

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕЙСМОЛОГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАПОЛЕТОВ ОТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПЕПЛОВЫХ ОБЛАКОВ НА ПРИМЕРЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ

Сенюков С.Л., Чебров В.Н., Блинецов В.Е., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Нуждина И.Н.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия
ssl@emsd.ru*

Введение

Одной из приоритетных задач Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН является оповещение органов власти, МЧС и населения Камчатского края о возникновении опасных природных явлений, в том числе и об извержениях вулканов, в оперативном режиме. Среди используемых в настоящее время видов наблюдений за опасными природными явлениями ведущим является сейсмологический мониторинг. Сеть сейсмических станций при достаточной плотности пунктов на активном вулкане позволяет проводить непрерывный эффективный контроль вулканической деятельности независимо от времени суток и погодных условий [5, 4]. Видео и спутниковые наблюдения за вулканами, несмотря на их широкое внедрение в последние годы, значительную часть времени не столь эффективны из-за частой плохой погоды на Камчатке. В предлагаемой работе дается краткое описание истории разработки, внедрения и результатов контроля пепловых извержений по сейсмологическим данным на примере одного из самых продуктивных вулканов Камчатки – вулкана Шивелуч.

Краткая характеристика вулкана

Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки. Шивелуч – одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки включает три главных элемента: Старый Шивелуч (3283 м), древнюю кальдеру и современный растущий купол – Молодой Шивелуч (~2600 м). Координаты Молодого Шивелуча: $56^{\circ} 38'$ с.ш. $161^{\circ} 19'$ в.д. Вулкан находится в 45 км к северо-востоку от пос. Ключи в северной части Центральной Камчатской депрессии. В XIX-XX вв. для вулкана Шивелуч были характерны преимущественно два типа извержений: катастрофические эксплозивные типа направленных взрывов (1-2 марта 1854 г и 12 ноября 1964 г) и слабые, умеренные и параксизмальные по силе извержения, сопровождающие рост экструзивных куполов. После катастрофического извержения 12 ноября 1964 г. в кратере вулкана до 1980 г. сохранялась лишь фумарольная активность. С ноября 1980 г. стал расти и формироваться экструзивный купол Молодой. В 1998-2002 гг. по визуальным данным сотрудников сейсмостанции «Ключи» на куполе была зафиксирована постепенно нарастающая активность. От 2 пепловых выбросов в 1998 г. с максимальной высотой до 5 км над уровнем моря (н.у.м.) до 100 выбросов в год с максимальной высотой до 15 км н.у.м. в 2001-2002 гг. [3]. Все такие пепловые выбросы потенциально опасны для авиации. Реальное число пепловых выбросов значительно больше, так как много эксплозивных извержений происходит в ночное время суток или при плохой погоде, когда вулкан недоступен для визуальных наблюдений.

История разработки и внедрения новых технологий

В предшествующие годы предпринимались попытки установить корреляционные зависимости между сейсмическими сигналами и пепловыми выбросами. Но всегда эти попытки ограничивались неоднородностью и недостоверностью визуальных данных. Качественный скачок в понимании процесса образования пепловых выбросов и отражении этого процесса в сейсмичности дали непрерывные видео наблюдения. Система видео наблюдений за вулканом Шивелуч была установлена 17 мая 2002 г. на сейсмостанции «Ключи». Суточный буфер позволял создавать фильмы с дискретизацией 1 кадр/с. Синхронизация видеок кадров со шкалой времени обеспечивалась приемником GPS. Автоматически создавался архив с дискретизацией 1 кадр/мин. Первое программное обеспечение для сбора, хранения, представления данных в Интернете и создания фильмов было разработано сотрудником КФ ГС РАН Д.Ю. Кискиным. Вторая более современная камера с высоким разрешением для наблюдения за вулканом в режиме день*ночь была установлена 22 ноября 2013 г.

В процессе изучения видеofilмов были установлены следующие факты [3]:

1. Все надежно выделенные по видео наблюдениям пепловые выбросы вулкана Шивелуч обязательно сопровождалось сейсмическими сигналами, преобладающие частоты в которых изменялись от 1 Гц в начале до 2-4 Гц к концу сигнала. По этому признаку можно уверенно выделять такие сигналы на фоне других с помощью временного спектрального анализа.

2. Скорость подъема пеплового облака хорошо коррелировалась с амплитудой огибающей соответствующего сейсмического сигнала, зарегистрированного радиотелеметрической сейсмостанции SVL. Отмеченная корреляция позволила получать оценку высоты выброса по интегралу огибающей сейсмического сигнала с использованием вычисленных коэффициентов. Станция SVL располагалась на расстоянии 8.5 км от вулкана и была оснащена комплектом короткопериодной аппаратуры на базе сейсмометра СМ-3.

В результате был предложен оригинальный эмпирический метод для выделения пепловых выбросов и оценке их высоты по сейсмологическим данным [3]. По данному методу в 2002 г было выделено 580 пепловых выбросов по сейсмическим данным, но только 99 из них были зафиксированы видео наблюдениями. Остальные 481 выброс (или 83%) были скрыты темным временем суток или облачностью.

Опробование метода в режиме реального времени в 2003-2004 гг., позволило выделить 866 пепловых выбросов на вулкане Шивелуч по сейсмическим данным. Из них 72 были подтверждены видео наблюдениями, а остальные были скрыты облачностью, или произошли в темное время суток. Всего за период времени с 1999 г. по 2004 г. было зарегистрировано визуальными, фото и видео наблюдениями 214 пепловых выбросов высотой от 200 м до 15 км. Для этих событий коэффициент корреляция между оценками высоты по сейсмическим данным и наблюдаемыми получился равным $R=0.82$ [3].

К сожалению, сильное извержение вулкана Шивелуч 28 февраля 2005 г. разрушило сейсмическую станцию "SVL". Полевой отряд отдела радиотелеметрических сейсмических станций установил 3 новые станции на склонах вулкана Шивелуч осенью 2005 г. Новые станции были установлены в более безопасных местах, но, к сожалению, возможность выделения по ним пепловых выбросов ухудшилась. Для 150 пепловых выбросов, зафиксированных визуальными, фото и видео наблюдениями в 2005-2011 гг., средний коэффициент корреляция по трем станциям получился равным $R=0.51$ [9]. Максимальная высота выбросов достигала 10 км н.у.м. По вновь зарегистрированным данным были сделаны соответствующие поправки, и работа по выделению пепловых выбросов и оценке их высоты по локальной сейсмичности была продолжена в режиме реального времени.

Здесь следует сказать несколько слов о процедуре обнаружения пепловых выбросов по сейсмическим данным. В рамках ежедневного дежурства с 08 час утра до 18 час вечера дежурный сотрудник лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) обязан был один раз в час запускать программу SWAN для создания изображений непрерывной сейсмической записи и соответствующей СВАН (Спектральный Временной АНализ) диаграммы. Если обнаруживался сейсмический сигнал, СВАН диаграмма которого соответствовала пепловому выбросу, то дежурный вызывал из буфера волновую форму выделенного сигнала, мог еще раз более детально проверить изменение преобладающей частоты и вычислить интеграл огибающей выделенного сигнала в программе DIMAS [2]. Потом пересчитать значение интеграла в высоту по установленной формуле. При этом срочно проверялись видео данные. Если вулкан был открыт, и высота выброса превышала 6 км н.у.м., или вулкан закрыт, но оценка высоты по сейсмике была ≥ 6 км н.у.м., то создавалось срочное сообщение на английском языке по согласованной форме и рассылалось по утвержденному директором КФ ГС РАН списку адресов. В МЧС и ИВиС (КВЕРТ) такая информация передавалась дополнительно по телефону. Такой порядок работы позволял проводить оповещение об опасных эксплозивных извержениях с задержкой от 15 мин до 1.5 час от начала события, если событие происходило в рабочее время. Несмотря на такую задержку, практически всегда это оповещение было первым.

Существенное уменьшение задержки до 10-20 мин удалось достичь благодаря использованию в режиме реального времени автоматической программы ADAP (Automatic Detection of Ash Plume) [1]. Первый вариант программы был разработан и внедрен В.Е. Блинецовым в систему наблюдений КФ ГС РАН в 2012 г. В последующие годы программа неоднократно усовершенствовалась с учетом перехода на более высокую частоту дискретизации сейсмического потока во времени. Подробное описание работы программы с примерами и оценкой ошибки определения опубликовано в работе [1].

Программа обрабатывает непрерывный поток данных с сейсмических станций в режиме реального времени. На первом этапе с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье программа разбивает каждую сейсмическую запись на частотные полосы и вычисляет в них средний уровень сигнала огибающей (Таблица 1). В КФ ГС РАН такой метод используется в программе Д.В. Дрозина для получения СВАН диаграмм сейсмических записей с 2001 г.

Таблица 1. Номера полос и граничные частоты

№	Частота, Гц	№	Частота, Гц	№	Частота, 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

Далее в программе ADAP для выделения пеплового выброса вычисляется частотный индекс Fi , описанный в работе [6] и равный десятичному логарифму отношения амплитуды сигнала в высокочастотной полосе к амплитуде сигнала в низкочастотной полосе. Признаком выделения сигнала соответствующего пепловому выбросу является значение Fi лежащее в определенном числовом диапазоне. Диапазон Fi определяется эмпирически для каждого вулкана и опорной станции индивидуально. Для вулкана Шивелуч индекс Fi вычисляется как десятичный логарифм отношения суммы амплитуд в 13-й и 14-й частотных полосах к сумме амплитуд в 6-й и 7-й частотных полосах (Таблица 1). Если Fi лежит в числовом диапазоне $-1.41 < Fi < -1.1$ для записи горизонтального канала SHN станции SRK (радиотелеметрическая сейсмостанция, расположена на расстоянии 9 км от вулкана и оборудована комплектом короткопериодной аппаратуры на базе сейсмометра CM-3), то вычисляется высота выброса. Расчет высоты пеплового выброса основан на интегрировании количественной характеристики возрастающей части огибающей сейсмического сигнала. Следует отметить, что похожие на пепловые выбросы значения Fi регистрируются также при тектонических землетрясениях. Для исключения таких “ложных тревог” из анализа удаляются интервалы времени с сейсмическими сигналами от тектонических землетрясений. Основным признаком выделения таких интервалов является регистрация тектонических землетрясений на удаленных от вулкана станциях. Достоверность работы программы пока оценивается как 70%.

В 2014 г. видеорегистрация зафиксировала 26 пепловых выбросов, и все они были выделены по сейсмологическим данным программой ADAP в течение 5-10 мин после их начала, с последующей рассылкой сообщений об опасности по электронной почте сотрудникам лаборатории ИСВА. Коэффициент корреляция для этих выбросов получился равным 0.85 [1].

Результаты применения новых технологий

Всего с 01.01.2006 по 01.05.2015 в рамках международного проекта KVERT [7, 8] по данным сейсмологических и видео наблюдений было передано ~585 срочных сообщений о пепловых выбросах вулкана Шивелуч с высотой $h \geq 6.0$ км н.у.м. [9]. В соответствии с регламентом эти сообщения на английском языке передавались как можно быстрее участникам проекта KVERT (Аляскинская Вулканологическая Обсерватория, Институт Вулканологии и Сейсмологии), в Центры слежения за вулканическими облаками в Токио и Анкоридже, а также в Главное управление МЧС по Камчатской области и Метеоцентр Елизовского аэропорта (до 2012 г.).

Рассмотрим более подробно результаты за 2010-2015 гг. для определения соотношения различных видов данных. Всего за этот период зарегистрировано 272 пепловых выброса с высотой $h \geq 6.0$ км н.у.м. по сейсмическим данным. Из них 103 было подтверждены видео наблюдениями. Остальные были скрыты облачностью или темным временем суток. Для 272 событий было передано 225 срочных сообщений. Остальные 47 произошли в нерабочее время, и задержка об их обнаружении превышала 6 час от начала события, поэтому срочные сообщения о них не передавались согласно регламенту.

Теперь рассмотрим более подробно результаты с 01.01.2014 до 01.05.2015 гг. для оценки качества работы. В Таблице 2 представлены результаты работы по оповещению об опасных пепловых выбросах в режиме реального времени с использованием программы ADAP для оценки скорости объявления тревоги. В таблице перечислены все выбросы с высотой $h \geq 8$ км н.у.м. по видео данным, как наиболее опасные для авиации и произошедшие в рабочее время. Времена сообщений

взяты из электронной почты С.Л. Сенюкова. Представленная информация может быть проверена по сообщениям на сайте Токио VAAC - <http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/index.html>. В представленных случаях задержка оповещения от начала выброса составила от 10 до 30 мин, что существенно меньше задержки по спутниковым данным. Например, Токио VAAC использовал данные геостационарных спутников GOES, GMS и MTSAT, которые из всех имеющихся обновляются наиболее часто - через 30 минут. Но даже в этом случае задержка оповещения по спутниковым данным от начала эксплозивного извержения получилась примерно 1–2 ч.

Таблица 2. Данные о пепловых выбросах вулкана Шивелуч с высотой $h \geq 8$ км н.у.м., произошедших в рабочее время в 2014-2015 гг., с временными задержками об их оповещении.

Дата	Время начала извержения по сейсмическим данным	Высота пеплового выброса, км над уровнем моря		Время оповещения об опасности сотрудником лаборатории ИСВА	Время оповещения об опасности Токио VAAC	
		По программе ADAP[1]	По видео данным		По данным КФГС РАН	По своим спутниковым данным
12.01.14	01:44	5.2	8.5	02:00	02:11	03:34
20.01.14	22:47	6.1	8.5	23:00	23:12	00:43 (21.01)
22.01.14	03:05	6.2	8.0	03:44	03:54	06:46
12.05.14	22:06	5.8	10	22:20	22:34	00:01 (13.05)
26.05.14	22:36	5.2	10	22:45	23:02	23:48
24.09.14	00:38	9.0	12	00:43	00:55	01:46
28.02.15	01:00	11.0	9	01:09	01:18	02:59
25.03.15	22:00	7.3	10	22:09	22:23	23:59

Примечание. Везде указано время UTC.

В Таблице 3 представлена информация обо всех пепловых выбросах с высотой $h \geq 6$ км н.у.м. по сейсмическим данным, произошедших в рабочее время в 2015 г, когда вулкан был закрыт облачностью, и подтверждение о выбросах можно было получить только по спутниковым данным.

Таблица 3. Данные о пепловых выбросах вулкана Шивелуч с высотой $h \geq 6$ км н.у.м., произошедших в рабочее время в 2015 г., с временными задержками об их оповещении

Дата	Время начала извержения по сейсмическим данным	Высота пеплового выброса, км над уровнем моря		Время оповещения об опасности сотрудником лаборатории ИСВА	Время оповещения об опасности Токио VAAC	
		По сейсмическим данным[9]	По спутниковым данным АВО/ время		По данным КФГС РАН	По своим спутниковым данным
21.01.	22:23	6.6±2.0	-	22:44	22:56	24:00
08.02	03:14	9.0±3.0	9.8/04:37	03:31	03:43	04:25
17.02	17:31	7.6±2.5	8.6/18:18	20:25*	20:44	20:44
03.03	22:50	9.0±3.2	7.0/01:59 (04.03)	23:03	23:12	00:07(04.03)
11.03	21:43	7.5±2.5	-	21:59	22:12	-
19.03	22:56	6.2±1.8	7.0/23:14	23:16	23:24	00:31(20.03)
29.03	11:56	10.0±3.3	5.5/16:05	12:36	12:49	13:53
03.04	04:32	8.0±2.6	7.3/05:00	04:50	04:55	06:34

Примечание. Везде указано время UTC. Событие за 17.02 произошло в нерабочее время, но сообщение о нем было передано согласно регламенту.

Здесь нужно отметить, что по спутниковым данным можно обнаружить пепловое облако только в случае, если оно поднимается выше метеорологических облаков. Для оценки высоты по спутниковым данным АВО характерно постепенное занижение высоты облака с увеличением задержки снимка относительно начала события. Также важно сказать, что в последние годы Токио VAAC чаще использует в своей информации оценку высоты пеплового облака по сейсмическим данным КФГС РАН даже при наличии своей оценки по спутниковым данным. Из данных таблицы очевидно

значение тревоги для авиации по сейсмологическим данным КФ ГС РАН, если вулкан закрыт облачностью в дневное время. В ночное время необходимость в таких данных еще более возрастает из-за отсутствия видимости.

Заключение

Разработка и внедрение новых технологий контроля пепловых извержений по сейсмологическим данным позволяют обеспечить наиболее быстрое и достаточно точное для практических задач оповещение о возможной вулканической пепловой опасности независимо от погодных условий и времени суток. В 2014-2015 гг. время задержки оповещения для извержений вулкана Шивелуч составило 10-30 мин от начала события. Ошибка определения высоты при этом оценивается в ~30%. Технологии не имеют аналогов в мировой практике.

В настоящее время результаты оценки возможной вулканической (пепловой) опасности рассылаются в МЧС Камчатского края и в рамках некоммерческих договоров по обмену информацией с Токио VAAC (Япония), WeatherNews Inc. (Япония), Support to Aviation Control System (Бельгия), Аляскинской вулканологической обсерваторией (США), Институтом Морской Геологии и Геофизики (Россия, г. Южно-Сахалинск) и метеослужбами военных частей Камчатки. В МЧС Камчатского края такая информация передается дополнительно по телефону согласно регламенту. Также важно сказать, что в настоящее время работа по обнаружению (идентификации) пепловых извержений по сейсмологическим данным выполняется только в рабочее время (с 8 час утра до 18 час вечера). При этом имеется принципиальная возможность проводить контроль пепловых извержений по сейсмологическим данным круглосуточно.

Следует отметить, что по сейсмологическим данным можно уверенно выделять сигналы, соответствующие пепловым выбросам, если удаление опорной сеймостанции от эруптивного центра не превышает 10 км. Это связано со значительным затуханием относительно высокочастотной части спектра в такой сильно поглощающей среде как шлак, слагающий верхнюю часть разреза под станцией приема. Очевидна необходимость продолжения работ как по установке сейсмических станций и систем видео наблюдений на вулканах Камчатки, так и по совершенствованию программ, по определению и уточнению индивидуальных частотных индексов и коэффициентов для вычисления высот по сейсмологическим данным.

Список литературы

1. Блинецов В.Е., Сеньюков С.Л. Программа ADAP для автоматического выделения пепловых выбросов и расчёта их высоты по сейсмологическим данным // Сейсмические приборы. 2015. Т.51. №1. С.46-59.
2. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. № 3. С.22-34.
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) // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. Петропавловск-Камчатский, 2004. С.292–300.
4. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С.96–108.
5. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С.18–40.
6. 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.
7. Gordeev E.I., Girina O.A. Volcanoes and Their Hazard to Aviation // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. Vol. 84. No.1. P.1–8.
8. Neal C., Girina O., Senyukov S., Rybin A., Osiensky J., Izbekov P., Ferguson G. Russian eruption warning system for aviation // Nat. Hazards. 2009. V.51. P.245–262.
9. 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.