

УДК 580.348.436+551.596

© 1996 г. ФИРСТОВ П.П.

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ
ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ 12 НОЯБРЯ 1964 г. НА ОСНОВАНИИ
ДАННЫХ О ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ
И ВУЛКАНИЧЕСКОМ ДРОЖАНИИ**

По данным микробарографических каналов, расположенных в ближней зоне (45 и 113 км), детально проанализированы особенности волновых возмущений в атмосфере, сопровождавших извержение вулкана Шивелуч 12.11.1964 г. Показано, что волновые возмущения в атмосфере, возникшие во время этого сильного эксплозивного извержения, в основном обусловлены формированием конвективной колонны и несут информацию о динамике извержения и количестве выброшенного в атмосферу пепла. На основании соотношения интенсивности сейсмического и акустического сигналов показано, что извержение вулкана Шивелуч началось с грандиозного обвала ($1,5 \text{ км}^3$), в результате которого сформировалось пылевоздушное облако, явившееся источником первого акустического сигнала. Спустя 12 мин после обвала возникло вулканическое дрожание и начал работать второй источник акустического сигнала, что связывается с началом плинианской деятельности и извержением пирокластических потоков. Переход от одной стадии извержения к другой сопровождался резким усилением интенсивности вулканического дрожания и составляющей акустического сигнала с частотой $> 0,05 \text{ Гц}$, а также генерацией длинноволнового (более 10 мин) возмущения с избыточным давлением 50 Па на расстоянии 113 км. Количество пепла, выброшенного в атмосферу, определенное по энергии длинноволновых возмущений, оценено в $0,35-0,45 \text{ км}^3$, что удовлетворительно совпадает с геологическими данными ($0,3 \text{ км}^3$).

RECONSTRUCTION OF THE TIME HISTORY FOR THE CATASTROPHIC SHIVELUCH ERUPTION OF NOVEMBER 12, 1964 BASED ON DATA RELATING TO WAVE DISTURBANCES IN THE ATMOSPHERE AND VOLCANIC TREMOR, by Fir stov P.P. Records of microbarographic instruments in the near zone (45 and 113 km) were used for a detailed analysis of wave disturbances in the atmosphere accompanying the November 12, 1964 Shiveluch eruption. It is shown that the wave disturbances due to this major explosive eruption were largely caused by the formation of a convective column; they provide information on the time history of the eruption and the amount of erupted ash. The relation between seismic and acoustic intensities shows that the eruption started with a giant landslide (1.5 км^3) giving rise to an ash cloud that produced the first acoustic signal. Volcanic tremor began 12 min after the slide and a second acoustic source began operating. This was related to starting Plinian activity and eruption of pyroclastic flows. The transition from one phase of the eruption to the next was accompanied by increased volcanic tremor and acoustic signal component of frequency $> 0.05 \text{ Hz}$, as well as by generation of a long period (greater than 10 min) disturbance having an excess pressure of 50 Pa at 113 km distance. The amount of ash ejected into the atmosphere as inferred from long period disturbance energy is estimated to be $0.35-0.45 \text{ км}^3$, which is in satisfactory agreement with geological evidence (0.3 км^3).

(Received July 31, 1995)

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

Вулкан Шивелуч - самый северный среди действующих вулканов Камчатки. Характерная особенность вулкана - катастрофические извержения с выносом ювениль-

ной пирокластики в виде тефры и пирокластических потоков объемом 1 км^3 и более. За последние 10 тыс. лет подобные извержения происходили в среднем 1 раз в 100 лет [9].

Последнее катастрофическое извержение на вулкане Шивелуч, по классификации Г.С. Горшкова [3] типа "направленный взрыв", произошло 11 ноября 1964 г. и детально описано в ряде работ [2, 4]. Г.С. Горшков [3] предполагал, что во время извержений такого типа происходит направленный выброс большого объема материала старой постройки по баллистической траектории. Интерес к подобным извержениям стимулировало катастрофическое извержение вулкана Сент-Хеленс 18 мая 1980 г. (США, штат Вашингтон). Все стадии этого извержения были задокументированы с помощью фото- и киноматериалов, что дало возможность детально изучить процесс извержения вулкана Сент-Хеленс и предложить несколько иную схему развития подобных извержений.

Согласно существующим на сегодняшний день представлениям, извержение типа "направленный взрыв" развивается по следующей обобщенной схеме: внедрение магмы в постройку вулкана - потеря устойчивости постройки — обвал - направленный взрыв - плинианская деятельность с излиянием пирокластических потоков. В зависимости от ряда причин далеко не все стадии этой схемы имеют место во время извержения того или иного вулкана, а соотношение между ними зависит от многих факторов. Анализ последовательности и соотношения между отдельными стадиями - основная задача при изучении подобных извержений.

Несмотря на то что после катастрофического извержения вулкана Шивелуч прошло более четверти века, в связи с большим масштабом, разнообразием форм активности, а также с новыми представлениями о механизме подобных извержений необходимо переосмыслить данные об этом извержении. Геологические данные в свете новых представлений изложены в работе [17]. В настоящей работе с новых позиций рассматриваются сведения о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании, сопровождавших это извержение.

Краткое описание извержения, его геологического эффекта и пунктов регистрации сейсмических и акустических сигналов. Извержение вулкана Шивелуч началось рано утром 12 ноября 1964 г. около 7 ч местного времени (LT = GMT + 12), когда было еще темно, поэтому детали этого гигантского события не зафиксированы очевидцами, которые дают только самые общие представления о характере извержения.

В начале седьмого эруптивная туча поднялась на высоту 1,5-2,0 км над кратером. В 7 ч 20 мин LT она достигла высоты 7-8 км, а еще через 20 мин - высоты 10-15 км. Туча имела грибовидную форму; яркие и широкие молнии расходились к краям. Продолжительный гул и мощные раскаты грома были слышны во всех окрестных поселках на удалении до 100 км. Эруптивное облако, сносимое северо-западным ветром (рис. 1, а), двигаясь в сторону Тихоокеанского побережья, к 8 ч 30 мин достигло пос. Усть-Камчатск, где пепел лег слоем толщиной 3 см, а количество пепла, выпавшего на 1 м^2 , составило 28 кг [11].

В результате извержения произошло разрушение вершины вулкана с образованием кратера сложной формы размером $1,5 \times 3,0$ км. Северная половина кратера, состоящая из двух сегментов, имеет овальную форму с сечением $1,5 \times 1,0$ км, а южная - форму трапеции и засыпана рыхлым агломератовым материалом. В работе [4] рассмотрена модель "направленного взрыва", поэтому необычная конфигурация кратера и сложная форма записи флуктуации атмосферного давления метеорологическими барографами объяснялись двумя пароксизмальными взрывами, следовавшими один за другим. Материал отложений "направленного взрыва" полностью резургентный, его объем оценен в $1,5 \text{ км}^3$. Вслед за процессом, разрушившим постройку вулкана, началась плинианская деятельность, в результате которой было выброшено $0,3 \text{ км}^3$ пепла. Поверхность "взрывных" отложений покрыта обширным плащом (площадь $\sim 50 \text{ км}^2$) пирокластических потоков, формирование которых произошло на последнем этапе извержения. Объем пирокластических потоков оценивается величиной $0,3-0,5 \text{ км}^2$ [4].

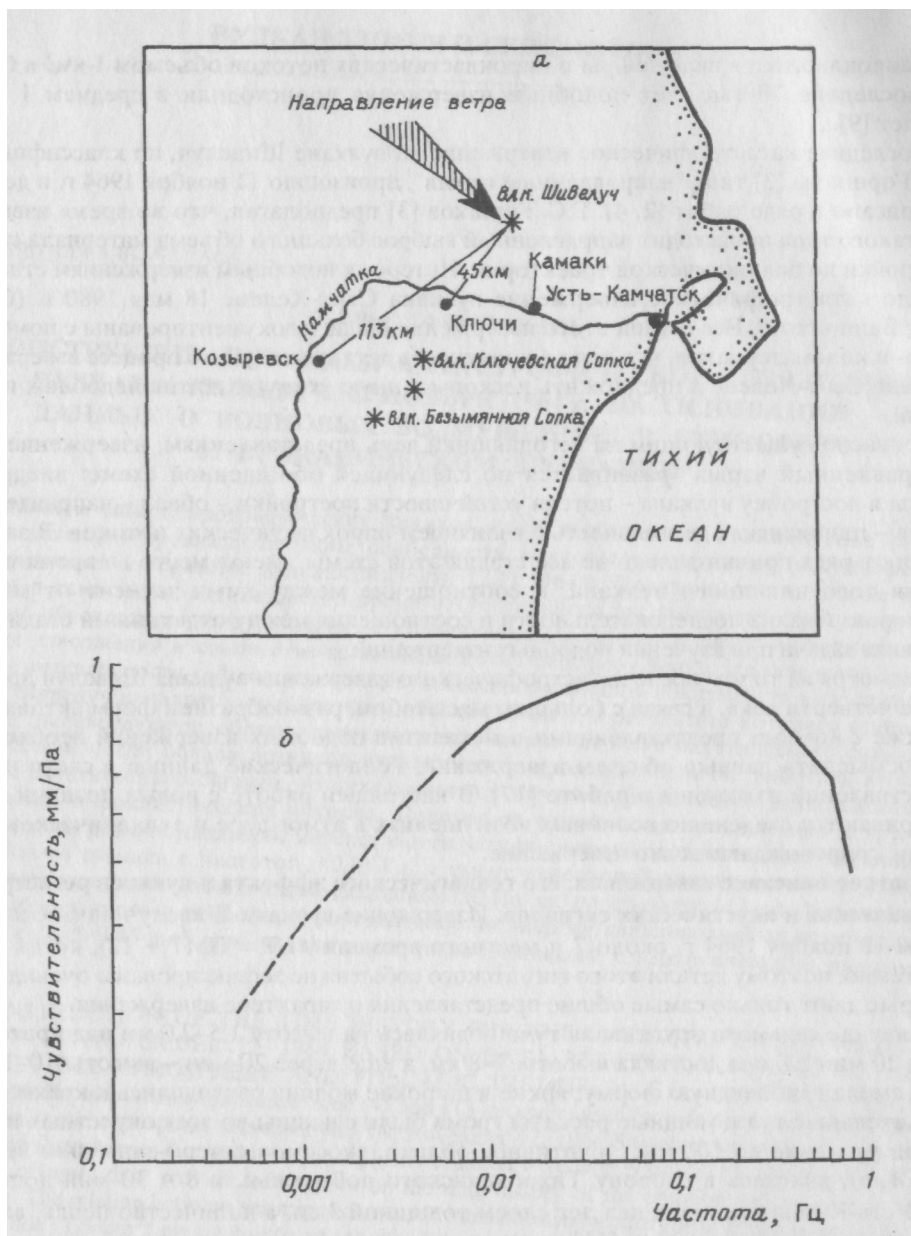


Рис. 1. Схема расположения вулкана Шивелуч и пунктов регистрации (а); б - амплитудно-частотная характеристика микробарографического канала на станции Козыревск

Во время извержения вулкана Шивелуч в 1964 г. ближайшими пунктами регистрации (рис. 1, а) были селения Ключи ($D = 45$ км) и Козыревск ($D = 113$ км), где работали сейсмические станции (КЛЧ, КЗР), оснащенные микробарографическими каналами [11]. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сейсмических каналов была столбовидной в диапазоне частот 1-10 Гц; АЧХ микробарографических каналов, заимствованная из работы [10], приведена на рис. 1, б. В качестве датчика флуктуации атмосферного давления применялся электродинамический микробарограф ЭДМБ-IV, нагруженный на гальванометр М21 с собственным периодом $T_0 = 20$ с. К сожалению, магнитный шунт гальванометра М21 на станции КЛЧ был выключен, в

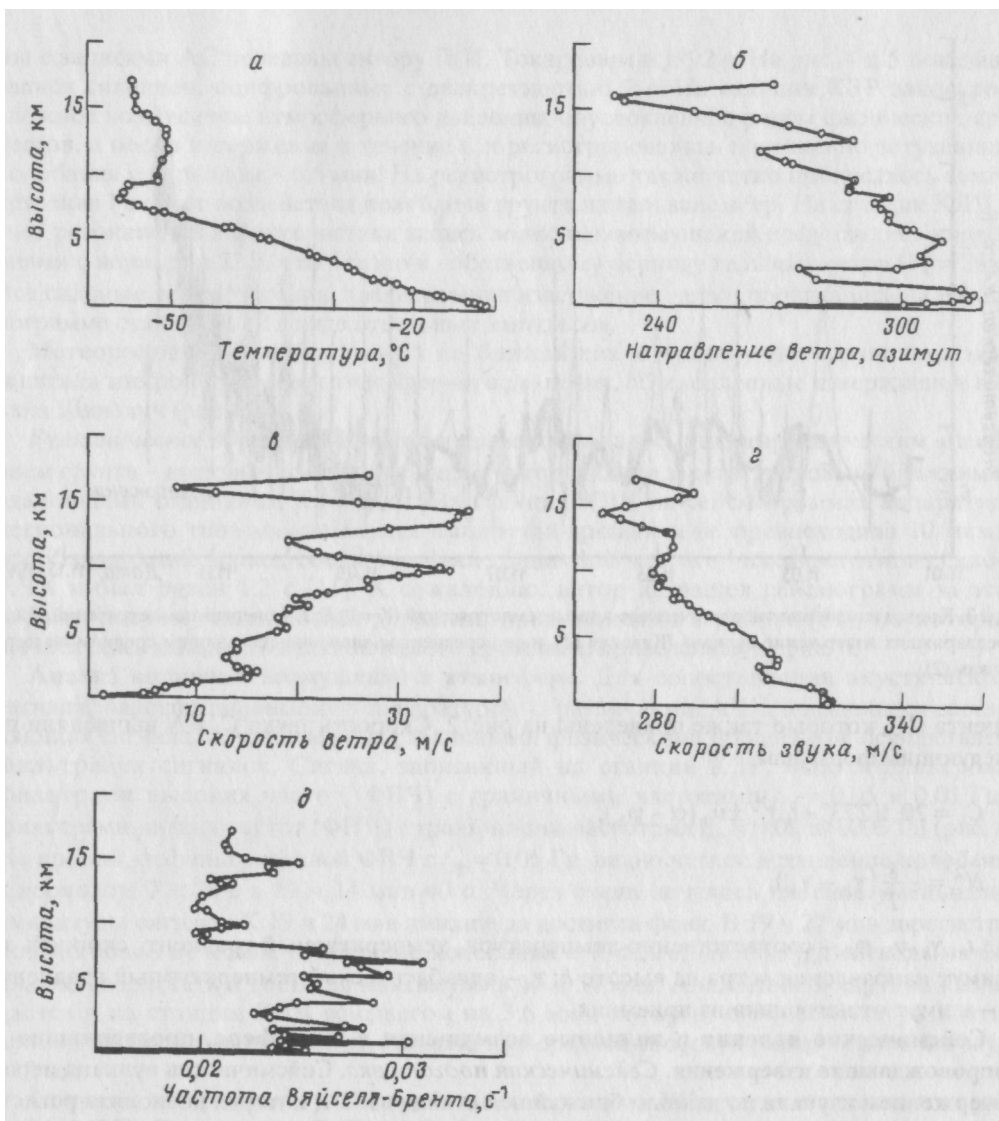


Рис. 2. Состояние атмосферы по данным высотного зондирования, выполненного на станции Ключи 11 ноября 1964 г. в 17 ч 30 мин GMT: а - температура, $^{\circ}\text{C}$; б - направление ветра, азимут; в - скорость ветра, м/с. Вычисленные параметры атмосферы: г - скорость звука на трассе вулкан Шивелуч (пункт регистрации Козыревск), м/с; д - частота Вэйсселя - Брента, с^{-1}

результате чего, по-видимому, получилась резонансная характеристика с максимумом на частоте гальванометра.

В пос. Ключи на зональной гидрометеостанции ежедневно проводилось высотное зондирование атмосферы. На рис. 2 приведены кривые стратификации атмосферы по данным высотного зондирования, выполненного 11 ноября 1964 г. в 17 ч 30 мин GMT¹, т.е. за 1,5 ч перед началом извержения. Видно, что в этот период высота тропопаузы довольно низкая - 8 км. Для оценок средней скорости распространения звука C_0 и резонансных характеристик нижней атмосферы по данным высотного зондирования строился скоростной разрез тропосферы на трассе ШВЛ-КЗР и частота Вэйсселя -

¹ Здесь и далее время дано по Гринвичу.

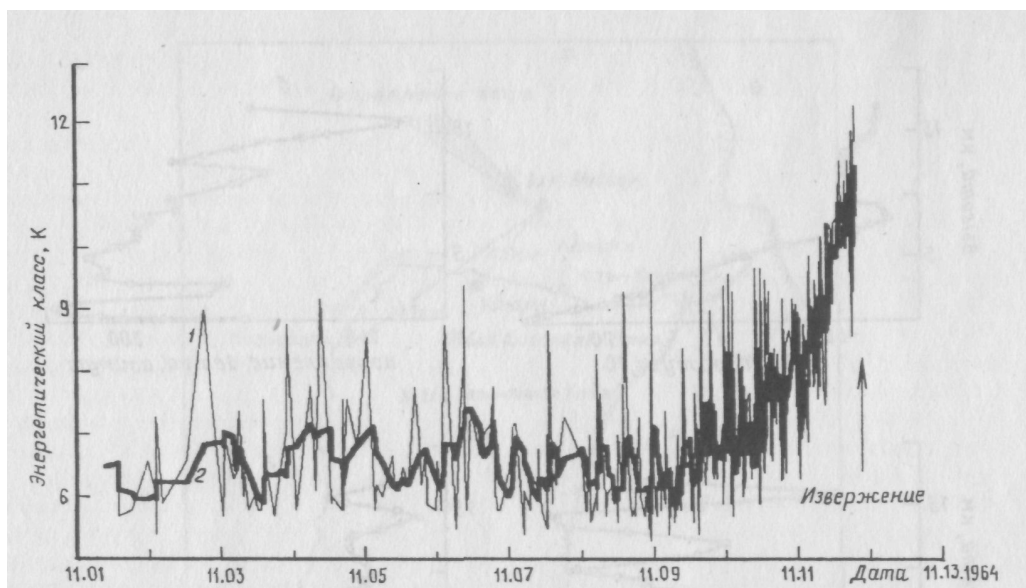


Рис. 3. Кривая изменения энергетического класса землетрясений ($K = \lg E$; E - энергия землетрясений, Дж), предвалявших извержение вулкана Шивелуч (1), и ее осредненное значение скользящим средним по пяти точкам (2)

Брента (N), которые также приведены на рис. 2. Скорость звука C_h и N вычисляли по следующим формулам:

$$C_h = 20,1(273^\circ + t_h)^{1/2} \pm v_h(\alpha - \varphi_h),$$

$$N^2 = -\frac{g}{T}(\gamma_a - \gamma_h),$$

где t_h , γ_a , v_h , φ_h , — соответственно температура, температурный градиент, скорость и азимут направления ветра на высоте h ; γ_a — адиабатический температурный градиент; α - азимут от источника на приемник.

Сейсмические явления и волновые возмущения в атмосфере, предвалявшие и сопровождавшие извержения. *Сейсмическая подготовка.* Сейсмичность вулкана перед извержением изучали по данным ближайшей станции КЛЧ, которая позволяла регистрировать без пропуска землетрясения с $K \geq 7$ ($K = \lg E$; E - энергия, Дж). Извержению предшествовало множество вулканических землетрясений, первые из которых начали отмечаться за 10,5 мес, когда в январе прошел слабый рой землетрясений. После некоторого затишья всплеск сейсмичности был отмечен в первой декаде мая. До начала ноября в основном происходили землетрясения с $K \leq 8$. В начале ноября сейсмичность вулкана Шивелуч резко возросла, что выразилось в росте числа землетрясений и увеличении их энергетического класса [11]. На рис. 3 приведены кривые изменения энергетического класса землетрясений и сглаженная скользящим средним по пяти событиям с первого ноября до начала извержения. Видно, что устойчивый рост "среднего" K начался в начале 10 ноября, почти за 2 сут до извержения. Наиболее сильное землетрясение роя ($K = 12,3$), непосредственно предвалявшего извержение, произошло в 19 ч 07 мин 20 с (рис. 4 и 5, землетрясение I), а в 19 ч 30 мин 50 с произошло землетрясение несколько слабее первого - $K = 11,7$ (рис. 5, землетрясение II), после чего на фоне интенсивного дрожания слабые землетрясения выделить было невозможно, а землетрясений с $K = 9$ не зафиксировано.

Волновые возмущения в атмосфере. Микробарографы на станциях КЛЧ и КЗР записали акустический сигнал (АС), который сопровождал это извержение. Барограм-

мы с записями АС переданы автору П.И. Токаревым в 1992 г. На рис. 4 и 5 показаны записи сигналов, оцифрованные с дискретностью 2 с. На станции КЗР записалось сложное возмущение атмосферного давления, обусловленное рядом физических процессов, а после извержения в течение 6 ч регистрировались постепенно затухающие колебания с периодом - 6,6 мин. На регистрограмме также четко прописалось землетрясение I за счет воздействия колебаний грунта на гальванометр. На станции КЛЧ за счет резонансной характеристики запись волновых возмущений представлена колебаниями с периодом 23 с, что близко к собственному периоду гальванометра ($T_0 = 20$ с). Все сильные землетрясения, предвалявшие извержение, четко прописались на регистрограмме станции КЗР в виде отдельных импульсов.

Метеорологические барографы на ближайших к вулкану метеопунктах также записали микрофлуктуации атмосферного давления, обусловленные извержением вулкана Шивелуч (рис. 6).

Вулканическое дрожание. Извержение сопровождалось квазигармоническим колебанием грунта — вулканическим дрожанием, которое было зарегистрировано ближними и удаленными станциями Камчатки. На станции КЛЧ на сейсмограммах аппаратуры регионального типа максимальная амплитуда дрожания не превосходила 10 мкм, а преобладающий период соответствовал граничной частоте низкочастотного склона АЧХ и был равен 1,2 с [11]. К сожалению, автор не нашел сейсмограмм за этот период, поэтому пользовался данными, приведенными в работе [11], по которым вычислялась мощность вулканического дрожания, приведенная на рис. 6.

Анализ волновых возмущений в атмосфере. Для сопоставления акустического сигнала, зарегистрированного аппаратурой с различными АЧХ, и выделения составляющих сигнала, обусловленных различными физическими процессами, осуществлена фильтрация сигналов. Сигнал, записанный на станции КЗР, был отфильтрован фильтрами высоких частот (ФВЧ) с граничными частотами $f_{гр} = 0,05$ и $0,01$ Гц и фильтрами низких частот (ФНЧ) с граничными частотами $f_{гр} = 0,01$ и $0,005$ Гц (рис. 4). На кривой, отфильтрованной ФВЧ $f_{гр} = 0,05$ Гц, видно четкое вступление колебаний с периодом $T < 20$ с в 19 ч 14 мин 40 с. Через 6 мин началось плавное уменьшение амплитуды сигнала. К 19 ч 24 мин амплитуда достигла фона. В 19 ч 27 мин зарегистрировано новое нечеткое вступление колебаний с $T < 20$ с. Амплитуда сигнала начала плавно возрастать и достигла максимума в 19 ч 54 мин. Аналогичная картина наблюдается и на станции КЛЧ со сдвигом на 3,6 мин, который определяется разностью времен распространения АС до станций, при средней скорости распространения звука 315 м/с.

Опираясь на предшествующие работы по изучению АС от вулканических извержений [13, 15], можно полагать, что "высокочастотный" диапазон волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений обусловлен нестационарными процессами, происходящими во время истечения пеплогазовой струи (отдельные взрывы, сверхзвуковые скачки), и крупномасштабными пульсациями в эруптивной колонне. Нестационарные процессы приводят к генерации слабых воздушно-ударных волн [15], которые в дальней зоне трансформируются в инфразвуковые волны с частотой 0,1-1 Гц. В данном случае максимум спектрального пика для "высокочастотного" диапазона приходится на 9 с. Ориентируясь на "высокочастотную" составляющую, можно говорить о двух источниках акустического сигнала, разнесенных по времени.

На кривой, отфильтрованной ФВЧ с $f_{гр} = 0,01$ Гц, также выделяются два АС, причем начиная с 19 ч 33 мин появляются периодические колебания с $f_{гр} = 0,0145$ Гц ($T = 1,2$ мин), амплитуда которых непрерывно возрастала до 19 ч 54 мин.

Узкополосная АЧХ микробарографического канала на станции КЛЧ позволила реализовать только фильтрацию ФНЧ с $f_{гр} = 0,01$ Гц, которая затем была усреднена реализациям средним по 100 точкам (рис. 5). Максимальный коэффициент корреляции между этой кривой и сигналом на станции КЗР, отфильтрованным ФНЧ с $f_{гр} = 0,01$ Гц, составляет 0,27 при смещении сигнала станции КЗР на 200 с, что удовлетворительно

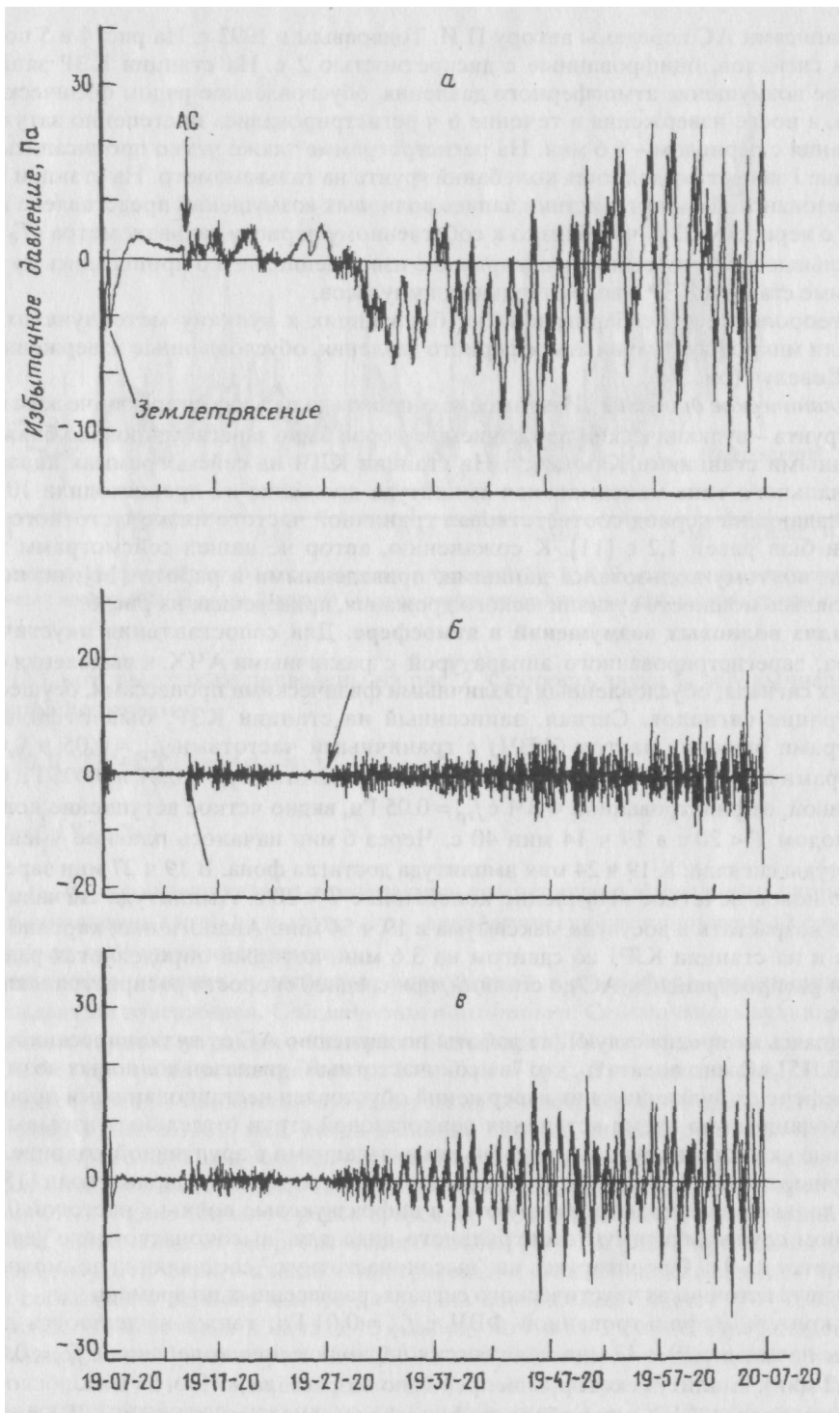


Рис. 4, а—в

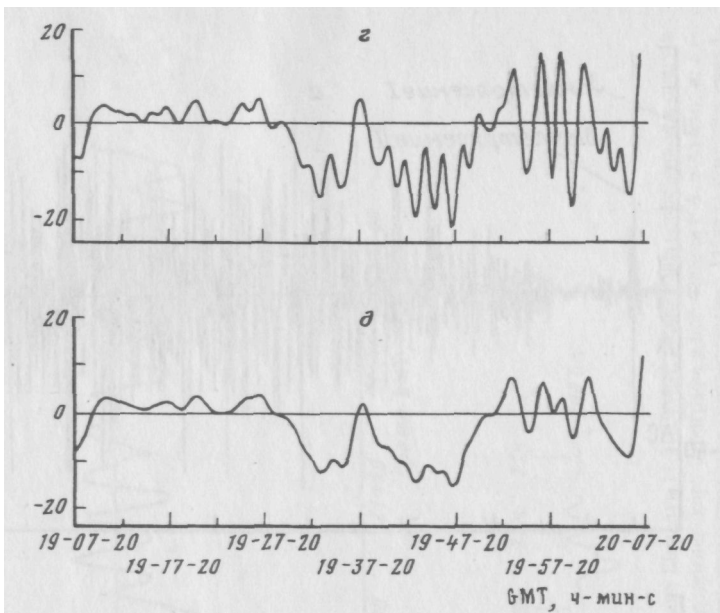


Рис. 4. Запись волновых возмущений, зарегистрированных на станции Козыревск во время извержения вулкана Шивелуч 11.11.1964 г., оцифрованная с шагом 2 с, при различных фильтрациях (*б*, *в* - фильтры высоких частот, *з*, *д* - фильтры низких частот). Значения f_p (Гц): *б* - 0,05, *в*, *з* - 0,01, *д* - 0,005. АС - момент вступления акустического сигнала

совпадает с расчетной разностью прихода сигналов (216 с). Указанные две кривые коррелируемы с уровнем доверия 0,95.

Для восстановления реальных длинноволновых возмущений в атмосфере в сигнал станции КЗР, отфильтрованный ФНЧ с $f_p = 0,005$ Гц, введена поправка на АЧХ. Длинноволновые возмущения и последующий шлейф колебаний атмосферного давления с $T \sim 6$ мин, приведенные по времени к очагу, показаны на рис. 6, где также приведена копия записи флуктуации атмосферного давления, зарегистрированного метеорологическим барографом на метеостанции Ключи. При сравнении восстановленного сигнала и сигнала, зарегистрированного метеорологическим барографом, видна их идентичность по форме записи. Спадание амплитуды с расстоянием пропорционально $\sim 1/r$ свидетельствует в пользу того, что длинноволновые возмущения, по-видимому, являются волнами Лэмба.

Для выявления детерминированной периодической компоненты в АС строили периодограммы для АС, зарегистрированных на обеих станциях, и их фильтраций для второго источника, а также периодограммы для восстановленного сигнала. На рис. 7 видно, что в периодограмме сигнала станции КЗР, отфильтрованного ФНЧ с $f_p = 0,01$ Гц, выделяются максимумы на частотах 0,0012; 0,0027 и 0,043 Гц, а также три близких максимума с частотами 0,06; 0,07 и 0,08 Гц. Первый спектральный максимум также хорошо выделяется на периодограмме сигнала, отфильтрованного ФНЧ с $f_p = 0,005$ Гц. На периодограмме сигнала, отфильтрованного ФНЧ с $f_p = 0,01$ Гц, выделяются два максимума с 0,015 и 0,021 Гц. С небольшими вариациями этот набор частот дает устойчивые и значимые спектральные максимумы на периодограммах сигнала станции КЛЧ. На периодограмме восстановленных длинноволновых возмущений выделяются пять спектральных пиков (рис. 7). Набор периодов устойчивых и значимых спектральных максимумов приведен в табл. 1.

Спектральные максимумы на периодограммах записей обеих станций могут быть обусловлены двумя причинами. С одной стороны, это периодичность истечения пепло-

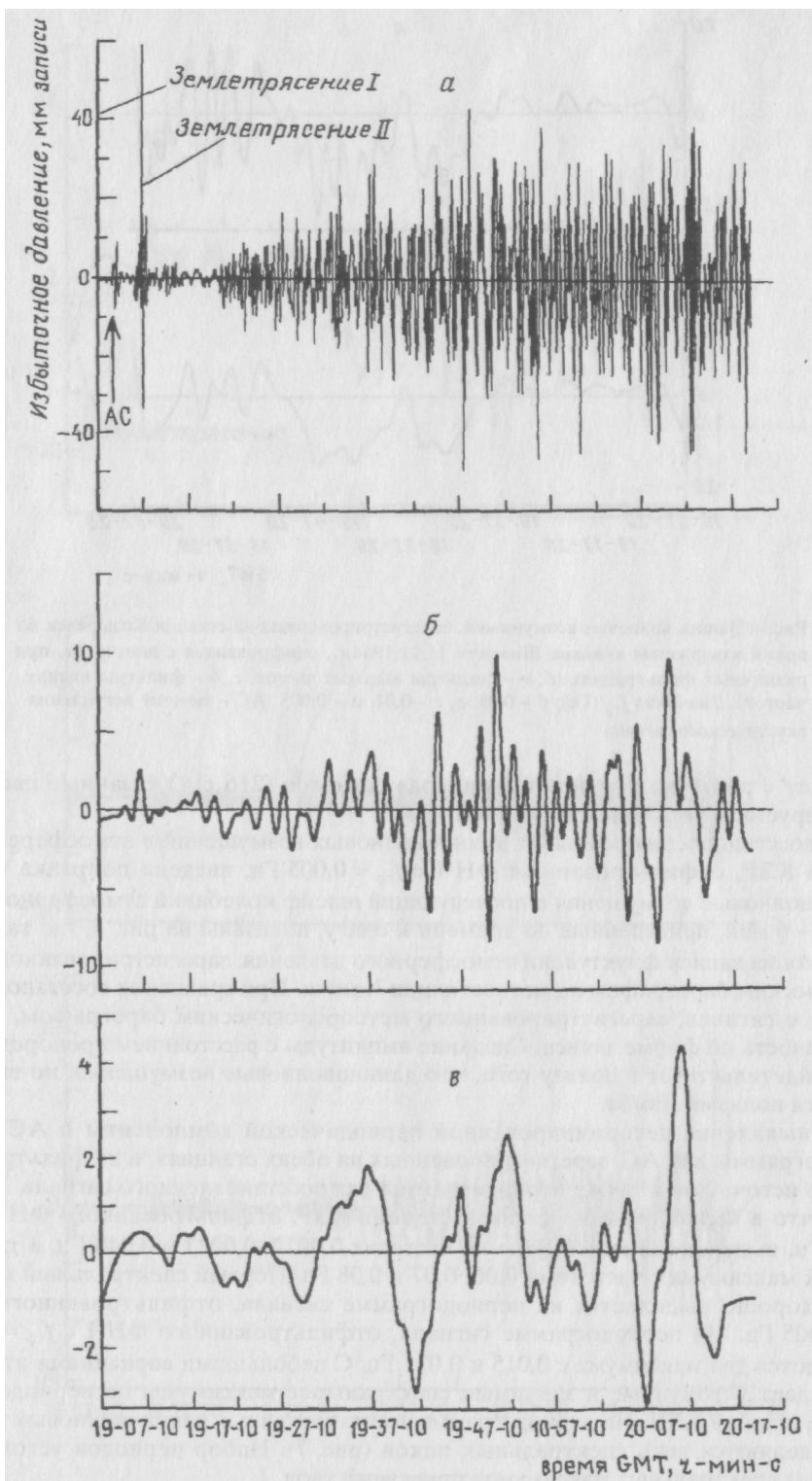


Рис. 5. Запись волновых возмущений (а), зарегистрированных на станции Ключи во время извержения вулкана Шивелуч 11.11.1964г., оцифрованная с шагом 2с; б - кривая, отфильтрованная ФНЧ с $f_{\text{гп}} = 0,01$ Гц, в - ее осреднение скользящим средним по 100 точкам

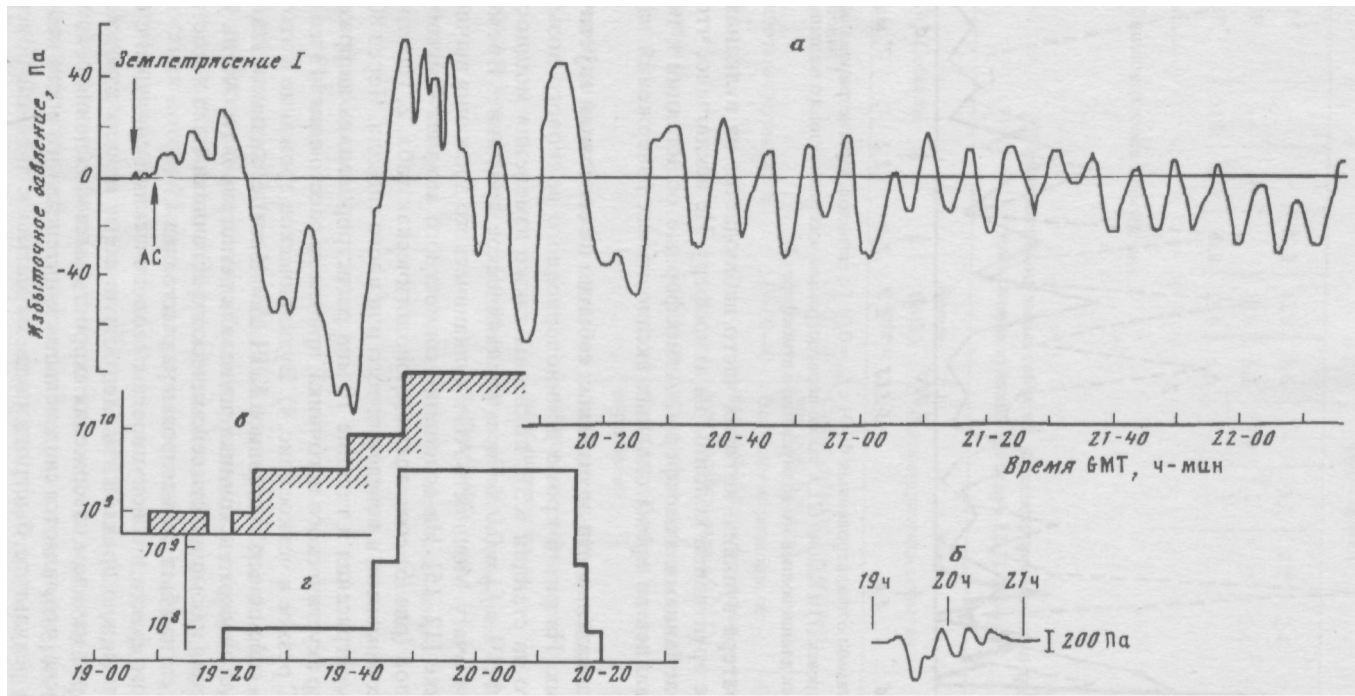


Рис. 6. Длиннопериодное волновое возмущение атмосфере (а), сопровождавшее извержение вулкана Шивелуч 11.11.1964 г., по времени приведенное к очагу и построенное с учетом АЧХ, по данным станции Козыревск ($\Delta = 113$ км); б - копия записи метеорологического барографа в пос. Ключи ($\Delta = 45$ км); в, г - мощности «высокочастотной» составляющей акустического сигнала (ФВЧ, $f_p = 0,05$ Гц) и вулканического дрожания соответственно. Начало землетрясения I 19 ч 07 мин 20 с, начало работы АС 19 ч 08 мин 40 с

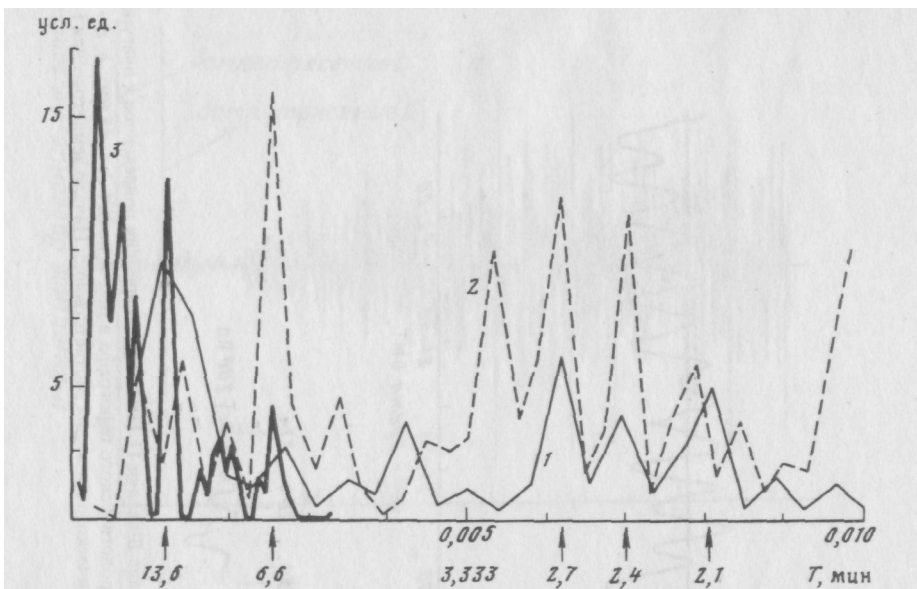


Рис. 7. Периодограммы отфильтрованных ФНЧ с $f_{\text{гр}} = 0,01$ Гц сигналов, зарегистрированных на станциях Козыревск (1) и Ключи (2), а также периодограммы восстановленного по записям станции Козыревск длинноволнового возмущения в атмосфере (3)

газовой струи из кратера вулкана, которая часто наблюдается на вулканах [8], а с другой - воздействие эруптивной колонны на атмосферу. Не исключено, что период 6,6 мин связан с колебаниями атмосферы. Атмосферные осцилляции с периодом ~ 5 мин регистрировались во время сильных эксплозивных извержений на многих вулканах мира [18].

Выделение последовательности эруптивных событий на основании акустических и сейсмических данных. На рис. 6 кроме длиннопериодного волнового возмущения, зарегистрированного на станции КЗР, показаны также изменения мощностей АС, отфильтрованного ФНЧ с $f_{\text{гр}} = 0,005$ Гц, и вулканическое дрожание. Времена всех сигналов приведены к очагу. Мощность АС и вулканического дрожания вычисляли по стандартной методике [12, 15]. На основании совместного анализа сейсмических и акустических сигналов (рис. 6) составлена хронологическая табл. 2, где приведены времена переломных моментов в поведении того или иного сигнала. Через 80 с после самого сильного землетрясения в течение 10 мин регистрировались инфразвуковые колебания от первого акустического источника, причем на расстоянии 113 км (станция КЗР) вступление АС резкое и четкое (рис. 4). Вулканическое дрожание в этот период не регистрировалось сейсмической станцией КЛЧ ($A = 45$ км). На данном этапе извержения мощность акустического источника позволяла регистрировать АС на удалении более 100 км, в то время как мощность сейсмического источника была недостаточной, чтобы сейсмический сигнал был зафиксирован на расстоянии 45 км.

На основании этого факта в совокупности с геологическими данными с большой долей достоверности можно предложить следующую схему начала извержения. На рис. 3 видно, что перед началом извержения скорость высвобождения сейсмической энергии резко возросла, что является свидетельством интенсивного роста напряжений в районе вулкана в результате быстрого подъема магмы к дневной поверхности, причем механизмы трех наиболее сильных землетрясений, предварявших извержение, подобны и характеризуются однотипными подвижками, близкими к горизонтальному сдвигу, а напряжения в очагах этих землетрясений хорошо вписываются в региональную систему напряжений [7]. Глубина очагов, предварявших извержение, заключена в интервале 0-10 км. Исходя из энергии землетрясения, радиус очага землетрясения с

Период устойчивых и значимых спектральных максимумов

Станция	Период, мин												
КЛЧ	-	-	20,8	12,8	6,6	-	3,2	2,7	2,4	2,1	1,8	1,2	0,8
КЗР	-	-	-	13,6	6,2	3,9	-	2,7	2,4	2,1	-	1,2	0,8
КЗР*	51,0	29,6	20,8	13,6	6,6	-	-	-	-	-	-	-	-

Длинноволновое возмущение.

Таблица 2

Хронология основных событий, зарегистрированных во время извержения вулкана Шивелуч 12.11.1964 г.

Событие	Время (GMT). ч-мин-с	Характеристика события	Визуальные данные
Землетрясение I	19-07-20	Самое сильное землетрясение роя, $K = 12,3$	
Начало работы акустического источника 1	19-08-40	Вступление резкое и четкое, преобладают в основном частоты выше 0,05 Гц	Высота пылевоздушного облака 1,5-2 км
Землетрясение II	19-13-40	$K = 11,7$, после этого землетрясений с $K > 9$ не зарегистрировано	-
Окончание работы акустического источника 1	19-18-40	В течение последних 15 мин наблюдалось постепенное уменьшение сигнала	-
Начало работы сейсмического источника	19-20-00	Вулканическое дрожание с амплитудой 0,5 мкм	Высота эруптивной колонны 7-8 км
Начало работы акустического источника 2	19-21-00	Плавное нарастание сигнала, возникновение колебаний с периодом - 2 мин	-
Резкое возрастание сейсмического и акустического сигналов	19-18-00	-	Высота эруптивной колонны 10-15 км

$K = 12,3$ должен составлять единицы километров. При малой глубине очага сплошность постройки вулкана должна была нарушиться, что привело к потере устойчивости склона и его обрушению. Обрушение склона породило обвальную лавину, в результате движения которой начали генерироваться сейсмические и акустические колебания. Отложения обвальной лавины выделяются по геологическим данным [17].

Продолжительность первого АС, равная 10 мин, близка к расчетному времени движения обвальной лавины, если протяженность отложений принять равной 16 км [17], а среднюю скорость ее движения по аналогии с извержением вулкана Сент-Хеленс - 30 м/с [19]. В то же время не исключено, что второе сильное землетрясение с $K = 11,7$, произошедшее в 19 ч 13 мин, смогло спровоцировать еще один обвал, на что указывает форма кратера.

Коэффициент преобразования кинетической энергии обвальной лавины в упругие колебания грунта зависит от многих факторов: кинематических (скорость движения),

динамических (масса), угла встречи поверхности препятствия с направлением движения тела лавины, размеров и конфигурации этой поверхности. Следует заметить, что коэффициент полезного действия механизма преобразования энергии падающего груза в энергию упругих колебаний даже для скального грунта $< 3\%$. Кроме того, как показали исследования схода снежных лавин [16], передача части энергии движущейся лавины в энергию упругих колебаний грунта происходит в моменты, когда головная часть снежной лавины набегает на препятствия в зоне ее транзита. По-видимому, для гравитационных потоков, зона транзита которых лишена препятствий и плавно переходит в зону торможения, что имело место в случае извержения вулкана Шивелуч, будет генерироваться слабый сейсмический сигнал.

Кроме того, при сходе лавины образуется турбулентный пылевоздушный поток, движущийся вместе с лавиной. При торможении лавины пылевоздушный поток может по инерции продолжать движение и образовывать специфические отложения пылевоздушной волны, которые, по-видимому, трудно отличимы от пирокластических волн (surge). В случае, если обваливается материал старого, но еще горячего экструзивного купола, как это было при извержении вулкана Шивелуч, пылевоздушный поток дает начало конвективному облаку, которое за счет тепла поднимается над обвалом. Отложения этого облака должны лежать на обвальных отложениях и состоять из тонкозернистого резургентного материала. Вероятно, именно такие отложения обнаружены А.Б. Белоусовым [17]. В начале извержения высота пылевоздушного облака составила 1,5-2,0 км от кратера [11]. На рис. 2, б видно, что скорость ветра на этой высоте (~ 4 км над уровнем моря) была небольшой (15 м/с). Протяженность отложений пылевоздушного облака, поднявшегося на 2 км, в этом случае должна быть в пределах 10-15 км, что подтверждается геологическими данными [17].

Пылевоздушные поток и облако генерируют акустические колебания, мощность источника которых зависит от флуктуации турбулентной скорости. Интенсивность акустических колебаний, как правило, превосходит на порядок и более интенсивность сейсмических колебаний как в случае снежных лавин [16], так и в случае извержения пирокластических потоков [13]. Исходя из перечисленных фактов, следует отдать предпочтение модели обвала на первом этапе извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г.

После окончания работы первого акустического источника в течение 2 мин сигналы обоих видов не регистрировались. Извержение не получило после обвала столь бурного развития, как это произошло во время извержения вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. Отсутствие криптокупола (в отличие от вулкана Сент-Хеленс) и большая глубина внедрения магмы обусловили инертность процесса. Только спустя 12 мин после обвала (в 19 ч 20 мин) на лентах станции КЛЧ появилась запись вулканического дрожания, а через 1 мин начали регистрироваться воздушные волны, амплитуда которых медленно начала нарастать. Появление вулканического дрожания и нового АС связано с началом плиннианской стадии извержения. В этот период высота эруптивной тучи достигла 7–8 км.

В 19 ч 48 мин наблюдалось резкое возрастание амплитуды вулканического дрожания и интенсивности АС на частотах $> 0,05$ Гц. Резкое усиление мощности того и другого сигнала свидетельствует о возрастании расхода потока магма-газ через кратер вулкана и о начале излияния пирокластических потоков.

К этому моменту приурочена вторая положительная фаза длинноволновых возмущений в атмосфере (рис. 6). Во время сильных эксплозивных извержений формируется эруптивное облако, которое на каком-то временном интервале можно рассматривать как конвективную колонну от постоянно действующего источника. Конвективная колонна порождает в атмосфере длинноволновое разряжение большой интенсивности за счет подсоса окружающего воздуха [1, 14]. Интенсивность волновых возмущений определяется тепловыделением в источнике. Резкое увеличение тепловыделения приводит к нарушению стационарности процесса и возникновению фазы избыточного давления в длинноволновых возмущениях. Извержение и распространение пирокласти-

**Энергия $E_{a.и}$ и длинноволновых акустических возмущений,
тепловая мощность Q и объем выброшенного пепла V
на разных стадиях извержения**

Станция	Стадия извержения	$E_{a.и} \cdot 10^{-15}$, Дж	$Q \cdot 10^{-11}$, кВт	$V \cdot 10^{-8}$, м ³
КЗР	I	2,6	2,2	2,3
	II	1,3	1,1	1,2
КЛЧ	I	4,2	3,5	Всего 3,5
	I	1,7	1,4	3,1
				Всего 4,5

I - плиннианская, II - извержение пирокластических потоков.

ческих потоков привели к резкому увеличению тепловыделения, что нашло отражение в форме записи.

Теоретическое обоснование зависимости энергии акустического источника $E_{a.и}$ от скорости тепловыделения Q в очаге сильных взрывов и площадных пожаров дано в работах [5, 6]:

$$E_{a.и} = 90 \frac{\pi \rho_0 \alpha}{\chi h C_0} \left(\frac{g \beta}{\pi \rho_0 c_p} \right)^{3/2} Q^{3/2} N^{3/2},$$

где $a = db/dx = 0,15$ - тангенс угла расширения струи; ρ_0 , c_p - плотность и теплоемкость воздуха соответственно; $\beta = 1/T_a$ - коэффициент термического расширения; T_a - температура окружающего воздуха; C_0 - скорость звука в воздухе; h - эффективная высота, зависящая от стратификации атмосферы; N - коэффициент Вейселя - Брента; χ - турбулентный коэффициент температуропроводности.

Для плиннианской деятельности и стадии извержения пирокластических потоков находили тепловую мощность по энергии длинноволновых возмущений, вычисленной по записям регистрограмм станций КЛЧ и КЗР. Исходя из допущения, что при сильных взрывных извержениях эруптивная колонна существует за счет тепла, выносимого в атмосферу мелкой пирокластикой (вулканическим пеплом), по тепловой мощности определяли количество выбрасываемого пепла в единицу времени. Время той или иной стадии извержения находили по АС, а плотность пепла принимали равной 1,4 т/м³, отсюда вычисляли объем выброшенного пепла (табл. 3). Наблюдается удовлетворительное совпадение результатов оценки количества пепла по АС с оценками, выполненными на основании полевых наблюдений (0,3 км³). Следует отметить, что, хотя по продолжительности плиннианская стадия и стадия извержения пирокластических потоков почти одинаковы (- 25 мин), количество пепла, выброшенного во время первой стадии, в 2 раза больше, чем во второй. Не исключено, что после перехода извержения на новый режим, вследствие резкого увеличения расхода материала в виде пирокластических потоков произошло обрушение колонны и началось формирование новой эруптивной колонны.

Выводы. 1. Волновые возмущения в атмосфере, возникающие во время сильных катастрофических извержений, несут информацию о динамике извержения и количестве выброшенного пепла в атмосферу.

2. На основании изучения соотношения интенсивности сейсмического и акустического сигналов предполагается, что извержение вулкана Шивелуч 12.11.1964 г. началось с грандиозного обвала, в результате которого сформировалось пылевоздушное облако, которое было источником первого акустического сигнала.

3. Второй источник акустического сигнала возник при формировании конвективной колонны в результате плинианской деятельности и извержения пирокластических потоков. Переход от одной стадии извержения к другой сопровождался резким усилением интенсивности вулканического дрожания и составляющей акустического сигнала с частотой $> 0,05$ Гц, а также генерацией длинноволнового (> 10 мин) возмущения с избыточным давлением 50 Па на станции Козыревск ($= 113$ км).

4. Количество пепла, выброшенного в атмосферу, определенное по энергии длинноволновых возмущений, оценено в $0,35-0,45$ км³, что удовлетворительно совпадает с геологическими данными - $0,3$ км³ [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 93-05-8520.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин ВВ., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3-111.
2. Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3-26.
3. Горшков Г.С. Направленные вулканические взрывы // Геология и геофизика. 1963. №12. С. 23-31.
4. Горшков Г.С., Дубик ЮМ. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3-36.
5. Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Шацкий Ю.В. Инфразвуковые и внутренние гравитационные волны в атмосфере при больших пожарах // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. №2. С. 327-330.
6. Гостинцев Ю.А., Шацкий Ю.В. Генерация длинноволновых возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва: Препринт № 2. Черноголовка, 1983. 33 с.
7. Зобин В.М. Динамика очага вулканического землетрясения. М.: Наука, 1979. 90 с.
8. Конов А.С., Озеров А.Ю. Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 21-38.
9. Мелекесцев И.В., Вольнец О. Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. С. 84-92.
10. Токарев П.И. Регистрация взрывов Ключевского вулкана в 1962 г. // Бюл. вулканол. станций. 1964. № 37. С. 52-59.
11. Токарев П.И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Физика Земли. 1967. № 9. С. 11-22.
12. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1980. 235 с.
13. Фирстов П.П. Особенности акустических и сейсмических волн, сопровождающих извержение вулкана Безымянный в 1983-1985 г.г. // Вулканология и сейсмология. 1988. №2. С. 81-97.
14. Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Жданова Е.Ю., Кирьянов В.Ю. Начало нового экстремального извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4-5. С. 33-47.

15. *Фирстов П.П., Сторчеус А.В.* Акустические сигналы, сопровождавшие извержение вулкана Ключевской в марте-июне 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 66-80.
16. *Фирстов П.П., Суханов Л.А., Пергамент В.Х., Родионовский МВ.* Акустические и сейсмические сигналы от снежных лавин // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 1. С. 67-71.
17. *Belousov A.B.* The Shiveluch volcanic eruption of 12 November 1964 - explosive eruption provoked by failure of the edifice // J. Vol. Geoth. Res. 1995. V. 55. № 1-4. P. 357-365.
18. *Kanamori H., Mogi J., Harkrider DC.* Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruption // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № B11. P. 21947-21961.
19. *Voight B., Clicken H., Jande R.L., Douglass P.M.* Catastrophic rock slide avalanche of May 18 // The 1980 eruptions of Mount St. Helens / Eds Lipman P.W., Mullineaux D.R. Washington: US. Geol. Serv. Prof. Pap., 1981. P. 347-378.

Поступила в редакцию
31.07.1995

Институт вулканической геологии и
геохимии РАН,
Петропавловск-Камчатский