

УДК 551.696

П. П. ФИРСТОВ, Н. А. ЖАРИНОВ, А. В. БЕЛОУСОВ

**НАБЛЮДЕНИЕ ЗА АКТИВНОСТЬЮ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА В  
1987 Г. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ РАДИОЛОКАТОРОМ**

В работе представлены результаты наблюдений за эруптивной активностью вулкана Ключевской. Показано, что радиолокатор позволяет вести мониторинг эруптивной активности даже при наличии кучевых облаков, что значительно повышает информативность о деятельности вулкана.

MONITORING ACTIVITY OF THE KLYUCHEVSKOY VOLCANO IN 1987 WITH A METEOROLOGIC RADIO LOCATOR, by Firstov P. P., Zharinov N. A., and Belousov A. V. The paper presents the results of observations of the eruptive activity of Klyuchevskoy volcano. It has been shown that radio locator enables one to monitor eruptive activity even in cumuli which considerably increases informativity of monitoring.

(Received August 31, 1989)

*Institute of Volcanology, Far East Division, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR*

Мониторинг эксплозивной активности Ключевского вулкана осуществляется несколькими методами. Традиционные визуальные наблюдения позволяют определить характер активности вулкана, оценить высоту пеплогазовых выбросов и раскаленных бомб. Сейсмическим методом, по уровню вулканического дрожания, осуществляются наблюдения за интенсивностью извержения. Сочетание обоих методов дает представление о динамике извержения [2, 3, 8].

К сожалению, в результате термической конвекции и турбулентного обмена в районе Ключевской группы вулканов, особенно в летнее время, возникает устойчивая кучевая облачность, которая препятствует визуальным наблюдениям. Так, при извержениях 1985—1987 гг. вершина Ключевского вулкана была доступной для наблюдений менее 60% времени.

В последние десятилетия для наблюдений за эксплозивной активностью стали применяться метеорологические локаторы, которые позволяют определять вертикальный и горизонтальный разрезы, верхнюю и нижнюю кромки эруптивных облаков, а также оценивать интенсивность извержения [5, 9, 10]. Поэтому представляет интерес изучение возможности использования метеорологического локатора, расположенного в г. Ключи, для мониторинга эксплозивной активности вулкана Ключевской.

В течение года (XII.1986—XII.1987 гг.) метеорологическим радиолокатором МРЛ-1 (расстояние от вулкана 31 км) выполнялись радиолокационные наблюдения эруптивных облаков над вершиной Ключевского вулкана. По индикатору дальность — высота определялась высота над кратером верхней границы радиоэха ( $H_{лок}$ ) и отражаемость ( $Z$ ). Отражаемость для облаков и осадков зависит от числа ( $N$ ) и диаметра частиц ( $d$ ) [6]

$$Z = \sum_1^N N_i d_i^6$$

И связана с мощностью отраженного сигнала ( $P_{отр}$ ) следующим соотношением:

$$P_{отр} = K_1 \cdot K_2 \frac{\sum_{i=1}^N N_i d_i^6}{R^r} \cdot P_{изл},$$

где  $K_1$  — коэффициент, учитывающий характеристики передатчика и антенны радиолокатора;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий диэлектрическую проницаемость среды,  $R$ —расстояние от точки регистрации до объекта. По стандартной методике определения отражаемости от облаков и осадков величина  $Z$  находилась и в нашем случае.

В образовании радиоэха от эруптивных облаков играют роль не только наличие пепла, но и его диэлектрические свойства. Диэлектрическая проницаемость среды зависит от молекулярного веса, плотности, абсолютной температуры и электрических свойств молекул. По всем этим параметрам эруптивное облако значительно отличается от метеорологических образований (облаков и осадков). Поэтому для эруптивных облаков в нашем случае можно говорить только об «эффективной отражаемости», которую могло бы дать облако той или иной интенсивности.

Эксплозивная активность вулкана за период наблюдений МРЛ выражалась в декабре 1986 г. слабыми парогазовыми выбросами на высоту до 200—300 м над кратером [2]. В январе 1987 г. эруптивные облака белого цвета, иногда с небольшой примесью пепла, поднимались на высоту 1000—1800 м. В феврале относительно ровная стромболианская деятельность сменилась сильной стромболианско-вулканской, которая продолжалась до 22 февраля. Характерной чертой февральской активизации (7—22.11.1987 г.) было чередование интервалов резкого усиления эксплозивной и эффузивной деятельности продолжительностью в несколько часов и интервалов заметного ослабления, а иногда почти полного прекращения вулканической активности. В момент усилений высота эруптивной колонны быстро увеличивалась от 1—2 до 3—4 км. Одновременно резко возрастало количество пепла. Последующие периоды активизации (август — сентябрь, декабрь 1987 г.) характеризовались умеренной стромболианской деятельностью с высотой парогазовых выбросов 400—1000 м.

Радиолокатор работал 4 раза в сутки, высота верхней границы радиоэха над кратером ( $\Delta H_{лок}$ ) определялась с точностью до 100 м, а отражаемость в интервалах через 0,6 ед. лог. На рис. 1 характеристики радиоэха  $Z$  и  $\Delta H_{лок}$  сопоставлены с высотой ( $\Delta H_{лок}$ ) парогазовых и пепловых выбросов по визуальным данным [2]. Февральская активизация четко отразилась на графиках  $Z$  и  $\Delta H_{лок}$ .

Высота выбросов по визуальным данным и амплитуда вулканического дрожания для последующих двух активизаций (август — сентябрь, декабрь) были довольно близки [2], в то время как характеристики радиоэха существенно различны. Август — сентябрь:  $\Delta H_{лок}=0,9$  км,  $Z=-0,9$ ; декабрь:  $\Delta H_{лок}=1,3$  км,  $Z=-1,5$ . Это различие можно объяснить сезонными изменениями термодинамических параметров атмосферы на высотах более 5 км. Согласно [4], эти параметры очень сильно влияют на формирование и подъем парогазовых облаков. Влияние термодинамических параметров атмосферы на формирование радиоэха от эруптивных облаков требует дальнейших разработок.

На рис. 2 приведено корреляционное поле  $\lg \Delta H_{\text{лок}} (\lg Z)$  за период с 1. II по 18.11 1987 г. Здесь же указаны интервалы значений  $\lg Z$  для слоистодождевых и слоистокучевых облаков. Эффективная отражаемость от вулканических облаков Ключевского вулкана в диапазоне  $\lg Z = -1,5-3$ , в то время как для слоистокучевых облаков  $\lg Z = -3-2$ . Таким образом, даже слабая эксплозивная

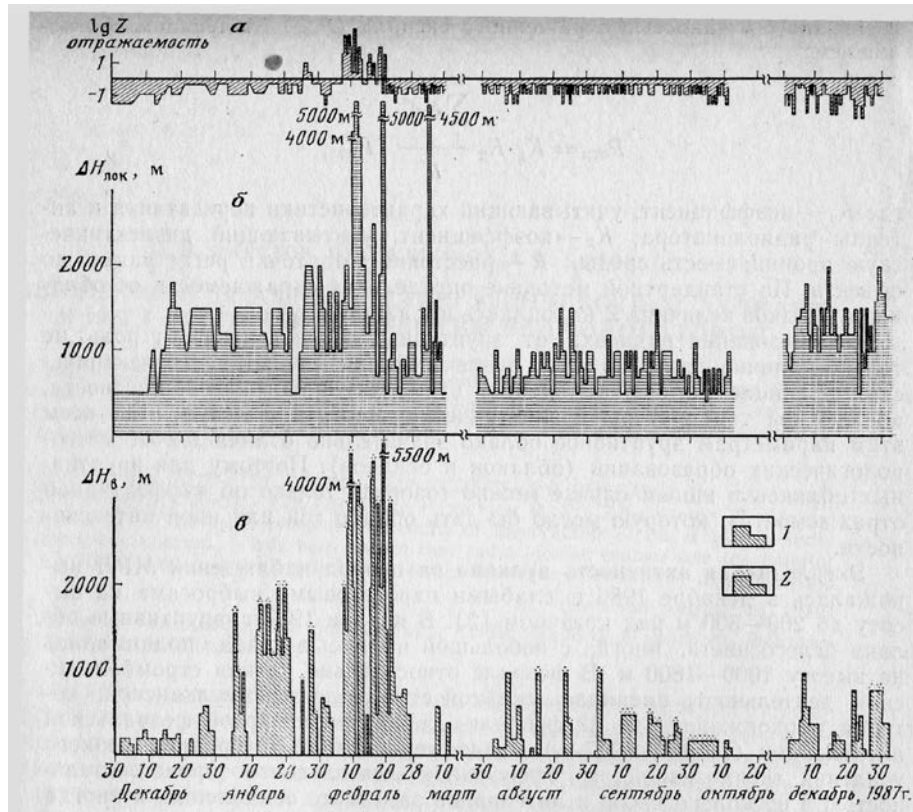


Рис. 1. Характеристика радиоэха: а — логарифм отражаемости,  $Z$ ; б — высота эруптивных выбросов по радиолокатору,  $\Delta H_{\text{лок}}$ , в — изменение высоты парогазовых (1) и пепловых (2) выбросов по визуальным данным

активность вулкана может быть зарегистрирована радиолокатором при наличии слоистокучевых облаков.

Для выборки объемом  $n = 118$  найден выборочный коэффициент корреляции  $r_B = 0,53$ . Проверим нулевую гипотезу о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции при конкурирующей гипотезе  $r_r$  не равняется 0. Найдем наблюдаемое значение критерия [1]

$$T_{\text{набл}} = \frac{|r_B| \sqrt{n-2}}{1-r_B^2} = 7,9.$$

По уровню значимости 0,05 и числу степеней свободы  $k = 118 - 2 = 116$  находим табличное значение  $t_{\text{кр}} = 1,98$  ( $T_{\text{набл}} > t_{\text{кр}}$ ), т. е. коэффициент корреляции между  $\lg \Delta H_{\text{лок}}$  и  $\lg Z$  значимо отличается от нуля. Методом наименьших квадратов находим уравнение регрессии  $\lg \Delta H_{\text{лок}} = a + b \lg Z$ . Получаем зависимость

$$\lg \Delta H_{\text{лок}} (\text{км}) = 0,074 + 0,16 \lg Z \left( \frac{\text{мм}^6}{\text{М}^3} \right) \text{ или } Z \sim \Delta H_{\text{лок}}^{3,2}$$

Высота подъема эруптивных облаков определяется тепловой мощностью ( $Q$ ) извержения и находится в прямой зависимости от расхода мелкодисперсной горячей пироклаستيку, которая выбрасывается в атмосферу. Согласно С. А. Федотову [7]-  $Q \sim \Delta H^{3,5-4,5}$ , в то время как  $Z \sim \Delta H_{лок}^{6,2}$ , т. е. зависимость  $Q=f(\Delta H)$  выражена сильнее, чем зависимость  $Z=f(\Delta H)$ . По-видимому, данный факт можно объяснить тем, что с увеличением расхода изменяется гранулометрический состав пепла (происходит увеличение среднего диаметра частиц), что увеличивает отражаемость.

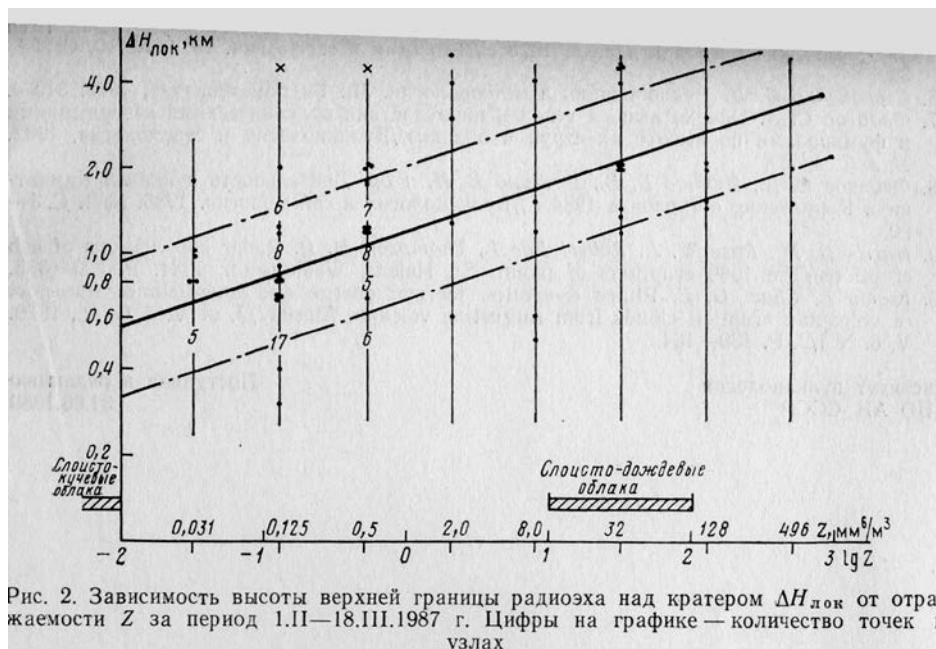


Рис. 2. Зависимость высоты верхней границы радиоэха над кратером  $\Delta H_{лок}$  от отражаемости  $Z$  за период 1.II—18.III.1987 г. Цифры на графике — количество точек в узлах

Метеорологический радиолокатор, расположенный в г. Ключи, позволяет вести мониторинг эруптивной активности вершинного кратера вулкана Ключевской даже при наличии кучевых облаков, что значительно повышает информативность о деятельности вулкана. Любые эксплозивные явления на северном склоне вулкана также могут наблюдаться этим радиолокатором [3].

Кроме вулкана Ключевской вокруг г. Ключи располагаются еще четыре действующих вулкана: Плоский Толбачик (63 км), Безымянный (42 км), Ушковский (35 км) и Шивелуч (46 км). В случае крупных эксплозивных извержений на этих вулканах, радиолокатор г. Ключи может быть использован для слежения за распространением эруптивного облака и, следовательно, для оперативной оценки вулканической опасности.

Авторы выражают благодарность О. П. Руленко за конструктивные замечания, А. А. Мырину за качественные наблюдения эруптивных облаков с помощью МРЛ, а также М. Г. Белоусовой и А. В. Яшиковской за помощь в обработке материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гмурман В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1972. 339 с.

2. *Жаринов Н. А., Горельчик В. И., Белоусов А. Б. и др.* Извержения и сейсмический режим Северной группы вулканов в 1986—1987 гг.//Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 3—20.
3. *Жаринов Н. А., Жданова Е. Ю, Белоусов А. Б. и др.* Активность Северной группы вулканов Камчатки в 1985 г.//Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 3—12.
4. *Иванов В. В.* Об облаках парогазовых извержений и фумарол//Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 37—50.
5. *Мархинин Е. К, Аникиев Ю. А., Гранник В. М. и др.* Извержение вулкана Тятя на Курильских островах в июле 1973 г.//Геология и геофизика. 1974. № 10. С. 22— 32.
6. *Степаненко В. Д.* Радиолокация в метеорологии: Гидрометеиздат, 1973. 319 с.
7. *Федотов С. А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков// Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 3—28.
8. *Федотов С. А., Иванов Б. В., Двигало В. Н. и др.* Деятельность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1984 г.//Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 3— 20.
9. *Harris D. I., Rose W. J., Robert Roe I., Thompson M. R.* Radar observations of ash eruptions//The 1980 eruptions of mount St. Helens, Washington, 1981. P. 323—333.
10. *Kienle J., Show G. E.* Plume dynamics, thermal energy and longdistance transport of volcanic eruption clouds from Augustine volcano, Alaska//J. of V. & G. R., 1979. V. 6. N 1/2. P. 139—164.

Институт вулканологии ДВО АН СССР  
 Поступила в редакцию 31.08.1989