

УДК 550.342+580.348.436

ДЛИННОВОЛНОВЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ – ИСТОЧНИК
ИНФОРМАЦИИ О СИЛЬНЫХ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ

П.П. Фирстов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: firstov@kscnet.ru

ВВЕДЕНИЕ

Внимание всего мирового сообщества вулканологов в течение многих десятилетий привлекают исследования катастрофических эксплозивных извержений вулканов: Безымянный, 1956 г. (Камчатка); Шивелуч – 1964 г. (Камчатка), Сент –Хеленс, 1980 г. (Каскадные горы, США). Извержения характеризуются грандиозным разрушением вулканических построек и большой мощностью, когда за сравнительно небольшой отрезок времени на поверхность Земли выносится большое количество вулканического материала.

В классической монографии Г.С. Горшкова и Г.Е. Богоявленской [6] дано детальное описание извержения вулкана Безымянный в 1955-1963 гг. В этой работе с большой детальностью показан геологический эффект пароксизма извержения 30 марта 1956 г., которое, также как и еще ряд сильных эксплозивных извержений с секторным распространением на десятки километров как материала постройки (резургентного), так и ювенильного (вулканы: Мон-Пеле, Малые Антильские острова, 1902 г.; Катмай, Северная Америка – 1912 г.; и др.), отнесено к извержению типа «направленный взрыв» [5].

В дальнейшем природа подарила человечеству еще два подобных извержения – вулкан Шивелуч (Камчатка), 1964 г. и вулкан Сент-Хеленс (США, Каскадные горы), 1980 г. Геологический эффект извержения вулкана Шивелуч был изучен сразу после извержения [7, 12], и это извержение также было отнесено к типу «направленный взрыв». Кульминационная стадия извержения вулкана Сент-Хеленс, в отличие от предшествующих извержений, была детально документирована с помощью наземной фотосъемки [22] и наблюдений со спутника [14]; в дальнейшем динамика и геологический эффект этого извержения были скрупулезно изучены американскими вулканологами [21]. В последние два десятка лет интерес к изучению особенностей этих извержений вновь резко возрос [1, 2, 3, 4].

После извержения вулкана Безымянный в 1956 г. Г.С. Горшков [16] обратил внимание на длинноволновые акустические возмущения (ДАВ) длительностью более нескольких минут, сопровождавшие это извержение и указал на их информативность. Он высказал предположение, что они могут служить источником инструментальной информации о динамике извержений, и наряду с геологическими данными могут пролить свет на различия и сходства в сценариях подобных катастроф. Но на тот период не было разработана теория генерации

ДАВ термиками и конвективными струями, которая появилась только в 80 годах прошлого столетия [8-10]. В данной статье рассмотрены ДАВ от четырех сильных эксплозивных извержений типа «направленный взрыв» на основании современных представлений о механизме их генерации, и даны оценки некоторых параметров извержений (рис. 1).

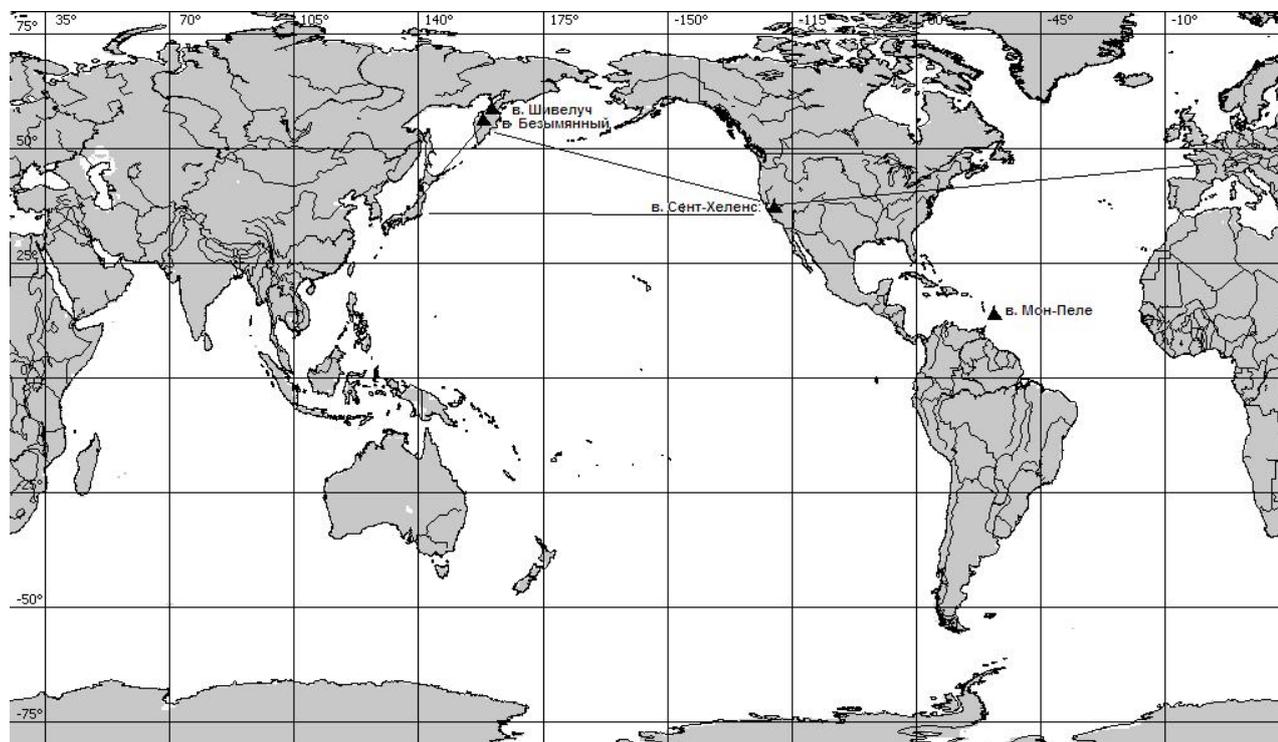


Рис. 1. Схема расположения вулканов, на которых происходили извержения типа «направленный взрыв», и трасс распространения длинноволновых акустических возмущений до пунктов регистрации.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗВЕРЖЕНИЙ

Динамика извержений типа «направленный взрыв» своеобразна и рассматривалась во многих работах [1, 2, 3, 6, 7, 21].

Вулкан Мон-Пеле. В апреле 1902 г. после длительного периода покоя началось пароксизмальное извержение вулкана вулкан Мон - Пеле, расположенного на о. Мартиника (Малые Антильские острова). В процессе этого извержения произошла серия «направленных взрывов» (8. IV; 20. IV; 30.VIII). С большой скоростью (70-100 м/с) из кратера вулкана по склону проносились горячие вулканические лавины, которые уничтожали на своем пути все живое и разрушали строения (г. Сент-Пьер, пос. Мон-Руж). Отложения этих вулканических лавин представляли тонко раздробленный материал (песок и пепел), который в виде мало-мощного слоя отлагался независимо от рельефа, как в понижениях, так и на возвышенностях. Площадь распространения материала каждой лавины оценивается $\sim 40 \text{ км}^2$.

Вулкан Безымянный. До 1955 г. этот вулкан считался потухшим. В октябре 1955 г. начались эксплозии вулканского типа, и образовался вершинный кратер. 30 марта на вулкане произошло извержение типа «направленный взрыв», в результате которого на месте вершины образовался кратер размером $1.5 \cdot 2.8 \text{ км}^2$ и глубиной 700 м. Область поражения в резуль-

тате этого пароксизма, выделенная по наличию отложений и повреждений древесной растительности, имела форму овала площадью около 500 м^2 , а обломочный материал отложился в пределах узкого сектора у подножия вулкана, покрыв площадь более 60 км^2 . В отложениях, объем которых оценивается в $0.6-0.8 \text{ км}^3$, преобладал материал постройки вулкана. Эти отложения в работах [3, 6] названы «агломератом направленного взрыва». По существующим на сегодня представлениям он представляет собой обломочную лавину, возникшую в результате обвала [2].

На остальной площади, отложился слой раскаленного материала («песок направленного взрыва»), мощность которого составляла $0.6-0.7 \text{ м}$ вблизи постройки вулкана до 0.01 м в краевой части. Эта фация объемом 0.2 км^3 представлена, главным образом, ювенильным песчаным и алевритовым материалом с рассеянным вулканическим гравием и сравнительно мелкими обломками размером от 0.01 м до 0.2 м в поперечнике.

Вслед за «направленным взрывом» началась плинианская деятельность, с выносом в атмосферу вулканического пепла, объем которого оценивается в $0.4-0.5 \text{ км}^3$. Сформировалась конвективная колонка высотой $35-40 \text{ км}$.

Вулкан Шивелуч. Извержение вулкана Шивелуч началось рано утром 12.XI около 7 ч. местного времени (LT = GMT + 12), когда было еще темно, поэтому последовательность в динамике этого гигантского события не могла быть зафиксирована. Очевидцы дают только самые общие представление о характере извержения.

В начале седьмого часа эруптивная туча поднялась на высоту $1.5-2.0 \text{ км}$ над кратером, к 7 ч 20 мин местного времени она достигла высоты $7-8 \text{ км}$, а еще через 20 мин $10-15 \text{ км}$. 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, двигаясь в сторону Тихоокеанского побережья, к 8 ч 30 мин достигло поселка Усть-Камчатск, где пепел лег слоем толщиной 3 см [7].

В результате извержения произошло разрушение нескольких куполов с образованием кратера сложной формы размером $1.5 \times 3.0 \text{ км}$. Северная половина кратера, состоящая из двух сегментов, имеет овальную форму с сечением $1.5 \times 1.0 \text{ км}$, а южная – форму трапеции и засыпана рыхлым агломератовым материалом. В работе [7] данное извержение рассматривается с позиции модели взрывного типа, поэтому необычная конфигурация кратера и сложная форма записи ДАВ объяснялись двумя пароксизмальными взрывами. Материал отложений «направленного взрыва» полностью резургентный, его объем оценивается 1.5 км^3 . Вслед за процессом, разрушившим постройку вулкана, началась плинианская деятельность, в результате которой было выброшено 0.3 км^3 пепла. Поверхность «взрывных» отложений была покрыта обширным плащом пирокластических потоков, формирование которых произошло на

последнем этапе извержения. Объем пирокластических потоков оценивается в 03-05 км³. Площадь отложений направленного взрыва составила 100 км². При более поздних исследованиях отложений этого извержения [4], на «агломерате направленного взрыва» выделен резургентный пепел мощностью 4-8 см, по мнению исследователей [4], возникший во время фреатических взрывов на следующей стадии извержения после образования «агломерата направленного взрыва».

Вулкан Сент-Хеленс (США, штат Вашингтон). Этот вулкан активизировался после 123-летнего периода покоя 27 марта 1980 г. Извержение началось со слабых эксплозий образованием вершинного кратера. Пароксизмальному извержению, которое было документально зафиксировано фотосъемкой очевидцев, предшествовала сейсмическая подготовка в течение 28 дней и деформационные процессы в постройке вулкана, вызванные внедрением магмы и формированием криптокупола [21].

18 мая 1980 г. в 15 ч 32 мин GMT, после землетрясения с $M = 5.1$ ($E \sim 10^{12}$, Дж) и глубиной очага 1.5 км, произошло соскальзывание северного склона вулкана с последующим обвалом и образованием обломочной лавины. Каменная лавина прошла путь длиной 29 км, заполнив отрицательные формы рельефа со средней скоростью 50-100 м/с [3]. Объем соскользнувшего блока оценивается 2.3-2.7 км³. Через 26 секунд после начала образования каменной лавины произошел направленный взрыв.

Быстрое разрушение обвалом части северного склона вулкана явилось причиной резкой декомпрессии криптокупола, сформированного внутри вулканической постройки. Быстрое отделение и расширение вулканических газов породили гигантский направленный взрыв, который произошел на месте обвала. Взрывная волна с максимальной скоростью ~ 200 м/с уничтожила весь лес на расстоянии до 10 км от вершины вулкана. В зоне 10-28 км лес был повален и сломан. Отложения направленного взрыва в течение 3.5 минут распространились на площади в 600 км².

По данным спутниковой съемки установлено, что гигантская эруптивная колонна начала развиваться со всей площади отложений направленного взрыва. Объем материала направленного взрыва оценивается 0.18 км³ при средней температуре 400° С, высота зависания эруптивной колонны оценивается около 25 км над у.м. За направленным взрывом началась 9-часовая плининанская деятельность с выносом большого количества ювенильной дацитовой пемзы в атмосферу ($V = 1.1$ км³) и образованием пирокластических потоков ($V = 0.12$ км³).

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЕНЕРАЦИИ ДЛИННОВОЛНОВАХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОНВЕКТИВНОГО ПОДЪЕМА НАГРЕТЫХ ПРОДУКТОВ

Исследования механизмов возбуждения ДАВ в атмосфере, конвективным подъемом нагретых продуктов от различных источников, с 80^{ых} годах прошлого столетия проводились

в научной школе Ю.А. Гостинцева [8-10]. Крупномасштабные процессы с выделением тепла (взрывы, пожары, извержения вулканов, падения метеоритов) за счет восходящих конвективных движений нагретых продуктов сопровождаются образованием конвективной колонки. При ее формировании вследствие турбулентного смешения, происходит вовлечение в движение больших объемов окружающего воздуха, что приводит к возбуждению ДАВ.

Конфигурация поднимающегося конвективного элемента зависит от соотношения между временем тепловыделения (t_H) и характерным временем подъема продуктов (t_N) до высоты зависания в стратифицированной атмосфере. Если $t_H \gg t_N$ (в пределе при постоянно действующем источнике), то имеет место струйное течение; при обратном соотношении (в пределе – при мгновенном выделении тепла или массы легких газов) в атмосфере образуется облако конечных размеров – термик [10].

Реальные очаги горения и взрыва отличаются большим разнообразием как по длительности действия, составу и температуре продуктов, начальному импульсу количества движения и выделившейся массе газов, так и по пространственной их конфигурации. Однако на некотором удалении от источника, конвективное турбулентное движение продуктов горения или взрыва перестает помнить начальные распределение плотности, скорости, температуры и концентрации в очаге. Движение становится свободно-восходящим, зависящим только от значений тепловой энергии и вещественных компонентов смеси (или некоторыми их смысловыми аналогами), от турбулентных чисел Прандтля и Шмита и значением коэффициента турбулентного обмена – автомодельный участок. В силу этого любой очаг горения и взрыва с точки зрения динамики подъема продуктов в атмосфере, на достаточном удалении от него, можно трактовать как конвективный источник тепла и компонентов веществ [9, 10].

Генерируемая колеблющимся на уровне теплового равновесия и пульсирующим конвективным элементом акустическая волна из-за стратифицированной структуры атмосферы по мере распространения преобразуется в цилиндрическую расходящуюся волну Лэмба с максимальным давлением на уровне земли.

Логично рассматривать площадь горячих отложений «направленного взрыва» и последующую плиннианскую стадию как постоянно действующий «мягкий» источник тепловыделения, в результате которого возникает конвективная колонка. В соответствии с конвективным механизмом генерации ДАВ, их интенсивность и энергия для «мягкого» постоянно действующего источника тепловыделения определяется изменением во времени эффективного объема поднимающейся струи продуктов в атмосфере. Наиболее длинноволновые возмущения в атмосфере возбуждаются на частотах, определяемых временем существования очага [10].

ДЛИННОВОЛНОВЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ СИЛЬНЫХ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ ТИПА «НАПРАВЛЕННЫЙ ВЗРЫВ»

На рис. 2 приведены копии трехчасовых записей атмосферного давления метеорологическими барографами, расположенными вблизи вулканов, на которых зарегистрированы ДАВ от четырех сильных эксплозивных извержений, описание которых дано выше. Записи ДАВ от вулканов Мон-Пеле и Безымянный заимствованы из работы [16] от вулкана Сент-Хеленс [19], а от вулкана Шивелуч переданы автору Ю.М. Дубиком. В таблице приведены основные параметры ДАВ, показанные на рис. 2б.

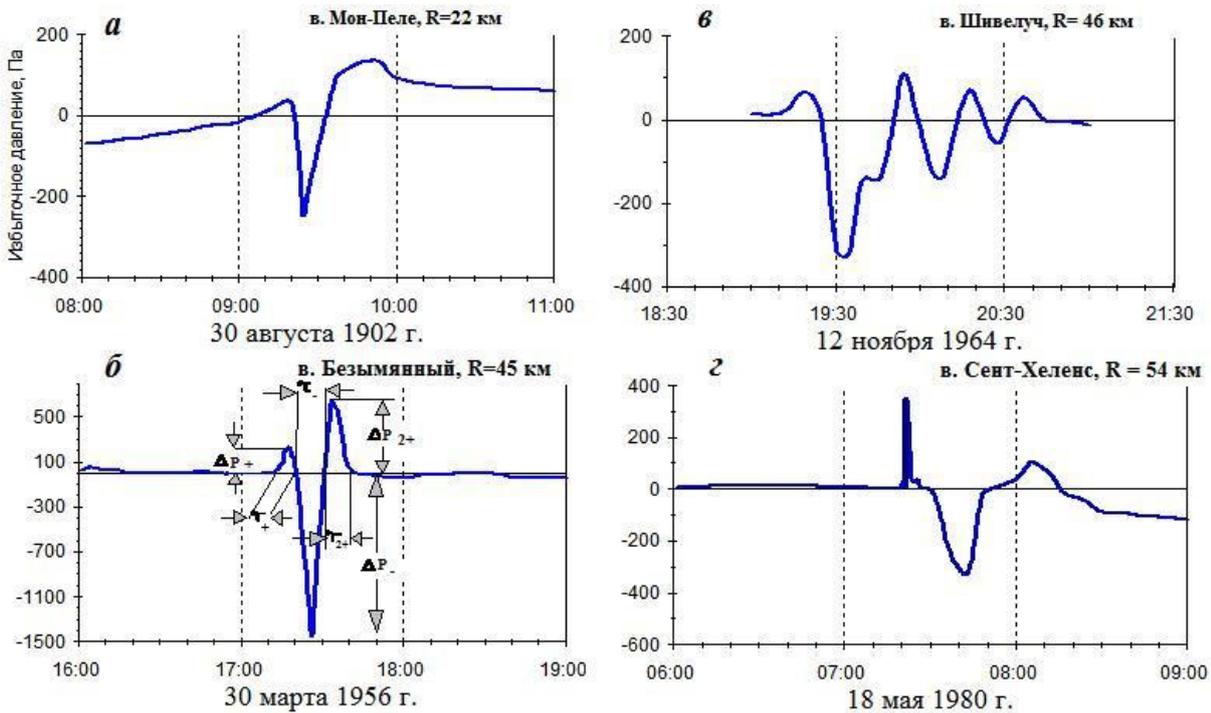


Рис. 2. Записи длинноволновых акустических возмущений, сопровождавшие извержения типа «направленный взрыв», метеорологическими барографами в ближней зоне.

Таблица. Основные параметры длинноволновых акустических возмущений, зарегистрированных во время сильных эксплозивных извержений типа «направленный взрыв», общая площадь отложений извержения и высота эруптивной колонки

Вулканы	r , км	ΔP_+ , Па	τ_+ , мин	ΔP_- , Па	τ_- , мин	$I \cdot 10^{-3}$, Па·мин	ΔP_{2+} , Па	τ_{2+} , мин	S , м ² h, м
Мон-Пеле, 30. VIII. 1902г.	22	34	12.5	250	11.4	1.42	98	24.0	~ 40 ?
Безымянный 30. III. 1956 г.	45	203	7.7	1450	9.6	6.96	660	11.2	500 35-40
Шивелуч 12. XI. 1964 г.	46	32	13.2	260	20.0	2.60	110	7.0	100 10 -15
Сент-Хеленс 18. V. 1980 г.	54	340	> 6	350	14.5	2.54	112	15.0	600 23

ДАВ для извержений вулканов Мон-Пеле и Безымянный (рис. 2а, б) подобны и представляют собой V - образный импульс с двумя фазами сжатия (ΔP_{+1} , ΔP_{+2}) и фазой разряжения (ΔP_{-}), причем $\Delta P_{-} > \Delta P_{+}$. Следует отметить, что фаза разряжения для ДАВ от вулкана Безымянный, имеет максимальную амплитуду 1450 Па.

Во время извержения вулкана Шивелуч метеорологические барографы близлежащих населенных пунктов, расположенных на расстоянии от 46 до 130 км, зафиксировали ДАВ длительностью около одного часа и максимальным перепадом давления около 400 Па. Отличительной особенностью ДАВ для извержения вулкана Шивелуч является маленькая амплитуда $\Delta P_{+1} = 32$ Па, наиболее длительная фаза разряжения длительностью 20 мин, с последующими двумя периодами изменениями ΔP длительностью около 20 мин. На рис.2в приведена копия барограммы, записанной на метеостанции Ключи, расположенной на расстоянии 46 км от вулкана.

Метеорологические барографы на станциях, расположенных вблизи вулкана Сент-Хеленс на расстояниях от 54 до 370 км, записали ДАВ от извержения 18 мая [19]. На рис. 2в приведена копия ДАВ, зарегистрированная в ближайшем от вулкана пункте Toledo [19]. На барограмме четко прописан резкий пик избыточного давления $\Delta P_{+1} = 350$ Па, период которого оценить затруднительно в связи с малой скоростью развертки и большой толщиной пера самописца. После фазы разряжения длительностью $\tau_{-} = 14.5$ мин и $\Delta P_{+} = 350$ Па, наблюдается вторая фаза сжатия с $\tau_{2+} = 15$ мин.

В работе [1] обсуждался механизм образования ДАВ, для указанных выше извержений. Первый полупериод ДАВ от извержений вулканов Мон – Пеле, Безымянный и Шивелуч связан с выносом в атмосферу вулканических газов и материала фрагментации с температурой значительно выше температуры воздуха, что приводит к возникновению начального импульса длительностью несколько минут (7.7-13.2 мин), обусловленного изменением эффективного объема поднимающейся струи продуктов в атмосфере до точки зависания. Сравнительно «высокочастотная» фаза избыточного давления ДАВ от извержения вулкана Сент-Хеленс, говорит о более «жестком» источнике и его механизм будет рассмотрен ниже. «Жесткость» источника определяется теплоемкостью процесса в единицу времени.

После образования конвективной колонки плинианскую деятельность можно рассматривать как постоянно действующий источник тепла и массы, который некоторое время поддерживает в атмосфере существование струи от поверхности Земли до тропопаузы и выше. Возникает мощный подсос воздуха и формируется фаза разряжения, которая связана с суммарной мощностью тепловыделения, как с площади распространения «взрывных отложений», так выносимого в атмосферу горячего пепла во время плинианской деятельности.

Не исключена возможность подпитки струи теплом, в результате окислительных реакций вулканических газов с кислородом воздуха по периферии колонки.

Рассчитаем импульс фазы разряжения, в первом приближении, как $I = 1/2 \cdot \Delta P \cdot \tau$ (см. табл.), который будет интегрально характеризовать процесс подсоса воздуха конвективной струей как за счет удельной теплоемкости процесса, так и за счет времени действия источника. Наибольшее значение $I \approx 4.2 \cdot 10^5$ Па·с наблюдается для ДАВ извержения вулкана Безымянный, для которого и высота эруптивной колонки имеет наибольшую оценку -35 -40 км. Для извержений вулканов Шивелуч и Сент-Хеленс импульс фазы разряжения почти в два раза меньше по сравнению с вулканом Безымянным, меньше и высота подъема эруптивной колонки.

После уменьшения удельной теплоемкости источника ниже определенного порога, конвективная струя теряет высоту, происходит опускание, переохлажденных по отношению к точке равновесия, продуктов извержения. Это вызывает сжатие внутренних слоев атмосферы, которое фиксируется в виде второго максимума. Для извержения вулкана Безымянный этот процесс происходил наиболее интенсивно, т.к. при этом извержении была самая большая высота эруптивной колонки.

ДЛИННОВОЛНОВЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ОТ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ БЕЗЫМЯННЫЙ И СЕНТ-ХЕЛЕНС В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Длинноволновые акустические возмущения сопровождавшие извержения вулканов Безымянный и Сент – Хеленс были зарегистрированы национальными службами контроля за испытаниями ядерного оружия в таких странах как СССР, Япония, США и Западная Германия.

ДАВ от вулкана Безымянный были зарегистрированы микробарографами акустических станций СССР и Японии, имеющими полосу пропускания от 0.5 до $2 \cdot 10^{-3}$ Гц, на расстояниях от источника – $(3.5-12) \cdot 10^3$ км [11,18]. Форма записи ДАВ практически не изменялась с расстоянием, длительность первой фазы сжатия на этих расстояниях составлял ~8 мин, а последующих –10-12 мин [11].

На рис. 3 приведены копии записи микробарографами ДАВ, сопровождавших извержение вулкана Сент-Хеленс 18 мая 1980 г., на акустических станциях Северной Америки на расстояниях от 927 км до 3950 км [17, 15] и Японии – от 6970 до 8240 км [20].

Как показано в работе [17], где анализируется записи ДАВ микробарографом на самой ближайшей от вулкана акустической станции Berkeley ($R = 927$ км), в начале записи с интервалом ~ 6 минут выделяются два импульса длительностью 5-7 минут. Амплитуда фазы сжатия первого импульса составляла $\Delta P = 35$ Па. Следует отметить, что эти два импульса хорошо выделяются и на записях акустических станций в Японии (рис. 3в). На основании сравне-

ния модельных и наблюдаемых сигналов авторы работы [17] считают, что два импульса обусловлены начальной стадией пароксизма извержения, первый связан с образованием оползня и почти горизонтальной эксплозией, а второй с вертикальной эксплозией, хотя по времени это не согласуется с сейсмическими и визуальными данными [17].

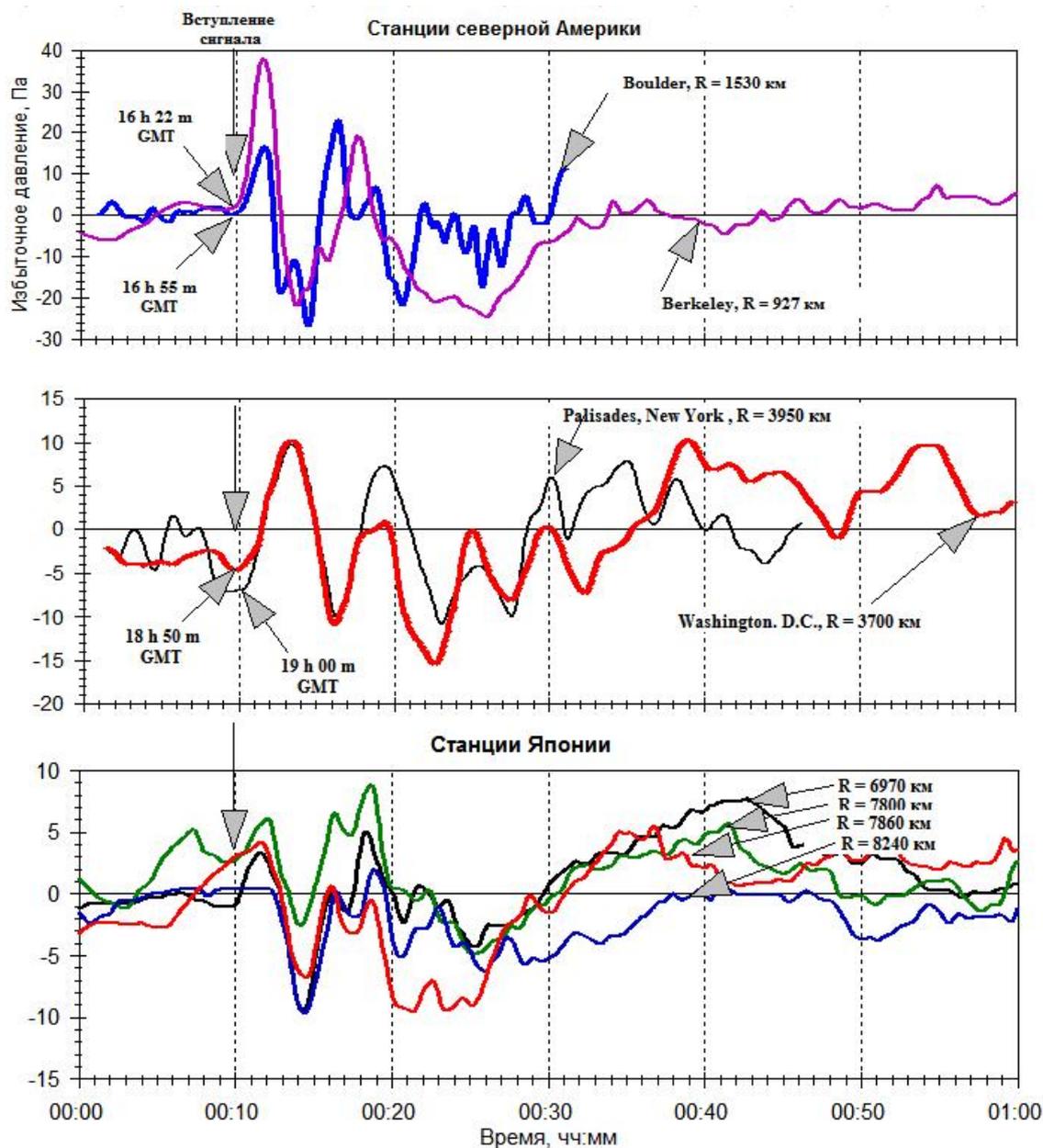


Рис. 3. Запись длинноволновых акустических возмущений, сопровождавших извержение вулкана Сент-Хеленс 18 мая 1980 г., микробарографами на акустических станциях Северной Америки [15] и Японии [20].

Наличие «высокочастотной» волны сжатия в ДАВ извержения вулкана Сент-Хеленс говорит о том, что начальный процесс этого извержения имел более «жесткий» источник по сравнению с другими извержениями типа «направленный взрыв».

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По мнению автора, все сильные эксплозивные извержения андезитовых и дацитовых вулканов с секторным отложением материала, а также в некоторых случаях и наличием «аг-

ломерата направленного взрыва» (обломочная лавина) следует, вслед за Г.С. Горшковым [5], относить к извержениям типа «направленный взрыв». Такие извержения имеют следующий обобщенный сценарий:

- после длительного перерыва активности вулкана происходит внедрение магмы в постройку;
- внедрение магмы приводит к деформациям и потере устойчивости склона вулкана;
- после потери устойчивости склона вулкана возникает обвал, порождающий каменную лавину (агломерат направленного взрыва), формируется подковообразный кратер;
- после обвала за счет резкой декомпрессии происходит фрагментация внедрившегося магматического тела, порождающая направленный взрыв, площадь отложений которого зависит от конфигурации вновь образованного кратера;
- фрагментация более глубоких частей магматической колонны, порождает плинианскую деятельность с извержением пирокластических потоков, под действием мощной пеплогазовой струи дальнейшее формирование кратера происходит за счет эрозии.

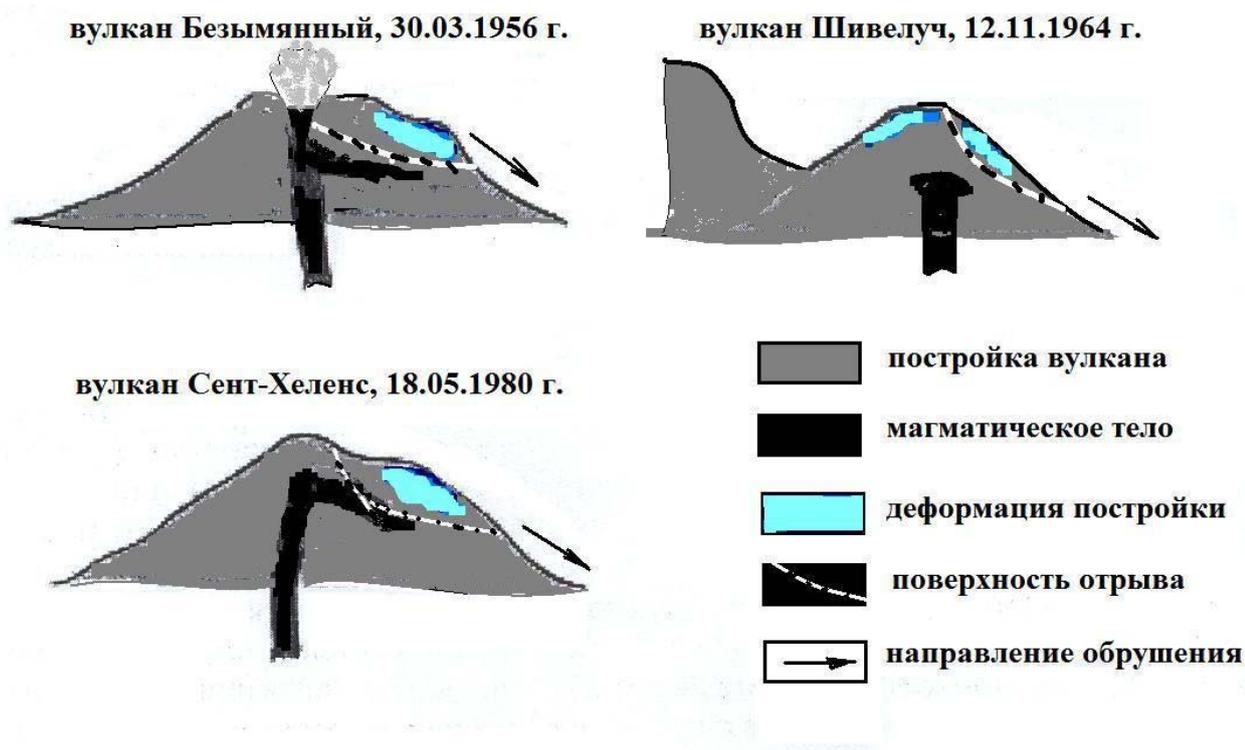


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая расположение внедрившегося магматического тела в постройку вулкана, перед извержениями типа «направленный взрыв» по [2].

В зависимости от ряда причин далеко не все стадии сценария имеют место во время извержения того или иного вулкана, а энергетическое соотношение между ними определяется многими факторами. На рис. 4 приведена схематическая иллюстрация гипотетических различий расположения внедрившейся магмы в постройку вулканов перед извержениями

«типа направленный взрыв» по [2]. Приведенные схемы подтверждается как геологическими, так и геофизическими данными.

Начало всех трех извержений происходило после землетрясений с $M = 5.1 - 5.2$ в застройке вулкана на глубине 1.5-2.0 км, что указывает на значительные деформации, происходящие при внедрении магмы. В работе [13] по акустическим и сейсмическим данным проведена реконструкция извержения вулкана Шивелуч, и убедительно показано, что после начала обвала и образования каменной лавины, только через 11 минут началось извержение. Это косвенно указывает на то, что обвал не создал резкую декомпрессию, т.к. внедрившаяся порция магмы, о чем можно с большой уверенностью говорить на основании сейсмических и акустических данных, залегала на большей глубине, по сравнению с извержениями вулканов Безымянный и Сент-Хеленс.

Анализ последовательности и энергетического соотношения между отдельными стадиями – основная задача при изучении извержений типа «направленный взрыв», а данные о волновых возмущениях в атмосфере наряду с сейсмическими являются основой для реконструкции динамики подобных извержений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3-11.
2. Белоусов А.Б., Войт Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Безымянный в 1956 г. И сходные события в мире. Последовательность эруптивных событий, отложения и механизм // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма». Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 43-48.
3. 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.
4. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) - плинианское извержение, предвалявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 116-127.
5. Горшков Г.С. Направленные вулканические взрывы // Геология и геофизика. 1962. № 12. С.
6. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. М.: Наука, 1966. 165 с.
7. Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука. 1969. С. 3-36.

8. Гостинцев Ю.А., Суханов Л.А., Солодовник А.Ф. Предельные законы нестационарных свободновосходящих турбулентных конвективных движений в атмосфере // ДАН СССР. 1980. Т. 252. № 2. С. 311-315.
9. Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н. и др. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 3. С. 573-576.
10. Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В. Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва // Препринт. Черниголовка. 1989. 34 с.
11. Пасечник И.П. Сейсмические и воздушные волны, возникшие при извержении вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. N 9. С. 1121-1126.
12. Токарев П.И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Физика Земли. 1967. № 9. С. 11-22.
13. Фирстов П.П. Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. N 4-5. С. 33-47.
14. Cristance P.L., Peterson D.W. Chronology of the 1980 eruptive activity // The 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1981. p. 17-30.
15. Donn W.L., Balachandran N.K. Mount St. Helens eruption of 18 may 1980: Air waves and explosive yield // Science. 1981. V. 213. P. 539-541.
16. Gorshkov G.S. Determination of the explosion energy in some volcanoes according to barograms // Bull. Volcanol. 1960. V. 23. ser. 2. P.141-144.
17. Mikumo T., Bolt B.A. Excitation mechanism of atmospheric pressure waves from the Mount St. Helens eruption // Geophys. J.R. Astr. Soc. 1985. N91. P. 445-461.
18. Murayama N. Propagation of atmospheric pressure waves produced by the explosion of volcano Bezymianny of March 30, 1956 and transport of volcanic ashes // Quality G. of Seismol. 1969. V. 33. N 1. P. 1-12.
19. Reed J.W. Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions // J.G.R. 1987. V. 92. P. 11979-11992.
20. Sawada Y., Wakui S., Komiya M. Atmospheric pressure wave generated by the May 18, 1980 eruption of mount St. Helens // Bul. Vol. Soc. Japan. 1982. V. 27. N 3. P.195-202.
21. The 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington // U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1981. 844. p.
22. Voight B. Time scale for the first moments of the May 18 eruption. The 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1981. p. 69-86.