

УДК 550.34.06.013.3+551.21

**ОПЫТ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЕПЛОВЫХ ВЫБРОСОВ И ОЦЕНКА ИХ ВЫСОТЫ  
ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ПРИМЕРЕ  
ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ (КАМЧАТКА)**

**С. Л. Сенюков, С. Я. Дроздина, Д. В. Дроздин**

*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН  
г. Петропавловск-Камчатский*

**Аннотация.** Были исследованы сейсмические сигналы, сопровождающие пепловые выбросы вулкана Шивелуч в 2000–2003 гг. Все пепловые выбросы и пирокластические потоки сопровождались сейсмическими событиями. Спектрально-временной анализ этих событий показал, что преобладающие частоты сейсмических сигналов изменяются от начала к концу событий с 1 Гц до 2–4 Гц, что отличает их от других землетрясений.

Благодаря непрерывным видео наблюдениям впервые установлена корреляция амплитуды огибающей сейсмических сигналов, сопровождающих пепловые выбросы, со скоростью подъёма пеплового облака. Получена зависимость высоты пеплового выброса от интеграла функции огибающей сейсмического сигнала по времени. Ретроспективный анализ и опробование в режиме оперативной обработки для вулкана Шивелуч показали, что ошибка определения высоты пеплового выброса по сейсмическому сигналу не превышает ~25% для выбросов высотой до 6000 м над куполом.

**DETECTION EXPERIENCE OF SHEVELUCH VOLCANO (KAMCHATKA)  
ASH PLUMES AND THE CLOUD HEIGHT ESTIMATION  
USING SEISMIC DATA**

**S. L. Senyukov, S. Ya. Droznina, D. V. Droznin**

*Kamchatkan Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS  
Petropavlovsk-Kamchatsky*

**Abstract.** During the ongoing dome-building eruption at Sheveluch Volcano, we have examined seismic records that accompany the production of ash plumes and associated pyroclastic flows related to gravitational and explosive dome collapse in 2000–2003. Spectrograms from examined seismic events show a predominant frequency content increasing from 1 Hz to 2–4 Hz, which is unusual for another volcanic earthquakes in the vicinity of Sheveluch.

For the first time, due to continuous video observation, we are able to correlate the amplitude of the seismic signal envelope with the ascent rate of the ash plume. We derive a formula determination for the ash plume height estimation using a function of seismic signal envelope with time. A retrospective and real time analysis indicates that this method can result in an error of about 25% for ash plumes up to 6000 meters (or ~19,670 ft) plumes above the lava dome.

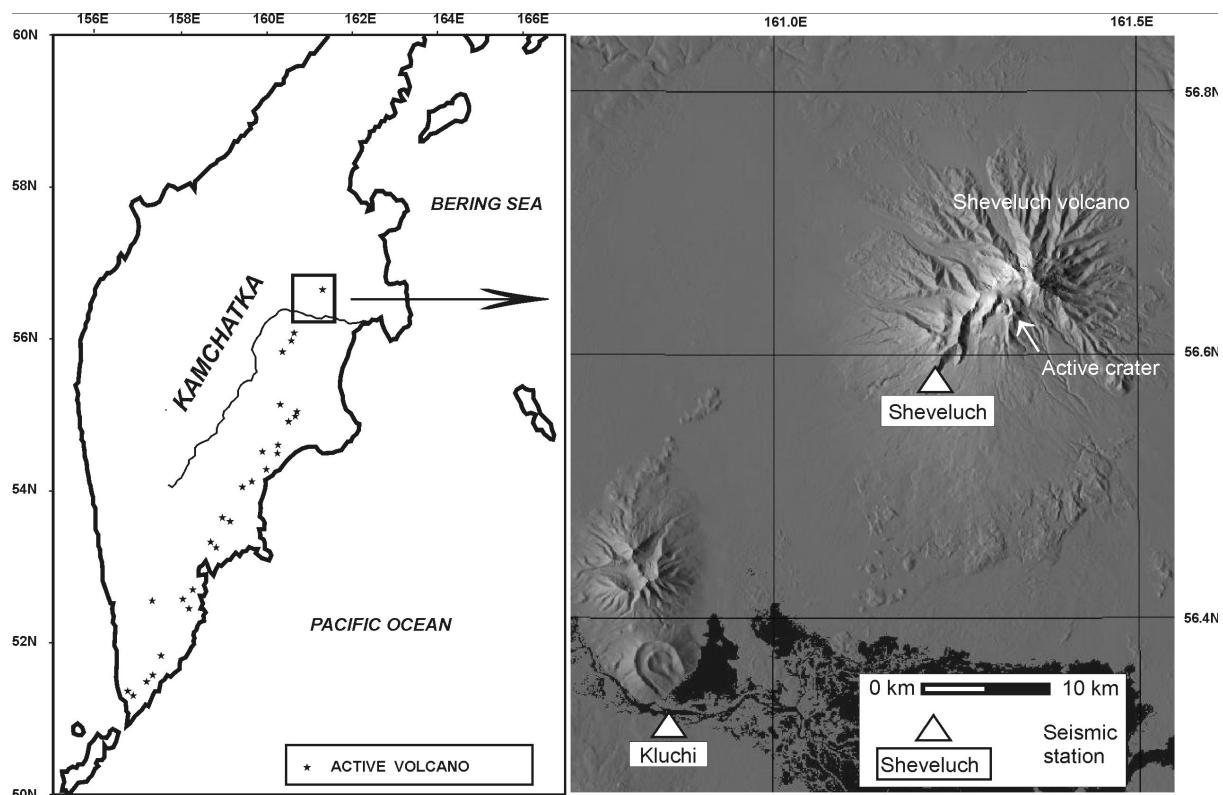
## Введение

Шивелуч - самый северный действующий вулкан Камчатки, рис. 1. Координаты активного кратера: 56° 38' с.ш., 161°19' в.д. Абсолютная высота современного растущего купола в 2003 г составила около 2500 м. Шивелуч - одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки, включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный кратер - Молодой Шивелуч. Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от г. Ключи в Северной части Центральной Камчатской депрессии. В XIX-XX вв. для вулкана Шивелуч были характерны преимущественно два типа извержений: катастрофические эксплозивные типы направленных взрывов (1-2.03.1854 г и 12.11.1964 г) и слабые, умеренные по силе извержения, сопровождавшие рост экструзивных куполов [1].

Последняя активизация вулкана началась в 1998 г. По визуальным данным сотрудников сейсмостанции Ключи (КОМСП ГС РАН) было зарегистрировано:

- 1998 г – 2 пепловых выброса (максимальная высота до 5 км над уровнем моря);
- 1999 г – 5 пепловых выбросов (максимальная высота до 8 км над уровнем моря);
- 2000 г – 7 пепловых выбросов (максимальная высота до 10 км над уровнем моря);
- 2001 г – более 35 пепловых выбросов (максимальная высота более 15 км над уровнем моря);
- 2002 г – около 100 пепловых выбросов (максимальная высота до 8 км над уровнем моря).

Все эти пепловые выбросы потенциально опасны для авиации [2,3,5]. Реальное число пепловых выбросов значительно больше, чем наблюдается визуально по следующим причинам:



**Рис. 1.** Карта Камчатки со спутниковым изображением района вулкана Шивелуч. Треугольники обозначают сейсмические станции, используемые в данной работе.

**Fig. 1.** Map of Kamchatka Peninsula with a map of the area surrounding Sheveluch Volcano. The two seismic stations used in this study are shown with the triangle symbol.

- все вулканы недоступны для визуальных наблюдений в ночное время, а это составляет около 50% от всего времени;

- на Камчатке из-за плохих погодных условий более половины дней в году вулканы закрыты облаками, а это составляет еще около 25 % от общего времени.

Поэтому проблема оценки вулканической опасности вне зависимости от погодных условий и наличия наблюдателей весьма актуальна. Решающую роль при этом могут играть сейсмические данные, которые не зависят от погоды и времени суток и, кроме того, являются непрерывными в отличие от дискретных (несколько раз в сутки) спутниковых наблюдений, которые в свою очередь тоже зависят от погоды.

Перспективность оценки вулканической активности по сейсмическим данным основывается на простом предположении. Каждое вулканическое событие (излияние лавы, пепловый выброс, сход обломочной лавины и т.д.) излучает свой особенный сейсмический сигнал. "Особенности" сейсмических сигналов можно выявить с помощью спектрально - временного анализа. Таким образом, если на вулкане фиксируют как можно более детально (с точной привязкой ко времени) вулканические события и сейсмические сигналы, сопровождающие эти события, то со временем можно собрать соответствующую базу данных (базу эталонов), в которой каждому вулканическому событию будет соответствовать свой сейсмический сигнал - эталон. В дальнейшем при отсутствии визуальных данных, если фиксируется сейсмический сигнал, соответствующий по своему спектральному составу пепловому выбросу, то можно с большой долей уверенности утверждать, что на вулкане произошел пепловый выброс.

В предыдущие годы предпринималось немало попыток установить корреляционные зависимости между сейсмическими сигналами и пепловыми выбросами. Но всегда эти попытки ограничивались недостоверностью визуальных данных [4,6]. Из накопленного нами опыта основными причинами недостоверности визуальных данных являются следующие:

- очень часто неопытные наблюдатели (пилоты, туристы и т.д.) выдают обычную парогазовую эмиссию за эксплозивное извержение;

- практически невозможно даже опытному наблюдателю отличить пепловый выброс от парогазового, если это происходит на восходе или закате солнца (из-за подсветки выброс всегда кажется более темным);

- часто наблюдатели, очарованные зрелищем, забывают зафиксировать точное время событий;

- высота выбросов определяется с большой ошибкой.

Все эти причины не позволили выявить каких-либо однозначных закономерностей. Некоторый поворот в понимании процесса образования пепловых выбросов и отражении этого процесса в сейсмичности дали непрерывные видео наблюдения с точной привязкой к абсолютному времени (точность  $\pm 1$  с, обеспечивается GPS приемником). Первая видеокамера была установлена 09 октября 2000 г на сейсмостанции «Ключи» для наблюдений за вулканом Ключевской. Начиная с этого дня, изображение Ключевского вулкана стало доступно в Интернете в режиме реального времени: <http://data.emsd.iks.ru/video/video.htm>. Дополнительно ведется архив видео снимков на лазерных дисках с дискретизацией 1 минута. Кроме того, суточный буфер позволяет создавать видеофильмы с дискретизацией 1 секунда. Вторая аналогичная система видео наблюдений за вулканом Шивелуч была установлена 17 мая 2002 г: <http://data.emsd.iks.ru/videosvl/videosvl.htm>. Относительно активного купола вулкана Шивелуч видеокамера и телеметрическая сейсмическая станция "SVL" установлены к юго-западу: в 45 км и в 8.5 км, соответственно, рис. 1. Программное обеспечение для сбора, хранения и представления данных в Интернете и создания видео фильмов было написано Кискиным Д.Ю.

В процессе изучения видеофильмов были выделены следующие факты.

1. Все надежно выделенные по видео наблюдениям пепловые выбросы вулкана Шивелуч обязательно сопровождались сейсмическими сигналами, спектральный сос-

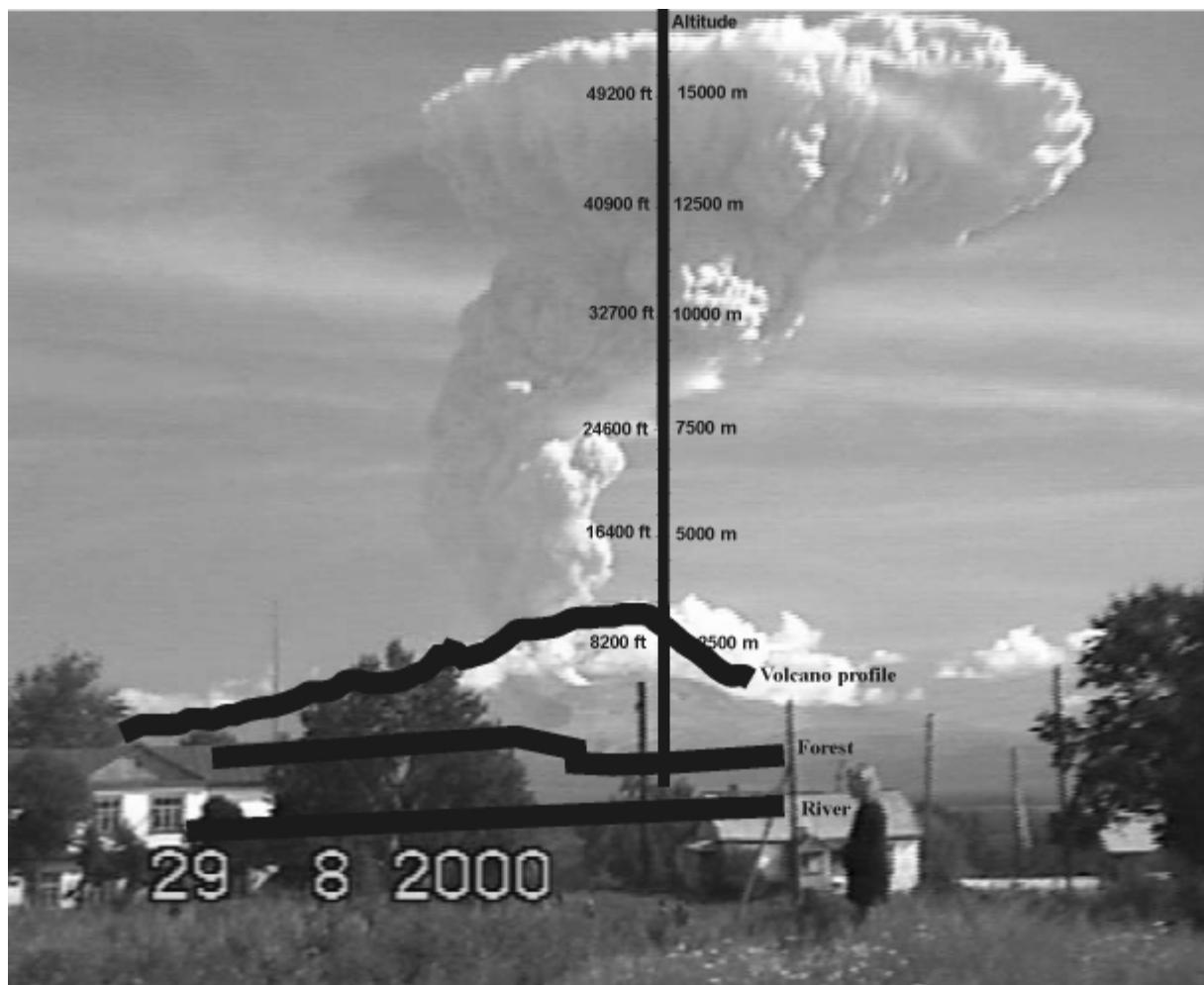
тав которых отличал их от других сейсмических событий. Преобладающие частоты сейсмических сигналов таких событий изменяются от их начала к концу с 1 до 2-4 Гц.

2. Пепловое облако появляется на поверхности с некоторой задержкой по отношению к соответствующему сейсмическому сигналу, регистрируемому на станции "SVL". Например, задержка для двух выбросов 16 и 17 сентября 2002 г составила около 15 секунд.

3. На снятых видеофильмах пепловый выброс выглядит, как протяженный во времени процесс. Скорость подъема пеплового облака обычно имеет наибольшее значение в момент появления облака на поверхности. Для пепловых выбросов высотой до 3000 м над экструзивным куполом зарегистрировано максимальное значение скорости 15 м/с. Скорость подъема пеплового облака коррелируется с амплитудой огибающей сейсмического сигнала.

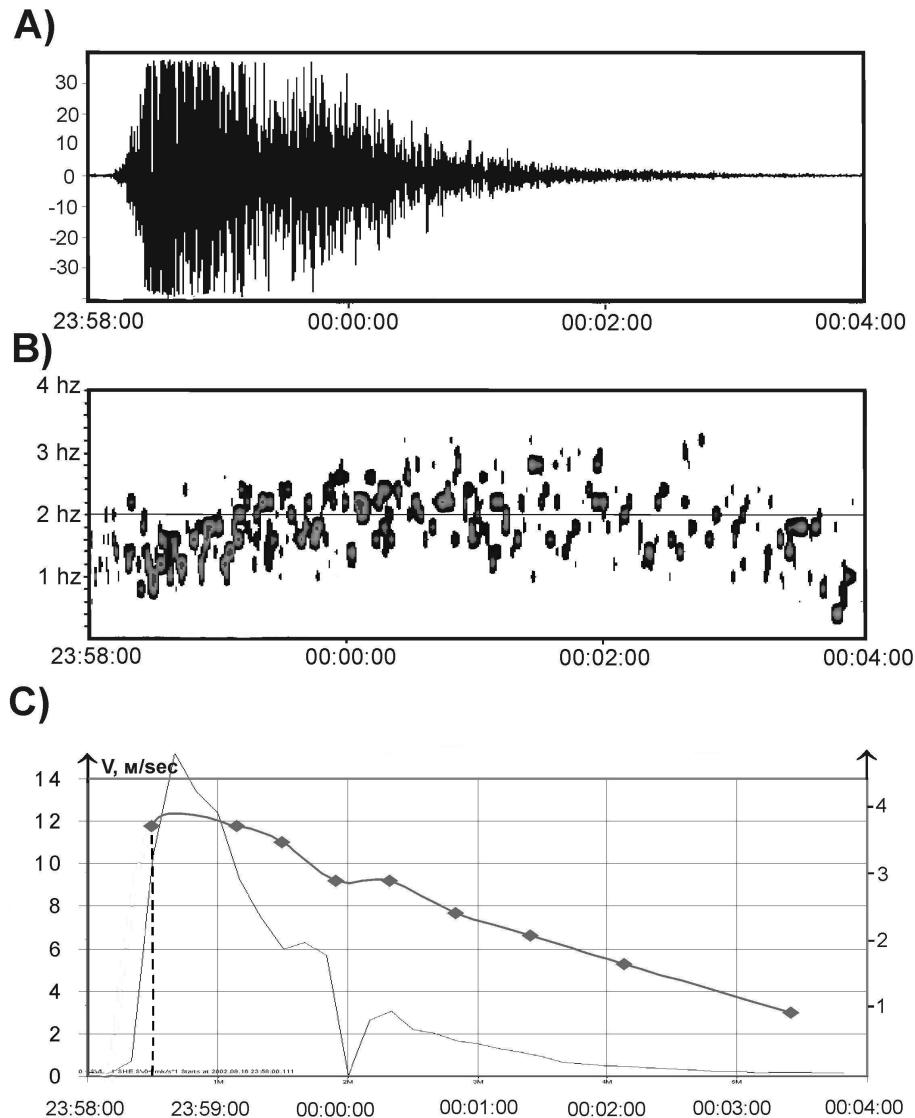
### Обработка данных

Определения высоты пепловых выбросов проводились только по фото и видео материалам. Проблема использования снимков с разным фокусным расстоянием была решена с помощью пакета программного обеспечения CorelDRAW. В CorelDRAW



**Рис. 2.** Монтаж фотографии газо-пеплового выброса вулкана Шивелуч (29 августа 2000) с контуром вулкана и шкалой измерения высоты выбросов относительно уровня моря. Фото-Ю.В. Демянчук.

**Fig. 2.** Montage of Sheveluch's ash plume (August 29, 2000) photo with the reference volcano profile and height scale above sea level. Photo - Yury Demyanchuk.



**Рис. 3.** Графики зарегистрированных параметров для газо-пеплового выброса вулкана Шивелуч, произошедшего 16 сентября 2002 г в 23:58 по Гринвичскому времени: А) сопровождающий сейсмический сигнал; В) сван диаграмма сейсмического сигнала; С) график скорости подъема пеплового облака (толстая линия с точками, левая шкала, м/сек) и график амплитуды огибающей сейсмического сигнала (тонкая сплошная линия, правая шкала, безразмерная величина).

**Fig. 3.** Seismicity and derived velocity history for Sheveluch's ash plume, 16 September 2001 at 23:58 UTC:

А) seismic signal; В) spectrogram; С) graph of the ash plume lifting velocity (left scale) is thick line with points and graph of the seismic signal envelope (right scale, dimensionless units) is thin line.

было создано контурное изображение вулкана Шивелуч, на котором были отмечены характерные детали рельефа, рис. 2. К этому контуру была создана измерительная шкала, реперными точками которой послужили характерные точки рельефа местности с известными абсолютными отметками высот. В дальнейшем каждый снимок с пепловым выбросом путем изменения масштаба подгонялся под созданный контур вулкана. Высота выброса при этом определялась по одной и той же шкале, что существенно повысило точность измерений. На рис. 2 представлена линейная шкала, но в действительности шкала должна быть нелинейной вследствие трехмерной геометрии наблюдаемого явления. Произведенные расчеты показали, что ошибка за нелинейность шкалы не превышает 2% на высоте 6 км, 3% на высоте 10 км и 5% на

высоте 15 км. Это значительно меньше, чем возможная ошибка из-за отклонения выброса от вертикали.

На рис. 3 представлены сейсмический сигнал (А), его сван диаграмма (В) и график амплитуды огибающей сейсмического сигнала с графиком изменения скорости подъема пеплового облака для газо-пеплового выброса высотой до 3000 м над куполом (С), произошедшего на вулкане Шивелуч 16 сентября 2002 г в 23:58 по Гринвичу. Горизонтальная шкала времени для всех графиков одинакова. «GPS» приемники обеспечивают точность  $\pm 1$  секунда для видео наблюдений и 10 мс для сейсмических данных. Первые признаки появления пепла на поверхности появились с задержкой около 15 секунд после начала сейсмического сигнала. Преобладающие частоты сейсмического сигнала (рис. 3 В) в первые ~20 секунд была в пределах 1-1.5 Гц, а потом стали расти, и достигли спустя 50 секунд после начала сигнала 2 Гц, а затем через 3 минуты – 3 Гц. Такая особенность была отмечена только для сейсмических сигналов, сопровождающих пепловые выбросы или пепловые выбросы с пирокластическими потоками. Рис. 3 С показывает существование корреляционной зависимости между амплитудой огибающей сейсмического сигнала и скоростью подъема пеплового облака. График скорости подъема пеплового облака был получен при исследовании детального видеофильма (1 кадр/сек) с помощью шкалы высот рисунка 2. Для построения графика огибающей сейсмического сигнала использовались средние абсолютные значения сейсмического сигнала во временном окне 10 секунд. Высота подъема пеплового облака является интегралом от функции скорости его подъема по времени. Вследствие имеющейся зависимости между амплитудой огибающей сейсмического сигнала и скоростью подъема пеплового облака при определении его высоты возможна замена функции скорости подъема функцией амплитуды огибающей сейсмического сигнала с учетом, определенного экспериментально, коэффициента корреляции.

## **Результаты исследований**

Установлено, что парогазовая эмиссия вулкана Шивелуч не сопровождается сейсмическими сигналами, которые регистрируются сейсмической станцией “SVL”. Газо-пепловый выброс, в отличие от парогазовой деятельности, связан с извержением твердого магматического материала и всегда сопровождается сейсмическим событием. Образование пепла происходит, когда жидкая магма достигает поверхности и стремительно “вскипает”, как вскипает вода при извержении гейзера. “Вскипание” магмы сопровождается, по-видимому, излучением сейсмического сигнала относительно повышенной частоты, более 2 Гц для вулкана Шивелуч. Наблюданное часто дальнейшее повышение частоты сигнала до 4 Гц для сильных пепловых выбросов можно объяснить последующим выпадением пепла и бомб на склон вулкана и образованием обломочных лавин. Практически всегда сейсмический сигнал (рис. 3), сопровождающий пепловый выброс, начинается с короткого (~15 сек) низкочастотного (~1 Гц) землетрясения – газового взрыва, который открывает путь магмы к поверхности. Поэтому неслучайно существует задержка между появлением пепла на поверхности и сейсмическим сигналом.

Таблица 1 и рис. 4 представляют результаты проверки, предложенной методики определения высоты пепловых выбросов по сейсмическим данным. На рис. 4 по горизонтальной шкале отложены результаты оценки высоты выбросов по сейсмическим сигналам, а по вертикальной шкале результаты измерений высоты выбросов по видео или фото материалам. Для определения высоты пепловых выбросов по сейсмическим данным используются две программы. Сначала с помощью специальной программы вычисляется амплитуда огибающей сейсмического сигнала. А потом, с помощью программы Excel, по данным огибающей определяется сумма значений в интервале времени, где величина огибающей больше фона. В результате проведенных исследований была найдена линейная зависимость между высотой выбросов в метрах и суммой значений огибающей в условных единицах. Единица измерения для огибающей

Таблица 1. Сопоставление оценок высоты выбросов по сейсмическим данным с измерениями по видео или фото наблюдениям.

Table 1. Comparison of observed and carefully measured ash plume heights with the heights calculated using seismic data.

Дата	Оценка высоты по сейм. данным, м	Высота по видео или фото данным, м	Ошибка, %	Примечание
20.12.2001 04:14	5691	5500	3.36	
04.09.2002 22:03	4800	3000	37.50*	Ветер
09.09.2002 06:10	3150	3500	-11.11	
09.09.2002 07:13	2624	2000	23.78	
16.09.2002 23:58	4218	3000	28.88*	Ветер
17.09.2002 02:14	3360	1600	52.38*	Лавина
05.10.2002 23:30	1002	1000	0.20	
24.10.2002 04:02	1760	1700	3.41	
03.11.2002 22:15	3770	3000	20.42	
09.11.2002 04:25	2160	1600	25.93	
16.02.2003 23:59	1545	1500	2.91	
25.02.2003 05:35	2574	2200	14.53	

является безразмерной величиной, формат которой принят в КОМСП для хранения цифровой сейсмической информации. В действительности можно перевести с помощью специальных вычислений эту величину в мкм/сек, но это не важно для наших исследований.

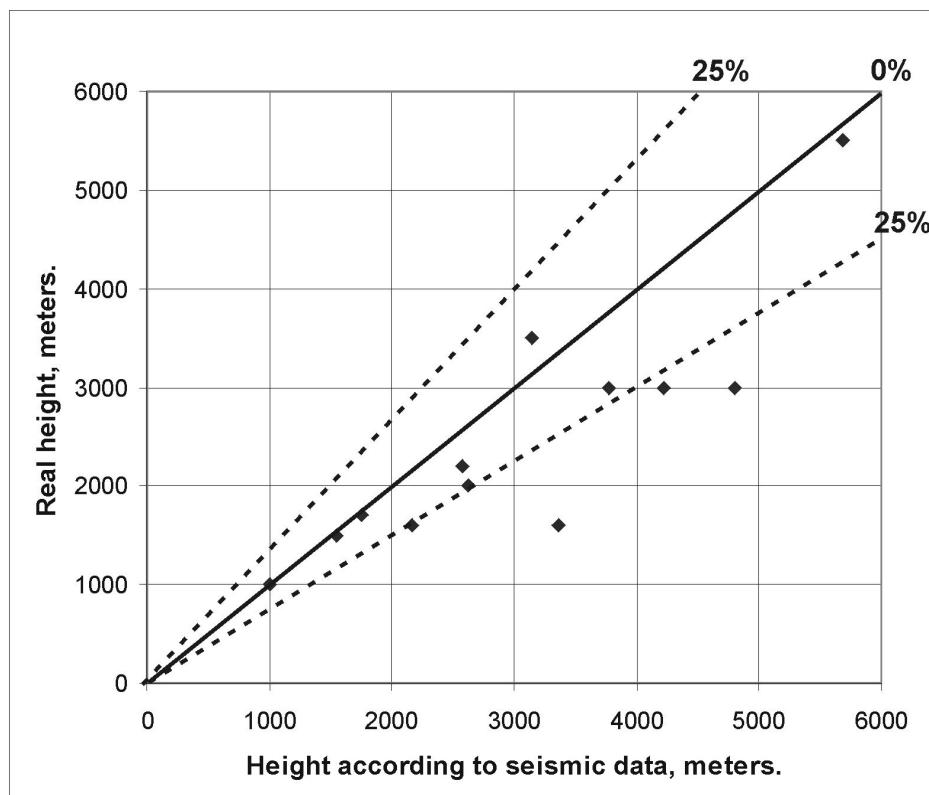


Рис. 4. Сопоставление оценок высоты выбросов по сейсмическим данным с измерениями по видео или фото наблюдениям, по данным таблицы 1.

Fig. 4. Comparison of observed and carefully measured ash plume heights with the heights calculated using seismic data, from table 1.

Таблица 2. Сопоставление оценок высоты сильных выбросов по сейсмическим данным с измерениями по видео или фото наблюдениям.

Table 2. Comparison of observed and carefully measured strong ash plume heights with the heights calculated using seismic data.

Дата	Оценка высоты по сейм. данным, м	Высота по видео или фото данным, м	Ошибка, %	Примечание
22.08.2000 23:43	10500	15000	-42.86	Возможно завышение высоты по фотографии из-за наклона облака в сторону наблюдателя
28.08.2000 22:30	8400	14000	-66.67	Возможно завышение высоты по фотографии из-за наклона облака в сторону наблюдателя
19.05.2001 04:55	108500	10000	88.94	Извержение с мощным пирокластическим потоком длиной 5 км

Для 9 зафиксированных пепловых выбросов ошибка определения составляет около 25%. Для трех событий, отмеченных знаком «\*» оценка высоты по сейсмическим данным завышена, что легко объясняется присутствием в этот момент сильного ветра, который сдувает поднимающую струю, или наличием обломочной лавины, сейсмический сигнал от которой дает дополнительную прибавку высоты.

Предложенная методика также была опробована для более сильных событий, таблица 2. Одно из них показано на рис. 2. Результаты таблицы 2 демонстрируют увеличение ошибки для сильных взрывоизвержений. Ясно, что зависимость для сильных событий ( $>6000$  м) не является линейной, как для более слабых ( $<6000$  м) событий. Главная причина заключается в том, что газо-пепловый выброс есть результат действия двух главных функций: функции источника и функции среды. Предложенная методика учитывает только функцию источника, а функцию среды, учитывающую силу ветра и строение атмосферного профиля, не рассматривает.

Таким образом, результаты проверки показали, что предложенная методика оценки высоты по сейсмическим данным дает в настоящее время хорошие результаты для газо-пепловых выбросов высотой до 6000 м над куполом.

### **Заключение**

1. Разработана и внедрена в систему оценки вулканической опасности на примере вулкана Шивелуч методика определения высоты пепловых выбросов по сейсмическим данным. Разработанная методика позволяет надежно идентифицировать пепловые выбросы по сейсмическим данным и оценивать степень их опасности для авиации. Применение методики имеет особенно большое значение, когда визуальные наблюдения невозможны.

2. По сейсмическим данным в 2002 г было выделено 580 возможных газо-пепловых выбросов на вулкане Шивелуч, и только 99 из них были подтверждены визуальными данными, остальные были недоступны для наблюдений из-за отсутствия видимости. В 2003 по предложенной методике было зафиксировано 272 возможных пепловых выброса, и только 33 из них были зарегистрированы видео наблюдениями. Темное время суток или облачность скрыли остальные извержения. Но не было зарегистрировано ни одного случая, когда бы наблюдался пепловый выброс в отсутствие соответствующего сейсмического сигнала. Для всех 33 подтвержденных видео наблюдениями пепловых выбросов (все высотой менее 3000 м) методика дала корректную оценку высоты.

3. Предлагаемый эмпирический метод для выделения и оценки высоты пепловых выбросов вулкана Шивелуч по сейсмическим данным, конечно, не охватывает все возможные случаи.

К недостаткам метода относятся:

- отсутствие возможности вычитания вклада возможных пирокластических потоков из общей суммы огибающей сейсмического сигнала, что приводит к завышению оценки высоты выброса. За период времени, исследованный в настоящей работе, пепловые выбросы с пирокластическими потоками составляют только несколько процентов от общего количества пепловых выбросов.

- отсутствие алгоритма учета атмосферных эффектов, в особенности скорости ветра, для сильных взрывоизвержений поднимающихся выше тропопаузы.

Авторы выражают благодарность Демянчуку Ю.В. за прекрасные фотографии пепловых выбросов вулкана Шивелуч.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта INTAS-2001-0106/F5.

#### *Список литературы*

1. Действующие вулканы Камчатки / Под. ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П. Т.1 М.: Наука, 1991. С. 84-97.
2. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной вулканической опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3, С. 16-36.
3. Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сенюков С.Л., Евдокимова О.А., Гарбузова В.Т. Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской острово-водной системы. ИВГИГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 408-423.
4. McNutt S.R. Volcanic tremor amplitude correlated with eruption explosivity and its potential use in determining ash hazards to aviation // Acta Volcanol. 1994. V. 5. P. 193-196.
5. Perkins S. Danger in the air // Science news. 2003. V. 164. № 11. P. 168-170.
6. Roach A.L., Benoit J.P., Dean K.G., McNutt S.R. The combined use of satellite and seismic monitoring during the 1996 eruption of Pavlof volcano, Alaska // Bull. Volcanol. 2001. V. 62. P. 385-399.