

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗА ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ В 2004-2007 гг. В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ***Сенюков С.Л.**Камчатский филиал Геофизической Службы РАН, Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru***Введение**

Вулкан Безымянный – координаты вершины: 55° 58' с.ш., 160° 35' в.д. Абсолютная высота вулкана 2 869 м. Последнее катастрофическое извержение произошло 30 марта 1956 г., после 900-1 000 летнего периода покоя. После этого события вулкан извергается 1-2 раза в год.

Перед некоторыми извержениями были зафиксированы сейсмические предвестники в виде роев поверхностных землетрясений, и в таких случаях Токарев П.И. сообщал о возможности извержений в октябре 1959 г., апреле 1960 г. и в марте 1961 г. [3]. В работе Чубаровой О.С. [8], исследовавшей сейсмичность вулкана Безымянный в 1971-1994 гг., был сделан вывод: «Энергия землетрясений, связанных с извержениями вулкана Безымянный за период 1971-1994 гг. была меньше, чем на начальной стадии эруптивного цикла. В 1955-1956 гг. несколько землетрясений имели магнитуду  $M = 5$  ( $K_s = 12.1$  [7]), в 1957-1970 гг. величина  $M$  достигала 3 ( $K_s = 9.1$ ), а за последние десятилетия только одно наиболее сильное землетрясение с  $M = 2$  ( $K_s = 7.6$ ) произошло в 1977 г. перед извержением, в процессе которого был излит лавовый поток. Кратковременность или почти полное отсутствие сейсмической подготовки на уровне выше  $M = 0$  ( $K_s = 4.6$ ), который обеспечивается ближайшей сейсмостанцией, не позволяют, как в 50-60-е годы, прогнозировать извержения вулкана Безымянный по сейсмологическим данным». Таким образом, официально не было спрогнозировано ни одно извержение этого вулкана по сейсмическим данным.

По литературным источникам зафиксирован один удачный краткосрочный прогноз для извержения 29 июня 1985 г. по визуальным наблюдениям «автоэкссплозивных лавин» (при отсутствии сейсмических предвестников), автор – Малышев А.И. [4].

Камчатский филиал Геофизической службы (КФ ГС) РАН начал собственный мониторинг активности вулканов Камчатки в 2000 г. (<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) по сейсмическим, спутниковым, визуальным и видео наблюдениям [5]. Из всех перечисленных видов наблюдений сейсмический мониторинг является, безусловно, ведущим методом. В 1996-1999 гг. в обработку землетрясений в районах вулканов были внесены существенные изменения. Все эти изменения были связаны с решением главной задачи – обеспечением обработки вулканических землетрясений в режиме, близком к реальному времени. С историей развития и модернизации сети, а также сбором и хранением информации можно ознакомиться в работах [1, 2]. Отметим только, что в 1996-1998 гг. был произведен качественный скачок в обработке сейсмической информации. В эти годы на приемных центрах радиотелеметрической системы была внедрена цифровая регистрация сейсмических сигналов, были разработаны и внедрены методическое и программное обеспечение обработки сейсмограмм с экрана компьютера. Создание корпоративной сети КФ ГС позволило иметь доступ к сейсмическим данным в реальном масштабе времени. Результатом выполненных работ стало создание возможности обработки вулканических землетрясений в режиме, близком к реальному времени. С введением цифровой технологии регистрации и обработки сейсмических сигналов энергетический класс обрабатываемых землетрясений понизился в среднем на единицу. Появилась возможность обрабатывать более слабые землетрясения в вулканических районах.

Мониторинг вулканической активности направлен на предупреждение о вулканической опасности. Таким образом, ставится задача не определения даты и масштабов будущего извержения, а решается вопрос об активности вулкана и, следовательно, опасен ли он в настоящее время. Зафиксировать начало пробуждения вулкана и проследить его дальнейшее состояние и есть задача мониторинга вулканической активности. Главным здесь представляется определение индивидуального для каждого вулкана понятия «нормальной, фоновой» сейсмичности, так как на базе этого понятия делается вывод о том, опасен или нет вулкан в настоящее время. В начале исследований уровень «нормальной, фоновой» сейсмичности был принят следующий: «Нормальная, фоновая сейсмичность, если зарегистрировано не более 5 поверхностных землетрясений с  $K_s \geq 4.0$  ( $M_I \geq 1.25$ ) за сутки или не более 2 землетрясений с  $K_s \geq 5.0$  ( $M_I \geq 1.75$ )».

С февраля 2000 г. по февраль 2004 г. было зарегистрировано и изучено 7 извержений вулкана Безымянный. В пяти из семи случаев система предупредила о возможности извержения и в двух случаях - нет. В результате исследований в мае 2004 г. был снижен уровень «нормальной, фоновой» сейсмичности и сформулирован алгоритм прогноза извержений этого вулкана по сейсмическим и спутниковым данным [9]. В основу алгоритма была положена последовательность выделенных в ходе исследований предвестников (типичный сценарий) в период подготовки вулкана к извержению и возможная их интерпретация:

- 1) рой слабых поверхностных землетрясений – поступление новой порции магмы и начало дегазации;
- 2) регистрация сейсмических сигналов, сопровождающих по нашей интерпретации сход лавин – вздымание постройки вулкана;
- 3) рост температуры и размера термальной аномалии – сход горячих лавин и истечение горячих газов.

Следует отметить, что обычно выделенные выше три предвестника последовательно регистрировались по мере приближения вулкана к извержению.

Алгоритм прогноза извержений вулкана Безымянный был определен, как формализованная процедура принятия решения о возможности извержения в режиме реального времени на основе накопленных данных. Это важно для краткосрочного прогноза, так как в этом случае, часто из-за отсутствия времени и возможности для обсуждения, успех прогноза зависит от быстрого решения дежурного сотрудника (или группы сотрудников), который, выполняя формальную процедуру, должен принять решение о вероятности извержения. И если вероятность извержения высока, то необходимо оформить правильно прогноз и передать в соответствующие организации. Обычно у дежурного сотрудника нет времени на вспоминание и обсуждение предвестников предыдущих извержений. Следует отметить, что дежурные сотрудники лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН работают каждый день в соответствии с установленным графиком дежурств, независимо от праздников и выходных. Они каждый день оценивают активность вулканов Камчатки и имеют право делать прогноз извержений, если согласно наблюдаемым параметрам вероятность извержения высока.

**Алгоритм прогноза извержений вулкана Безымянный (пункт №3 был включен в алгоритм после извержения 11 января 2005 г., таблица)**

1) Вероятность извержения вулкана Безымянный равна нулю, если в районе вулкана регистрируется «фоновая», нормальная сейсмичность (не более 10 поверхностных землетрясений с  $K_s \geq 3.0$  ( $M_l \geq 0.75$ ) за сутки или нет землетрясений с  $K_s \geq 4.0$  ( $M_l \geq 1.25$ )), и максимальная температура термальной аномалии на куполе вулкана не превышает максимальную температуру аномалии лавового потока из второго конуса Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ-1975), которую можно считать постоянной.

2) Вероятность извержения равна 50 %, если в районе вулкана начинает регистрироваться «повышенная» сейсмичность (более 10 поверхностных землетрясений с  $K_s \geq 3.0$  ( $M_l \geq 0.75$ ) за сутки или хотя бы одно с  $K_s \geq 4.0$  ( $M_l \geq 1.25$ )).

3) Извержение произойдет в следующие 30 дней с вероятностью 90 %, если в течение последних 3 суток регистрировалась сейсмичность «выше фона» и наблюдается дальнейший рост количества и энергии поверхностных землетрясений, в сочетании с ростом максимальной температуры термальной аномалии на куполе вулкана относительно максимальной температуры аномалии лавового потока из второго конуса Северного прорыва БТТИ-1975.

4) Время извержения можно уточнить с точностью до недели по ежедневным данным регистрации предваряющей сейсмичности. Извержение произойдет в следующие 7 дней с вероятностью 100 %, после того как наряду с повышенной сейсмичностью начинают регистрироваться сейсмические события (более 5 за сутки), сопровождающие по нашей интерпретации сход лавин, что может свидетельствовать о вздымании купола.

5) По интенсивности предваряющего роя землетрясений можно делать приблизительную оценку масштабов будущего извержения путем сравнения с интенсивностью сейсмической подготовки зарегистрированных извержений.

6) Существующая в настоящее время сеть автоматических телеметрических сейсмических станций позволяет проводить все эти исследования, если дрожание на вулкане Ключевской не больше 1 мкм/сек по станции «С1R».

## Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в режиме реального времени (таблица)

Таблица. Прогнозы и результаты.

№	Время объявления прогноза (UTC)	Прогноз			Время извержения, высота пеплов. выброса н.у.м.	Подтверждение
		Время начала извержения	Высота пеплов. выброса	Был передан в организации		
1	2004, 15 июня	следующие 5 дней	-	ИВС(KVERT), АВО и КФГС	18 июня 2004 г. с 19:40 до 20:20 UTC, более 8 км.	Сейсм., спутн., визуальные и видео данные
2	2005, 06 января	следующие 7 дней	-	ИВС(KVERT), АВО и КФГС	11 января 2005 г. с 08:02 до 08:45 UTC	Сейсмические и спутниковые данные
	2005, 10 января	следующие 7 дней	6-10 км н.у.м.	КФ РЭС		
3	2005, 24 ноября	следующие 30 дней	6-10 км н.у.м.	КФ РЭС, ИВС(KVERT), АВО и КФГС	30 ноября 2005 г. с 12:00 до 13:15 UTC, более 6 км	Сейсмические и спутниковые данные
	28 ноября (уточнение)	следующие 7 дней	6-10 км н.у.м.			
4	2006, 02 мая	следующие 30 дней	6-10 км н.у.м.	КФ РЭС, ИВС(KVERT), АВО и КФГС	09 мая 2006 г. с 08:21 до 08:45 UTC, 12-15 км.	Сейсм., спутн., визуальные и видео данные
	06 мая (уточнение)	следующие 7 дней	6-10 км н.у.м.			
5	2006, 22 декабря	следующие 30 дней	6-10 км н.у.м.	КФ РЭС, ИВС(KVERT), АВО, КФГС, ГУ МЧС КО	24 декабря 2006 г. с 09:17 до 10:20 UTC, 13 км	Сейсмические, спутниковые и визуальные данные
	23 декабря (уточнение)	следующие 7 дней	6-15 км н.у.м.			
6	2007, 10 мая *)	следующие 14 дней	6-15 км н.у.м.	КФ РЭС, КФГС	11 мая 2007 г. с ~14:45 до ~15:10 UTC	Сейсмические и спутниковые данные
7	-	-	-	-	14 октября с 14:27 до 16:30 UTC и 15 октября с 02:23 до 14:00 UTC 2007 г	Сейсмические, спутниковые, визуальные и видео данные

\*) Прогноз №6 был сделан по спутниковым данным, т.к. корректный сейсмический мониторинг влк. Безымянный был невозможен с апреля по июнь 2006 г. из-за сильного извержения влк. Ключевской [6].

Примечание: Сокращения в таблице: ИВС(KVERT) - Институт Вулканологии и Сейсмологии (участники проекта KVERT- Kamchatka Volcano Eruption Response Team), АВО – Аляскинская Вулканологическая Обсерватория, КФ РЭС – Камчатский Филиал Российского Экспертного совета, ГУ МЧС КО – главное управление МЧС по Камчатской области, н.у.м. – над уровнем моря.

Результаты: 1) прогнозы № 2-5 были признаны успешными в КФ РЭС; 2) прогноз № 6 пока не оценивался в КФ РЭС; 3) прогноз № 1 в КФ РЭС не передавался; 4) с июня 2004 г. по 30 ноября 2007 г. ложных тревог не зафиксировано; 5) для извержения № 7 было дано предупреждение об активизации вулкана (желтый код в течение 3 дней перед извержением) в интернете (<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), но официальный прогноз не был сделан.

### Обсуждение результатов

Из семи извержений только последнее извержение не было спрогнозировано. Это произошло из-за того, что перед этим извержением наблюдалась очень слабая и кратковременная (2 дня) сейсмическая подготовка. Таким образом, подготовка вулкана к извержению происходила не по обычному сценарию, который был положен в основу алгоритма. Необычно также было то, что температура аномалии на вулкане значительно выросла за 3 дня до извержения (сообщение Мельникова Д.В. – ИВС(KVERT)), но при этом по сейсмическим данным не регистрировались лавины, которые раньше всегда хорошо коррелировали с повышением температуры термальной аномалии. Совместный анализ спутниковых и видео данных за 11 октября 2007 г позволил сделать предположение, что причиной повышения температуры аномалии могло быть необычно мощное

истечение газов с высокой температурой. По видео данным в это время наблюдалась мощная парогазовая деятельность высотой до 1.5 км над куполом вулкана.

Пропуск последнего извержения заставил задуматься над вопросом: «Каким образом нужно изменить алгоритм, чтобы не было пропущенных извержений?»

Для ответа на этот вопрос был проведен ретроспективный анализ предвестников. На рис. 1 представлен график, показывающий продолжительность сейсмической подготовки перед извержениями вулкана Безымянный. Необходимо отметить, что уровень «фоновой, нормальной» сейсмичности до мая 2004 г. был более высоким, чем в настоящее время. Поэтому продолжительность сейсмической подготовки могла быть несколько больше для извержений до июня 2004 г. Был проведен анализ зависимости продолжительности сейсмической подготовки перед извержениями вулкана Безымянный от сейсмической и вулканической активности вулкана Ключевской. Несмотря на некоторую неоднородность данных можно сделать следующие выводы:

- 1) Наиболее продолжительная сейсмическая подготовка перед извержениями вулкана Безымянный наблюдалась в периоды времени, когда сейсмическая активность вулкана Ключевской регистрировалась только на глубине около 30 км. Именно в такие периоды алгоритм прогноза извержений вулкана Безымянный работал лучше всего.
- 2) Короткая и слабая сейсмическая подготовка перед извержениями вулкана Безымянный наблюдалась, когда сейсмическая активность вулкана Ключевской была сосредоточена в постройке этого вулкана, на глубинах от кратера до 5 км ниже уровня моря.
- 3) Если извержения вулкана Безымянный происходили во время извержений вулкана Ключевской, то зарегистрировать сейсмическую подготовку перед извержениями вулкана Безымянный не было возможности из-за сильного дрожания вулкана Ключевской. В такие периоды прогноз извержений вулкана Безымянный можно сделать только по температуре его термальной аномалии.

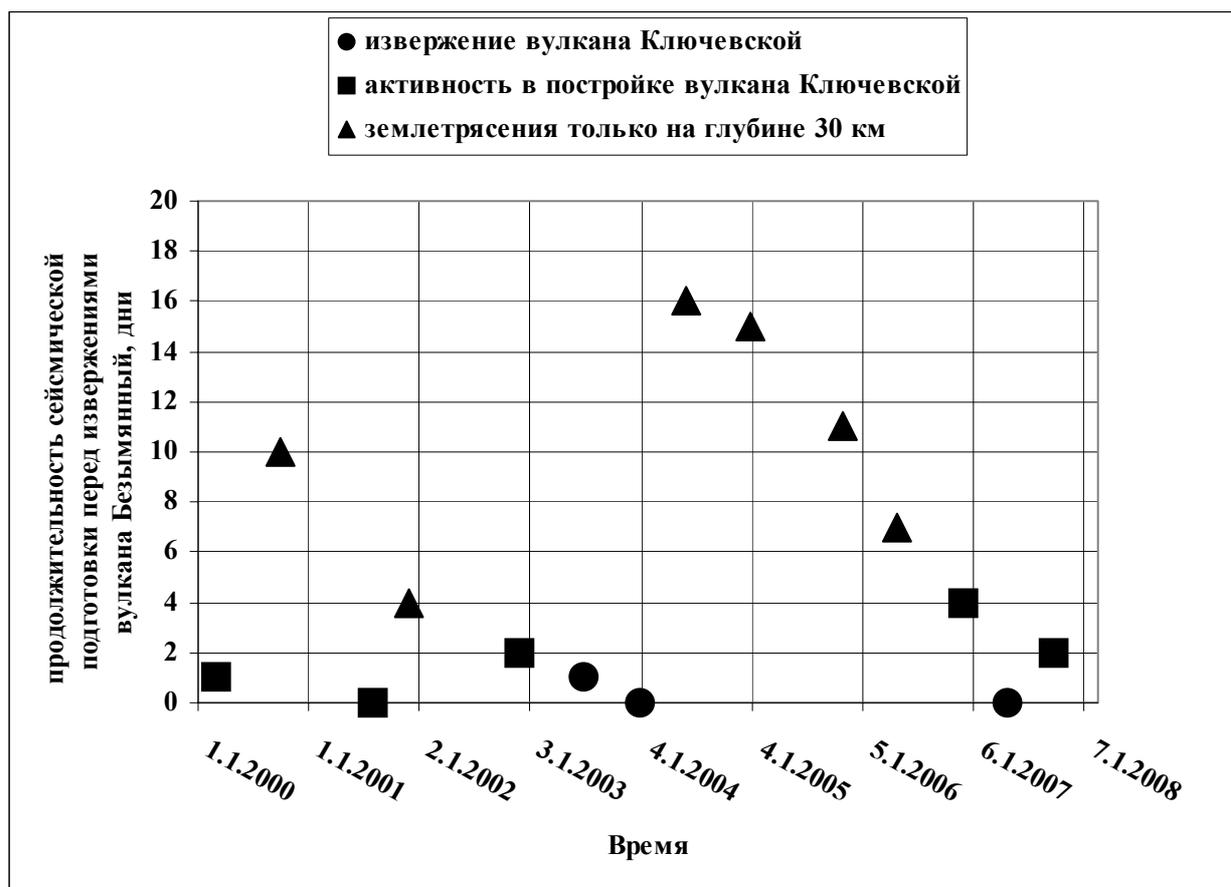


Рис. 1. График продолжительности сейсмической подготовки перед извержениями вулкана Безымянный. Тип маркера показывает, в каком состоянии в это время находился вулкан Ключевской.

## **Заключение**

- 1) Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в реальном времени можно признать успешными. Из семи извержений только последнее извержение не было спрогнозировано.
- 2) Установлена зависимость успешности (и, соответственно, ограничения в применении) использования алгоритма от активности вулкана Ключевской.
- 3) Алгоритм будет успешно работать, если сейсмическая активность вулкана Ключевской будет регистрироваться только на глубине около 30 км.
- 4) Алгоритм необходимо скорректировать для случаев, когда сейсмическая активность вулкана Ключевской будет наблюдаться в постройке этого вулкана. Так как в этом случае описанный в разделе «Введение» сценарий не выполняется, по-видимому, необходимо рассматривать каждый предвестник самостоятельно, но не последовательность предвестников, как было раньше.
- 5) В алгоритме необходимо усилить значение такого предвестника, как температура термальной аномалии на вулкане Безымянный. Для этого нужно провести ретроспективный анализ спутниковых, температурных данных, которые накапливались с сентября 2002 г. Возможность для измерения температур появилась только в октябре 2006 г [6]. В случаях, когда сейсмическая активность вулкана Ключевской будет наблюдаться в постройке этого вулкана или вулкан Ключевской находится в стадии извержения, этот предвестник будет играть решающую роль.
- 6) Вероятно, магматические системы вулканов Безымянный и вулкана Ключевской взаимодействуют, при этом система вулкана Безымянный имеет подчиненное значение.

## **Список литературы**

1. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 11-42.
2. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Дроздин Д.В. и др. Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 43-61.
3. Горельчик В.И. К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 341-351.
4. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
5. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 68-78.
6. Соболевская О.В., Сеньюков С.Л. Исследование температур термальных аномалий на активных вулканах Камчатки в 2006-2007 гг. с целью определения предвестников их извержений по данным сенсора AVHRR спутников NOAA 16 и NOAA 17 // (статья в данном сборнике).
7. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
8. Chubarova O.S. Bezymianny volcano (Kamchatka). Seismic accompaniment of the Novy dome growth in 1971-1994 // Geophysics and Environment. IUGG XXI General Assembly. Boulder, Colorado. July 2-14. Abstracts. Week A. 1995. P. A49.
9. Senyukov Sergey L. Algorithm of the eruption prediction of Bezymianny volcano (Kamchatka) // Thesis of the presentations of 5<sup>th</sup> Biennial Workshop on Subduction emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5). Sapporo. 2006. P. 57.