

Первое применение в реальном времени методики СОУС'09 для прогноза извержений вулкана Безымянного

В.А. Салтыков, Ю.А. Кугаенко, П.В. Воронаев

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Геофизическая служба Российской академии наук», Петропавловск-Камчатский 683006, salt@emsd.ru

Рассматриваются предвестниковые ситуации, выявленные в реальном времени по возрастанию уровня сейсмичности перед извержениями вулкана Безымянный в ноябре 2016 г. – марте 2017 г. Применение формализованной прогностической методики, разработанной для вулкана Безымянный по данным 1999–2014 гг., позволило сформулировать вероятностные прогнозы, признанные КФ РЭС оправдавшимися.

Одним из наиболее опасных вулканических объектов России является камчатский вулкан Безымянный, относящийся к Ключевской группе вулканов. Этот вулкан знаменит катастрофическим извержением 1955–1956 гг., кульминация которого связана с направленным взрывом 30.03.1956 г., уничтожившим часть постройки вулкана, при этом гигантское эруптивное облако поднялось на высоту 35–40 км [1]. По аналогии с предыдущими интервалами активизации вулкана Безымянный и исходя из оценок их длительности предполагается, что современный эруптивный цикл вулкана продлится еще не менее 100–200 лет [2]. С 1977 по 2012 гг. на вулкане Безымянный ежегодно происходило 1–2 кратковременных, но сильных эксплозивно-эффузивных извержения с высотой выбросов пепла в некоторых случаях до 10–15 км [7]. С сентября 2012 г. по ноябрь 2016 г. вулкан Безымянный находился в состоянии парогазовой и фумарольной активности. В кратере вулкана продолжается выжимание купола вязкой лавы, начавшееся после взрыва 1956 г. Учитывая опасность вулкана Безымянный для авиации и оценки длительности текущего цикла его эруптивной активности, разработка методик прогноза его извержений остается актуальной задачей.

Сейсмичность вулкана Безымянного

Сейсмичность, регистрируемая на вулкане Безымянный, носит характер спорадических вспышек, связанных с извержениями и их подготовкой. В основном это достаточно слабые ($4,0 \leq K_S \leq 8,8$) мелкофокусные ($H < 10$ км) сейсмические события. Сейсмичность является наиболее надежным источником информации при выявлении потенциальной предвестниковой ситуации для этого вулкана. Непрерывные данные обеспечиваются камчатской системой сейсмического мониторинга, они доступны для анализа в реальном времени и не зависят от возможности визуальных наблюдений, метеоусловий, прозрачности атмосферы, наличия спутников и т.д. По данным 1999–2012 гг. в большинстве случаев извержения предварялись статистически значимым повышением уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 [5] с заблаговременностью до 40 суток, при этом в 9 случаях сейсмичность затем выходила на высокий уровень и в трех – на экстремально высокий [3].

О методике вероятностного прогноза

В соответствии с современными требованиями к прогнозу опасных природных процессов методика обнаружения предвестника должна быть формализована, а среди прочих ее параметров обязательными должны быть эффективность предвестника, что позволяет оценить вероятность реализации прогноза. В работах [4, 6] предложен формализованный подход вероятностного прогноза на основе применения статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 и ряда вспомогательных

функций, характеризующих предвестник. Для выявления временных участков подготовки извержения предлагается использовать функцию-индикатор $U(t)$ и пороговый критерий. Разработка включила в себя следующие аспекты:

- предложен формализованный предвестник извержения – превышение значением ряда U , рассчитанного на основе данных об уровне сейсмичности вулкана Безымянный по шкале СОУС'09, определенного порогового уровня;
- методика включает параметр вероятности реализации прогноза; создана номограмма вероятности в зависимости от времени прогноза и значения прогностического параметра;
- формализована процедура снятия состояния тревоги.

На основе данных о сейсмичности вулкана Безымянный в 1999–2014 гг. оценена надежность и достоверность предвестника. Показано, что надежность предвестника уменьшается с увеличением пороговых значений, а его достоверность растет. При прогнозировании извержений надежность составляет 0,38–0,95 (т.е. от 38% до 95% извержений в зависимости от задаваемого порогового значения имели предвестник), а достоверность – 0,3–0,6 (т.е. реализованы от 30% до 60% выявленных предвестников также в зависимости от используемого порога).

Проведена оценка эффективности предвестника двумя способами. Показано, что результаты применения прогностической методики статистически значимо отличаются от случайного угадывания и дают по сравнению с ним выигрыш в 3–30 раз. Представленные оценки получены по данным о сейсмичности вулкана Безымянный 1999–2014 гг., в течение которых произошло 21 извержение.

Предвестниковые ситуации в ноябре 2016 г., январе-феврале и марте 2017 г.

Усиление сейсмичности, начавшееся в ноябре 2016 г., привело к росту вероятности извержения вулкана Безымянного (рис.). Приведенный на рис. параметр (контрастность) показывает, во сколько раз увеличивается вероятность прогнозируемого события при появлении предвестника по сравнению с ситуацией, когда предвестник отсутствует. Методика ориентирована на расчет выделившейся сейсмической энергии, а не числа зарегистрированных на вулкане землетрясений. Как видно из приведенного рис., эти величины не всегда коррелируют, что является особенностью вулканических областей.

Разработанная методика ранее не была опробована в режиме реального времени, поэтому мониторинг функции-индикатора в 2016 г. велся в экспериментальном режиме. К тому же длительное (с сентября 2012 г.) отсутствие извержений позволяло предположить, что режим вулкана изменился и методика, разработанная для событий 1999–2012 гг., может оказаться неэффективной. Однако начавшееся экструзивно-эффузивно-экструзивное извержение показало, что предложенный подход остается актуальным. По данным KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>) извержение началось 5.12.2016 г. с экструзивной фазы (активизировалось выжимание экструзии в кратере лавового купола), 11.12.2016 г. на склон вулкана излился лавовый поток, а 15.12.2016 г. было отмечено предположительно взрывное событие: был зафиксирован парогазовый шлейф с примесью пепла. Извержение произошло, когда его вероятность превышала среднемноголетнюю в ~10 раз, а вероятность в отсутствии предвестника – более чем в 100 раз (рис.).

Исходя из этого опыта, следующая сейсмическая активизация (январь–февраль 2017 г.) была обработана в режиме реального времени. Прогнозные заключения о готовящемся извержении были переданы в КФ РЭС 26.01.2017 г., 03.02.2017 г. и 10.02.2017 г. Вероятность извержения превышала среднемноголетнюю в ~7 раз. Из-за облачности, затруднявшей наземные и спутниковые наблюдения за вулканом, не

представляется возможным указать точную дату начала извержения. Ориентировочно это случилось между 7 и 11 февраля (по данным KVERT). Видеокамерами КФ ФИЦ ЕГС РАН новый лавовый поток фиксировался на склоне вулкана с 11.02.2017 г. Таким образом, прогноз оправдался: реализовался эффузивным извержением.

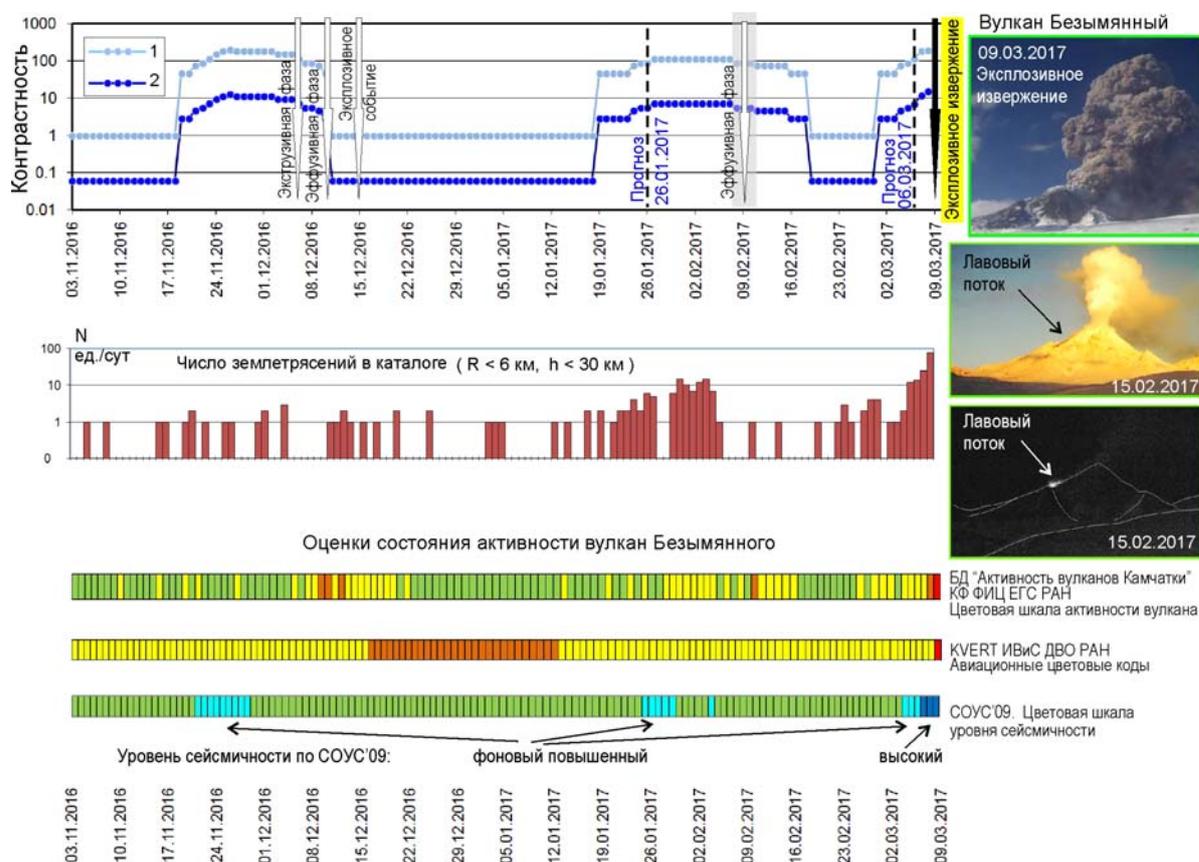


Рисунок. Контрастность: 1 – отношение вероятности извержения вулкана Безымянного при появлении предвестника к вероятности извержения без предвестника; 2 – отношение вероятности извержения при появлении предвестника к среднемноголетней вероятности извержения. Дополнительно на рисунок нанесены эруптивные события, оценки активности вулкана разными коллективами исследователей и фотографии (видеоданные КФ ФИЦ ЕГС РАН).

Сейсмическая активизация, начавшаяся в начале марта 2017 г., также анализировалась в режиме реального времени. Уровень сейсмичности вулкана (во временном окне 5 суток) вышел на *фоновый повышенный* уровень 04.03.2017 г. и перешел на *высокий* уровень 07.03.2017 г. В соответствии с разработанной методикой [6] 06.03.2017 г. в КФ РЭС было передано прогнозное заключение: в этот момент вероятность извержения превышала среднемноголетнюю в ~6 раз. 07–08.03.2017 г. вероятность извержения продолжала расти, и контрастность достигла ~16. Прогноз реализовался живописным эксплозивным извержением 09.03.2017 г., которое в условиях хорошей видимости было успешно зафиксировано видеокамерами. Анализ спутниковых снимков позволил определить начало извержения как ~ 01:30 UTC (данные KVERT). По видеоданным в течение получаса (03:00 – 03:30 UTC) произошло 5 сильных эксплозий с подъемом пепловых облаков на высоту до 7-8 км, после чего вулкан перешел в состояние умеренной эруптивной активности.

Заключение

Три извержения вулкана Безымянный (05-11.12.2016 г., 8-10.02.2017 г. и 09.03.2017 г.) подтвердили работоспособность разработанной методики вероятностного прогноза вулкана Безымянного, которая использует энергетические параметры мелкофокусной сейсмичности, локализованной в радиусе 6 км от вершины вулкана. Первый опыт применения методики в режиме, близком к реальному времени, успешен.

Список литературы

1. *Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В и др.* Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Москва: Наука, 1991. С. 168-194.
2. *Богоявленская Г.Е., Гирина О.А.* Вулкан Безымянный: 50 лет активности // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный) / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С.11-17.
3. *Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Вариации статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09: вулкан Безымянный // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 25. С. 31-40.
4. *Салтыков В.А.* Вероятностный прогноз извержений вулкана Безымянный на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 // Вулканизм и связанные с ним процессы. XIII ежегодная научная конференция, посвященная Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 30 марта – 1 апреля 2015 г. Сборник тезисов докладов. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 115-119.
5. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
6. *Салтыков В.А.* Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45-59.
7. *Girina O.A.* Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956-2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22-41.