

4.2. Особенности генерации и распространения акустических сигналов от вулканических эксплозий

4.2.1. Характерная частота колебаний АС и ее связь с размером кратера

Как правило, эксплозии при вулканическом и стромболианском типах извержений происходят на дне кратера глубиной от нескольких десятков до сотни метров. Продукты взрыва первоначально формируют криволинейный фронт головной волны. В дальнейшем происходит постепенное отделение фронта ударной волны от газов и взаимодействие его со стенками кратера. Образующаяся отраженная волна движется по сжатой и нагретой головной волной среде с большей скоростью, догоняет головную и сливается с ней. В результате взаимодействия головной волны с волной, отраженной от стенок кратера, происходит формирование плоского фронта ударной волны и только затем ее излучение в атмосферу. В этом случае за характерный размер источника ВУВ для вулканических взрывов, происходящих на дне кратера, по-видимому, следует считать диаметр кратера.

Зависимость частоты АС от размера кратера наглядно иллюстрирует рис. 4.10, на котором приведены АС VI типа для четырех извержений.

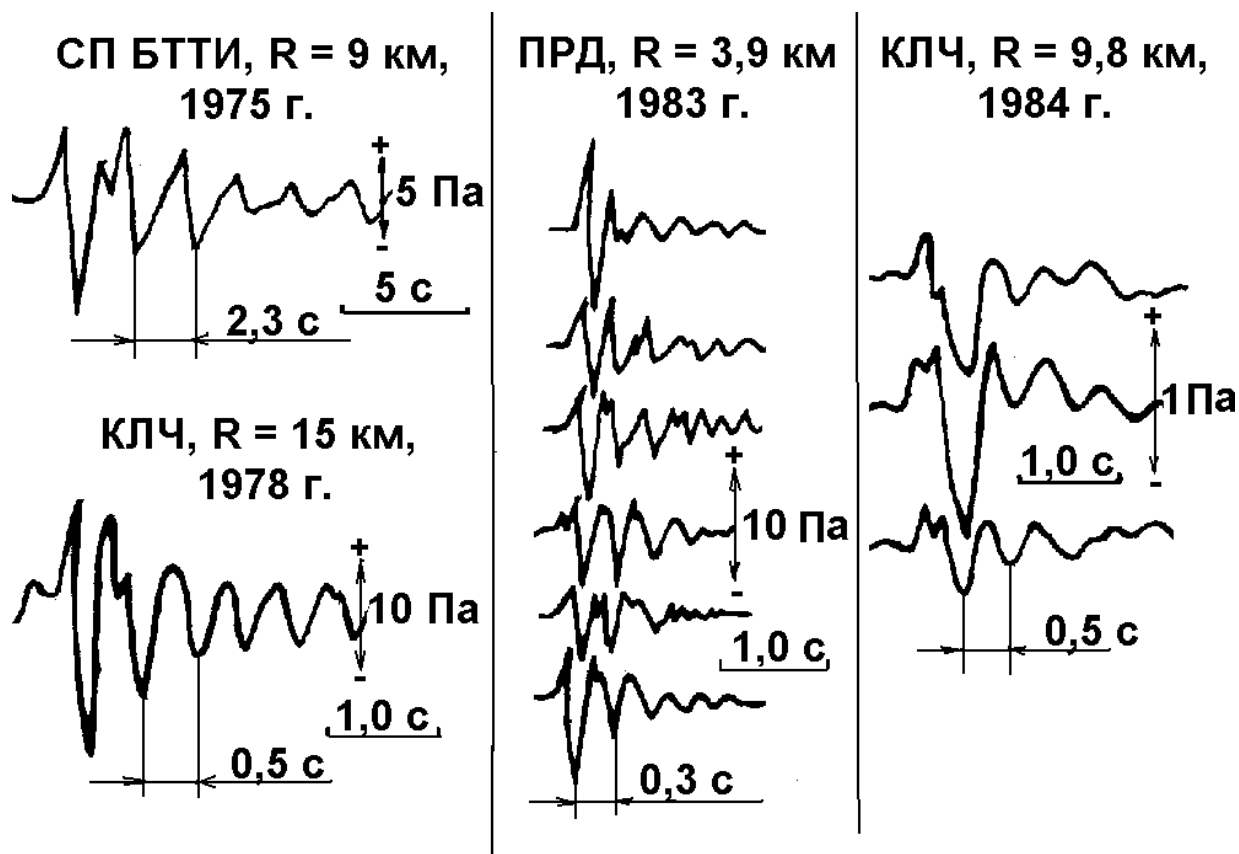


Рис. 4.10. Образцы записей АС VI типа, иллюстрирующие зависимость частоты АС от размера кратера. Сокращения: СП БТТИ – Северный прорыв Большого трещинного Толбачинского извержения; ПРД – побочный кратер Предсказанный; КЛЧ- вершинное извержение в. Ключевского.

Рассмотрим соотношение размера кратера и времени длительности фазы сжатия для некоторых извержений (табл. 4.5). В качестве радиуса кратеров вулкана Ключевского приняты оценки, полученные по данным аэрофотосъемки *В.Н. Двигало (1991)*. Для других вулканов использовались аэровизуальные оценки размеров кратеров. В первом приближении радиус сферической области повышенного давления, которая служит источником зарегистрированных АС, можно определить как $a = C_0 \cdot \tau_+$, где C_0 – скорость звука в атмосфере на высоте источника h . При этом учитывалось, что по мере удаления от источника для ВУВ происходит увеличение $\tau_+ \sim \Delta^{0,4}$ (*Цейтлин, Смолий, 1981*). Для всех извержений, приведенных в таблице 4.5, бралось среднестатистическое значение τ_+ для АС IV и V типов.

Таблица 4.5.

Радиус кратера и время длительности фазы избыточного давления τ_+ .

	Вулкан	Год извержения	h , м	Δ , км	r , м	τ_+ , с	C_0 , м/с	a , м
1	Карымский	1970- 1972	1500	3,5	100	0,5	330	129
2	Большое Толбачинское извержение Северный Прорыв Южный Прорыв	1975	1100	9,0	100	0,6	330	106
		1976	400	1,9	45	0,14	340	48
		1983	4750	14,6	160	0,5	320	160
3	Вершинный кратер Ключевского	1984	4750	9,8	40	0,3	320	38
		1987	4750	14,6	30	0,23	320	35
		1983	2100	3,9	15	0,08	330	20
4	Прорыв “Предсказанный”	1983	2100	3,9	15	0,08	330	20

Примечание. h – высота источника над уровнем моря; Δ – расстояние от источника до пункта наблюдений; r – радиус кратера по визуальным наблюдениям и данным аэрофотосъемки; a – радиус сферической области повышенного давления, вычисленный по времени действия фазы сжатия (τ_+); C_0 – скорость звука в атмосфере на высоте источника.

Из данных таблицы 4.5 следует, что относительное отклонение $\delta r = |r-a|/r$ в 6 случаях из 7 не превышает 20%. Таким образом, вычисленный радиус сферической области повышенного давления удовлетворительно совпадает с размером кратера и, основываясь на времени действия фазы сжатия τ_+ , можно оценивать изменения размеров кратера в процессе извержения.

4.2.2. Отражение режима автоколебаний взрывного процесса в акустическом и сейсмическом излучениях

Периодичность в активности извергающихся вулканов отмечалась многими исследователями на различных вулканах мира. Для вулкана Ключевского в работе (Конов, Озеров, 1988) рассмотрено проявление периодичности в активности вулкана на основании полувекового периода визуальных наблюдений и вариаций в динамике вулканического дрожания во время извержения вершинного кратера в 1983-1984 гг. Нами рассмотрено проявление квазипериодичности в активности некоторых вулканов на основании регистрации акустических сигналов всех извержений (вулкана Карымского, СП и ЮП БТТИ, вершинного кратера вулкана Ключевского) возникали периоды, когда наблюдалась квазипериодичность появления АС со скважностью $\Delta\tau = 1,5 \div 4$ с.

Уникальным случаем можно считать появление квазипериодического режима АС во время извержения СП БТТИ 14.09.1975 г.

В период с 1ч 25 мин до 6 ч 25 мин вулкан работал в пульсирующем режиме; периоды покоя чередовались с кратковременными (30÷90 с) вспышками стромболианской активности, когда регистрировались квазипериодические АС с $\Delta\tau = 1,5 \div 3,8$ с и изменением амплитуды фазы избыточного давления в пределах $\Delta P_+ = 1,0 \div 3,5$ Па.

С 7 ч 41 мин до 8 ч 07 мин наблюдалось отсутствие пауз, деятельность вулкана стабилизировалась, но также наблюдалась квазипериодичность появления АС. В качестве примера приведена запись квазипериодических АС и ВД, зарегистрированных на СП БТТИ 14.IX. 1975 г. в 7 ч 54 мин (рис.4.11).

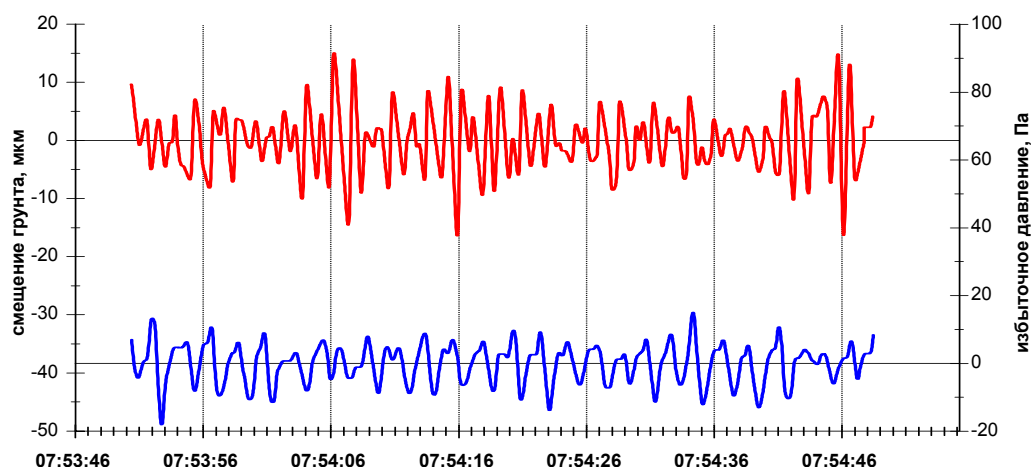


Рис.4.11. Фрагмент записи АС и ВД на станции ВДП во время извержения СП БТТИ 14.IX. 1975 г.

Для приведенного на рис. 4.11 фрагмента записи АС и ВД строились спектральная плотность мощности (СПМ) сигнала и передаточная функция, причем в качестве выходного сигнала рассматривалось ВД, а в качестве входного - акустическое излучение (рис.4.12).

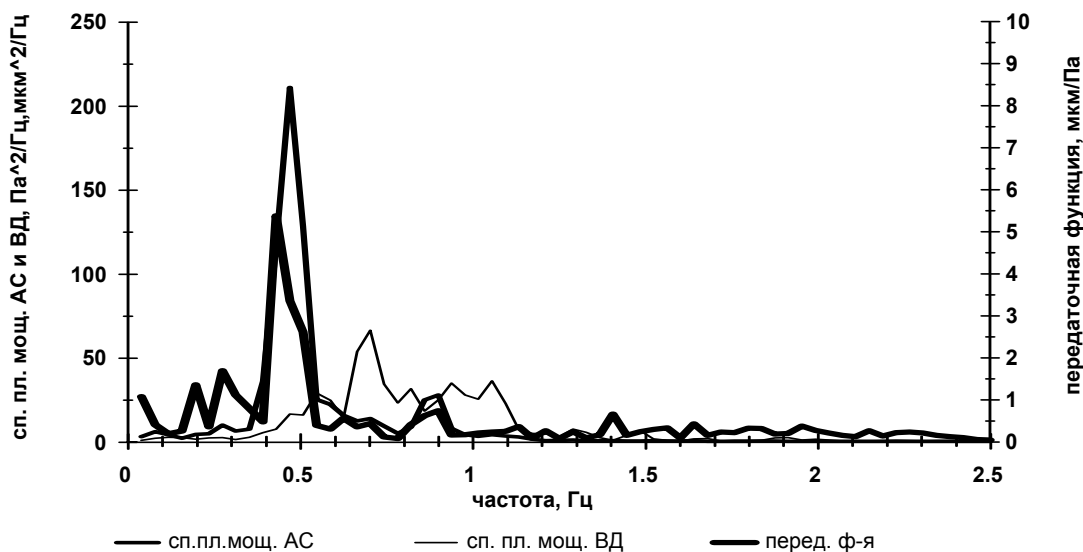


Рис.4.12. Спектральные плотности мощности акустического и сейсмического излучений для сигналов, приведенных на рисунке 4.11, и график передаточной функции.

В СПМ акустического излучения четко выделяется спектральный максимум $f = 0,48$ Гц, обусловленный периодичностью появления АС. Хотя СПМ сейсмического излучения сдвинута в область высоких частот $0,7 \div 1,1$ Гц, передаточная функция имеет четко выраженный максимум почти на максимуме частоты СПМ акустического излучения, который указывает на определенную зависимость формирования ВД от АС.

Для пульсирующего и стационарного режимов активности рассматривалась зависимость $lg \Delta \tau = f(lg \Delta P_+)$, представленная на рис. 4.13. В период работы вулкана в пульсирующем режиме наблюдается линейная зависимость между $lg \Delta \tau$ и $lg \Delta P_+$, которая рассчитана методом наименьших квадратов и имеет вид $lg \Delta \tau = 0,52 lg \Delta P_+ + 0,19$. Таким образом, чем больше скважность, тем больше энергия АС. Во время стабилизации вулканической активности амплитуда фазы избыточного давления изменялась в пределах $\Delta P_+ = 6,0 \div 12,0$ Па, при почти постоянной скважности появления АС $\Delta \tau = 2,2 \pm 0,21$ с.

Можно предположить, что такое различие в зависимости между $lg \Delta \tau$ и $lg \Delta P_+$ связано с тем, что при пульсирующем режиме происходило изменение конфигурации и размеров жерла вулкана с сохранением расхода лавового материала. В дальнейшем жерло вулкана приобрело оптимальные размеры, что привело к стабилизации $\Delta \tau$

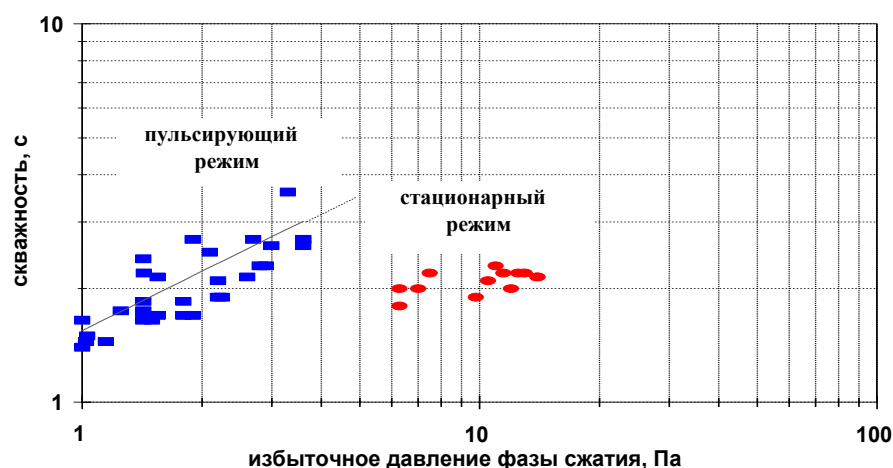


Рис. 4.13. Зависимость между скважностью появления АС (ΔT) и амплитудой фазы избыточного давления (ΔP_+) для пульсирующего (а) и стационарного (б) режимов.

Во время стромболианской активности вершинного кратера вулкана Ключевского в 1997-1999 гг. наблюдалось периодическое появление АС со скважностью 2÷4 секунды. На рис. 4.14 показан пример записи появления квазипериодических АС и соответствующего ВД на станции АПХ во время извержения вершинного кратера вулкана Ключевского 18.VII. 1988 г. Причем запись АС сдвинута на разность времен пробега акустических и сейсмических волн—31 с.

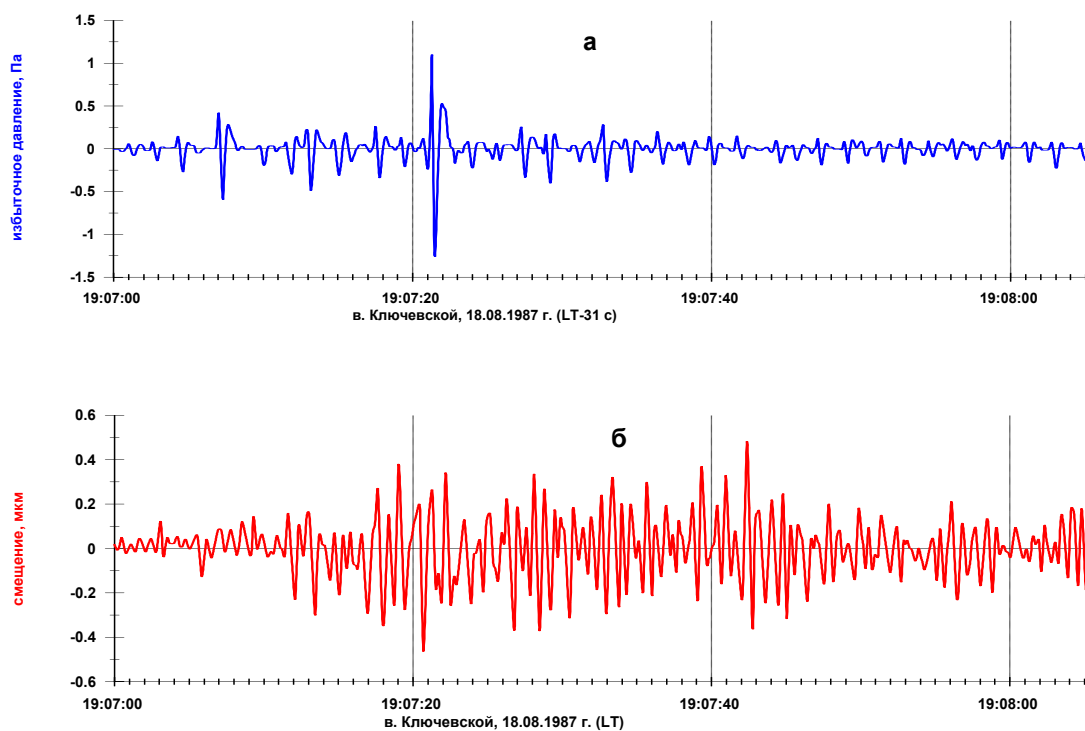


Рис.4.14. Пример записи появления квазипериодических АС и соответствующего ВД во время извержения вершинного кратера вулкана Ключевского, 1987 г.

С целью исследования взаимосвязи ВД и АС строились спектры плотности мощности (СПМ) и передаточная функция между сейсмическим и акустическим излучениями (рис.4.15. а, б).

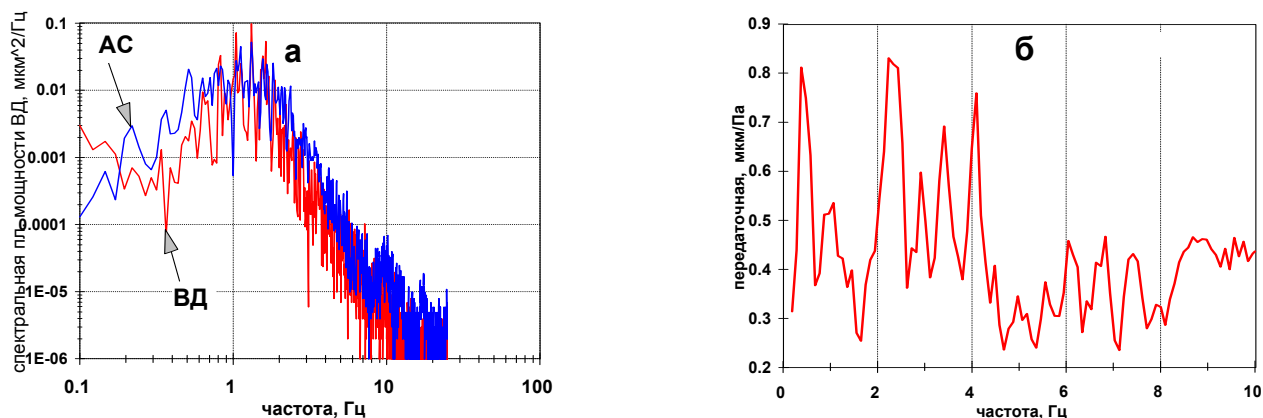


Рис.4.15. Спектральная плотность мощности для акустического и сейсмического сигналов, фрагменты которых приведены на рис. 4.13. (а), и их передаточная функция (б).

В отличие от предыдущего случая, для обоих видов излучения формы кривых спектральной плотности мощности довольно близки. Это объясняется тем, что, как показано в ряде работ (*Гордеев, 1998*), спектры ВД, сопровождающего explosивно - эффузивные извержения, различаются незначительно, а в спектрах АС частота фазы избыточного давления, формирующая высокочастотный склон, зависит от размеров кратера. При значительном отличии СПМ АС для извержений Северного прорыва БТТИ и вершинного кратера в. Ключевского, для последнего в передаточной функции также выделяется максимум на частоте скважности АС $f = 0,45$ Гц. Так как в СПМ вулканического дрожания спектральный пик на частоте скважности АС не выделяется, но проявляется в передаточной функции, можно предполагать не прямое, а опосредованное влияние процесса разрушения газовых пузырей на формы

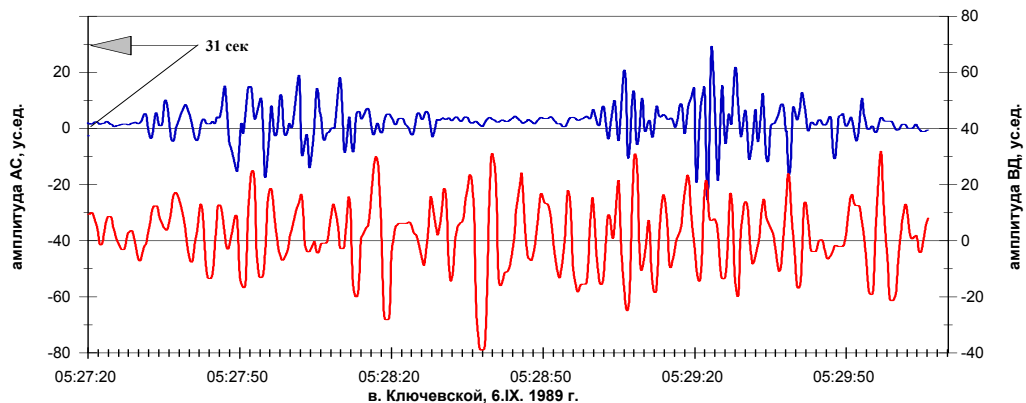


Рис. 4.16. Фрагмент записи АС и ВД (извержение в. Ключевского 6.IX. 1989 г.), для которых построены по среднеквадратичным значениям огибающие, приведенные на рис. 4.17.а.

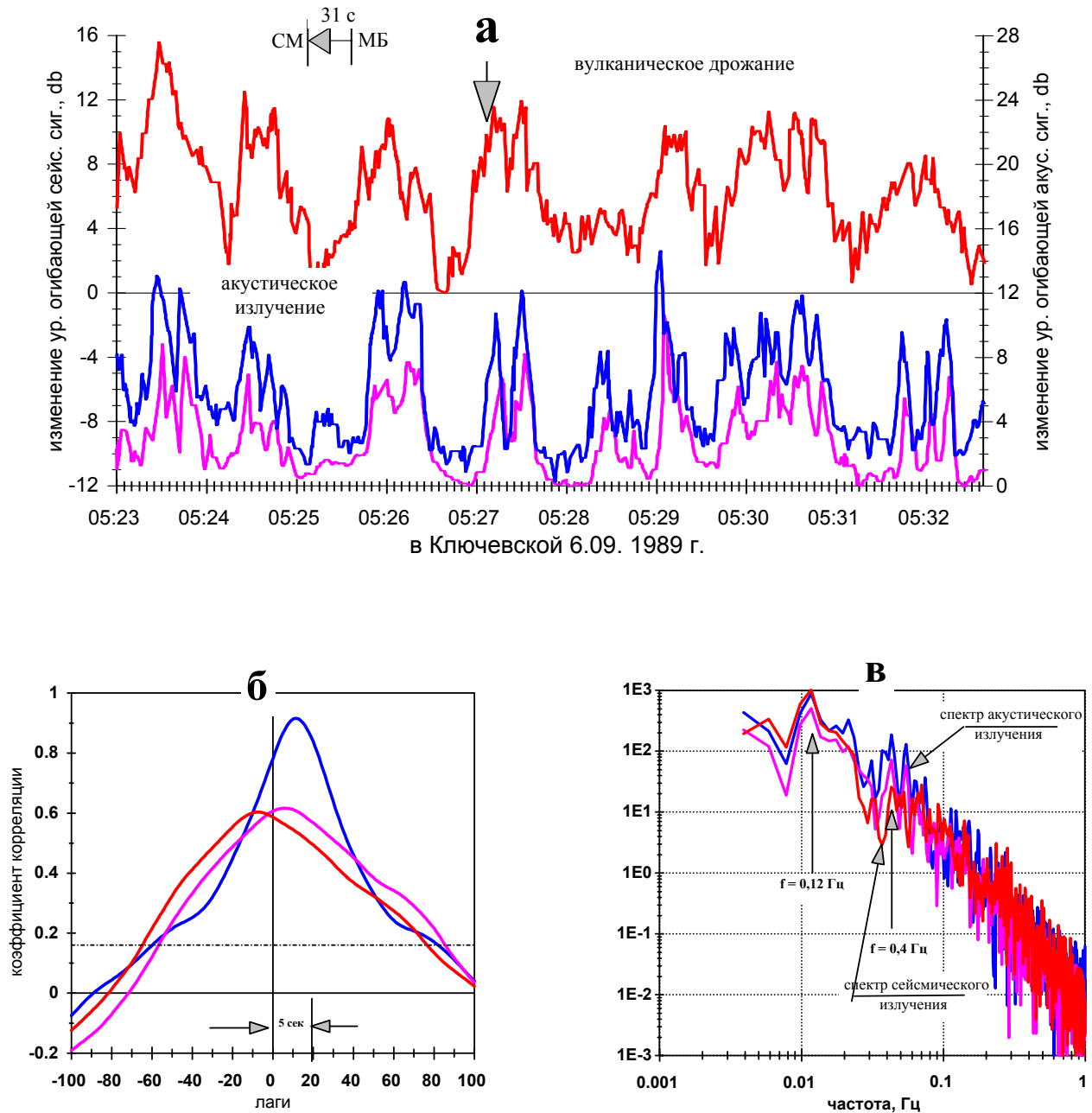


Рис. 4.17. Фрагмент огибающих (среднеквадратическое значение) ВД и АС (а), функция их взаимной корреляции (б) и спектральная плотность мощности АС и ВД (в). Стрелкой на рис. а показан момент начала записи АС и АД, приведенных на рис. 4.15.

В определенные периоды извержений вершинного кратера вулкана Ключевского возникали квазипериодические пульсации активности с периодом $40 \div 80 \text{ с}$. Когда после некоторого периода затишья над кратером вулкана наблюдались лавовые фонтаны, хорошо наблюдаемые в ночное время, то одновременно возрастала амплитуда ВД, и регистрировались АС. На рис. 4.16 приведен фрагмент записи АС и ВД в момент активизации извержения вершинного кратера Ключевской 6.IX.1989 г., на котором хорошо видны квазипериодические АС со скважностью $\Delta\tau \approx 1,5\text{с}$.

Для сигналов длительностью 10 минут вычислялись уровни среднеквадратического значения смещения почвы и избыточного давления для двух микробарографических каналов (рис. 4.17а). Наблюдается хорошая корреляция: $r = 0,95$ между уровнем огибающих обоих акустических каналов, а также между огибающими сейсмического и акустического сигналов: $r = 0,6$, при $r = 0,18$ для 95% уровня доверия (рис.4.16.б). Спектральные плотности мощности для всех трех сигналов идентичны и имеют четко выраженный спектральный максимум $f = 0,12$ Гц (1 мин 23с), соответствующий среднему периоду появления фонтанов лавы над кратером вулкана (рис. 4.17в). Этот период близок к одному из пяти основных периодов в эруптивной активности вулкана Ключевского, выделенных в работе (Конов, Озеров, 1988).

Приведенные примеры появления квазипериодичности АС указывают на возможность возникновения автоколебательных режимов в процессе движения магмы по магматическому каналу к дневной поверхности. Причем автоколебательные режимы при определенных условиях могут возникать на разных уровнях глубины магматического канала. Не исключено, что автоколебательный режим, имеющий характерное время $1,4 \div 4$ секунды, связан с волной разряжения, которая, возникая во время разрушения газового пузыря на поверхности, движется вниз по магматическому каналу и приводит к дегазации магмы, что способствует возникновению нового пузыря. Таким образом, в этом автоколебательном режиме с параметрическим возбуждением обратной связью является волна разрежения.

Автоколебательный режим второго уровня с характерным временем $40 \div 90$ с, по-видимому, также имеет параметрическое возбуждение, связанное с процессом запаздывания равновесного состояния летучих газов по мере подъема магматической колонны. Подъем лавовой колонны после серии выбросов приводит к тому, что вновь поднявшаяся с глубины на новый гипсометрический уровень порция магмы не успевает дегазироваться и наступает пауза, после которой возникает новый цикл «вскипания» магмы.

В данном разделе отмечены характерные особенности генерации АС, связанные с автоколебательными режимами извержений стромболианского типа, которые указывают на то, что при *барботирующем* режиме двухфазного потока (магма - газ) начинает работать газодинамический источник. При этом происходит «закачка» части энергии движущегося потока в грунт (вулканическое дрожание) и создается источник акустических сигналов на срезе кратера за счет разрушения газовых пузырей.

4.2.3. Распространение АС в ближней зоне от взрывов вершинного кратера вулкана Ключевского

Регистрация АС осуществлялась у подножия вулканических аппаратов на расстояниях от 3,5 до 15 км от кратера. Причем источник, как правило, был значительно выше пункта наблюдения. При распространении АС в неоднородном движущемся слое атмосферы форма его подвержена изменениям в результате рефракции и отражений, поэтому в пограничном слое атмосферы хорошо выражена связь между формой сигнала на данном расстоянии и стратификацией скорости ветра и температуры. Для оценки параметров взрывного процесса необходимо уметь из регистрируемого сигнала выделить очаговый импульс. С этой целью исследовались особенности распространения акустического импульса от вулканических взрывов, происходивших в вершинном кратере вулкана Ключевского (*Чунгузов, Фирстов 1992*). В течение 1987-1988 гг. в вершинном кратере вулкана Ключевского работало от одного до трех жерл. Обычно в течение многих часов АС сохранял свою привычную биполярную форму (см. разд. 4.1), но в отдельные периоды регистрации форма АС усложнялась и состояла из двух, а в некоторых случаях из трех импульсов. На рис. 4.18. приведены АС, зарегистрированные на станции АПХ в августе 1987 г., а также скоростные разрезы нижней тропосферы на трассе в. Ключевской - Апахончич, построенные по данным зондирования атмосферы на зональной метеорологической станции в г. Ключи (см. рис. 2.1).

На рис. 4.18 видно, что в некоторые моменты времени наблюдается очень быстрая смена формы импульса. Так, в 05 ч 23.08. регистрировались АС, состоящие из одного биполярного импульса. После 11 ч 30 мин форма АС изменилась: на биполярный импульс через 0,8 секунд накладывается U – образный импульс, появление которого обусловлено инверсией скорости звука (отмечена на рис. 4.18 заштрихованным квадратом) на высоте около трех километров. Общая длительность АС, состоящего из двух импульсов, могла в течение дня существенно изменяться за счет изменения времени запаздывания второго импульса относительно первого ($\Delta t = A_1 - A_2$). На рис.4.19 приведены изменения в течение дня 10.08.1987 г. температуры приземного слоя воздуха, разности прихода прямой и отраженной волны и амплитуды волны сжатия. В этот день Δt изменилось от 0,5 сек. в 10 ч до 0,9 с в 15 ч.

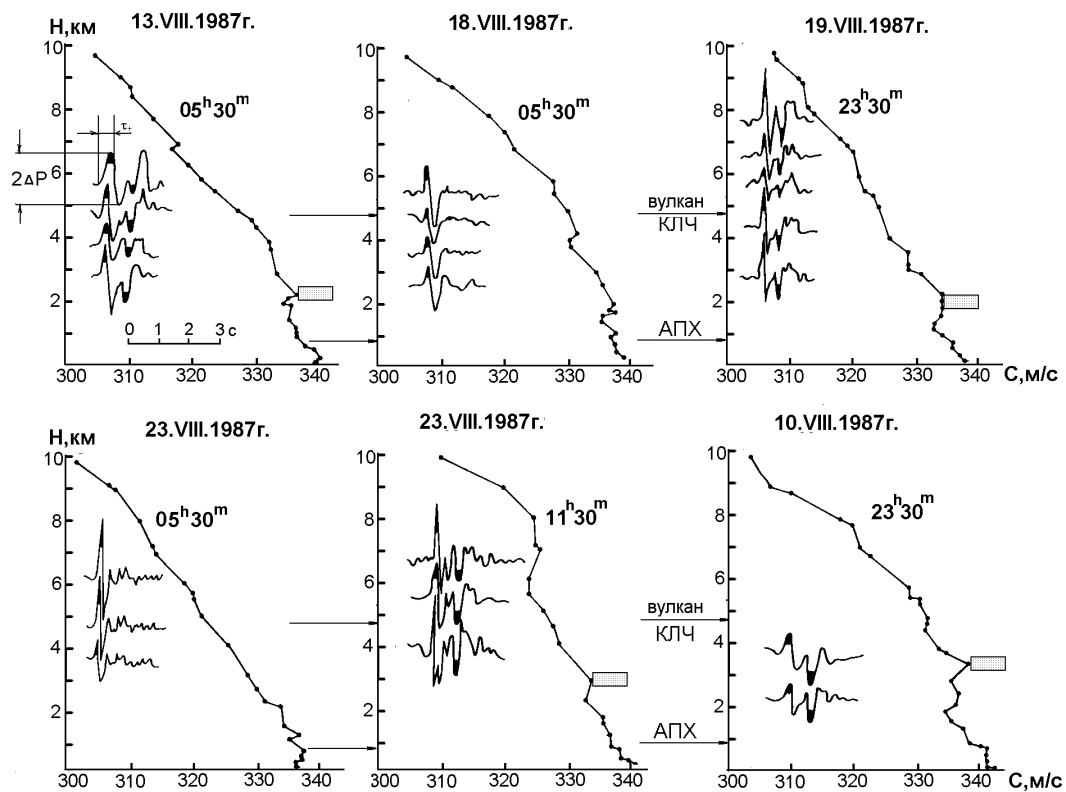


Рис. 4.18. Образцы записей АС на станции Апахончич в период с 10 по 23.08. 1987 г. и скоростные разрезы звука нижней тропосферы на трассе КЛЧ-АПХ, рядом с которыми указано время зондирования. Заштрихованным квадратом помечены инверсии скоростных разрезов.

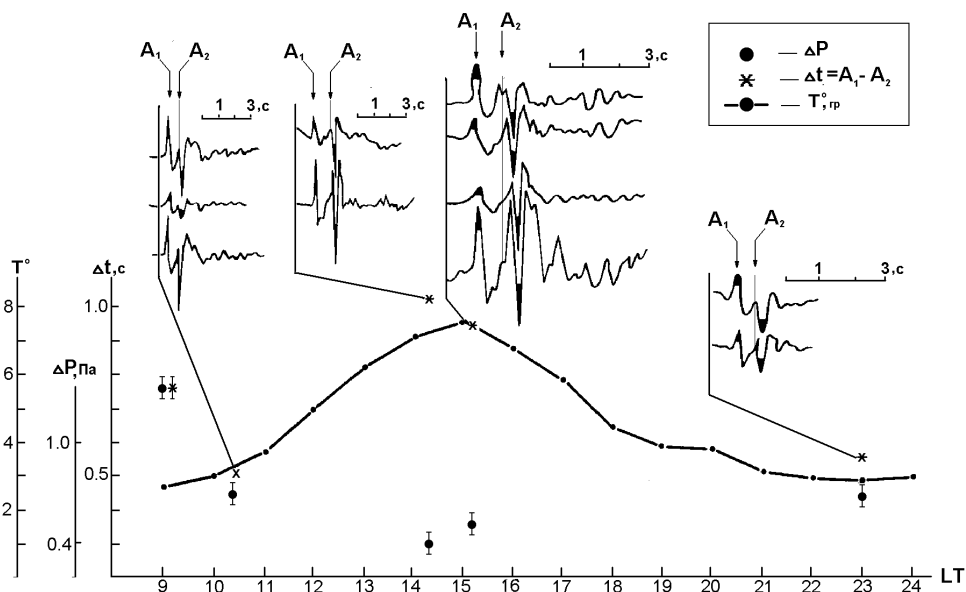


Рис. 4.19. Изменение в течение дня 10.08.1987 г. температуры приземного слоя воздуха, разности прихода прямой и отраженной волны и амплитуды волны сжатия.

Такое изменение Δt может быть объяснено вариациями высоты пограничного слоя атмосферы и перепадом скорости звука на его высоте. В пограничном слое в течение дня идет обмен количеством движения, теплом, паром и т.д. между земной поверхностью и атмосферой, а в ночное время он часто характеризуется инверсией температуры у его кровли. Мощность пограничного слоя колеблется от 0,2 до 2 км (Хргиани, 1986).

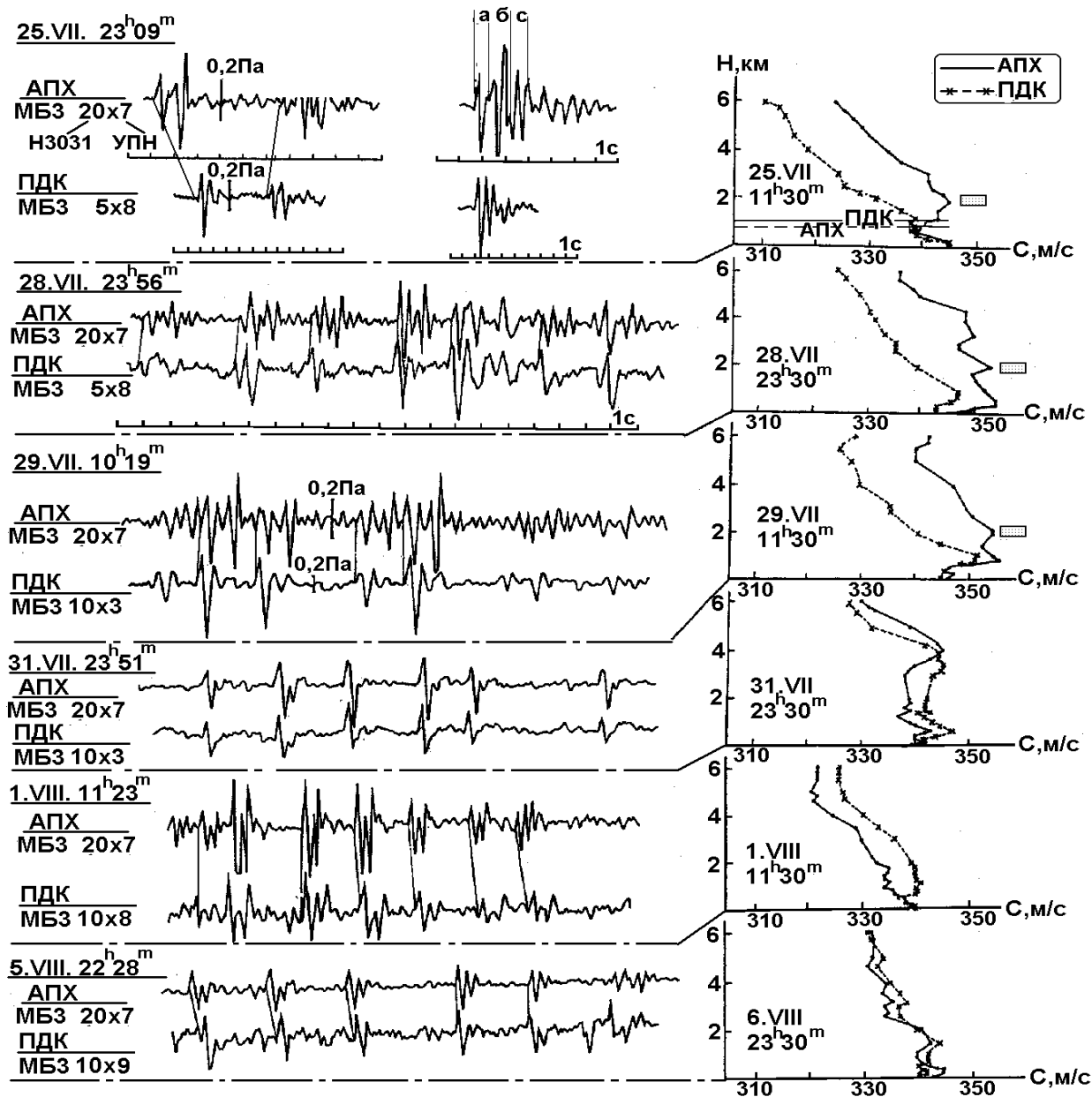


Рис. 4.20. Образцы синхронных записей АС, зарегистрированных в двух равноудаленных пунктах в июле- августе 1988 г. и скоростные разрезы нижней тропосферы на трассах КЛЧ-АПХ, КЛЧ- ПДК. В верхней части рисунка а-с – импульсы АС: биполярный (а); обращенный биполярный (б); U-образной формы (с).

В июле – августе 1988 г. было выполнено шесть синхронных сеансов на двух равноудаленных станциях АПХ и ПДК, расположенных под углом 73° относительно вершины вулкана (см. рис. 3.). Как видно на рис.4.20, для первых трех сеансов наблюдаются существенные различия в форме АС на этих станциях.

Так, 25.07 на станции АПХ сигнал состоял из биполярного (а) и обращенного биполярного (б) импульсов. Для наиболее сильных сигналов наблюдался и третий импульс U-образной формы (в). В то время как на станции ПДК АС состоял из одного биполярного или U-образного импульса. 29.07 на ст. АПХ сигнал был представлен двумя биполярными импульсами, а на ст. ПДК только одним. Для остальных случаев форма сигналов на обеих станциях была идентична.

Взаимное расположение источника и пункта регистрации в сочетании с рельефом вносит свою специфику в распространение АС от взрывов вершинного кратера вулкана Ключевского. На рис. 4.21. показан профиль земной поверхности на трассе КЛЧ-АПХ. Так как источник приподнят над пунктом регистрации на 4 км, то звуковое поле будет складываться из прямой и отраженной от склона волны.

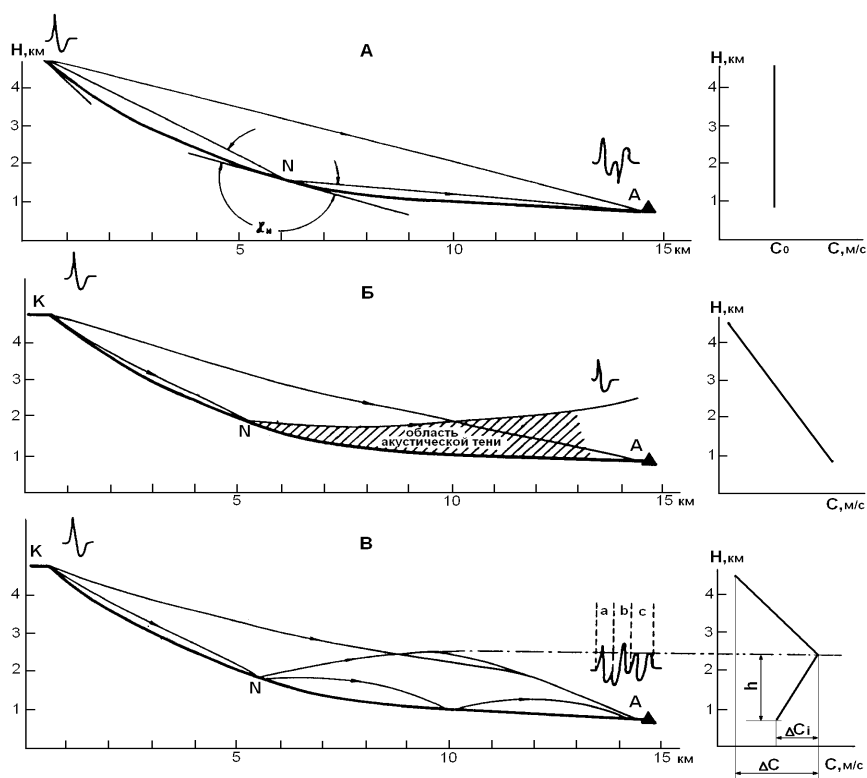


Рис. 4.21. Основные лучевые траектории на трассе КЛЧ-АПХ и возможные варианты скоростного разреза нижней тропосферы: А –однородная тропосфера; Б- неоднородная тропосфера с отрицательным градиентом скорости звука; В- неоднородная тропосфера с инверсией скорости звука. Заштрихована область акустической тени для отраженного от склона сигнала.

В работах (Чунгузов, 1984; Чунгузов и др.,1988) рассмотрены теоретическая модель и экспериментальные данные по распространению АС в пограничном слое атмосферы. В этих ра-

ботах показана связь между формой сигнала на данном расстоянии и стратификацией скорости ветра и температуры. Согласно представлениям, изложенным в работе (Чунчузов и др., 1988), в нашем случае возможны три основных варианта распространения звукового луча в зависимости от скоростного разреза нижней тропосферы (рис. 4. 21)

1. Случай однородной тропосферы до высот источника ($C_0 = \text{const} = 330 \div 340$ м/с). В этом случае, исходя из равенства углов падения и отражения, прямой импульс, распространяющийся вдоль луча, пройдет путь $KA = 14,8$ км, а отраженный и обращенный на π импульс $KN + NA = 6,2 + 8,8 = 15$ км. При этом временная задержка между приходом прямого и однократно отраженного импульсов составит $\sim 0,5$ с.

2. Случай неоднородной нижней тропосферы с отрицательным градиентом (рис. 4.20 в). Из-за уменьшения скорости звука с высотой лучи KA и KN испытывают слабую рефракцию. Перепад скорости звука ΔC с высоты A до высоты источника K в нашем случае, как показали многочисленные скоростные разрезы, составит $4 \div 20$ м/с; тогда изменение угла χ из-за рефракции луча KN будет $\cos \chi_N / \cos \chi_K = (331 \div 315) / 335 = 0,99 \div 0,94$. При $\chi_K = 18^\circ$ это изменение соответствует $2 \div 8^\circ$, т.е. точка отражения N будет смещаться по склону незначительно, оставаясь на высоте $1,2 \div 2$ км над уровнем моря. В силу специфики рельефа в этом случае пункт регистрации попадает в зону тени отраженного импульса и регистрируется только прямой импульс.

3. Случай неоднородной нижней тропосферы с инверсией скорости звука. Если точка отражения N будет лежать ниже высоты слоя инверсии скорости звука, то после отражения звукового луча в слое под инверсией может произойти его «захват» при условии $\chi_N < \chi_{\max} = \arcsin (\Delta C_i / C_0)^{0,5}$. Согласно работе (Чунчузов, 1984), дальнейшее распространение отраженного от склона импульса будет определяться эффективной «толщиной» волновода:

$$M_0 = 4\pi \left(\frac{\Delta C_i}{C_0} \right)^{0,5} \frac{f}{C_0} h,$$

где f - частота падающего импульса. В случае «широкого» волновода ($M_0 \gg 1$) в пункт регистрации придет импульс, однократно отразившийся от слоя скоростной инверсии. Причем при полном внутреннем отражении луча происходит потеря его геометрического набега фазы на $-\pi/2$. При малой «ширине» волновода ($M_0 \approx 1$) импульс может расплываться и превращаться в небольшой цуг колебаний.

Сравнение формы зарегистрированных АС со скоростными разрезами на трассах (см. рис. 4.18 ÷ 4.20) показывает удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с теоретической моделью волноводного распространения звука. Действительно, на рисунках видно, что отраженный от склона импульс присутствует в тех случаях, когда скоростной разрез нижней тропосферы имеет инверсию на высотах $1,8 \div 2,7$ км над уровнем моря. В случае

отрицательного градиента скорости звука на участке *NA* пункт регистрации попадает в зону тени отраженного от склона импульса, и регистрируется только прямой импульс.

В таблице 4.6. приведены среднестатистические параметры АС от взрывов вершинного кратера вулкана Ключевского, зарегистрированные синхронно на обеих станциях, за период 25.VII÷06.VIII 1988 г., а также параметры скоростных разрезов на трассах на соответствующие даты.

Таблица 4.6.

Основные параметры АС от взрывов вершинного кратера вулкана Ключевского, синхронно зарегистрированные на станциях АПХ и ПДК, и параметры скоростных разрезов на трассах.

№	Дата	Время, ч	$2\Delta P_{АПХ}/2\Delta P_{ПДК}$			Станция	τ_+ , с			Δt , с			Параметры скоростного разреза, м/с			h, км
			N	m	σ		N	m	σ	N	m	σ	C_0	ΔC	ΔC_i	
1	25.07	23	18	0,67	0,18	АПХ	16	0,17	0,02	17	0,99	0,04	340	11	5	1,3
						ПДК	21	0,23	0,02	-	-	-	338	23	-	-
2	28.07	23	21	0,78	0,15	АПХ	15	0,22	0,02	15	1,06	0,08	352	11	3	1,3
						ПДК	16	0,20	0,03	-	-	-	347	18	-	-
3	29.07	10	17	0,60	0,18	АПХ	15	0,23	0,02	15	1,35	0,08	355	13	2	1,4
						ПДК	18	0,29	0,02	-	-	-	348	19	-	-
4	31.07	23	14	0,50	0,07	АПХ	21	0,21	0,01	-	-	-	341	0	-	-
						ПДК	15	0,16	0,01	-	-	-	336	15	-	-
5	01.08	11	17	0,63	0,10	АПХ	16	0,15	0,01	18	0,51	0,03	336	15	2	0,5
						ПДК	17	0,17	0,02	19	0,80	0,04	340	12	2	0,7
6	06.08	23	-	-	-	АПХ	15	0,14	0,01	-	-	-	340	9	-	-
						ПДК	16	0,14	0,02	-	-	-	342	9	-	-

Примечание. $2\Delta P_{АПХ}/2\Delta P_{ПДК}$ – отношение двойной амплитуды прямого импульса; τ_+ – время длительности фазы сжатия прямого импульса; Δt – время запаздывания отраженного импульса относительно прямого; C_0 – скорость звука в точке регистрации; ΔC – перепад скорости звука между точкой регистрации и источником; ΔC_i – перепад скорости звука в зоне инверсии; h – высота инверсионного слоя над пунктом регистрации.

В качестве параметров АС брались: длительность фазы сжатия прямого импульса (τ_+), время запаздывания отраженного импульса относительно прямого (Δt), отношение двойной амплитуды давления ($2\Delta P = \Delta P_+ + \Delta P_-$) для прямого импульса на станциях АПХ и ПДК ($2\Delta P_{АПХ}/2\Delta P_{ПДК}$). В таблице 4.6 также приведено количество замеров (N), математическое ожидание (m) и среднеквадратичное отклонение (σ).

При квазиоднородной тропосфере 01.VII время запаздывания прямого и отраженного импульса составляет $\Delta t_{АПХ} = 0,5$ и $\Delta t_{ПДК} = 0,8$ с. Для случаев инверсии на большей высоте время запаздывания несколько увеличивается: $\Delta t = 1,0\div 1,3$ с (25, 28, 29, VII.). Длительность фазы сжатия колеблется от 0,14 до 0,29 с., причем τ_+ иногда существенно различается на

станциях. Так, 31.VII $\tau_{АПХ} = 0,21$ с, $\tau_{ПДК} = 0,16$ с. Наименьшая длительность фазы сжатия зарегистрирована 06.VIII и составляет 0,14 с. Различия τ_+ на разных станциях зависят от многих причин и требуют специальных исследований.

Отношение $2\Delta P_{АПХ}/2\Delta P_{ПДК}$ мало зависит от стратификации скорости звука и составляет $0,5 \div 0,8$, что может быть объяснено сравнительно большой длиной волны импульса ($\lambda = C_0 \cdot T = 100 \div 200$ м), на распространение которого мало влияют мелкие неоднородности. Эффективная «толщина» волновода на трассе КЛЧ-АПХ для случаев 1÷3 составляет $M=10 \div 18$, т.е. волновод широкий и в пункт регистрации должен приходиться только отраженный от склона, а затем от слоя инверсии импульс, что и наблюдалось в действительности.

4.2.4. Нелинейные колебания в жерле вулкана Ключевского в 1983 г.

В период извержения вулкана Ключевского в марте - июне 1983 г. регистрировались акустические сигналы (АС), связанные с взрывной деятельностью вершинного кратера и побочного кратера “Предсказанный”. Активность вершинного кратера выражалась в газовых выбросах с небольшой примесью пепла, которые происходили из жерла диаметром около 120 м (Хренов и др., 1985). Почти непрерывная регистрация АС во время этого извержения проводилась на станции “Апахончич” (АПХ), которая располагалась на расстоянии 14,6 км от вершины вулкана (см. рис.3.). Зарегистрированные в этот период АС от взрывов вершинного кратера имели специфическую форму. По кинематическим параметрам АС в 1983 г. существенно отличались от АС, сопровождавших извержения 1978, 1984, 1987÷1989 гг. По форме записи на станции АПХ АС этого извержения можно условно разбить на три типа.

Первый тип (АС₁⁸³) представлял собой сдвоенный или строенный импульс с избыточным максимальным давлением в волне сжатия $\Delta P_+ \approx 10$ Па. Первый удовлетворительно сбалансированный импульс с длительностью положительного и отрицательного полупериодов $\tau = 0,5$ с значительно больше второго, приходящего с запаздыванием на $2 \div 2,2$ с. У второго импульса отрицательная фаза давления, как правило, превосходила положительную (рис.4.22). Второй импульс нельзя отнести к импульсу, отраженному от инверсионного слоя, потому что, как было показано в разделе 4.2.3, максимальное время запаздывания в этом случае составляло 1,3 с.

Второй тип (АС₂⁸³) – также сдвоенный или строенный импульс. Кроме того, на него накладываются затухающие колебания с $f = 1,5$ и 3 Гц.

Третий тип (АС₃⁸³) – цуг из трех квазисинусоидальных колебаний с $f = 1$ Гц. После первого цуга приходил второй, слабее основного в $2 \div 4$ раза (рис.4.22).

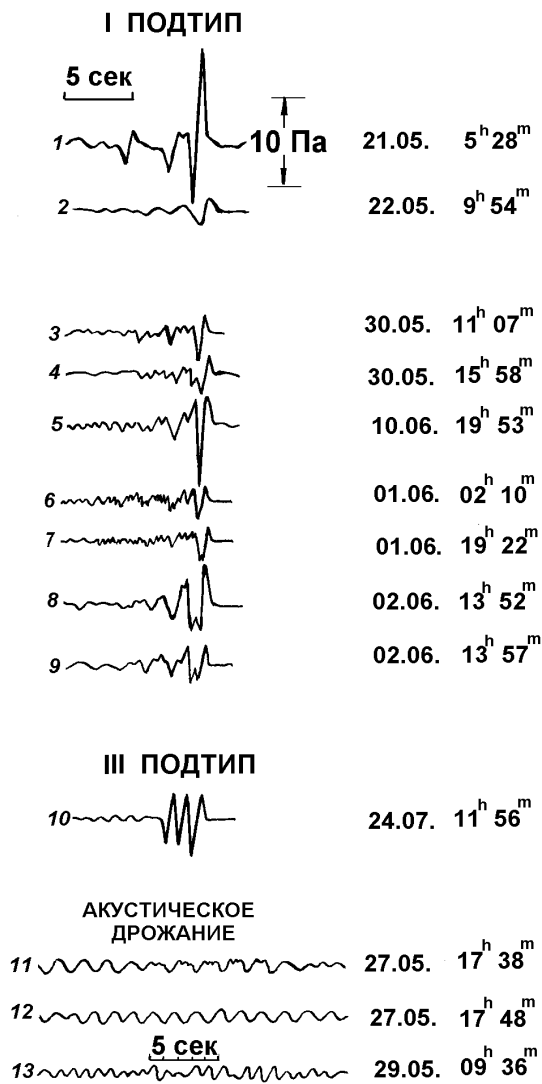


Рис. 4.22. Образцы записей АС от вершинного кратера вулкана Ключевского, зарегистрированных в мае - июне 1983 г.

Особенностью всех АС⁸³ являлось постоянное время фазы избыточного давления первого вступления $\tau_+ = 0,5$ с, которое не зависело от типа АС, а также от амплитуды ΔP_+ , изменяющейся от 1 до 10 Па .

Кроме того, во время непрерывного истечения газа из вершинного кратера (визуальные наблюдения со станции АПХ) регистрировались квазисинусоидальные колебания («акустическое дрожание» – АД) с $f = 0,5 \div 1,0$ Гц длительностью до нескольких минут (рис.4.21).

Для АС⁸³ и АД рассчитывались амплитудные спектры $S(\omega)$, которые приведены на рис. 4.23. Различия в форме амплитудных спектров подтверждают правомерность деления АС на типы. В целом же максимумы спектральных плотностей АС и АД приурочены к четырем хорошо выраженным частотам: $f_1 = 0,5$; $f_2 = 1,0$; $f_3 = 1,5$; $f_4 = 3$ Гц, причем; $f_3/f_1 = f_4/f_2 = 3$, а

$f_2/f_1=2$. Для АС⁸³ и АД вблизи доминирующего максимума с $f=1,0$ Гц появляются две близкие частоты, которые создают цуги колебаний.

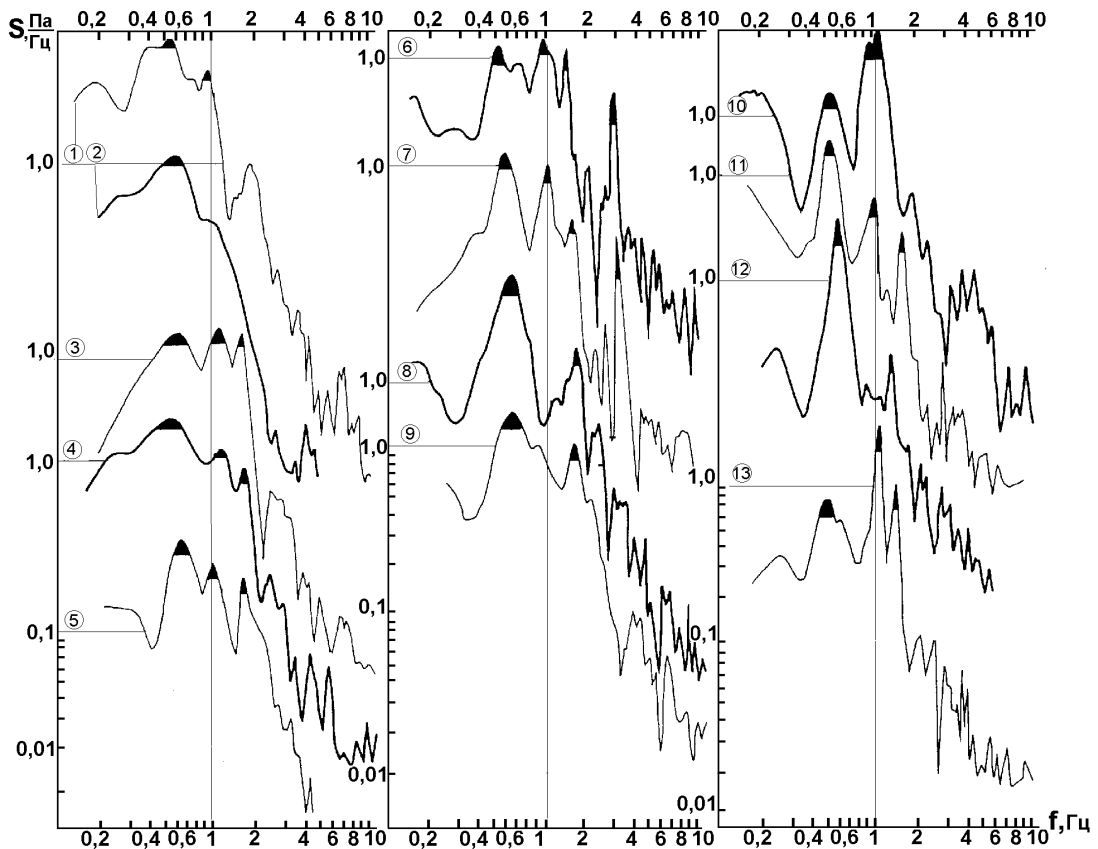


Рис.4.23. Амплитудные спектры акустических сигналов, зарегистрированных во время эксплозий вершинного кратера в. Ключевского в 1983 г. Номер спектральной кривой соответствует номеру АС, приведенных на рис. 4.16.

Набор характерных частот, наблюдаемый в спектрах АС, хорошо объясняется набором резонансных частот, даваемых теорией нелинейных колебаний в полуоткрытой трубе. Изложим кратко эту теорию, следуя работе (Красильникова, Крылова 1984), в которой считается, что на одном конце $Z \equiv 0$ трубы длиной L имеется поршень, движущийся по закону косинуса

$s = \cos \omega t$ и возбуждающий колебания идеального газа с адиабатой $p = p_0 \left(\frac{c}{c_0} \right)^2$. Возмущения

давления и плотности на открытом конце $Z = L$ отсутствующими.

Эту задачу удобно решать не в эйлеровых координатах (t, Z) , а в лагранжевых (t, ξ) , полагая $z = \xi + s(t, \xi)$, где s – смещение частицы из начального положения $\xi = z_0$. Тогда имеем уравнение

$$c_0 = c \left(1 + \frac{\partial s}{\partial \theta} \right), \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = C_0^2 \left(1 + \frac{\partial s}{\partial \theta} \right)^{-1-2} \frac{\partial^2 s}{\partial \theta^2}, \quad (4.5)$$

где $C_0 = \sqrt{2p_0/c_0}$ - невозмущенная скорость звука. Считая смещение малым, полагаем $s = s^{(1)} + s^{(2)}$, где $s^{(1)}$ - величина первого, а $s^{(2)}$ - второго порядка малости, для которых из (4.5) находим уравнения

$$s_u^{(1)} - C_0^2 s_{oo}^{(1)} = 0, \quad s_u^{(2)} - C_0^2 s_{oo}^{(2)} = -(\gamma + 1)C_0^2 s_{oo}^{(1)} s_o^{(1)}. \quad (4.6)$$

Решение, удовлетворяющее граничным условиям, имеет вид

$$s^{(1)} = \varepsilon \cos \varphi \cos \omega t, \quad s^{(2)} = \gamma/16 (\gamma + 1) k \varepsilon^2 [f(\xi) + g(\xi) \cos \omega t], \quad (4.7)$$

где для краткости введены обозначения

$$\varphi = k(L - \xi), \quad k = \omega / C_0, \quad \varepsilon = a / \cos \varphi_0, \quad \varphi_0 = kL, \quad (4.8)$$

а также функции

$$f = 2k\xi + \sin 2\varphi - \sin 2\varphi_0, \quad g = \frac{\sin 2k\xi}{2 \cos 2\varphi_0} - k\xi \cos 2\varphi. \quad (4.9)$$

Как видим, в решениях (4.8, 4.9) встречаются два знаменателя $\cos \varphi_0$ и $\cos 2\varphi_0$, которые могут обращаться в нуль, если частота ω близка к одной из частот либо “резонансов первого порядка”: $\omega_1, 3\omega_1, 5\omega_1 \dots$, либо “резонансов второго порядка”: $\omega_1/2, 3\omega_1/2, 5\omega_1/2, \dots$, где $\omega_1 = \pi C_0 / 2L$.

Таким образом, имеем набор резонансных частот

$$\omega_{res} = (1/2, 1, 3/2, 5/2, 3, 7/2)\omega_1, \quad (4.10)$$

в котором отсутствуют целые четные члены ряда. Учет слагаемых порядка $\varepsilon^3, \varepsilon^4$ привел бы к “резонансам третьего порядка” и более высоким, но они, видимо, малы.

Близость теоретического набора (4.10) к наблюдаемому набору частот в спектрах АС⁸³, по нашему мнению, указывает на применимость рассмотренной модели полуоткрытой трубы к случаю извержения вершинного кратера Ключевского вулкана в мае-июне 1983 г., хотя, конечно, модель не учитывает силу тяжести, общее движение пепло-газовой струи и другие реальные факторы в жерле вулкана. Можно предположить, что вулканические взрывы на дне жерла порождают колебания достаточно широкого частотного диапазона, но в наибольшей степени на такой “белый шум” должны откликнуться именно частоты набора (4.10).

Таким образом, наблюдения АС являются полезным дополнением к традиционным сейсмологическим исследованиям. Непрерывная регистрация АС дает информацию о динамике извержения и, в ряде случаев, об изменениях геометрии жерла вулкана.