



УДК 550.34:551.21

В. Е. Близнецов, С. Л. Сенюков

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: sva09@emsd.ru

Первые результаты использования программы автоматического выделения пепловых выбросов и расчёта их высоты по сейсмологическим данным на примере вулкана Шивелуч

Предлагается метод автоматического выделения пепловых выбросов и расчёта их высоты по сейсмологическим данным в реальном времени. Метод основан на спектральном анализе сейсмических сигналов, сопровождающих различные вулканические события, и их сопоставлении с данными видеонаблюдений. По первым результатам вероятность автоматического выделения программой пеплового выброса в реальном времени для вулкана Шивелуч составила примерно 75%. Коэффициент корреляции между высотами, зафиксированными по видео наблюдениям, и высотами, вычисленными программой, получился равным $R = 0,69$.

Введение

Проблема своевременного оповещения ответственных служб о месте, времени и высоте пеплового выброса в режиме, близком к реальному времени, независимо от погодных условий и времени суток, остаётся актуальной, прежде всего, для обеспечения безопасности авиаполётов [1, 2, 5]. Автоматизация процесса выделения и расчёта высоты по сейсмологическим данным может существенно упростить и ускорить работу оператора.

Лаборатория исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) Камчатского филиала Геофизической службы РАН начала применять в режиме реального времени оригинальный эмпирический метод для обнаружения и оценки высоты пепловых выбросов в 2003 г. [3] Сейсмические сигналы, соответствующие пепловым выбросам, выделяются в результате временного спектрального анализа, а высота выбросов оценивается по интегралу абсолютной скорости. Все эти процедуры выполняются в программе Д. В. Дрознина. Результаты за период 2003–2011 гг. опубликованы в работах - [4, 6]. К настоящему времени в лаборатории ИСВА создана база данных, включающая материалы видео, фото и визуальных наблюдений пепловых выбросов и сопутствующих им сейсмических сигналов для активных вулканов Камчатки. Например, на вулкане Шивелуч зафиксировано более таких 350 событий, Карымский — более 100, Кизимен — более 20, Безымянный — 9.

Метод выделения и расчёта высоты пеплового выброса

В 2012 г. были начаты работы по автоматизации процедуры выделения и расчёта высоты пепло-

Таблица 1. Номера полос и граничные частоты, используемые в программе SWAN

N	Гц	N	Гц	N	Гц
1	0,125–0,25	6	0,75–1,5	11	4–8
2	0,1875–0,375	7	1–2	12	6–12
3	0,25–0,5	8	1,5–3	13	8–16
4	0,375–0,75	9	2–4	14	12–18
5	0,5–1,0	10	3–6	15	0,1–18

го выброса. В итоге в июне 2012 г. был запущен первый вариант такой программы, которая каждые 15 минут анализирует поступающие с сейсмостанций сигналы в реальном времени. Для выделения пеплового выброса программа использует частотный индекс FI, описанный в работе [7], равный десятичному логарифму $\log(A_u/A_v)$, где A_u — амплитуда сигнала в высокочастотной полосе, A_v — амплитуда сигнала в низкочастотной полосе. Разделение непрерывной сейсмической записи во времени t по частотным полосам и последовательности их значений $X(t) = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]$ производится программой SWAN (автор — Д. В. Дрознин). Ниже приведена табл. 1 с номерами полос N и граничными частотами полос в Герцах.

Вычисление высоты пеплового выброса основано на идеи, что значения X_n можно представить в виде $X_n = A_n \exp(-B_n)$, где A_n является амплитудой X_n , B_n — постоянная величина. Тогда величина определяющая возрастание или затухание сигнала в заданной частотной полосе есть $A = \ln(A_{n-1}/A_n)$ — логарифм отношения двух последовательных амплитуд. Для вычисления высоты выделяются участки,

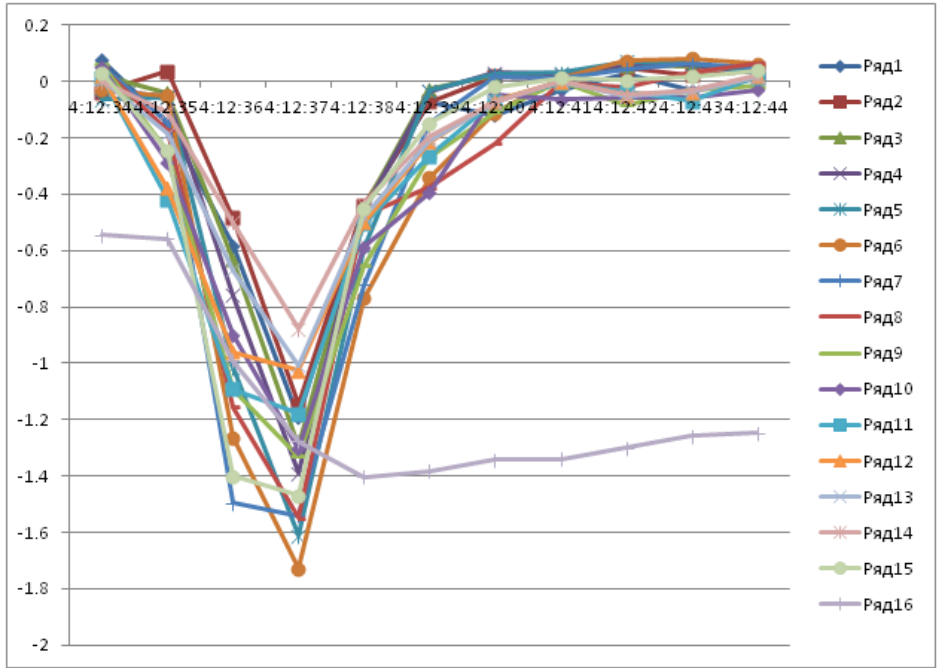


Рис. 1. График значений A и частотного индекса FI .

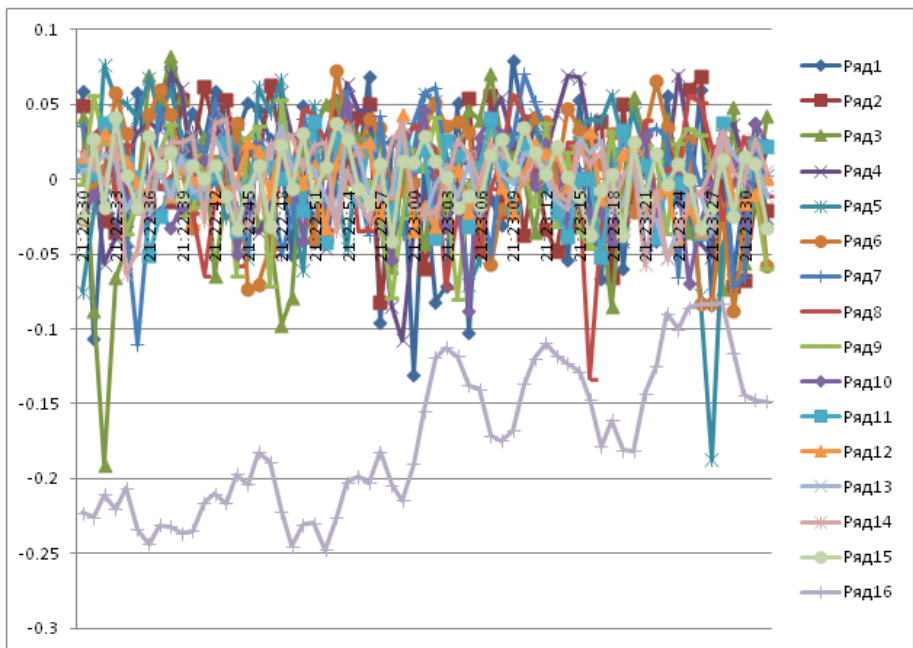


Рис. 2. График значений A и частотного индекса FI .

где A в общей 15-ой частотной полосе меньше нуля. Высота выброса есть интегральная величина от функции $f(A)$. В результате опробования разных вариантов расчётов и их сравнения с наблюдаемыми выбросами в итоге был выбран следующий вариант, как наиболее удачный: $H = K \cdot FI \cdot (A_n A - A_n)$, где H – высота, K – коэффициент.

Ретроспективный анализ данных видео и сейсмологических наблюдений показал, что значения частотного индекса FI меньше некоторого значе-

ния (для вулкана Шивелуч $FI < -1,1$, Кизимена $< -0,9$, для Карымского $< -0,85$ и т. д.) являются необходимым условием пеплового выброса, но недостаточным. Значения A в 6-ой и 7-ой частотных полосах меньше нуля – есть дополнительное условие пеплового выброса. Так пепловый выброс на вулкане Шивелуч определяется значением $FI = \log((Af_{13} + Af_{14}) / (Af_6 + Af_7))$, где Af – амплитуда сигнала в частотных диапазонах 6, 7, 13 и 14, меньше $-1,1$.

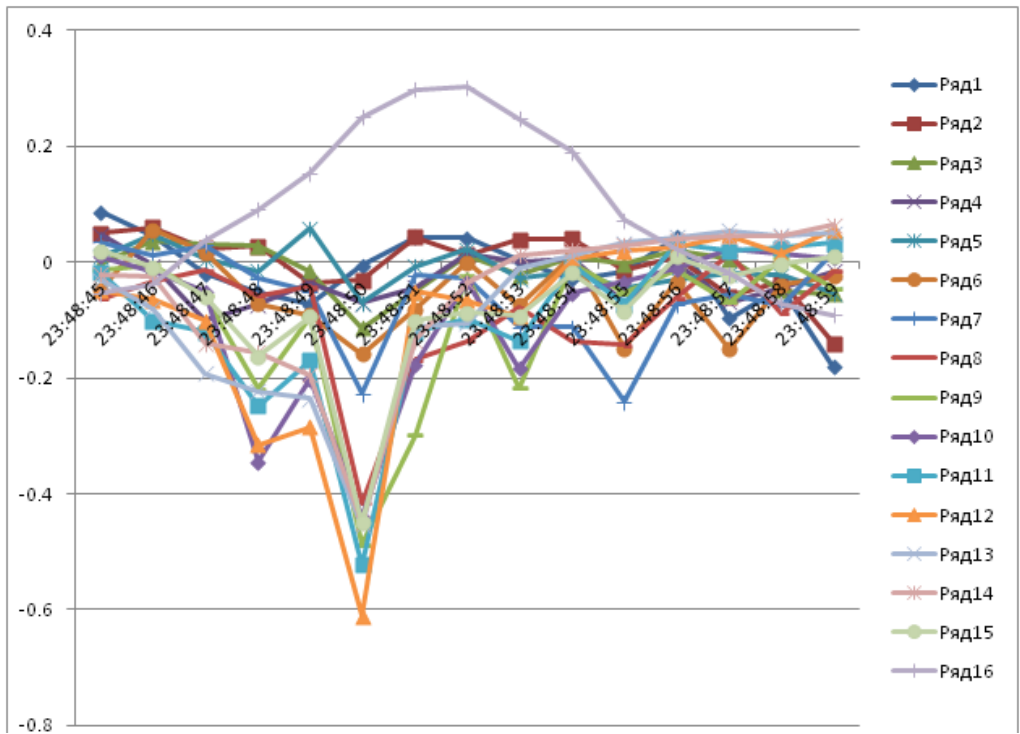


Рис. 3. График значений A и частотного индекса FI.

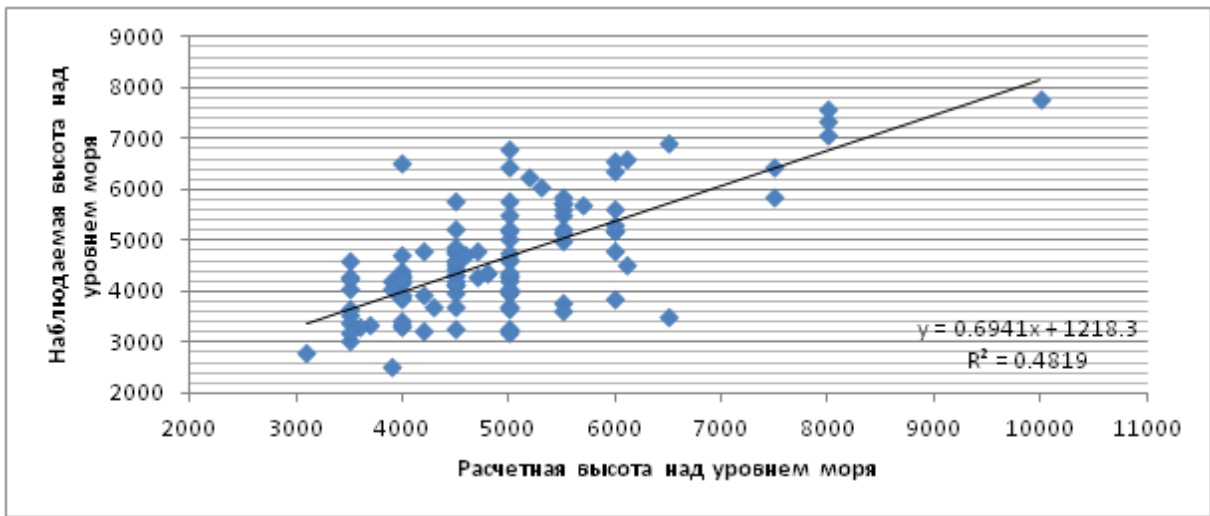


Рис. 4. График корреляции между высотами, зафиксированными по видео наблюдениям, и высотами, вычисленными программой.

На рис. 1 – 3 приведены графики значений A и частотного индекса FI для станции KZV канала SHE вулкана Кизимен. Ряды 1–15 соответствуют значениям A в частотных полосах 1–15, ряд 16 соответствует значению FI. рис. 1 отображает пепловый выброс 2 февраля 2013 г. Частотный индекс FI меньше -0,8. На рис. 2 изображена ситуация когда вулкан находится в спокойном состоянии. Рис. 3 показывает момент, когда датчик регистрирует сейсмическое событие, но пеплового выброса нет. Частотный индекс FI находится в положительной зоне.

Вероятность автоматического выделения программой пеплового выброса составляет около 75%. При этом коэффициент корреляции между высотами, наблюдаемыми по видео наблюдениям, и высотами, вычисленными по формуле, получился равным 0,69.

Работа программы на примере вулкана Шивелуч от 6 марта 2013 г. Высота вулкана 2600 м н. у. м. На рис. 5 изображён пепловый выброс в 05:04 UTC на высоту 5000 м и на рис. 6 в 05:22 на высоту 4500 м н. у. м.



Рис. 5. Пепловый выброс на вулкане Шивелуч 05:04 UTC.

Таблица 2. Результат работы программы для первого выброса, жирным красным выделена максимальная расчётная высота пеплового выброса над куполом вулкана.

ВУЛКАН: Шивелуч ДАТА: 2013-03-06						
СТАНЦИЯ: SRK - Сорокин						
Канал: shn						
Начало	Конец	dT	FI	Am	Тип	H над куполом
4:58:51	4:58:53	2	-0,50871	1,895	гибридные	0
4:58:55	4:59:19	24	-1,38967	52,042	низкочастотные	449
4:59:41	4:59:45	4	-1,3858	128,724	низкочастотные	1843
4:59:46	4:59:49	3	-1,3842	128,729	низкочастотные	1801,1
4:59:54	4:59:57	3	-1,3089	122,893	гибридные	1643,4
4:59:58	5:00:00	2	-1,3187	126,815	гибридные	1742,7
5:00:03	5:00:04	1	-1,2912	119,987	гибридные	0
5:00:06	5:00:08	2	-1,2335	114,861	гибридные	1441
5:00:11	5:00:13	2	-1,2178	118,772	гибридные	1462,5
5:00:15	5:00:16	1	-1,2529	113,234	гибридные	0
5:00:17	5:00:18	1	-1,2163	113,749	гибридные	0
5:00:21	5:00:25	4	-1,2401	116,986	гибридные	87,8
5:00:26	5:00:27	1	-1,24098	117,527	гибридные	1514,6
5:00:29	5:00:30	1	-1,23441	112,513	гибридные	1389,3
5:00:33	5:00:36	3	-1,24966	104,566	гибридные	1288,8
5:00:38	5:00:39	1	-1,22255	100,55	гибридные	0
5:00:56	5:00:57	1	-1,20929	67,045	гибридные	0
5:00:59	5:01:00	1	-1,17829	61,481	гибридные	0
5:01:05	5:01:06	1	-1,168	52,179	гибридные	0
5:01:08	5:01:09	1	-1,17605	51,019	гибридные	0
5:01:10	5:01:12	2	-1,19621	52,013	гибридные	625

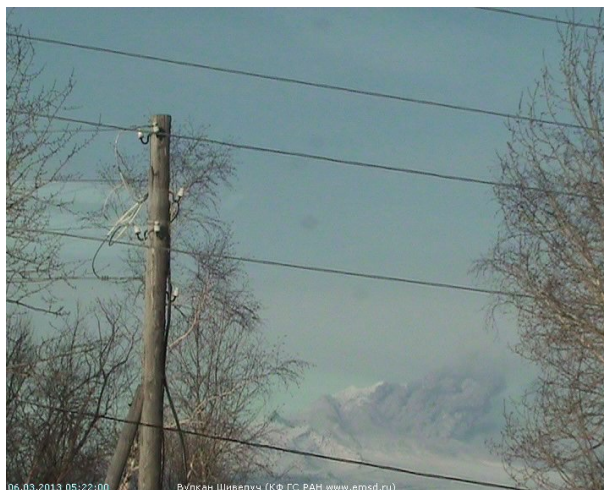


Рис. 6. Пепловый выброс на вулкане Шивелуч 05:22 UTC.

Таблица 3. Результат работы программы для второго выброса, жирным синим выделена максимальная расчётная высота пеплового выброса над куполом вулкана.

ВУЛКАН: Шивелуч ДАТА: 2013-03-06						
СТАНЦИЯ: SRK - Сорокин						
Канал: shn						
Начало	Конец	dT	FI	Am	Тип	H над куполом
5:23:50	5:23:51	1	-1,1385	19,905	гибридные	241,6
5:23:52	5:23:54	2	-1,14126	20,134	гибридные	0
5:23:55	5:24:01	6	-1,20323	24,014	гибридные	267,5
5:24:05	5:24:08	3	-1,20589	22,892	гибридные	0
5:24:11	5:24:12	1	-1,1599	23,267	гибридные	295,2
5:24:13	5:24:17	4	-1,21742	28,078	гибридные	340,8
5:24:21	5:24:22	1	-1,17324	25,991	гибридные	0
5:24:25	5:24:26	1	-1,16513	25,077	гибридные	302,8
5:24:27	5:24:30	3	-1,20492	27,043	гибридные	329,9
5:24:31	5:24:34	3	-1,13613	27,997	гибридные	0
5:24:35	5:24:44	9	-1,28089	109,651	гибридные	876,1
5:24:45	5:24:46	1	-1,2794	114,025	гибридные	0
5:24:47	5:24:48	1	-1,3106	116,621	гибридные	1568,9
5:24:52	5:24:53	1	-1,32709	112,622	гибридные	1541,9
5:24:55	5:24:56	1	-1,33957	103,6	гибридные	0
5:24:57	5:24:58	1	-1,34521	102,251	гибридные	0
5:25:05	5:25:06	1	-1,34632	85,088	гибридные	0
5:25:07	5:25:09	2	-1,36554	88,913	низкочастотные	1279,9
5:25:12	5:25:13	1	-1,37315	77,966	низкочастотные	0
5:25:14	5:25:17	3	-1,35895	76,4	низкочастотные	0
5:25:19	5:25:20	1	-1,27579	74,089	гибридные	0
5:25:21	5:25:25	4	-1,29322	82,216	гибридные	1078,4
5:25:30	5:25:32	2	-1,2566	83,857	гибридные	1099,9
5:25:36	5:25:38	2	-1,23231	77,784	гибридные	0
5:25:41	5:25:45	4	-1,23768	72,552	гибридные	898,6
5:25:48	5:25:49	1	-1,20997	69,686	гибридные	0
5:25:48	5:25:49	1	-1,20997	69,686	гибридные	0
5:25:53	5:25:54	1	-1,15039	62,605	гибридные	0

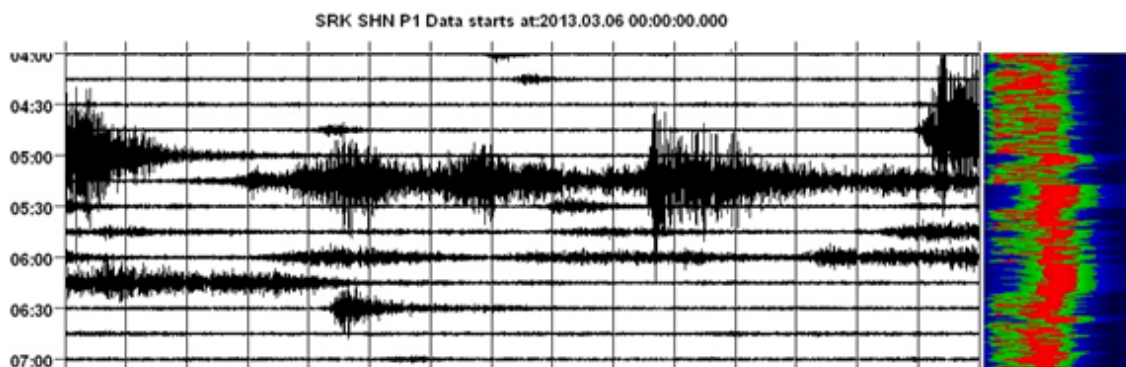


Рис. 7. Сейсмограмма сейсмических событий.

На рис. 7 отображена сейсмограмма этих событий. Результат работы программы в табл. 2 и 3 соответственно. Ам — амплитуда сигнала, dT — промежуток расчётного времени в секундах.

Выводы

Вероятность автоматического выделения программой пеплового выброса в реальном времени для вулкана Шивелуч составляет около 75%. Коэффициент корреляции между высотами, зафиксированными по видео наблюдениям, и высотами, вычисленными по формуле, получился равным $R = 0,69$. Применение данной программы к другим активным вулканам показало на её пригодность. Так в 2012 г. в режиме реального времени были автоматически выделены эксплозивные извержения вулкана Безымянный 01 сентября и вулкана Плоский Толбачик 27 ноября.

Список литературы

1. Кирьянов В. Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3, С. 16–36.
2. Кирьянов В. Ю., Чубарова О. С., Сеньюков С. Л., Евдокимова О. А., Гарбузова В. Т. Группа по обеспечению безопасности полётов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской остро-воздушной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 408–423.
3. Сеньюков С. Л., Дрознина С. Я., Дрознин Д. В. Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным на примере вулкана Шивелуч (Камчатка) // Сборник «Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке», Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 292–300.
4. Сеньюков С. Л., Дрознина С. Я., Кожевникова Т. Ю.. Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным для вулканов Шивелуч, Карымский, Кизимен и Безымянный с 1 января 2003 г. по 1 мая 2011 г. // Труды Третьей научно-технической конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. — Обнинск: ГС РАН, 2011. — С. 139–143,5.
5. Neal C., Girina O., Senyukov S., Rybin A., Osiensky J., Izbekov P., Ferguson G. Russian eruption warning system for aviation // Nat.Hazards. 2009. 51:245–262.
6. Senyukov S. L., Droznina S. Ya., Kozhevnikova T. Yu. Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatkan volcanoes during 2003–2011 (Kamchatka Peninsula, Russia) // Complex monitoring of volcanic activity: methods and results, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2013, P. 35–52
7. Buurman H., West M. E. Seismic Precursors to Volcanic Explosions During the 2006 Eruption of Augustine Volcano // The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska, Reston, Virginia: U.S. Geological Survey 2010, P. 41–57