



УДК 550.34+551.21

С. Л. Сенюков, С. Я. Дрозина, Т. Ю. Кожевникова,  
В. Т. Гарбузова, И. Н. Нуждина

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

## Прогноз извержения вулкана Безымянный 8 марта 2012 года по сейсмологическим данным

В 2000–2011 гг. проводились работы по изучению режима активности вулкана Безымянный по сейсмологическим данным. В итоге был разработан общий сценарий подготовки умеренных эксплозивных извержений вулкана, характерных для его эруптивной деятельности после его катастрофического извержения 30 марта 1956 г. Для быстрой оценки вероятности извержения в реальном мониторинге по этому сценарию был разработан алгоритм прогноза. Также было установлено, что алгоритм можно успешно применять при условии, что сейсмичность в районе вулкана Ключевской не превышает «фоновый» (нормальный) уровень. Использование данного алгоритма в рамках ежедневного мониторинга позволило 15 февраля 2012 г. сделать прогноз о возможном начале умеренного эксплозивного извержения по сейсмологическим данным в ближайшие 30 суток, а 3 марта уточнить время начала извержения на период с 3 по 10 марта. Умеренное эксплозивное извержение вулкана Безымянный произошло 8 марта 2012 г., и прогноз полностью оправдался. Для периода 2005–2012 гг. было сделано 9 официальных (зафиксированных в Камчатском филиале Российского экспертного совета) успешных краткосрочных прогнозов для 11 последних умеренных эксплозивных извержений вулкана Безымянный при одной ложной тревоге.

### Сейсмологические наблюдения и эруптивная деятельность вулкана Безымянный в 20-м веке

Вулкан Безымянный — координаты вершины в программе «Google Планета Земля»:  $55^{\circ}58''$  с. ш.,  $160^{\circ}35''$  в. д., рис. 1. Абсолютная высота вулкана 2869 м. Вулкан находится в центральной части Ключевской группы вулканов к юго-западу от Ключевского [1]. Сейсмологические наблюдения в районе Ключевской группы вулканов начались с открытия в 1946 г. сейсмостанции «Ключи» (42 км от вулкана) и до 1958 г. осуществлялись только по данным этой станции. Ретроспективный анализ сейсмичности для периода 1955–1956 гг. провёл П. И. Токарев [8]. 29 сентября 1955 г. было зарегистрировано землетрясение с  $K_S = 6,8$  (здесь  $K_S$  — энергетический класс землетрясений  $KS1.2\Phi68$  по амплитуде S-волны, определяемый по номограмме С. А. Федотова [9]). После этого начался рой землетрясений, частота и энергия которых постепенно нарастали, и к началу извержения 22 октября достигли максимума. После начала пеплового извержения, частота и энергия землетрясений оставались на одном уровне вплоть до начала марта 1956 г., затем несколько снизились.

Гигантский взрыв вулкана 30 марта 1956 г. произошёл на фоне уменьшения сейсмической активности. Взрыв сопровождался землетрясением с  $K_S = 12$ . На сейсмостанции «Ключи» наиболее сильные землетрясения ( $K_S \sim 12$ ) ощущались не более 2 баллов. После взрыва 30 марта 1956 г. сейсмичность

вулкана резко снизилась. Извержение вулкана Безымянный после 900–1000 летнего периода покоя [1] разрушило вершину вулкана и его восточный склон. После этого события на вулкане ежегодно происходят одно или два эксплозивных извержения с вы-

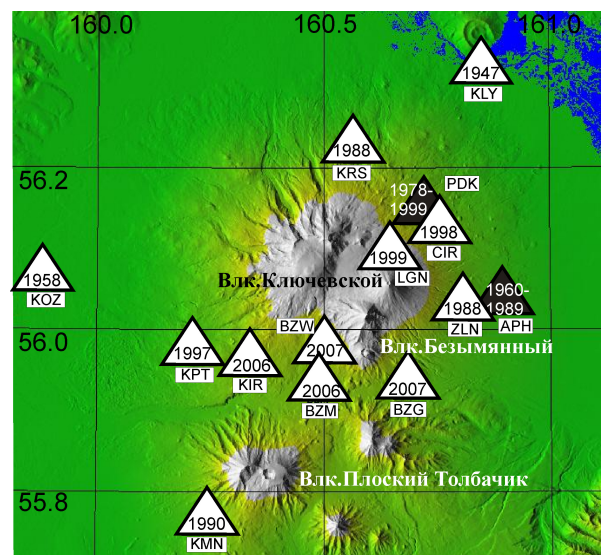


Рис. 1. Карта района исследований. Белыми треугольниками обозначены сейсмические станции с годом открытия станции. Чёрными треугольниками отмечены станции, проработавшие указанный период времени.

сотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря.

Следует отметить, несмотря на то, что эпицентры предвещающих землетрясений располагались близко к вулкану Безымянный, он считался потухшим, поэтому предполагалось, что произойдет извержение побочного кратера вулкана Ключевской [3].

С 1 апреля 1956 г. по 1970 г. сейсмические наблюдения проводились под руководством П. И. Токарева [8]. В октябре 1958 г. была установлена сейсмостанция «Козыревск» (45 км от вулкана), в октябре 1960 г. сейсмостанция «Апахончич» (16 км от вулкана). В этот период произошло 17 умеренных эксплозивных извержений, сопровождавших рост нового купола в кратере вулкана. Перед извержениями 1956–1962 гг. всегда наблюдался рой землетрясений 2-ого типа по классификации П. И. Токарева [7] ( $5 \leq K_S \leq 8,0$ , более слабые невозможно было зарегистрировать). П. И. Токарев сообщал о возможности извержений в октябре 1959 г.; апреле 1960 г.; марте 1961 г. по нарастанию частоты землетрясений 2-ого типа [7]. В период 1962–1963 гг. наблюдалось резкое снижение активности купола и сопровождающей его сейсмической активности. В 1964–1970 гг. — почти непрерывно происходил рост купола, землетрясения регистрировались более равномерно во времени и их энергия была меньше, но иногда регистрировались события с  $K_S = 8,4$ . Для периода времени 1964–1970 гг. был сделан вывод, что перед извержениями не наблюдался рой предвещающих землетрясений.

За период 1971–1994 гг. сейсмичность исследовала О. С. Чубарова [10] и сделала вывод: “Энергия землетрясений, связанных с извержениями вулкана Безымянный за период 1971–1994 гг. была меньше, чем на начальной стадии эруптивного цикла 1955–1956 гг. За этот период зарегистрировано одно наиболее сильное землетрясение с  $M = 3$  ( $K_S = 7,6$ ) в 1977 г. перед извержением, в процессе которого был излит лавовый поток. Кратковременность или почти полное отсутствие сейсмической подготовки на уровне  $M = 1,6$  ( $K_S = 4,6$ ) и выше, который обеспечивается ближайшей сейсмостанцией «Апахончич», не позволяют прогнозировать извержения вулкана Безымянный по сейсмологическим данным”.

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

С 1978 г. по 1985 г. в районе Ключевской группы вулканов были установлены радиотелеметрические станции «Подкова», «Крестовский», «Каменистая» и «Зелёная» (взамен станции «Апахончич»). Но это не улучшило возможности сейсмологического мониторинга в районе вулкана Безымянный, так как ближайшая станция осталась на примерно том же удалении от вершины вулкана (14 км вместо прежних 16 км).

Таким образом, почти за 40 лет наблюдений на вулкане Безымянный произошло большое количество умеренных эксплозивных извержений, но успешных прогнозов с указанием времени начала извержения по сейсмологическим данным не было сделано. Главная причина — недостаточно хорошие условия наблюдений.

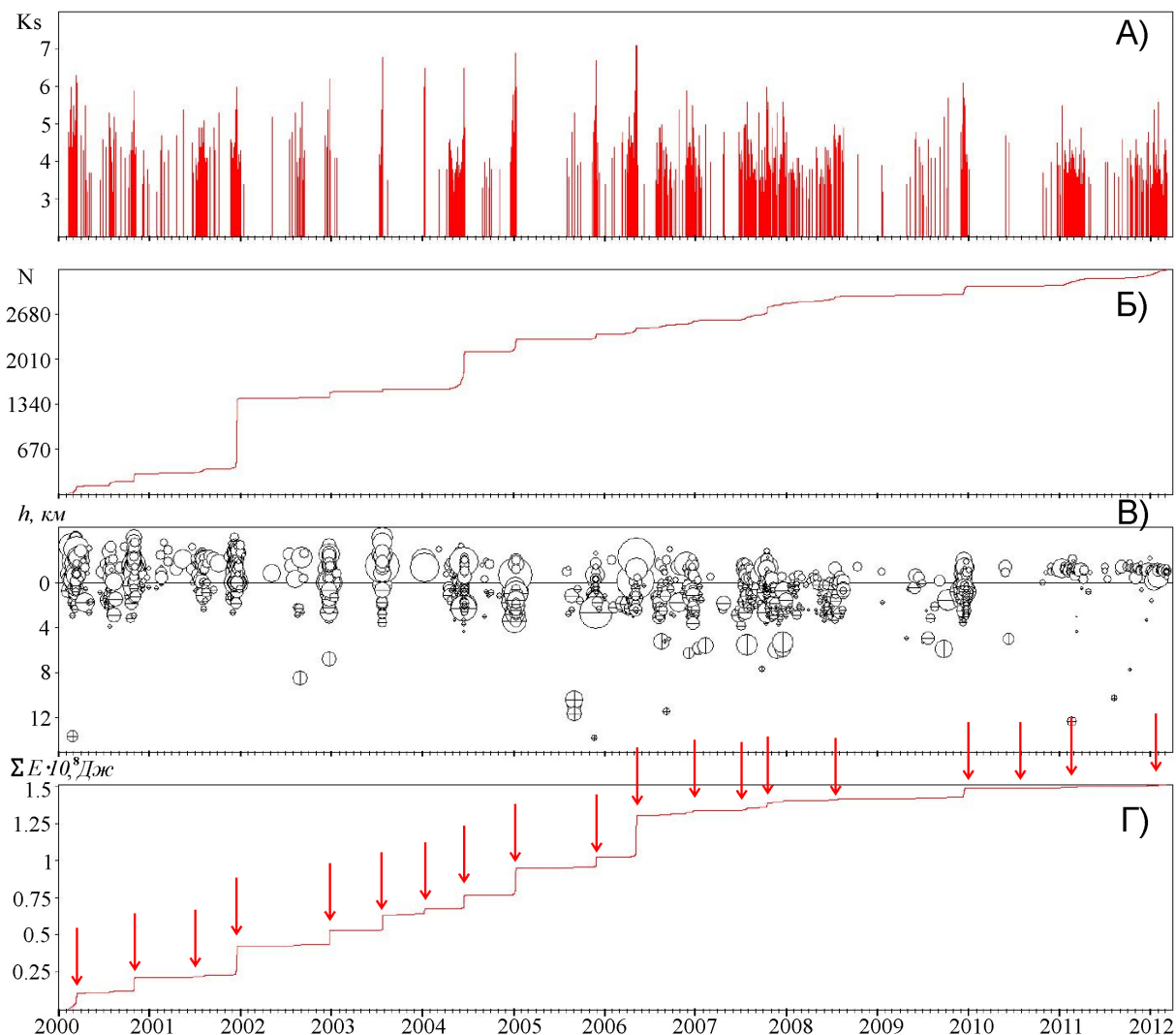
В 1996–1999 гг. благодаря установке новых радиотелеметрических станций («Копыто», «Цирк», «Логинов») и внедрению современных технологий сбора, обработки и хранения сейсмологической информации [2] произошёл качественный скачок в системе наблюдений КФ ГС РАН за сейсмической активностью в районе Ключевской группы вулканов. К 1999 г. появилась возможность регистрировать более слабые сейсмические сигналы в районе вулкана Безымянный, и представительный класс локализованных землетрясений уменьшился с  $K_S = 5,5$  до  $K_S = 4,0$ .

#### Сейсмологические наблюдения в районе вулкана Безымянный с 2000 г. по 2011 г.

Всего за период с 2000 г. по 25 марта 2012 г. локализовано 3373 землетрясения в радиусе 6 км от вулкана и в диапазоне глубин от вершины до 40 км, рис. 2. Из них только 199 событий имели класс  $K_S \geq 5,0$ , что составляет 6%. Главной особенностью сейсмичности в районе вулкана Безымянный в исследуемый период стало то, что практически вся она была сосредоточена вблизи поверхности от вершины до 5 км ниже уровня моря.

В этот период произошло 19 умеренных эксплозивных извержений с высотой пепловых выбросов от 5 до 15 км над уровнем моря.

В 2000 г. вулкан извергался 2 раза: 13 марта и 30 октября. На рис. 3 представлена сейсмичность, предвещающая и сопровождающая эти извержения. В обоих случаях первые сейсмические события появились примерно за 20 дней до пароксизмальной фазы. В 2001 г. также произошло 2 извержения: 6 августа и 15 декабря. На графиках активности, представленных на рис. 4 первые признаки сейсмической подготовки были зарегистрированы за 30 дней и 22 дня, соответственно, до начала извержения. В остальное время в районе вулкана наблюдалось или отсутствие землетрясений, или редкие единичные землетрясения. Сейсмичность, предвещающая извержения 25 декабря 2002 г. и 26 июля 2003 г. была слабой и непродолжительной, первые признаки в виде единичных землетрясений 3-го типа в обоих случаях появились за 2 недели до извержений, рис. 5. Сейсмическую подготовку извержения 13 января 2004 г. невозможно было зарегистрировать из-за сильного вулканического дрожания, сопровождающего извержение вулкана Ключевской. Перед этим извержением удалось зафиксировать только два землетрясения  $K_S \geq 6,0$  (рис. 6). Ретроспективное изучение изменения во времени разли-



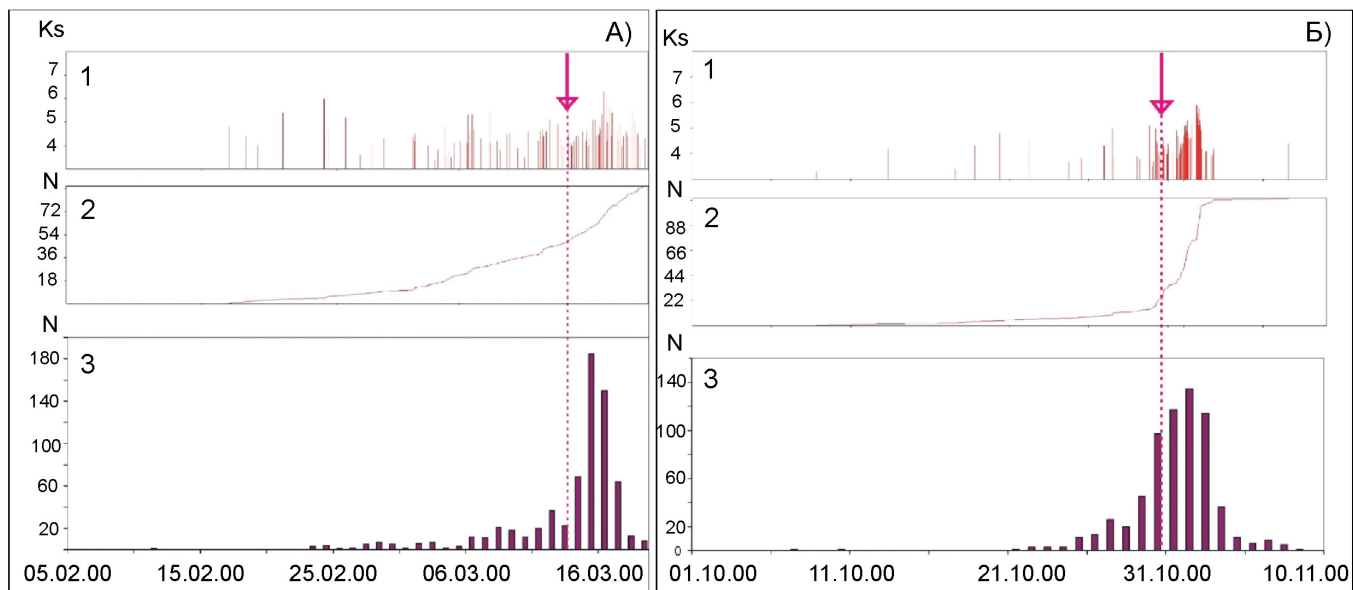
**Рис. 2.** Распределение во времени различных параметров сейсмической активности для землетрясений, произошедших в радиусе 6 км от вершины вулкана Безымянный в период 2000–2012 гг.: А) энергетический класс по  $S$ -волне; Б) кумулятивное количество землетрясений; В) глубина гипоцентров, км; Г) кумулятивная энергия, Дж. Стрелками показаны умеренные эксплозивные извержения.

цы температуры термальной аномалии и температуры фона в районе вулкана показало, что за два дня до начала извержения наблюдалось повышение температуры аномалии, а максимальное значение было отмечено сразу после извержения. Подготовка к следующему извержению 18 июня 2004 г. началась примерно за 30 дней до главного события. Наблюдалось постепенное увеличение количества землетрясений (рис. 6 Б). На рис. 7 представлены примеры волновых форм разных типов землетрясений. Землетрясения 3-го и 4-го типов выделяются в соответствии с классификацией П. И. Токарева [7, 8]. Кроме этого землетрясения 4-го типа можно разделить на два подтипа по продолжительности: «короткие» (~ 1 минута — обычные взрывы) и продолжительные (~ 2 минуты) — серии, сопровождающие сход лавин. Первые наблюдения таких серий были сделаны в 70-е годы с сейсмостанции «Апахончич». Сотрудники, находившиеся на этой станции, могли

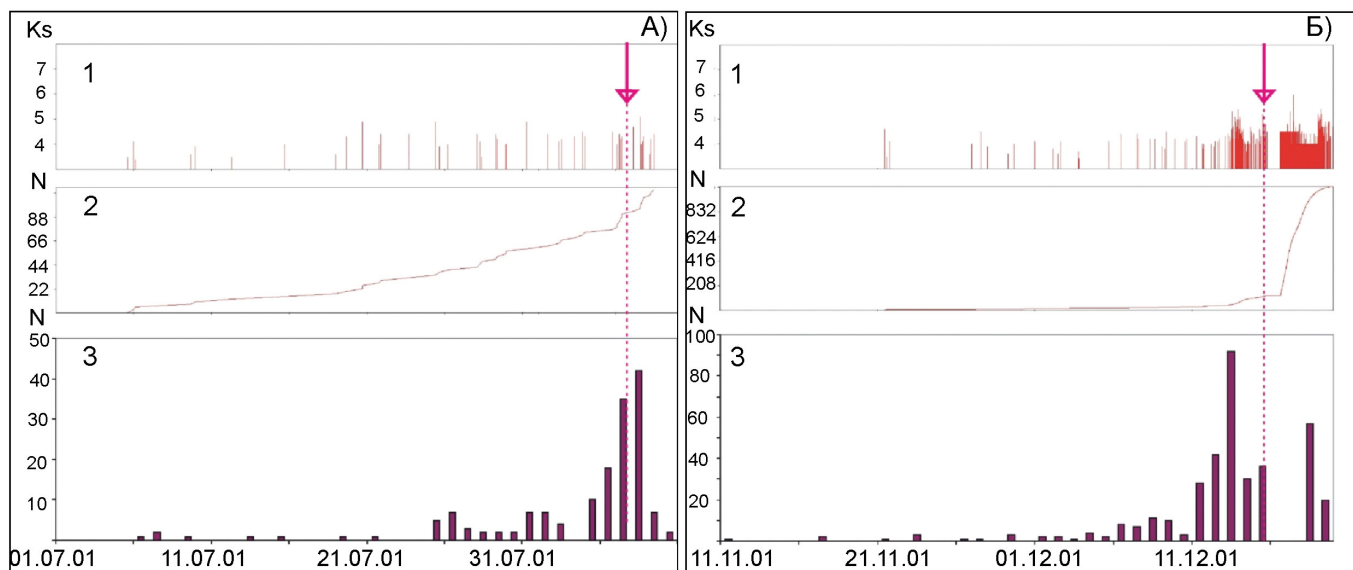
наблюдать сход каменных лавин со склонов вулкана Безымянный и изучать сопровождающие их сейсмические сигналы. По нашему мнению появление и последующее увеличение количества таких событий является одним из однозначных (прямых) сейсмических предвестников эксплозивных извержений вулкана Безымянный.

Исследования предваряющей и сопровождающей сейсмичности для 8 извержений, произошедших в 2000–2004 гг., позволили определить сценарий подготовки извержения по выделенным предвестникам и сформулировать алгоритм прогноза вулкана Безымянный [5, 6]. По сути, алгоритм является инструкцией для дежурного сотрудника, в обязанности которого входит быстрая оценка состояния вулкана и оповещение соответствующих организаций, если вероятность извержения высока.

Следует отметить, что в 2006–2007 гг. в районе вулкана Безымянный были установлены станции



**Рис. 3.** Распределение во времени различных параметров сейсмичности, предваряющей и сопровождающей извержения вулкана Безымянный в 2000 г. А) Извержение 13 марта: 1 — энергетический класс локализованных землетрясений; 2 — кумулятивное количество локализованных землетрясений; 3 — количество землетрясений 4-го типа за сутки. Б) Извержение 30 октября.

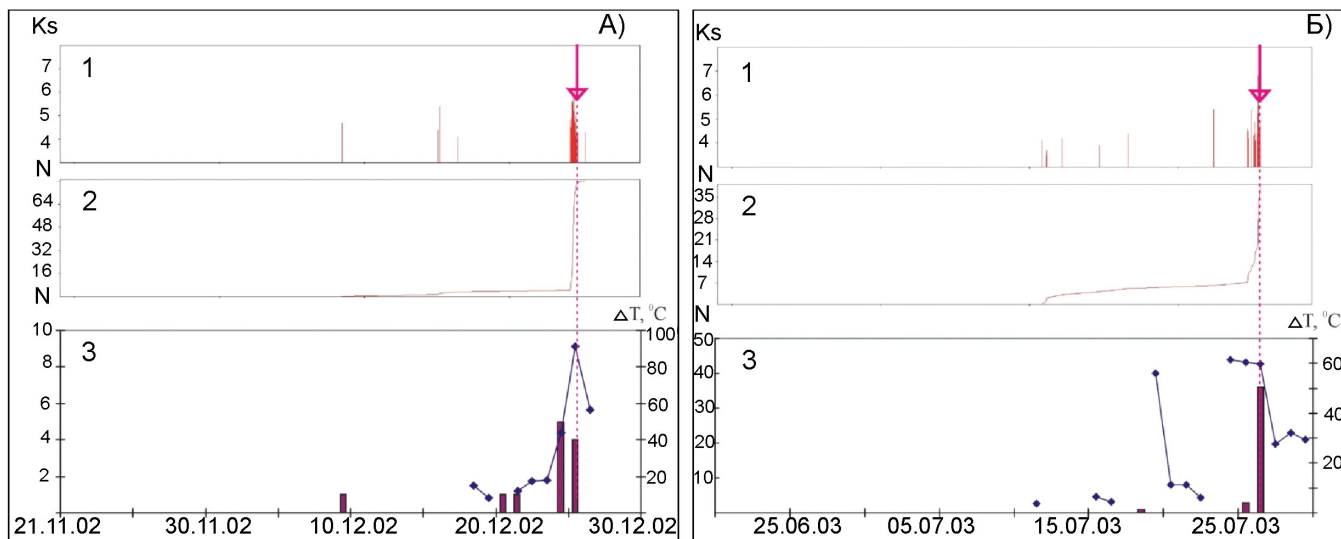


**Рис. 4.** Распределение во времени различных параметров сейсмичности, предваряющей и сопровождающей извержения вулкана Безымянный в 2001 г. А) Извержение 6 августа: 1 — энергетический класс локализованных землетрясений; 2 — кумулятивное количество локализованных землетрясений; 3 — количество землетрясений 4-го типа за сутки. Б) Извержение 15 декабря.

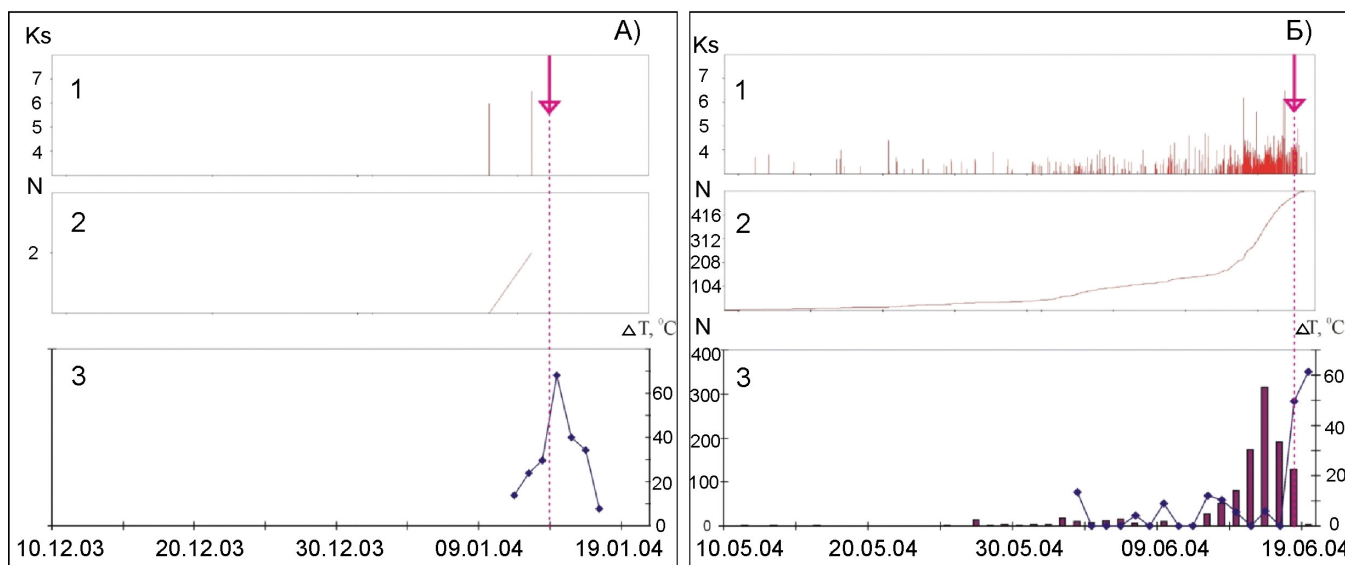
«Киришева», «Безымянный», «Безымянный-Грива», «Безымянный-Запад» (рис. 1) и представительный класс локализованных землетрясений в этом районе уменьшился до  $K_S = 3,8$ . В 2005–2006 гг. анализ сейсмичности проводился по сейсмостанции «Зелёная» (14 км от вершины вулкана), а для извержений в 2009–2011 гг. — по станции «Безымянный» (7,5 км от вершины вулкана).

За период с 2005 г. по 2011 г. произошло 10 умеренных эксплозивных извержений вулкана Безы-

мянный. Применение алгоритма в режиме реального времени, позволило успешно спрогнозировать 8 извержений из этих 10 при одной ложной тревоге. При этом следует отметить, что для извержений 11 мая 2007 г. и 31 мая 2010 г. сейсмический мониторинг вулкана Безымянный был невозможен из-за сильного вулканического дрожания, сопровождающего мощные вершинные извержения вулкана Ключевской. Перед извержениями 14 октября 2007 г. и 19 августа 2008 г. наблюдалась очень слабая



**Рис. 5.** Распределение во времени различных параметров сейсмичности, предваряющей и сопровождающей извержения вулкана Безымянный. А) Извержение 25 декабря 2002 г.: 1 — энергетический класс локализованных землетрясений; 2 — кумулятивное количество локализованных землетрясений; 3 — количество землетрясений 4-го типа за сутки, график — изменение разницы температуры термальной аномалии и температуры фона по данным Камчатского Центра Связи и Мониторинга и Аляскинской вулканологической обсерватории. Б) Извержение 26 июля 2003 г.



**Рис. 6.** Распределение во времени различных параметров сейсмичности, предваряющей и сопровождающей извержения вулкана Безымянный. А) Извержение 13 января 2004 г.: 1 — энергетический класс локализованных землетрясений; 2 — кумулятивное количество локализованных землетрясений; 3 — изменение разницы температуры термальной аномалии и температуры фона по данным Камчатского Центра Связи и Мониторинга и Аляскинской вулканологической обсерватории. Б) Извержение 18 июня 2004 г.

и кратковременная (2 дня) сейсмическая подготовка, которая не укладывалась в рамки типичного сценария. Решающим предвестником в таких случаях стала температура термальной аномалии, которая резко выросла в течение 2 суток до максимально возможной для регистрации ( $56,9^{\circ}\text{C}$ ) по данным Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО). Для двух извержений 11 мая 2007 г. и 19 августа 2008 г. прогноз был сделан только по спутни-

ковым данным. Использовались данные Камчатского Центра Связи и Мониторинга и АВО.

**Извержение 8 марта 2012 г.**

Первые признаки сейсмической активности в виде единичных событий 3-го типа появились за 6 месяцев до извержения, в сентябре 2011 г. Примерно через месяц стали регистрироваться землетрясения 4-го типа, количество которых постепенно

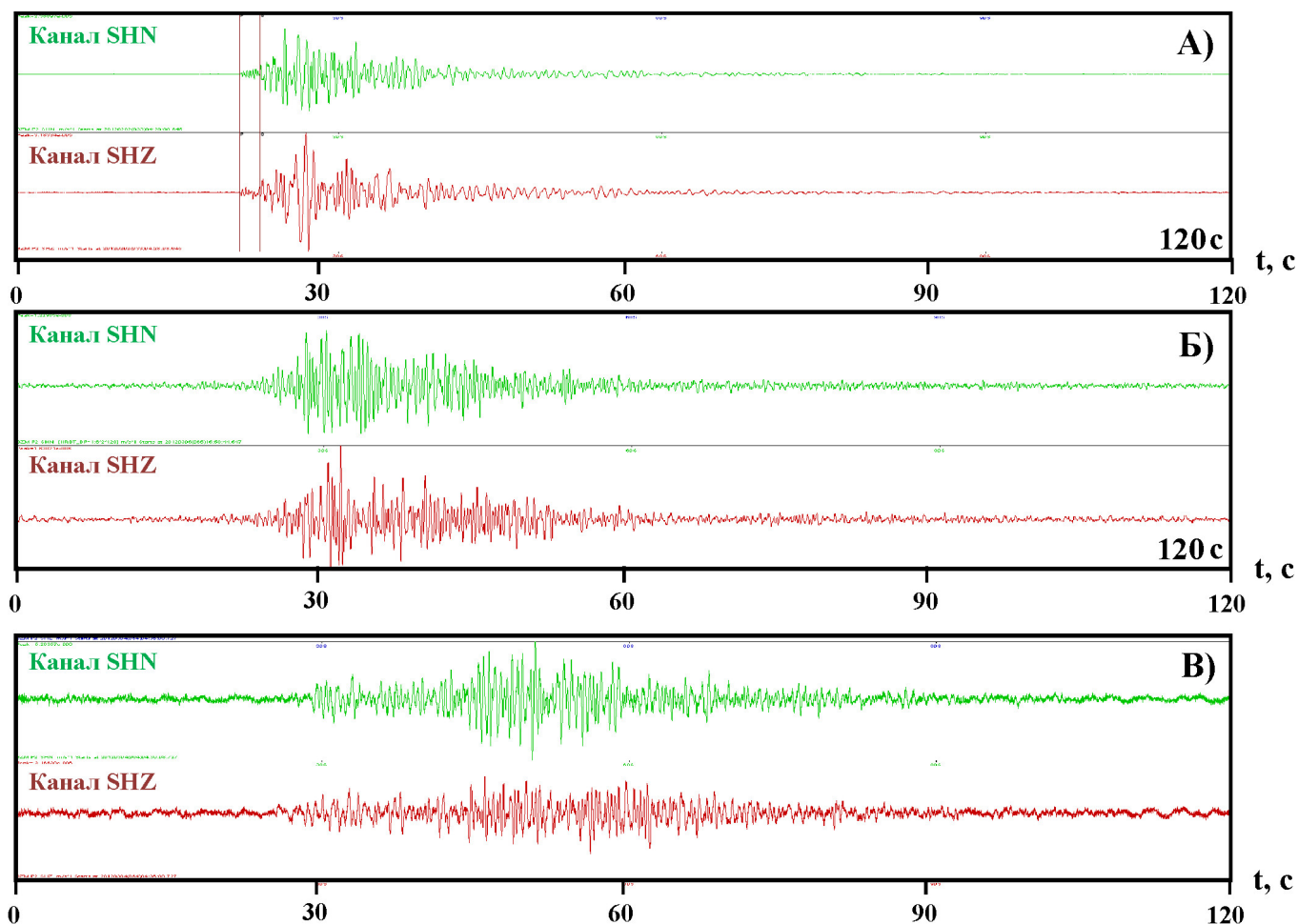


Рис. 7. Примеры сейсмических событий различного типа, зарегистрированных сейсмостанцией «Безымянный». А) Землетрясения 3-го типа. Б) Землетрясения 4-го типа. В) Серия, сопровождающая сход лавины.

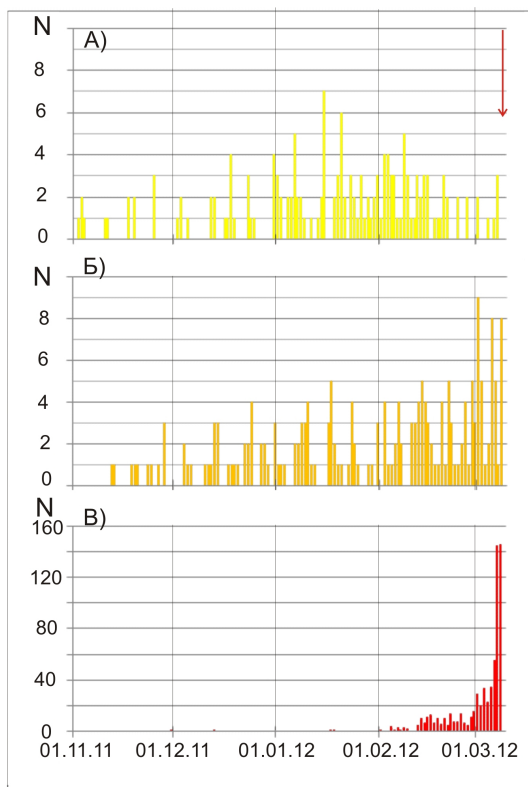
увеличивалось. За месяц до извержения появились продолжительные (около 2 минут) поверхностные события — серии, являющиеся, по нашему мнению, однозначными предвестниками эксплозивных извержений вулкана, рис. 8. Согласно алгоритму, эксплозивное извержение произойдет в следующие 30 суток, если в течение последних трёх дней постоянно наблюдалась «повышенная» сейсмичность (более 10 поверхностных землетрясений с  $K_S \geq 3,0$  за сутки или хотя бы одно с  $K_S \geq 4,0$ ) и количество событий продолжает увеличиваться. Такой момент наступил 15 февраля, и тогда был сделан прогноз о начале возможного умеренного эксплозивного извержения по сейсмологическим данным, и передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС). Далее регистрировалась достаточно высокая сейсмичность, но примерно на одном уровне, пока в начале марта не произошло резкое увеличение количества поверхностных событий 4-го типа, что позволило 3 марта уточнить время начала извержения на ближайшие 7 суток. По сейсмологическим данным извержение началось 8 марта в 21 ч 27 мин UTC и продолжалось около часа, рис. 9.

### Заключение

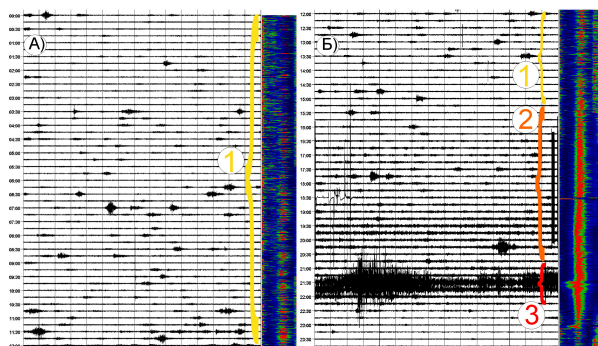
По результатам работ, проведённых в 2000–2004 гг. с целью изучения режима активности вулкана Безымянный составлен общий сценарий подготовки вулкана к извержению по сейсмологическим данным. Для быстрой оценки вероятности извержения в реальном мониторинге по этому сценарию был разработан алгоритм прогноза. Также было установлено, что алгоритм можно успешно применять при условии, что сейсмичность в районе вулкана Ключевской не превышает «фоновый» (нормальный) уровень.

В период 2005–2012 гг. алгоритм прогноза извержений вулкана Безымянный использовался в режиме реального времени как инструкция для дежурного сотрудника. В итоге для этого периода было сделано 9 официальных (зафиксированных в КФ РЭС) успешных краткосрочных прогнозов для 11 последних умеренных эксплозивных извержений вулкана Безымянный при одной ложной тревоге.

Пропуски и ложная тревога свидетельствуют о необходимости продолжения исследований по совершенствованию алгоритма с учётом комплексно-



**Рис. 8.** Сейсмичность, предвещающая извержение вулкана Безымянный 8 марта 2012 г. А) Землетрясения 3-го типа. Б) Землетрясения 4-го типа. В) Серии, сопровождающие сход лавин.



**Рис. 9.** Суточная сейсмограмма сейсмостанции «Безымянный», канал SHN за 8 марта 2012 г. А) Период времени с 00 час 00 мин до 12 час 00 мин UTC. Б) Период времени с 12 час 00 мин до 24 час 00 мин UTC. Фигурными скобками обозначены периоды активности: 1 – регистрируются серии, сопровождающие сход лавин и прерывистое спазматическое вулканическое дрожание; 2 – регистрируются серии, сопровождающие сход лавин и непрерывное спазматическое вулканическое дрожание; 3 – взрывное извержение с 21 час 27 мин до 22 час 30 мин UTC.

го использования сейсмологических, спутниковых и других возможных видов наблюдений.

Использование результатов сейсмологических наблюдений в системе комплексного мониторинга вулканов позволяет примерно за месяц сделать прогноз очередного эксплозивного извержения вулкана Безымянный, и потом уточнить время начала извержения с точностью до 7 суток. Для последнего извержения 8 марта 2012 г. успешный краткосрочный прогноз по сейсмологическим данным был сделан 15 февраля 2012 г., а время начала извержения на период с 3 по 10 марта было уточнено 3 марта.

**Список литературы**

1. Богоявленская Г. Е., Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Максимов А. П., Иванов Б. В. Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 168–209.
2. Гордеев Е. И., Чебров В. Н., Левина В. И., Сеньюков С. Л., Шевченко Ю. В., Яцук В. В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 6–27.
3. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955–1963 гг.) М.: Наука, 1965, 172 с.
4. Малышев А. И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
5. Сеньюков С. Л. Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в 2004–2007 гг. в режиме реального времени // Труды региональной научно-технической конференции «Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России», 11–17 ноября 2007 г., Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 59–63.
6. Сеньюков С. Л. О возможности успешного прогноза извержений вулкана Безымянный в зависимости от состояния вулкана Ключевской. Сейсмологические доказательства взаимодействия магматических систем этих вулканов // Труды региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 11–17 ноября 2009 г., Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 239–243.
7. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
8. Токарев П. И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
9. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
10. Chubarova O.S. Bezymyanny 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.