунта (X), которое является обобщающей энергетической характеристикой сейсмического процесса. Кроме этого, по лентам видимой записи проводили измерения средней амплитуды вертикальной компоненты вулканического дрожания (A_{cp}). Сведения о числе и энергии вулканических землетрясений получены по оперативным данным.

При исследовании сейсмической активности до и во время извержения 1994 г. использованы данные сейсмостанций Зеленая (ZLN) и Подкова (PDK), расположенных соответственно в 11 и 14 км от вершинного кратера (рис. 1).

В январе – феврале 1994 г. сейсмическая активность в районе Ключевского вулкана находилась на уровне обычных фоновых значений: на сейсмостанциях ZLN и PDK ежемесячно регистрировалось ~50 вулканических землетрясений типов I–III. С марта их число стало постепенно возрастать и в июле – августе (за 1–2 мес до начала извержения) превысило 500 землетрясений в месяц. Эпицентры землетрясений в основном группировались вокруг подводящего канала вулкана в радиусе до 10 км. Энергетический класс большинства землетрясений был $K_{S1,2} \leq 8$. Максимальное число слабых вулканических землетрясений ($K_S \leq 6$) зарегистрировано на глубинах 20–30 км. К дневной поверхности их число плавно уменьшалось, а ниже 30 км они фактически не регистрировались.

По данным визуальных наблюдений, каких-либо событий, предваряющих извержение, не отмечено. Вулкан, как и в предыдущие месяцы, находился в состоянии слабой fumarольной деятельности.

Описание извержения. Извержение началось 7 сентября из вершинного кратера и продолжалось по 2 октября 1994 г. В ходе этой активизации выделяются четыре этапа: первый – эксплозивный, второй – эффузивно-эксплозивный, третий – пароксимальный эффузивно-эксплозивный и четвертый – заключительный эффузивно-эксплозивный.

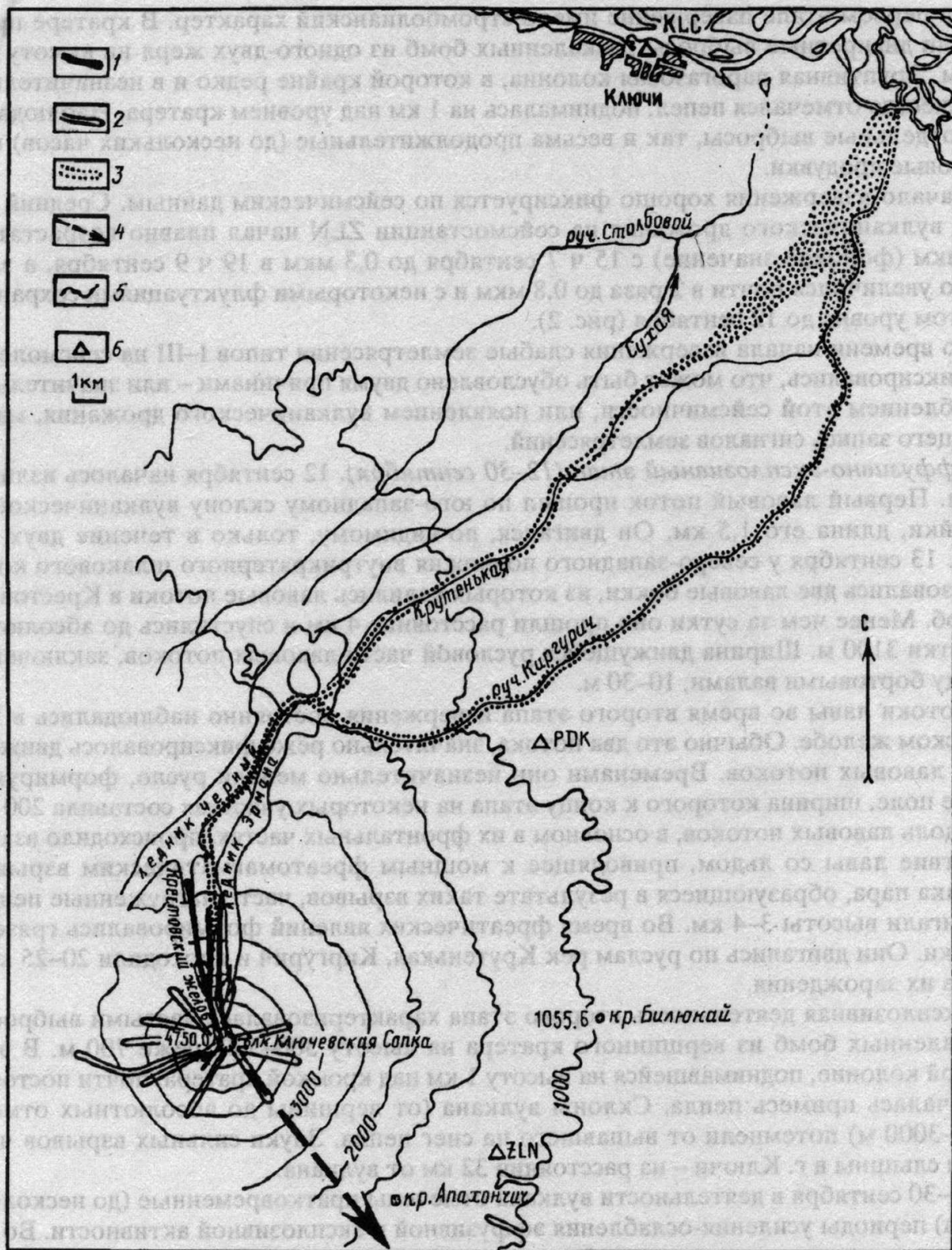


Рис. 1. Схема отложений продуктов извержения Ключевского вулкана во время пароксизмального этапа 1 октября 1994 г.: 1–3 – соответственно лавовые, пирокластические и грязевые потоки; 4 – ось пеплопада; 5 – горизонталы; 6 – сейсмические станции (ZLN – Зеленая, PDK – Подкова, KLC – Ключи)

Эксплозивный этап (7–11 сентября). Первые признаки начинающегося извержения отмечены в 17 ч 7 сентября (здесь и далее время местное), когда над кратером вулкана стали появляться слабые парогазовые выбросы. На следующий день, 8 сентября, с утра был туман, но со стороны Ключевского вулкана на сейсмостанции ZLN были слышны звуки взрывов, что свидетельствовало об активизации эруптивной деятельности. Вечером 8 сентября над кратером стали видны выбросы раскаленных бомб на высоту до 50 м.

На первом этапе извержение имело стромболианский характер. В кратере происходили дискретные выбросы раскаленных бомб из одного-двух жерл на высоту 100–200 м. Эруптивная парогазовая колонна, в которой крайне редко и в незначительном количестве отмечался пепел, поднималась на 1 км над уровнем кратера. Наблюдалось как отдельные выбросы, так и весьма продолжительные (до нескольких часов) газопепловые продувки.

Начало извержения хорошо фиксируется по сейсмическим данным. Средний уровень вулканического дрожания на сейсмостанции ZLN начал плавно возрастать от 0,1 мкм (фоновое значение) с 15 ч 7 сентября до 0,3 мкм в 19 ч 9 сентября, а затем резко увеличился почти в 2 раза до 0,8 мкм и с некоторыми флуктуациями сохранялся на этом уровне до 12 сентября (рис. 2).

Со времени начала извержения слабые землетрясения типов I–III на сейсмолентах не фиксировались, что может быть обусловлено двумя причинами – или значительным ослаблением этой сейсмичности, или появлением вулканического дрожания, маскирующего запись сигналов землетрясений.

Эффузивно-эксплозивный этап (12–30 сентября). 12 сентября началось излияние лавы. Первый лавовый поток прошел по юго-западному склону вулканической постройки, длина его 1,5 км. Он двигался, по-видимому, только в течение двух-трех дней. 13 сентября у северо-западного подножия внутрикратерного шлакового конуса образовались две лавовые бокки, из которых излились лавовые потоки в Крестовский желоб. Менее чем за сутки они прошли расстояние 4 км и спустились до абсолютной отметки 3100 м. Ширина движущейся русловой части лавовых потоков, заключенной между бортовыми валами, 10–30 м.

Потоки лавы во время второго этапа извержения постоянно наблюдались в Крестовском желобе. Обычно это два потока, значительно реже фиксировалось движение трех лавовых потоков. Временами они незначительно меняли русло, формируя лавовое поле, ширина которого к концу этапа на некоторых участках составила 200 м.

Вдоль лавовых потоков, в основном в их фронтальных частях, происходило взаимодействие лавы со льдом, приводящее к мощным фреатомагматическим взрывам¹. Облака пара, образующиеся в результате таких взрывов, часто нагруженные пеплом, достигали высоты 3–4 км. Во время фреатических явлений формировались грязевые потоки. Они двигались по руслам рек Крутенькая, Киргурич и проходили 20–25 км от места их зарождения.

Эксплозивная деятельность второго этапа характеризовалась частыми выбросами раскаленных бомб из вершинного кратера на высоту 300–500, реже 700 м. В эруптивной колонне, поднимавшейся на высоту 1 км над кромкой кратера, почти постоянно отмечалась примесь пепла. Склоны вулкана (от вершины до абсолютных отметок 2500–3000 м) потемнели от выпавшего на снег пепла. Звуки сильных взрывов часто были слышны в г. Ключи – на расстоянии 32 км от вулкана.

29–30 сентября в деятельности вулкана отмечены кратковременные (до нескольких часов) периоды усиления-ослабления эффузивной и эксплозивной активности. Во время усиления высота газопепловой эруптивной колонны достигала 3 км над кромкой кратера.

¹ В вулканологической литературе в настоящее время терминология, относящаяся к фреатическим явлениям, продолжает уточняться. В толковании понятий «фреатический взрыв» и «фреатомагматический взрыв» остается много неопределенностей, которые не позволяют однозначно классифицировать некоторые вулканические события. При рассмотрении этого вопроса следует учитывать, с одной стороны, то, что в ряде литературных источников указывается на отсутствие свежего (ювенильного) магматического материала в продуктах фреатических взрывов. С другой стороны, Макдональд [4, стр. 30] дает следующее определение: «Извержения, при которых извергаемый материал является частично или полностью магматическим, но эксплозия представляет собой результат действия вторичного пара (образовавшегося вне магматического очага), могут быть названы гидромагматическими или фреатомагматическими извержениями». В рассматриваемом случае на лавовых потоках Ключевского вулкана вторичные эксплозии происходят благодаря взаимодействию ювенильного магматического материала (раскаленной лавы) со льдом. Авторы считают, что к этим явлениям следует применять термин «фреатомагматический взрыв».

Углубление в центре (200 м) - признак развития вулканического взрыва. Всплески амплитуды в начале и в конце периода - признаки начала и конца периода.

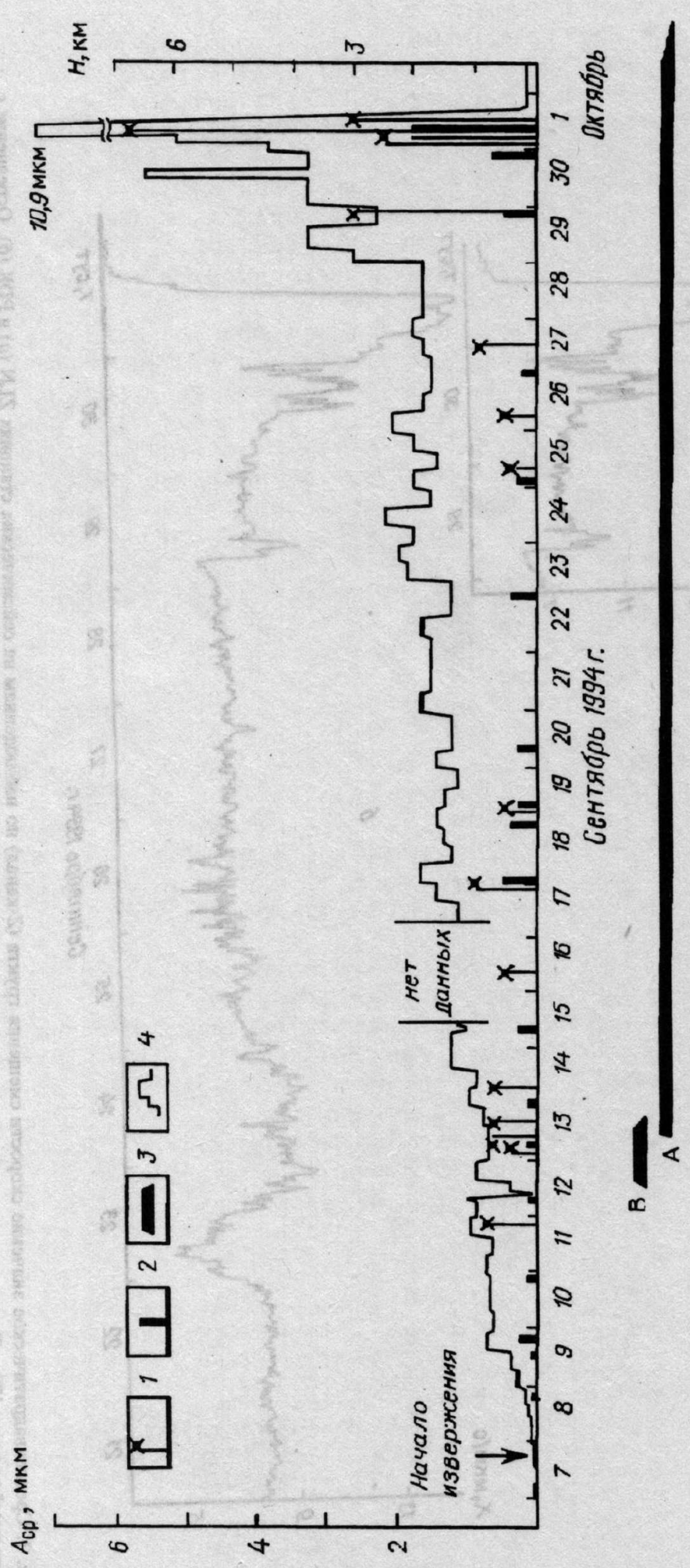


Рис. 2. Изменение динамических параметров терминального извержения Ключевского вулкана в сентябре - октябре 1994 г. По оси абсцисс - время местное, T ; по оси ординат: H - высота выбросов над кратером, A_{cp} - средняя амплитуда вулканического дрожания (Z-канал). 1 - Высота верхней кромки эруптивного облака над кратером; 2 - выбросы вулканических бомб; 3 - интервалы излияния лавы на склоны вулкана; А - по Крестовскому желобу, В - по юго-западному склону; 4 - средняя амплитуда вулканического дрожания по наблюдениям на сейсмостанции ZLN (вертикальная составляющая Z)

Среднеквадратическое значение скорости смещения грунта (Z-канал) по наблюдениям на сейсмических станциях ZLN (а) и PDK (б). Осреднение с постоянной времени 170 с; T – местное время, X – среднеквадратическое значение скорости смещения грунта

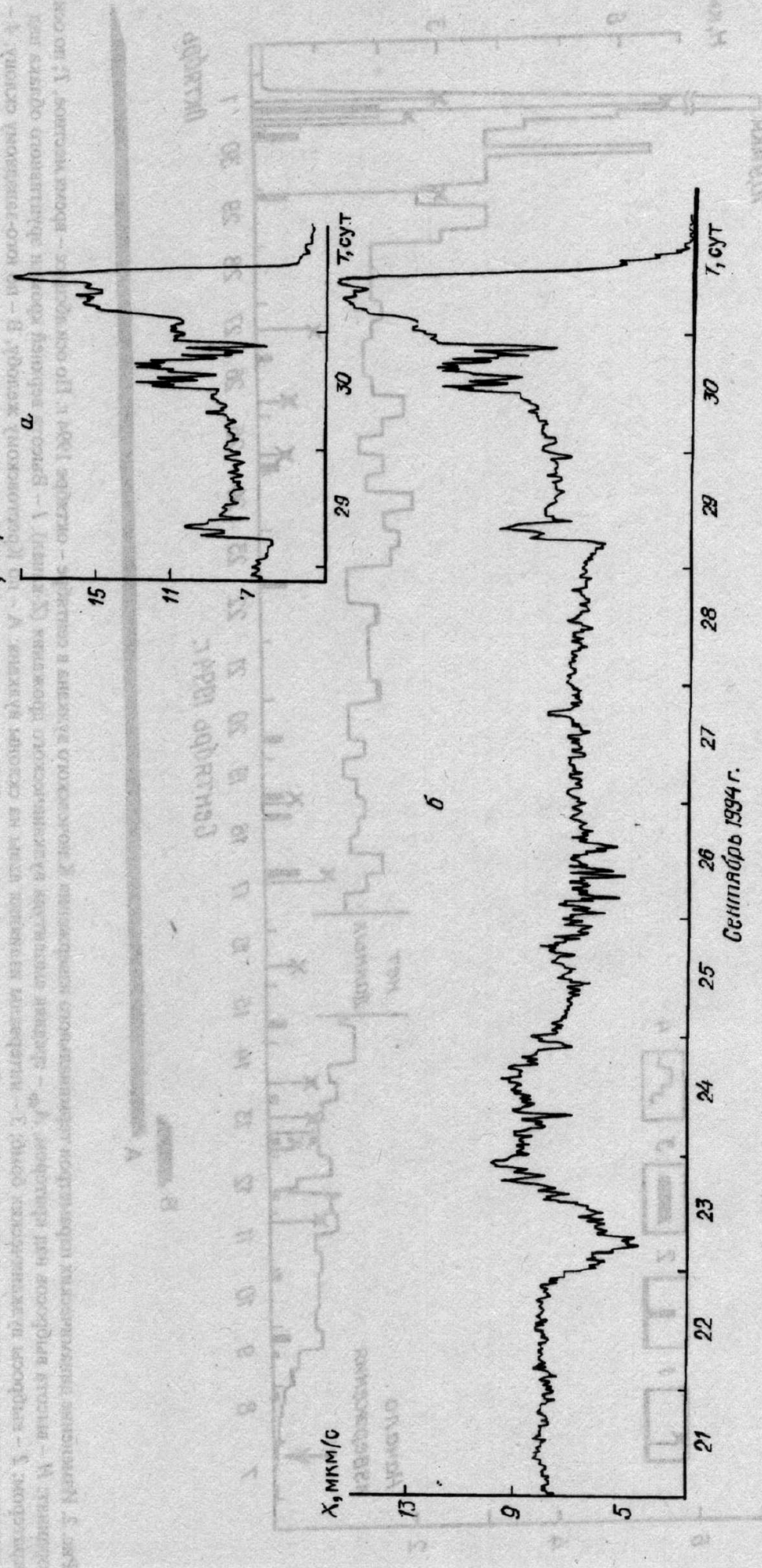


Рис. 3. Среднеквадратическое значение скорости смещения грунта (Z-канал) по наблюдениям на сейсмических станциях ZLN (а) и PDK (б). Осреднение с постоянной времени 170 с; T – местное время, X – среднеквадратическое значение скорости смещения грунта

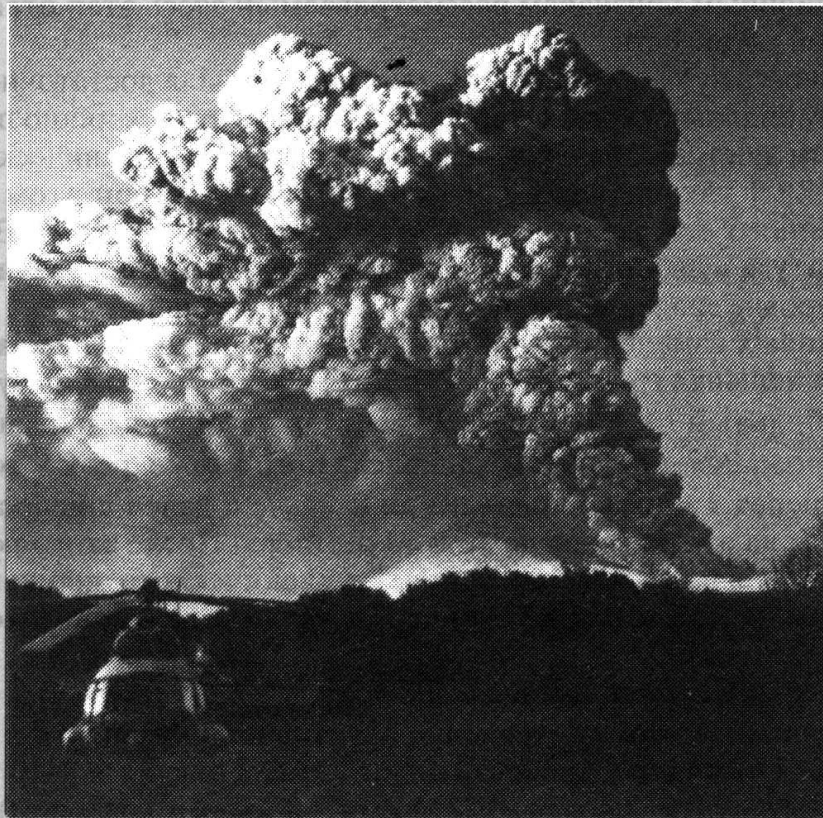


Рис. 4. Извержение Ключевского вулкана 1 октября 1994 г. в 9 ч 30 мин; вид с севера из г. Ключи. Высота эруптивной колонны 12,5 км над уровнем моря. Фреатические взрывы в Крестовском желобе (нижняя правая часть рисунка). Фото В.А. Подтабачного



Рис. 5. Эруптивная туча пароксизмального извержения Ключевского вулкана 1 октября 1994 г. в 12 ч 15 мин; вид с юга. На первом плане вулкан Безымянный, далее за ним вулкан Камень, за которым в облаках извержения просматривается конус вулкана Ключевской. Фото В.А. Подтабачного

По классификационным признакам рассматриваемый здесь этап отвечает умеренной стромболианской активности.

В целом деятельность вулкана в описываемый период была достаточно ровной.

Относительно стабильный характер эруптивной активности хорошо прослеживается и по сейсмическим данным. Значения средней амплитуды вулканического дрожания на сейсмостанции ZLN находились в пределах 0,7–1,6 мкм, при этом наблюдалась тенденция постепенного его увеличения в ходе извержения (рис. 2). В конце этапа (29 сентября) амплитуда вулканического дрожания скачкообразно увеличилась, и уже на более высоком уровне значений наблюдались его флуктуации.

Структуру указанных изменений можно видеть на графике среднеквадратического значения скорости смещения грунта X (рис. 3). До 29 сентября уровень вулканического дрожания был стабильный ($X \sim 7$ мкм/с). 29 сентября в течение первых 5 ч уровень вулканического дрожания плавно уменьшался, после чего резко возрос до $X = 9,5$ мкм/с, затем через 4 ч он уменьшился до 8 мкм/с и далее с небольшими флуктуациями сохранялся на этом уровне до 13 ч 30 сентября. После этого почти до конца 30 сентября наблюдались колебания уровня вулканического дрожания – от 9 до 12 мкм/с с периодом ~ 1 ч, а затем в течение 6 ч уровень вулканического дрожания стабилизировался (~ 13 мкм/с).

Пароксизмальный эффузивно-эксплозивный этап – 1 октября. В 5 ч утра 1 октября неожиданно произошло резкое усиление эруптивной активности в деятельности Ключевского вулкана – начался пароксизмальный этап. Он длился 9–10 ч. Из вершинного кратера на абсолютную высоту ~ 12 –13 км (7–8 км над кратером) поднималась мощная, нагруженная пеплом эруптивная колонна (рис. 4 и 5). Фонтаны раскаленных бомб взлетали на 2–2,5 км над кратером, максимальный размер обломков достигал 1,5–2 м в диаметре.

На юго-восток от поднимающегося столба извержения простирался густой темный шлейф, нагруженный вулканическими продуктами и сносимый сильным северо-западным ветром. На поверхности этой огромной устрашающей завесы формировался рисунок типа «цветной капусты». Стена пеплопада протягивалась в сторону океана на десятки километров и уходила за линию горизонта. Верхняя граница шлейфа была достаточно ровной на всем своем протяжении. Начальная ширина пеплового шлейфа 3–5 км; в последующем он постепенно расширялся, длина его в этот день превысила 2000 км (рис. 6). Из шлейфа происходило выпадение тефры. На оси пеплопада, в 15 км от кратера, максимальный размер отдельных лапилли достигал 50 мм.

По северо-северо-западному склону, главным образом по Крестовскому желобу, изливались лавовые потоки, а по северо-западным, западным, южным и восточным склонам спустились многочисленные глыбово-пепловые пирокластические потоки (рис. 1). Длина лавовых потоков до 5 км. Глыбово-пепловые потоки имели длину 2–6 км; ширина, как правило, составляла 50–80 км.

Лавовые потоки на всем своем протяжении и во фронтальных частях интенсивно взаимодействовали со льдом; происходили фреатомагматические взрывы, в результате которых образовывались огромные черные густые облака типа «цветной капусты», поднимающиеся на высоту до 7 км от места их зарождения, а также формировались грязевые потоки (лахары).

Мощные грязевые потоки прошли по уже проработанным руслам путь 25–30 км и достигли р. Камчатки. Размер обломков пород, переносимых основным руслом лахара, у р. Камчатки достигал 1,5 м в диаметре. Грязевые потоки размывали автомобильную грунтовую дорогу, идущую вдоль правого берега р. Камчатки, восточнее г. Ключи на участке от 6 до 12 км.

Около 14–15 ч 1 октября сила извержения стала заметно ослабевать.

Пароксизмальный этап хорошо выражен на кривых изменения уровня вулканического дрожания (рис. 2 и 3). Основными особенностями этого этапа являются резкое (в течение 1–2 ч) увеличение уровня вулканического дрожания и столь же резкое его уменьшение. По наблюдениям на сейсмостанции PDK среднеквадратическое значение

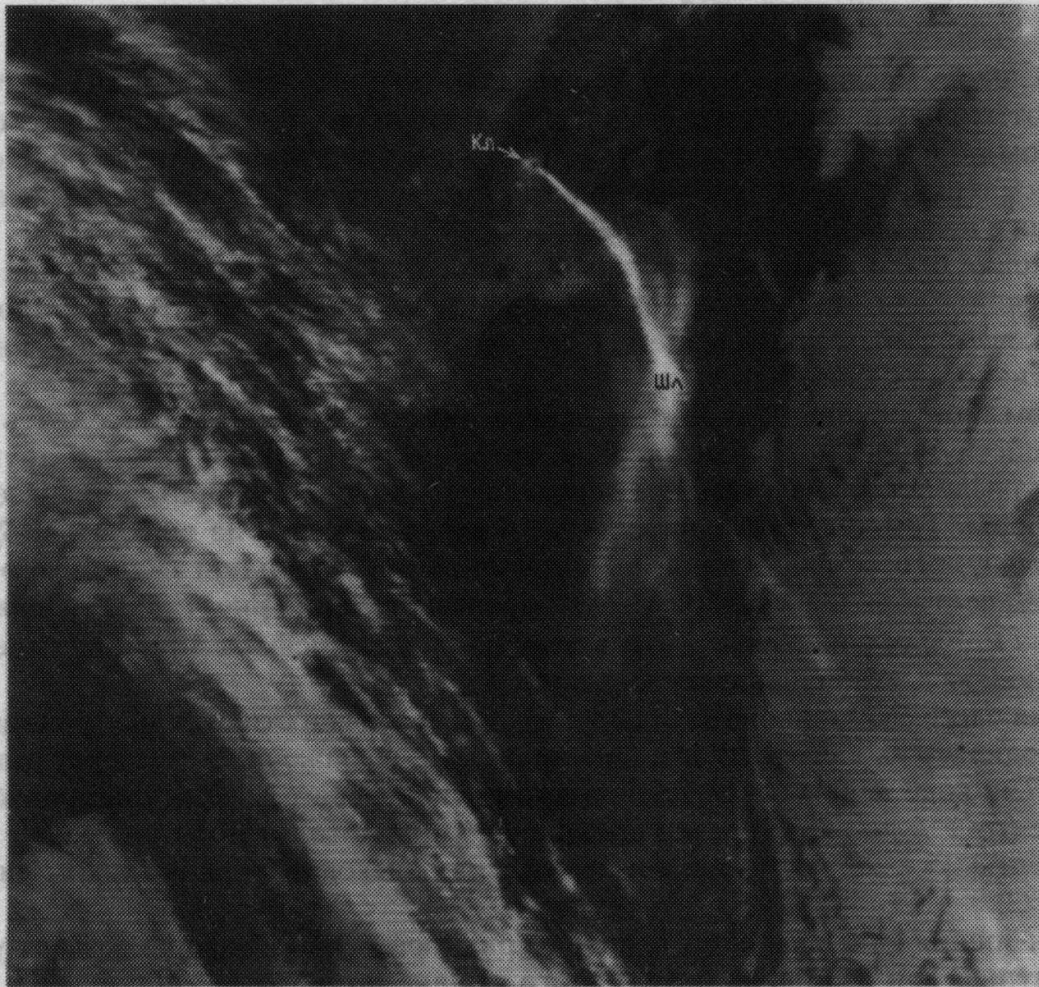


Рис. 6. Эруптивный шлейф пароксизмального извержения Ключевского вулкана 1 октября в 20 ч 15 мин, полученный с американского спутника NOAA-1. Левая часть снимка закрыта облаками; Кл – Ключевской вулкан, из кратера которого берет начало протяженный эруптивный шлейф Шл (белое)

скорости смещения грунта (вулканическое дрожание) в начале пароксизма (в 5 ч утра 1 октября) резко возросло до 15–16 мкм/с и сохранялось на этом уровне в течение 8–10 ч (рис. 3). Сходная картина была зарегистрирована на сеймостанции ZLN (рис. 2) – вертикальная составляющая средней амплитуды вулканического дрожания к 5–6 ч утра достигла 10,9 мкм и на этом уровне сохранялась несколько часов. В 12 ч 1 октября уровень вулканического дрожания стал резко уменьшаться и в 18 ч снизился фактически до фонового (рис. 2).

Во время пароксизмального этапа произошло резкое увеличение мощности извержения – на два-три порядка по сравнению с предыдущими этапами (по визуальным оценкам). Такой тип извержения обычно рассматривается как плинианский, но для него характерны значительные объемы пепла. В данном случае количество выпавшего пепла не столь велико, поэтому третий, пароксизмальный этап извержения Ключевского вулкана классифицируется как субплинианский.

Заключительный эффузивно-эксплозивный этап (2–3 октября). 2 октября произошло резкое ослабление взрывной активности; в вершинном кратере продолжались пепловые выбросы, но уже на меньшую высоту – до 300 м. Эффузивная деятельность также пошла на убыль; длина лавового потока, продолжавшего движение по Крестовскому желобу, не превышала 1 км. 3 октября наблюдения были невозможны: вулкан был закрыт облаками. По характеру вулканического дрожания 3 октября можно считать временем окончания извержения. 4 октября и в последующие дни над кратером отмечалась только умеренная фумарольная деятельность; высота подъема фумарольных струй не превышала 50 м. Число землетрясений типов I–III соответствовало фоновому.

Обсуждение результатов

За пять-шесть месяцев до начала терминального извержения вулкана на глубинах 20–30 км отмечалось усиление сейсмической активности, что, по-видимому, обусловлено ростом поля напряжений вокруг магматического канала. Такого рода события могут рассматриваться как среднесрочный предвестник готовящегося извержения Ключевского вулкана [3].

Извержение было кратковременным – длилось < 1 мес. Оно началось как взрывное (5 дней), затем стало взрывно-эффузивным (19 дней) и завершилось мощным пароксизмальным проявлением (1 октября) с постепенным затуханием вулканической активности (2 дня).

В первом приближении такое извержение вулкана можно рассматривать как постоянно действующий источник энергии, тогда подъем верхней кромки эруптивной колонны и распространение шлейфа определяются мощностью источника и состоянием атмосферы. Температура, направление и скорость ветра на высотах до 25 км по данным высотного зондирования, выполненного на зональной гидрометеостанции г. Ключи 30 сентября и 1 октября 1994 г., представлены на рис. 7, а и б. Сравнительный анализ кривых показывает, что в этот период атмосфера в районе извержения характеризовалась стабильным состоянием.

Во время пароксизмального этапа эруптивной деятельности вулкана граница тропопаузы находилась на высоте 10 км. Она прекрасно выражена на температурных кривых (рис. 7) в виде перегиба. Здесь происходит инверсия температуры: равномерное ее падение (от +10 до –50°C) резко прекращается на абсолютной отметке 10 км и далее до высоты 25 км флуктуации температуры происходят в крайне узком интервале (–50...–55°C).

С точки зрения физики, такой температурный разрез атмосферы создает условия, благоприятные для всплытия эруптивного облака до высоты тропопаузы, выше – условия для подъема уже неблагоприятные: происходит торможение и движущиеся массы начинают распространяться в горизонтальном направлении. Как указано ранее, газопепловая колонна извержения поднималась на высоту 12–13 км. Некоторое превышение верхней кромки эруптивного облака над высотой тропопаузы объясняется его инерцией и турбулентной конвекцией.

Дальнейшее распространение поднимающихся масс (формирование шлейфа) определялось скоростью и направлением ветра. Его максимальная скорость (35–40 м/с) наблюдалась на высотах 10–15 км, а азимут направления составлял 305°. Следует отметить, что на абсолютных отметках от 5 до 10 км азимут направления движения воздушных масс составлял 325° при скорости ~25 м/с, что приводило к расслоению поднимающегося эруптивного облака; это хорошо прослеживается на космических снимках.

Из эруптивной тучи пароксизмальной стадии извержения выпало большое количество тефры, которая представлена сильно пористым ювенильным шлаком. Исследования показали, что отложения тефры распространяются полосой в юго-восточном направлении, ширина которой достигает 25 км на расстоянии 20 км от кратера вулкана. Максимальная мощность отложений зафиксирована по оси пеплопада в районе знаменитого камня «Амбон» в 15 км от вершины вулкана (азимут 135°), где толщина слоя достигает 50 мм. (Основной объем измерений мощности отложений тефры и размера частиц выполнен через год после извержения, в сентябре 1995 г.; исследования в районе сеймостанции Зеленая и на конусе Билюкай проведены 4 октября 1994 г.) Отложения тефры имеют здесь обратную градиционную слоистость. Размер частиц увеличивается от 1–3 мм в нижней части слоя до 10–30 мм – в кровле. Максимальный размер отдельных редких плоских лапилли достигает 50 мм, причем для них характерны обломанные края: это указывает на то, что при падении они разбились и, следовательно, изначально имели более крупные размеры. Вес тефры, выпавшей в районе камня «Амбон», составляет 32,800 кг/м².

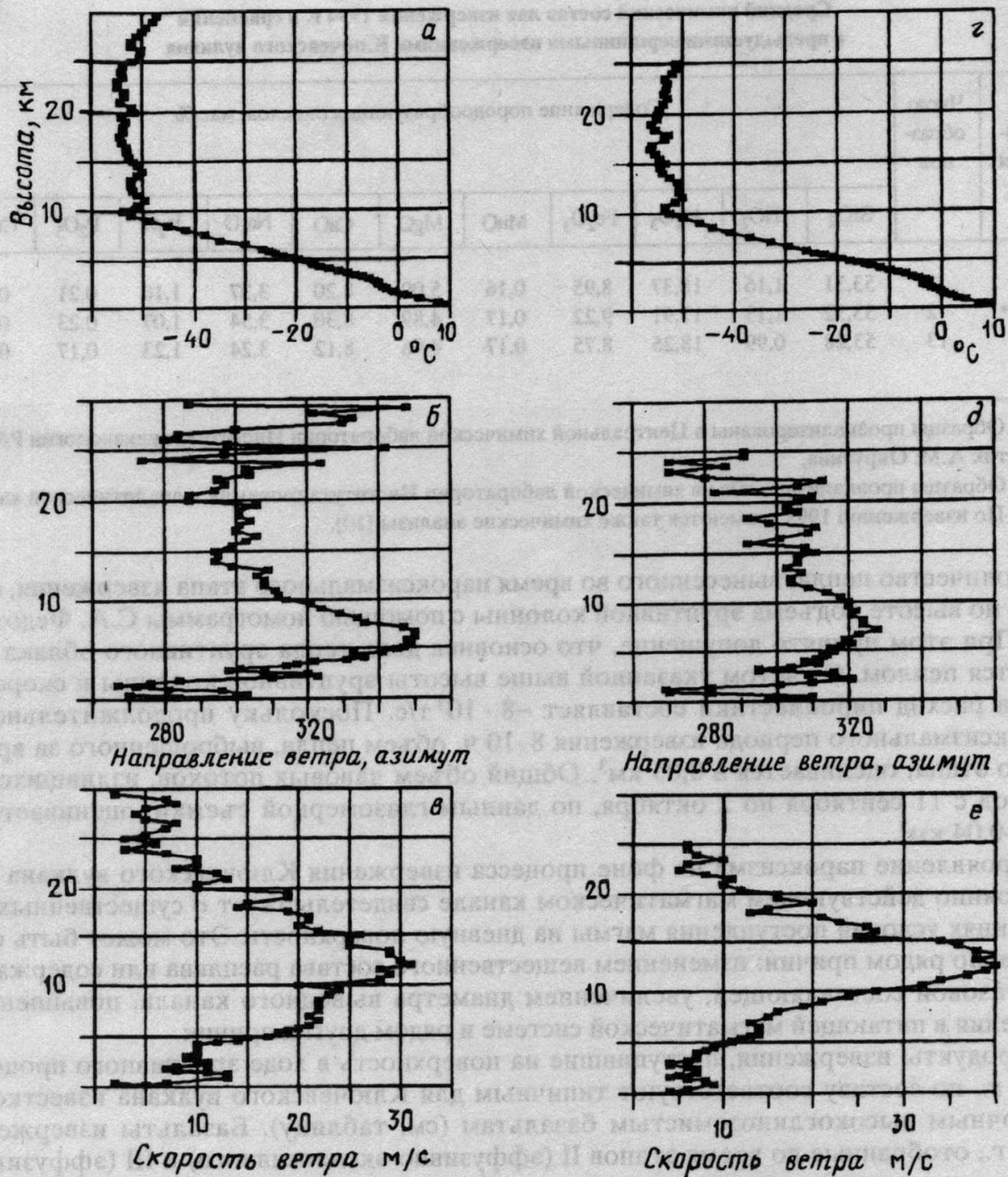


Рис. 7. Изменения температуры (а, з), направления (б, д) и скорости ветра (в, е) на высотах до 25 км, полученные по данным высотного зондирования на гидрометеостанции г. Ключи в период с 23 ч 30 мин 30.09.1994 г. (а-в) по 11 ч 30 мин 01.10.1994 г. (з-е)

С удалением от оси пеплопада мощность слоя и максимальный размер частиц тефры постепенно уменьшаются. В северном направлении, в районе шлакового конуса Карпинского, мощность составляла 40 мм, а размер частиц – 24 мм соответственно; на сейсмостанции Зеленая (шлаковый конус Горшок) толщина свежесвыпавшего пепла не превышала 3 мм, а максимальный размер частиц – 1 мм (вес 3,333 кг/м²). На кромке кратера конуса Билюкай отмечены только следы тонкого пепла. К югу от оси пеплопада, в районе восточного подножия вулкана Безымянный, толщина тефры и размер обломков уменьшились до 30 и 13 мм соответственно, а в верховьях р. Сухая Зими́на они уже составляют соответственно 25 и 7 мм. Южную границу распространения тефры проследить не удалось; вероятно, она проходит по северным склонам вулкана Зими́на.

Средний химический состав лав извержения 1994 г. в сравнении с предыдущими вершинными извержениями Ключевского вулкана

Год извержения	Число образцов	Содержание породообразующих окислов, мас. %										
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
1994*	2	53,31	1,16	18,37	8,95	0,16	5,09	8,20	3,37	1,10	0,21	0,00
1993**	2	53,32	1,13	17,91	9,22	0,17	4,89	8,30	3,54	1,07	0,23	0,03
1984–1986*	13	53,28	0,99	18,25	8,75	0,17	4,96	8,12	3,24	1,23	0,17	0,00

* Образцы проанализированы в Центральной химической лаборатории Института вулканологии РАН; аналитик А.М. Округина.

** Образцы проанализированы в химической лаборатории Института геохимии и аналитической химии РАН. По извержению 1993 г. имеются также химические анализы [10].

Количество пепла, вынесенного во время пароксизмального этапа извержения, оценено по высоте подъема эруптивной колонны с помощью номограммы С.А. Федотова [8]. При этом принято допущение, что основная доля тепла эруптивного облака выносится пеплом. С учетом указанной выше высоты эруптивной колонны и скорости ветра расход пироклаستيку составляет $\sim 8 \cdot 10^3$ т/с. Поскольку продолжительность пароксизмального периода извержения 8–10 ч, объем пепла, выброшенного за время этого этапа, оценивается в $0,05 \text{ км}^3$. Общий объем лавовых потоков, излившихся за период с 11 сентября по 2 октября, по данным глазомерной съемки, оценивается в $0,02\text{--}0,04 \text{ км}^3$.

Проявление пароксизма на фоне процесса извержения Ключевского вулкана при постоянно действующем магматическом канале свидетельствует о существенных изменениях условий поступления магмы на дневную поверхность. Это может быть обусловлено рядом причин: изменением вещественного состава расплава или содержания его газовой составляющей, увеличением диаметра выводного канала, повышением давления в питающей магматической системе и рядом других причин.

Продукты извержения, поступившие на поверхность в ходе эруптивного процесса 1994 г., по составу соответствуют типичным для Ключевского вулкана известково-щелочным высокоглиноземистым базальтам (см. таблицу). Базальты извержения 1994 г., отобранные во время этапов II (эффузивно-эксплозивного) и III (эффузивно-эксплозивного пароксизмального), близки по составу и аналогичны таковым предыдущих терминальных извержений – 1993 и 1984–1986 гг. [5]. Макроскопически это черные и темно-серые слабораскисленные породы. Основным породообразующим минералом является плагиоклаз, размер зерен которого 1,0–1,5, реже 2 мм. Отмечены единичные мелкие вкрапленники оливина и пироксена.

Терминальное извержение 1994 г. относится к числу наиболее мощных исторических извержений Ключевского вулкана. Его можно сравнить с терминальным извержением 1944–1945 гг., хорошо изученным Б.И. Пийпом [6], когда также проявилась мощная пароксизмальная стадия, и по характеру проявления активности на этой стадии оба извержения близки. В 1994 г. пароксизмальный этап продолжался 8–10 ч, в 1944–1945 гг. – 15 ч. Высота эруптивной колонны – соответственно 13 и 15 км. Объем пепла, вынесенного во время пароксизмальной стадии, также близок для обоих извержений².

² Оценка объема пепла, выброшенного во время пароксизмальной стадии извержения 1944–1945 гг., по Б.И. Пийпу [6], значительно выше ($0,6 \text{ км}^3$ против $0,05 \text{ км}^3$ в 1994 г.). Оценка Б.И. Пийпа основывалась на сообщении из пос. Козыревск, что там выпало 32 мм пепла. Это явное преувеличение, на что указывают следующие данные. Специально проведенное А.Б. Белоусовым и А.Ю. Озеровым изучение почвенно-пирокластического чехла вдоль дороги пос. Козыревск – г. Ключи показало, что в настоящее время пепел извер-

Состав продуктов извержений 1994 и 1945 гг. соответствует известково-щелочным глиноземистым базальтам.

Наблюдаются и некоторые различия. В 1994 г. после пароксизмальной стадии извержение пошло на убыль и в течение 1,5 сут закончилось, а в 1945 г. оно продолжалось еще ~1 мес. Лавовые потоки в 1994 г. изливались до и после пароксизмальной стадии, а в 1945 г. они изливались лишь после пароксизма. Каких-либо существенных изменений в морфологии вулканической постройки в результате извержения 1994 г. не произошло, в то время как после извержения 1944–1945 гг. на северо-северо-западном склоне вулкана образовался глубокий Крестовский желоб, существующий и в настоящее время.

Извержение 1994 г. не причинило серьезного ущерба населению г. Ключи. Лишь лахары размыли автомобильную дорогу восточнее г. Ключи на протяжении 6 км. Основная часть пепла была унесена сильным западным ветром в Тихий океан.

Следует еще раз подчеркнуть, что пароксизмальная стадия извержения 1994 г. является одним из наиболее ярких и мощных проявлений эруптивной активности Ключевского вулкана.

Исследования выполнены при финансовой поддержке администрации Камчатской области (проект № 16/95).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брайцева О.К., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. и др. Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4–5. С. 5–32.
2. Гаврилов В.А., Воропаев В.Ф., Головищкова И.А. и др. Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2 // Сейсмические приборы. 1987. № 19. С. 5–17.
3. Горельчик В.И. Сейсмичность магматической системы Ключевского вулкана на Камчатке // Вулканизм, структуры и рудообразование: Тез. докл. VII Всесоюз. вулканол. совещ. Петропавловск-Камчатский, 1992. С. 48–49.
4. Макдональд Г.А. Вулканы. М.: Мир, 1975. 431 с.
5. Озеров А.Ю., Хубуная С.А. Химизм оливинов и пироксенов как показатель генетической связи глиноземистых и магнезиальных базальтов Ключевской группы // Постэруптивное минералообразование на активных вулканах Камчатки. Ч. 2. Владивосток, 1992. С. 37–61.
6. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. 1956. № 11. 310 с.
7. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
8. Федотов С.А. Оценки выноса тепла и пироклаستيку вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28.
9. Федотов С.А., Хренов А.П., Жаринов Н.А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932–1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3–16.
10. Федотов С.А., Хубуная С.А., Жаринов Н.А. и др. Извержение вулканов Шивелуч и Ключевской в 1993 г. и их влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 117–131.

жения 1945 г. в виде отдельного прослоя не выделяется. В то же время из практики тефрохронологических исследований на Камчатке (устное сообщение О.А. Брайцевой) известно, что в случае, если толщина выпавшего пепла превышает 5 мм, он образует в почве самостоятельный прослой. Такой прослой тем более должен был бы фиксироваться, если толщина пепла первоначально составляла 32 мм. Следовательно, мощность пепла, выпавшего в результате извержения 1945 г., была меньше 5 мм и объем выброшенного пепла на порядок ниже указанного Б.И. Пийпом, т.е. ~0,06 км³, что сопоставимо с извержением 1994 г.

11. Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Жданова Е.Ю., Кирьянов В.Ю. Начало нового экструзивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4-5. С. 33-47.

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
01.08.1995

Институт вулканической геологии
и геохимии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Камчатский Центр мониторинга сейсмической
и вулканической активности,
Петропавловск-Камчатский

Опытно-методическая сейсмологическая партия
Института вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браунинг О.Е., Мейерс М.В., Лонгман В.В. и др. Восток действующих вулканов Камчатко-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4-5. С. 2-11.
2. Гаврилов В.А., Воробьев В.В., Толочников Н.А. и др. Коэффициент радиотермической аппаратуры ТЕН-1 // Сейсмическая аппаратура. 1987. № 19. С. 2-17.
3. Горелов В.М. Сейсмическая активность системы Камчатского вулкана на Камчатке // Вулканная структура и раздробленность: Тез. докл. VII Всесоюз. вулканич. совещ. Петропавловск-Камчатский. 1992. С. 48-49.
4. Макдонльд Т.А. Вулканы. М.: Мир. 1975. 431 с.
5. Озаров А.Ю., Худина С.А. Химия газов в извержениях вулканов Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 37-41.
6. Филд Б.М. Камчатская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и прошлым // Тр. Даб. вулканологии. 1956. № 11. 210 с.
7. Токмачев П.В. Извержения в сейсмический режим вулкана Камчатского группы. М.: Наука. 1966. 118 с.
8. Фоботов С.А. Оценка влияния вулканических извержений на фумаролампы по высоте их струй и объемам // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 2-28.
9. Фоботов С.А., Жарин А.И., Жарин Н.А. Камчатский вулкан: его деятельность в 1931-1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3-16.
10. Фоботов С.А., Жарин А.И., Жарин Н.А. и др. Извержение вулкана Шивелуч и Камчатской в 1993 г. и ее влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 117-131.

Конец 1945 г. в виде отдельного потока не выделяется. В то же время на практике теоретически как исследовали на Камчатке (восток Камчатского региона) известно, что в случае, если температура минимального предела составляет 2 мм, он образует в конце самостоятельный поток. Такой поток тем более должен был бы фактически, если температура не была первоначально составляла 2 мм. Следовательно, минимальная температура извержения 1945 г. была меньше 2 мм в объеме извержения. Следовательно, температура извержения была меньше 2 мм, что согласуется с извержением 1994 г.