

УДК 550.34.06.013.3+551.21

ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ ШИВЕЛУЧ И БЕЗЫМЯННЫЙ В 2000-2003 ГГ. ДИСТАНЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ НАБЛЮДЕНИЙ

**С. Л. Сенюков, С. Я. Дроздина, И. Н. Нуждина, В. Т. Гарбузова,
Д. В. Дроздин, Т. Ю. Кожевникова**

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

Аннотация. Представлены результаты исследований активности вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000-2003 гг. Исследования проводились в режиме близком к реальному времени с использованием данных трех видов наблюдений: 1) сейсмический мониторинг; 2) визуальные и видео наблюдения; 3) спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов. Результаты ежедневной обработки данных были доступны пользователям Интернета по адресу: <http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>. Обработка мощного роя землетрясений на вулкане Шивелуч в оперативном режиме стала решающим фактором для удачного прогноза его сильного извержения в мае 2001 года. Выявлены закономерности подготовки извержений вулкана Безымянный по сейсмическим данным и термальным аномалиям. На примере извержений вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000-2003 гг. показано, что комплексное использование данных сейсмического и спутникового мониторинга позволяет получать объективную информацию о состоянии вулканов в режиме близком к реальному времени и предупреждать о возможных извержениях.

SHEVELUCH AND BEZYMIANNY VOLCANOES ACTIVITY INVESTIGATIONS IN 2000-2003 USING REMOTE SENSING

**S. L. Senyukov, S. Ya. Droznina, I. N. Nuzdina, V. T. Garbuzova,
D. V. Droznin, T. Yu. Kozevnikova**

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

Abstract. The article represents the investigation results of Sheveluch and Bezymianny volcanoes activity in 2000-2003. The investigations were derived in near real time regime in three parts: 1) seismic monitoring; 2) visual and video observation; 3) satellite monitoring. All daily processing results were available via Internet: <http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>. In the first time a strong earthquake swarm, which forewarned a powerful Sheveluch eruption on May 2001, was processed in near real time regime. It was a real factor for successful prediction. It was fixed the preparation regularities of the Bezymianny's eruptions according to seismic and thermal anomaly data. Seismic and satellite monitoring of the 2000-2003 Sheveluch's and Bezymianny's eruptions allows to estimate a real volcano condition and to give warning of volcanic danger.

Введение

Начиная с 2000 г, КОМСП ГС РАН проводит исследование активности Камчатских вулканов на основе сейсмического мониторинга с привлечением данных спутникового мониторинга в режиме близком к реальному времени. Сейсмический мониторинг является наиболее надежным методом, так как носит непрерывный характер и не зависит от погодных условий [7]. До 2002 г. спутниковая информация предоставлялась сотрудникам КОМСП Аляскинской вулканологической обсерваторией (АВО) в рамках договора по безопасности полетов. Начиная с 16 сентября 2002 г, обработка информации приемника AVHRR спутника NOAA16 проводится в лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) КОМСП. Прием данных осуществляется Камчатским центром связи и мониторинга. Ежедневные визуальные наблюдения, при наличии видимости, проводятся сотрудниками КОМСП ГС РАН с приемных центров радиотелеметрической системы в г. Ключи и пос. Козыревск. Дополнительно для непрерывных видео наблюдений за вулканом Шивелуч на приемном центре 17 мая 2002 г была установлена видеокамера, которая работает в автоматическом режиме с частотой кадров 1Гц. Данные видеосъемки накапливаются на жестком диске компьютера и доступны операторам по локальной сети КОМСП. Аналогичная система была установлена в п. Козыревск 20 августа 2003 г. для наблюдений за вулканом Безымянный.

Статья посвящена исследованиям извержений вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000-2003 гг. на основе комплексного использования данных сейсмического и спутникового мониторинга.

Обработка данных

Сейсмический мониторинг включает, прежде всего, обработку и занесение в базу данных информации о землетрясениях 1÷3 типа (по классификации Токарева П.И. [6]), для которых можно определить стандартные параметры: координаты очага, время в очаге, энергию события.

Также проводится обработка и анализ вулканических землетрясений, для которых невозможно получить стандартные параметры. Это либо слабые землетрясения, зарегистрированные только ближайшими станциями, либо землетрясения 4-го типа - поверхностные вулканические события, для которых характерны относительно большие периоды продольных волн и интенсивные поверхностные волны. Вступления поперечных волн S в таких землетрясениях выделить практически невозможно [6].

Кроме этого, проводится спектрально-временной анализ сейсмических сигналов. Для этого сейсмический сигнал пропускается через набор полосовых фильтров, на выходе каждого полосового фильтра вычисляется огибающая амплитуды сигнала. Ежедневно ведется построение суточных сейсмограмм, которые дополнены информацией, о поведении спектра сейсмического сигнала во времени.

Процедура сбора и обработки спутниковой и визуальной информации подробно описана в статье Сенюкова С. Л. «Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений» (см. наст. Сборник).

Результаты исследований вулкана Шивелуч

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. Вулканический массив Шивелуча входит в состав крупнейшей на Камчатке Северной группы вулканов, которая приурочена к северной части Центральной Камчатской депрессии в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

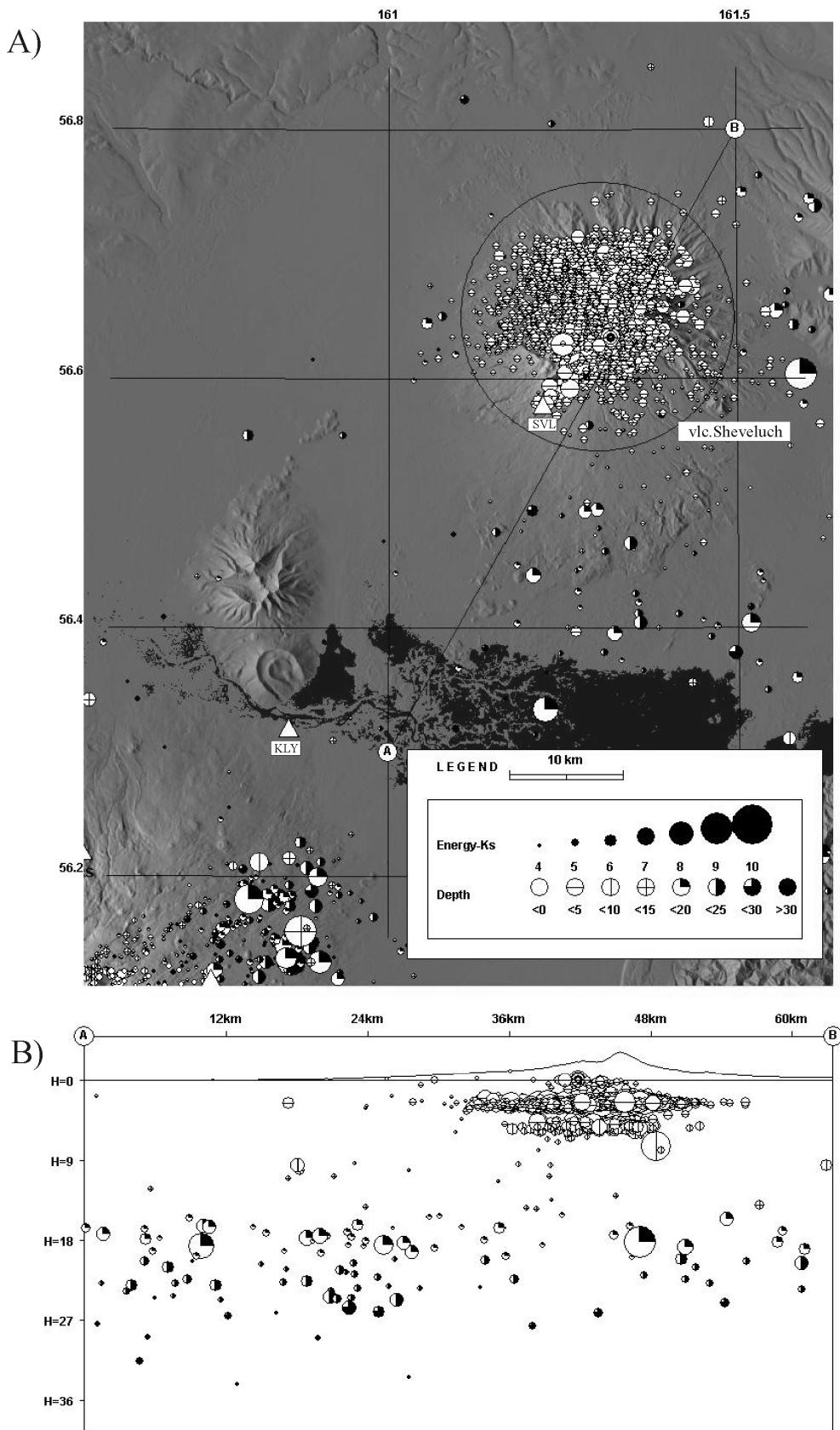


Рис. 1. Сейсмичность района вулкана Шивелуч в 2000 -2003 годах:
А) схема эпицентров землетрясений; В) разрез вдоль линии АВ.

Fig. 1. Seismicity of Sheveluch volcano region in 2000 - 2003:
A) map of earthquake epicenters; B) vertical cross-section along AB.

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 XIX-XX вв. для вулкана Шивелуч были характерны преимущественно два типа извержений: катастрофические эксплозивные типа направленных взрывов (1-2.03.1854 г и 12.11.1964 г) и слабые, умеренные по силе извержения, сопровождавшие рост экструзивных куполов [2].

Существующая сеть сейсмических станций является удаленной и односторонней по отношению к вулкану Шивелуч. Поэтому определяемые координаты гипоцентров землетрясений имеют большую ошибку, особенно по глубине. Ближайшая телеметрическая станция (SVL) расположена в 8.5 км от активного кратера вулкана Шивелуч. Минимальный уровень регистрируемых землетрясений по ближайшей станции, соответствует классу 3,1. Уровень надежной регистрации (без пропусков) по трем станциям соответствует классу землетрясений 5,5. На рис. 1 представлено пространственное распределение гипоцентров землетрясений в районе вулкана до глубины 40 км. Можно отметить приуроченность гипоцентров к горизонтам на глубинах 2 км и 5 км и отсутствие их в постройке вулкана выше уровня моря (рис. 1В). Скорее всего, это объясняется ошибками обработки, чем какой либо закономерностью. Чтобы провести уточнение положений гипоцентров необходимо расширить сеть сейсмических станций, например, установить телеметрическую станцию на северном склоне вулкана на расстоянии 3-5 км от активного кратера, а затем уточнить скоростную модель изучаемого района.

Всего за исследуемый период было зарегистрировано около 3700 землетрясений. Рис. 2 представляет распределение сейсмических событий во времени. В 2000 г и начале 2001 г в районе вулкана фиксировались одиночные землетрясения 3,4 типа (по классификации П. И. Токарева), после которых возникали цуги вулканического дрожания продолжительностью до полутора часов. Вулканическое дрожание часто сопровождало газо-пепловые выбросы высотой до 10 км над уровнем моря. 21 апреля 2001 г сейсмическая активность резко возросла, начался рой сильных близ поверхностных землетрясений (рис. 2). Энергия самого сильного события равнялась $K_s=9.5$, а количество землетрясений за 10 суток превысило 1500. Как оказалось впоследствии, этот рой сопровождал выживание нового экструзивного купола в активном кратере вулкана. Новый купол был обнаружен сотрудником Института вулканологии В.Н. Двигало 12 мая. 29 апреля была зарегистрирована первая термальная аномалия на спутниковых снимках (рис. 3С).

Для детального исследования сейсмичности была проведена традиционная обработка землетрясений с разбиением по типам в соответствии с классификацией Токарева П.И. с привлечением более слабых событий, для которых невозможно было определить стандартные параметры. Анализ сейсмичности от начала активизации до извержения (рис. 4) позволил выделить характерные особенности подготовки вулкана к этому извержению.

1. Землетрясений первого типа происходило мало, их энергия невелика (рис. 4А).
2. Наибольший вклад по количеству и выделенной энергии дали землетрясения 2-3 типа, которые обычно происходят в постройке и на глубинах до 5 км под постройкой вулкана. Пик активности землетрясений 2-3 типа был зафиксирован 26 апреля (рис. 4В).

3. Одновременно с уменьшением количества землетрясений 2-3 типа стал наблюдаться рост количества и суммарной энергии землетрясений 4 типа, которые обычно происходят в самой верхней части постройки вулкана и связаны с ее разрушением, наибольшее их число было зафиксировано с 4 по 8 мая (рис. 4С).

4. Накануне максимальной фазы извержения (рис. 4Д) с 14 по 17 мая наступило относительное сейсмическое затишье, после которого в течение 18 мая наблюдался быстрый рост активности вулканического дрожания.

Главная эксплозивная фаза извержения вулкана Шивелуч произошла с 19 по 21 мая (рис. 4Д) и сопровождалась отдельными мощными выбросами пепла с образо-

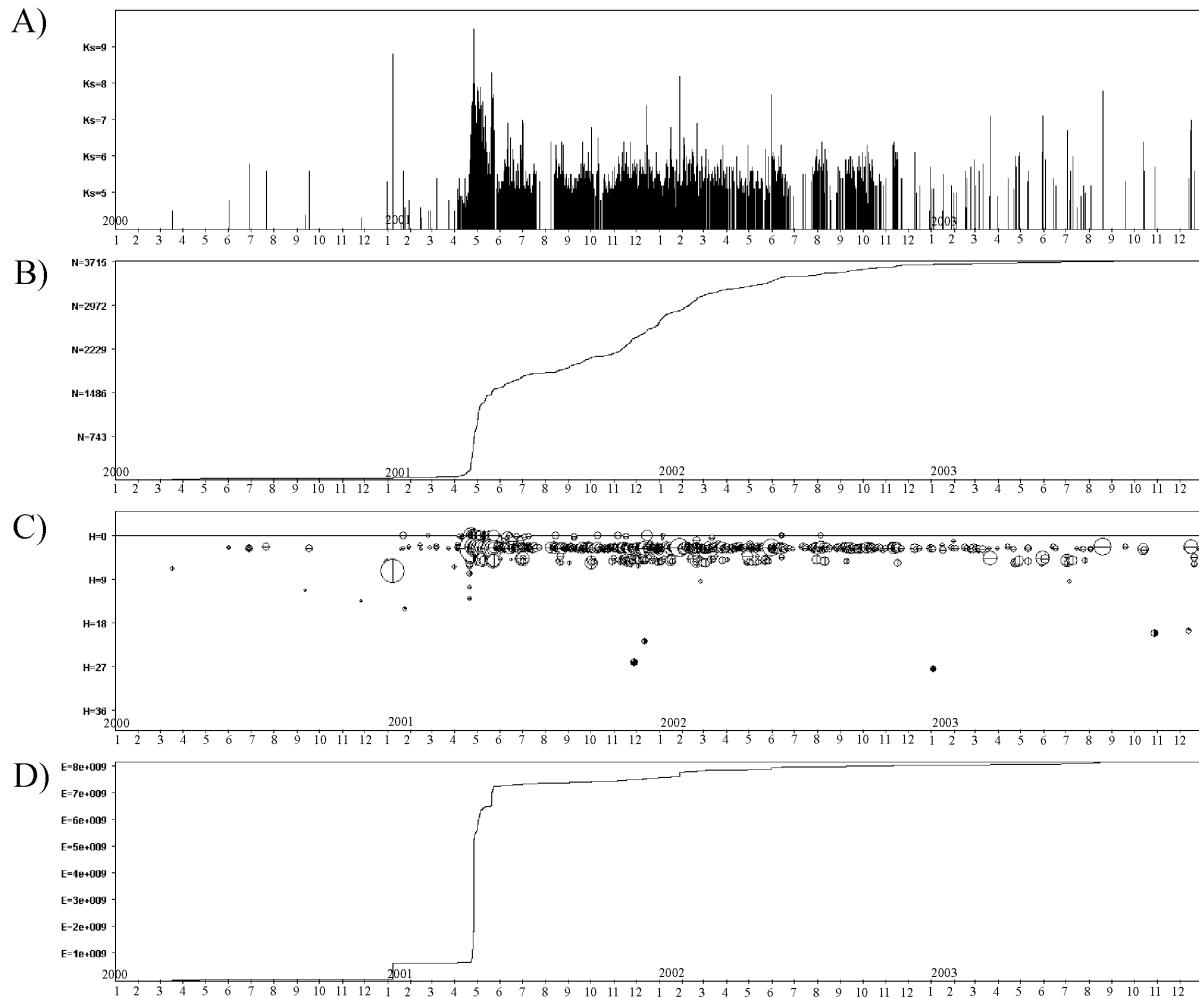


Рис. 2. Графики распределения во времени различных параметров сейсмической активности для землетрясений, выделенных окружностью на рис. 1:

А) энергетический класс по S-волне; В) кумулятивное количество землетрясений; С) глубина гипоцентров, км; Д) кумулятивная энергия, дж.

Fig. 2. Graphs of seismic activity for the earthquakes within circumference (fig. 1).

А) energy class from S-wave (Ks), local magnitude $M_l = Ks/2 - 0.75$; В) cumulative number of the earthquakes; С) depth of the earthquakes, km; Д) cumulative energy, joule.

ванием эруптивных колонн высотой более 12 км, сходом пирокластических и грязевых потоков вдоль каньона реки Байдарной длиной до 18 км. В дальнейшем до конца года ещё несколько раз фазы относительного затишья сейсмической активности сменялись периодами её усиления, которые завершались эксплозивными извержениями. Наиболее сильные из них произошли 30 июня, 30 сентября и 1 октября. На рис. 3А представлены данные о вулканическом дрожании, зарегистрированном на вулкане Шивелуч.

В 2002 и в 2003 гг. на вулкане Шивелуч продолжала наблюдаться интенсивная вулканическая деятельность, связанная с ростом нового купола и сопровождающаяся высокой сейсмической активностью (рис. 2). В течение всего периода на спутниковых снимках наблюдалась термальная аномалия, свидетельствующая о постоянном выходе на поверхность горячего магматического материала (рис. 3С). На рис. 3В представлены данные о газо-пепловых выбросах по визуальным наблюдениям сотрудников приемного центра г. Ключи. Самым значительным событием этого периода по данным сейсмических станций была, зарегистрированная 3 марта 2003 с 22:30 до 23:40 по Гринвичу, серия поверхностных сейсмических событий с амплитудой до 8.8 мкм/сек,

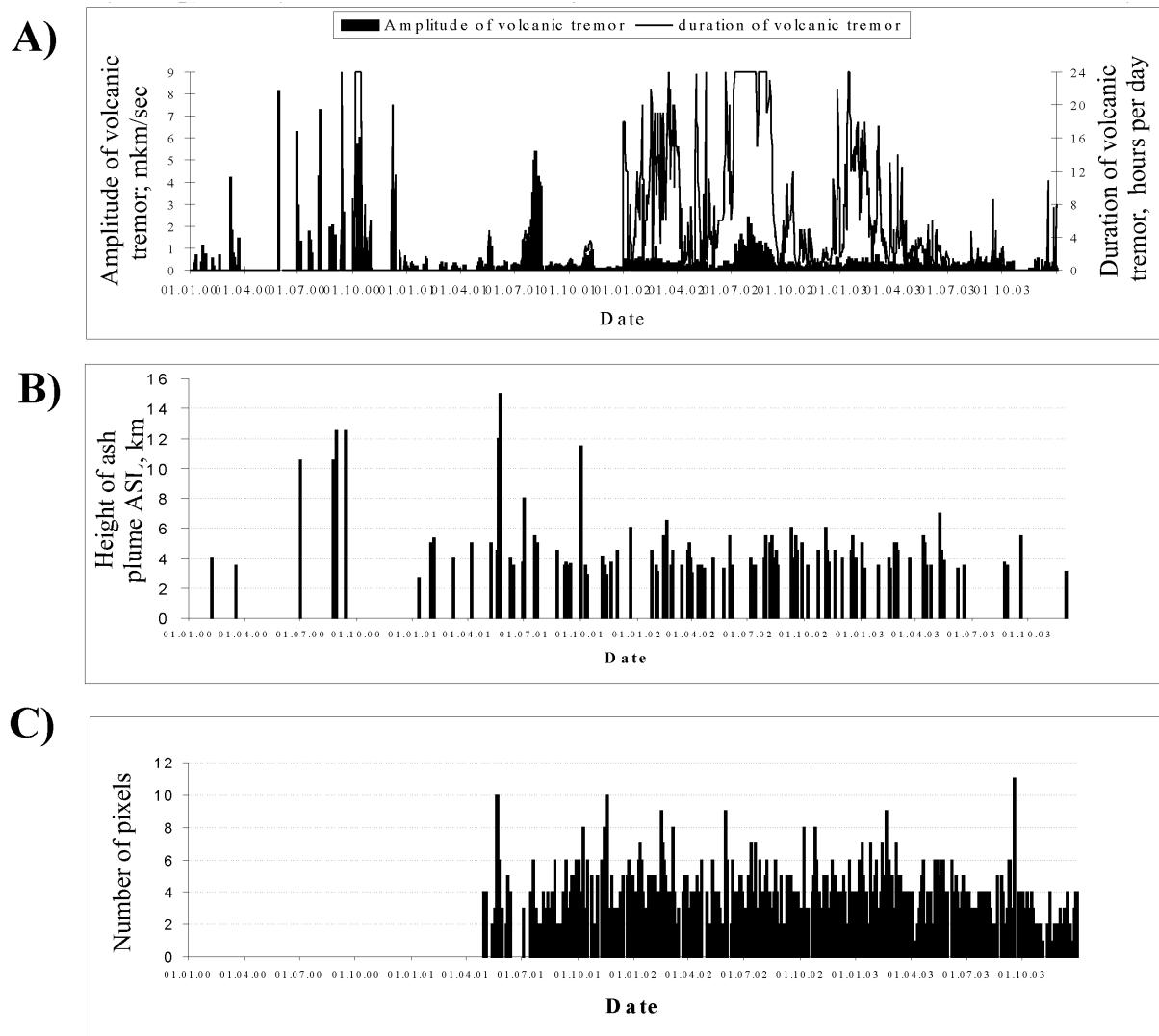


Рис. 3. Графики изменения во времени некоторых параметров активности для вулкана Шивелуч в 2000-2003 гг.

А) интенсивность (мкм/сек) и продолжительность (часы в день) вулканического дрожания; В) высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря, км; С) размер термальной аномалии, данные Аляскинской вулканологической обсерватории и лаборатории ИСВА КОМСП.

Fig. 3. Graphs of the parameter activity for the Sheveluch volcano region in 2000-2003:
A) amplitude (mkm/sec) and duration (hours per day) of volcanic tremor; B) height of ash plume, km above sea level; C) size of the thermal anomaly, data from AVO and KEMSD.

которая вероятно сопровождалась эксплозивным извержением с возможным сходом обломочных лавин. К сожалению, в это время вулкан был закрыт.

К концу 2003г. сейсмическая активность на вулкане Шивелуч постепенно ослабла. Особенно наглядно это показывает рис. 3А, на котором представлены данные о вулканическом дрожании.

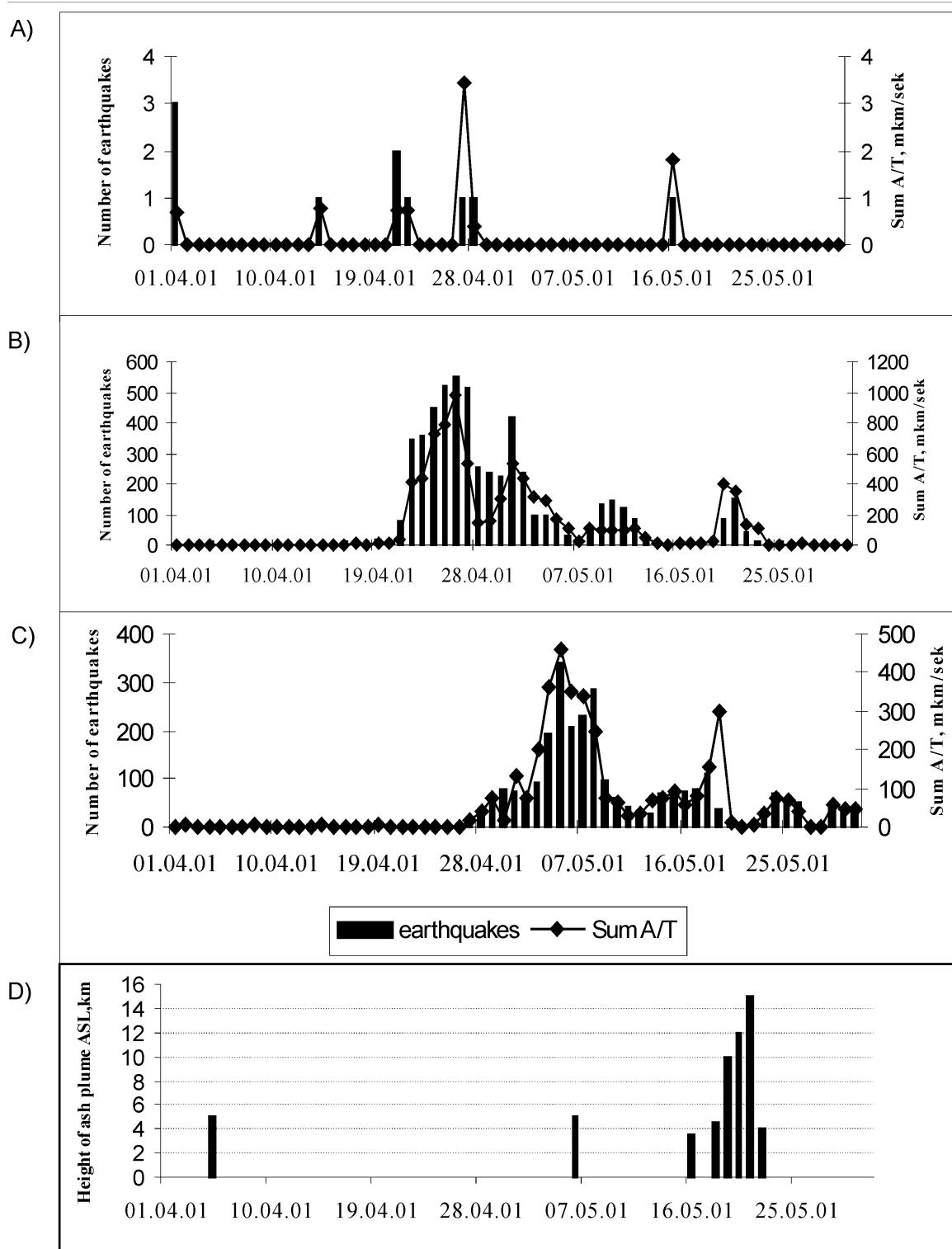


Рис. 4. Распределение во времени землетрясений различного типа для района вулкана Шивелуч, в период наибольшей сейсмической активности, апрель–май 2001 года.

А) землетрясения 1-го типа; В) землетрясения 2-3-го типа; С) землетрясения 4-го типа; D) высота газо-пепловых выбросов над уровнем моря по визуальным данным с сейсмостанции «Ключи».

Fig. 4. Time variation of volcanic earthquake types during the major seismic period at Sheveluch Volcano, April–May 2001.

А) deep earthquakes; Б) shallow earthquakes; В) gas bursts and rock avalanches; D) height of ash plumes according to visual data of seismic station “Klyuchi”, km above sea level.

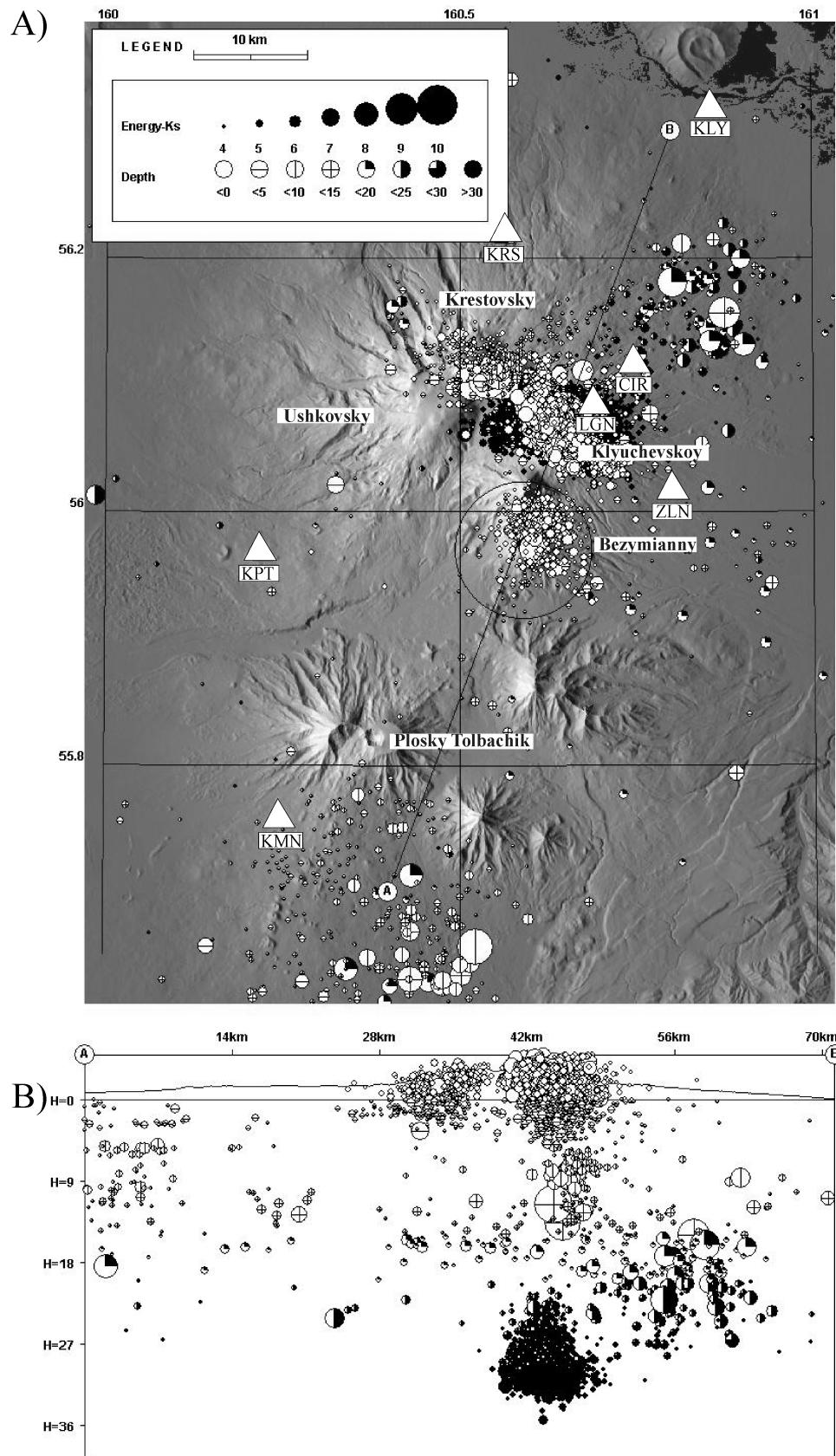


Рис. 5. Сейсмичность района вулкана Безымянnyй в 2000-2003 годах:

А) схема эпицентров землетрясений; В) разрез вдоль линии АВ.

Fig. 5. Seismicity of Bezymianny volcano region in 2000-2003:

A) map of earthquake epicenters; B) vertical cross-section along AB.

Результаты исследований вулкана Безымянnyй

Вулкан Безымянnyй – координаты вершины: $55^{\circ} 58' \text{ с.ш.}, 160^{\circ} 35' \text{ в.д.}$ Абсолютная высота вулкана 2869 м. Расположен в центральной части Ключевской группы вулканов к юго-западу от Ключевского вулкана [2].

Вулкан представляет собой несколько удлиненный в широтном направлении массив с разрушенной вершиной. Разрушенную вершину вулкана занимает огромный кратер диаметром 1.3-2.8 км, открытый на восток, в центре которого располагается купол Новый. В постройке вулкана и в экструзивных образованиях резко преобладают андезиты и значительно меньшую долю составляют андезито-базальты и дациты.

Последнее катастрофическое извержение вулкана Безымянnyй произошло 30 марта 1956 г после длительного периода покоя, длившегося 900-1000 лет. Этому извержению предшествовала мощная сейсмическая подготовка. В это время ближайшая сейсмическая станция «Ключи» (рис. 5А) была расположена в 40 км от вулкана, что не позволяло регистрировать слабые землетрясения с $K_s < 6,0$. Но даже при таких неблагоприятных для сейсмического наблюдения условиях первое землетрясение было зарегистрировано задолго до извержения 29 сентября 1955 г. После 19 октября их количество выросло до 100 землетрясений за сутки. Извержение началось 22 октября сильными эксплозиями вулканского типа с извержением большого количества пепла. Кульминационная фаза извержения произошла 30 марта 1956 г, когда эруптивное облако пепла поднялось на высоту 35-40 км, а пирокластические потоки спустились на расстояние до 18 км при максимальной мощности до 25-30 м [2].

В дальнейшем и в настоящее время для вулкана свойственны довольно частые эксплозивные извержения умеренной силы, 1-2 раза в год, сопровождающиеся образованием пирокластических потоков, а также более редкие извержения с излиянием вязких лав [10, 11].

Ближайшие телеметрические станции (ZLN, LGN), расположены в 13,5 км от кратера вулкана Безымянnyй. Минимальный уровень регистрируемой сейсмичности по ближайшим станциям соответствует классу землетрясений 3,6. Уровень надежной регистрации по трем станциям соответствует классу землетрясений 4,5.

В 2000-2003 гг. произошло 6 извержений вулкана Безымянnyй. На рис. 5 представлена схема расположения эпицентров землетрясений. Район вулкана Безымянnyй выделен окружностью и для землетрясений, расположенных внутри окружности построены графики распределения во времени различных параметров сейсмической активности (рис. 6).

Анализируя графики, можно сделать вывод, что практически каждое усиление сейсмичности заканчивается извержением. В периоды между извержениями, когда вулкан находится в спокойном состоянии, регистрируются единичные, слабые, поверхностные землетрясения. Только один раз за период наблюдений повышенная сейсмичность с 20 июля по 24 августа 2000 года никак не проявилась на поверхности. При этом на спутниковых снимках, предоставленных АВО, в период с 20 июля по 24 августа термальная аномалия не регистрировалась. С сейсмической станции «Козыревск» сообщали о слабой фумарольной деятельности на вулкане.

Для всех остальных периодов активности вулкана, которые закончились извержениями, на рис. 7 представлены графики изменения во времени суммарного количества землетрясений 3-го и 4-го типов в сутки и роста термальной аномалии. Практически во всех случаях сейсмическая подготовка начинается примерно за 1 месяц до извержения. Термальная аномалия появляется на спутниковых снимках не раньше, чем за 2 недели до кульминационной стадии извержения. Только в октябре 2000 года термальная аномалия стала регистрироваться за 20 дней перед извержением одновременно с появлением первых землетрясений. Значение термальной аномалии "-1" на графиках (рис. 7) соответствует отсутствию спутниковых наблюдений из-за погодных условий или по техническим причинам. Определение размера аномалии (количество пикселей) проводилось достаточно субъективно. Считались все пиксели, с

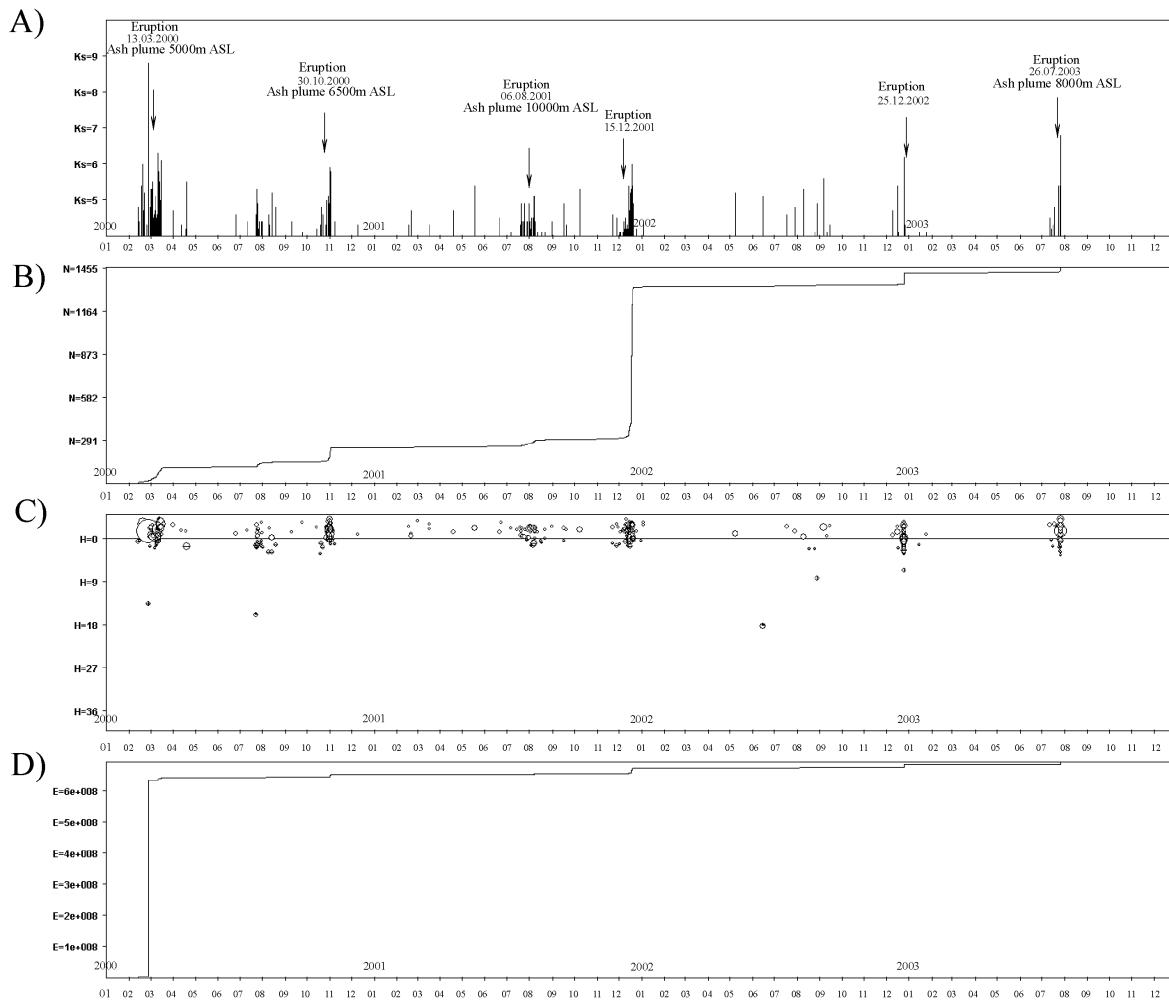


Рис. 6. Графики распределения во времени различных параметров сейсмической активности для землетрясений, выделенных окружностью на рис. 1:

А) энергетический класс по S-волне; В) кумулятивное количество землетрясений; С) глубина гипоцентров, км; Д) кумулятивная энергия, дж.

Fig. 6. Graphs of seismic activity for earthquakes within circumference (fig. 1).

А) energy class from S-wave (Ks), local magnitude $M_l = Ks/2 - 0.75$; В) cumulative number of the earthquakes; С) the depth of the earthquakes, km; Д) cumulative energy, joule.

температурой большей, чем температура фона. Для выделения аномалий использовались данные 3 канала ($3.53\text{--}3.93 \mu\text{m}$) сенсора AVHRR с пространственным разрешением 1 км [12, 13]. При этом в обработку принимались только ночные снимки, т.к. на дневных снимках большое значение имеет солнечное отражение.

Обычно размер аномалии увеличивается пропорционально увеличению количества землетрясений. Сейсмическая активность и термальные аномалии достигают максимального значения перед извержением.

Ниже приведены детальные данные об извержениях вулкана Безымянного в 2000–2003 гг., полученные удаленными средствами наблюдений.

Март 2000 г. Первые признаки активизации вулкана появились в середине февраля. Сейсмическими станциями стали регистрироваться единичные землетрясения из района вулкана Безымянного (рис. 5, 6, 7А). Анализ сейсмичности проводился по станции "КРТ", расположенной в 23 км от вулкана, так как станция "ZLN" работала неустойчиво. К 12–13 марта уровень сейсмичности возрастает, но вулкан закрыт облачностью, что делает невозможным контроль со спутников. К 7 часам 13 марта

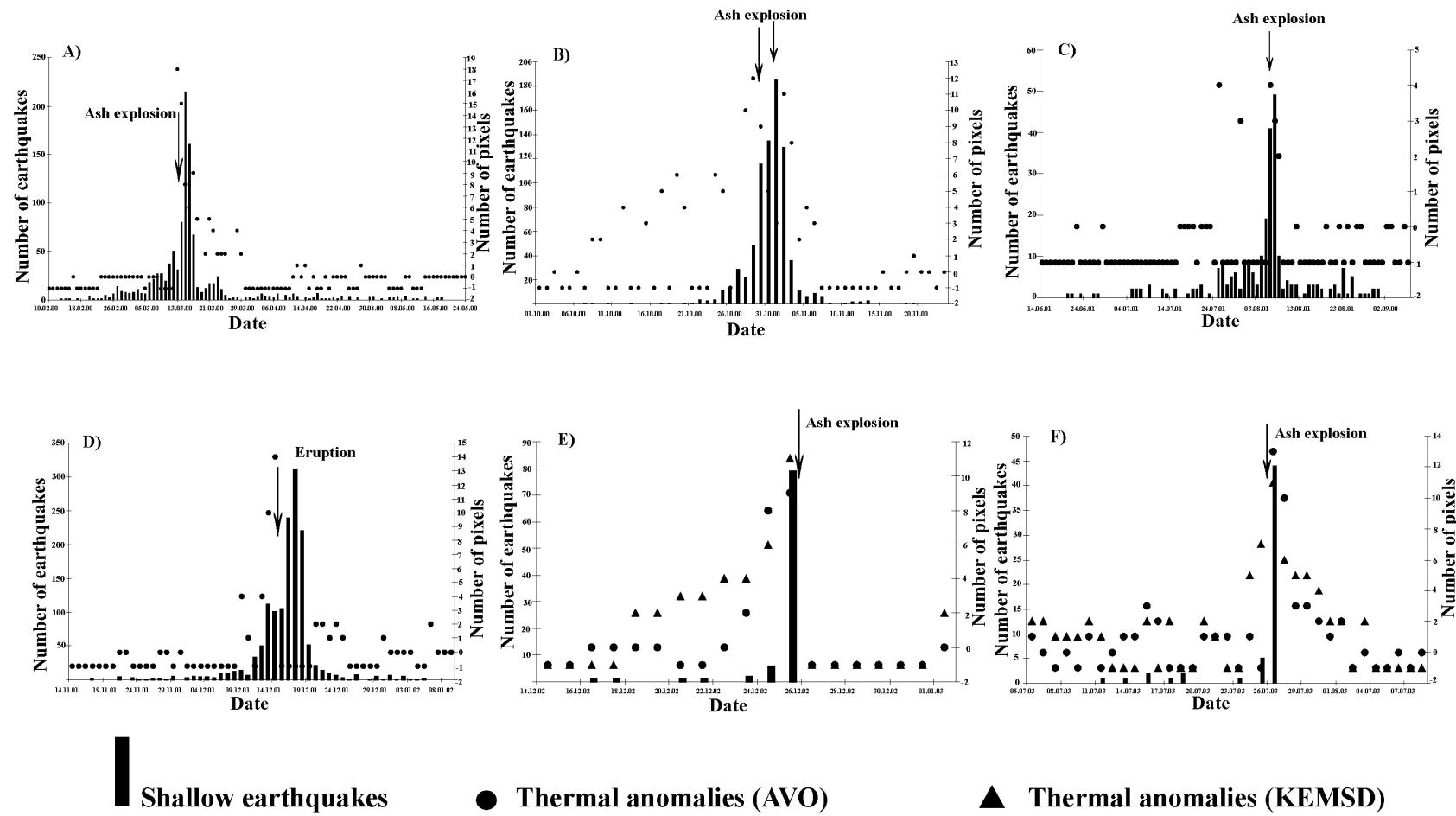


Рис. 7. Суммарное количество землетрясений 3-го и 4-го типов за сутки и термальная аномалия на вулкане Безымянnyй:

А) извержение в марте 2000 года; В) извержение в октябре 2000 года; С) извержение в августе 2001 года; Д) извержение в декабре 2001 года; Е) извержение в декабре 2002 года; Ф) извержение в июле 2003 года.

Fig. 7. Number of shallow earthquakes per day and size of the thermal anomaly at Bezymianny Volcano:

А) eruption in March 2000; Б) eruption in October 2000; В) eruption in August 2001; Г) eruption in December 2001; Д) eruption in December 2002; Е) eruption in July 2003.

(здесь и везде далее по тексту используется время по Гринвичу) вулкан открылся, но на спутниковом снимке, сделанном в это время, никаких термальных аномалий и никаких проявлений вулканической активности нет. Следующий снимок за 13 марта в 16:44 показал наличие термальной аномалии размером 18 пикселей и небольшого пеплового облака в 10 км к западу от вулкана. Это совпало с началом извержения, которое также было зафиксировано сейсмическими станциями, зарегистрировавшими 13 марта с 16:25 - непрерывное спазматическое вулканическое дрожание. Изменение термальной аномалии во времени представлено на рис. 7А. По визуальным наблюдениям из поселка Козыревск в 19:42 13 марта над вулканом наблюдалась пепловая туча до высоты 5000 м над уровнем моря, которая распространялась на запад. В 20:15 отмечено выпадение пепла в Козыревске. В 23:00 пепловая туча накрыла поселок и протянулась до Срединного хребта. Наиболее сильное событие за этот период активности произошло 13 марта в 21:31, которое можно связать с взрывом на куполе. Некоторое снижение активности вулкана наблюдалось 14-го марта. На спутниковых снимках отмечалась термальная аномалия меньшей интенсивности, чем за прошедшие сутки. Пепловые облака отсутствовали. 15 марта с 10 часов началось довольно быстрое усиление сейсмической активности, вероятно связанное с нарастанием интенсивности и мощности обвальных лавин. Поверхностные события и землетрясения из постройки вулкана происходили так часто, что к 12:22 слились и перешли в спазматическое вулканическое дрожание, продолжавшееся около 1,5 часов. Уровень дрожания указывал на возможные пепловые выбросы до высоты 5000 м над уровнем моря. К сожалению, визуальных наблюдений за этот период нет, но на спутниковом снимке, сделанном в 17:50, отметилось пепловое облако размером 60 км на 100 км в 140 км к западу от вулкана.

Октябрь-ноябрь 2000 г. Сейсмическая подготовка началась 08 октября с регистрации единичных землетрясений из района вулкана Безымянного. Первая слабая термальная аномалия размером 2 пикселя была зафиксирована на спутниковом снимке 08 октября в 18:09. В дальнейшем размер и интенсивность термальной аномалии увеличивались, а сейсмическая активность нарастала (рис. 7В). 29 октября появились парогазовые выбросы над кратером вулкана (по визуальным наблюдениям из поселка Козыревск). Извержение началось 30 октября в 13:46. В это время сейсмостанциями было зарегистрировано поверхностное событие продолжительностью около 30 мин, которое хорошо выделяется по частоте на спектограмме (рис. 8А). Анализ сейсмичности проводился по станции "КРТ", расположенной в 23 км от вулкана, так как станция "ZLN" работала неустойчиво. Это событие сопровождало выброс пепла, подтвержденный спутниковыми данными (рис. 9А). Максимум активности вулкана пришелся на 01 ноября. Именно тогда, по сейсмическим данным (рис. 8В), произошел наибольший выброс газа и пепла. Это подтвердилось и спутниковыми наблюдениями. На снимке за 01 ноября 18:28 отметилось пепловое облако в 130 км к западу от вулкана на высоте не более 6500 м над уровнем моря (рис. 9В).

Июль-август 2001г. Активизация вулкана наблюдалась с 25 июля по 8 августа. Для этого извержения и для всех описанных ниже анализ сейсмичности проводился по станции "ZLN". Землетрясения этого роя были слабыми, максимальный энергетический класс равнялся 5.1, и немногочисленными. На снимках из космоса термальная аномалия появилась впервые 25 июля (рис. 7С), которая в дальнейшем, по-видимому, тоже должна была наблюдаваться, если бы вулкан не был закрыт облачностью. Только 30 июля, в период прояснения, наблюдалась термальная аномалия размером 3 пикселя, и после этого вулкан был закрыт облачностью. 6 августа на спутниковом снимке в 04:51 стала вновь наблюдаваться термальная аномалия. Также 6 августа, в течение одних суток, резко увеличилось количество слабых локальных землетрясений, и стала постепенно нарастать амплитуда вулканического дрожания. И в 22:28 по Гринвичскому времени началось эксплозивное извержение. По наблюдениям из п. Козыревск, высота пеплового столба достигла через час высоты 10 км над уровнем моря.

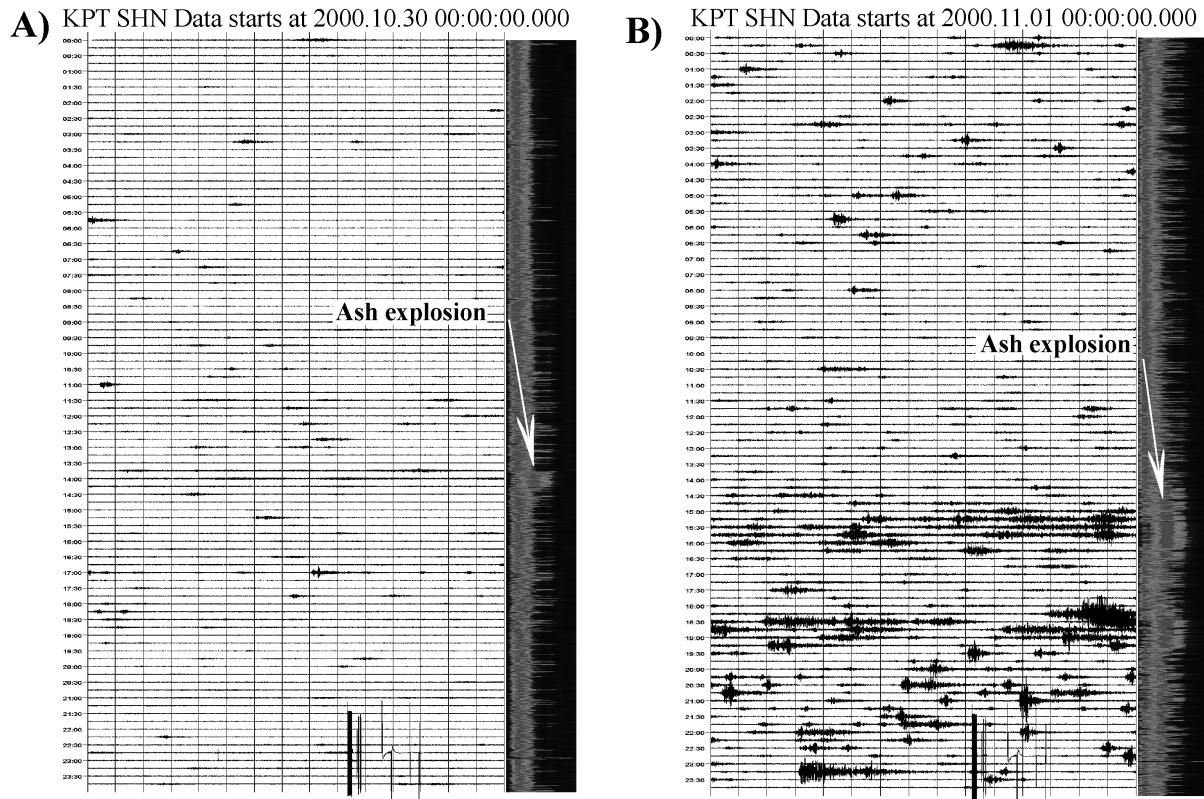


Рис. 8. Суточные сейсмограммы со спектрограммой (правая колонка):

А) сейсмостанция “КРТ” 30 октября 2000 год. В) сейсмостанция “КРТ” 01 ноября 2000 год.

Fig. 8. Daily seismograms with spectrograms (right column):

А) seismic station KPT – “Kopyto” on October 30, 2000. В) seismic station KPT – “Kopyto” on November 01, 2000.

ря. Максимальная фаза извержения продолжалась приблизительно около 1.5 часов, а потом наблюдалось постепенное уменьшение амплитуды вулканического дрожания и количества слабых поверхностных землетрясений. 9 августа сейсмичность вернулась к фоновому уровню.

Для кульминационной стадии извержения был построен график огибающей амплитуды сейсмического сигнала, осредненной в 10-секундном интервале (рис. 10А). Исследование поведения амплитуды сигнала позволило выявить следующее. При эксплозивных извержениях с мощными газо-пепловыми выбросами на сейсмических записях всегда присутствуют сильные поверхностные события. И огибающая амплитуды сейсмического сигнала имеет характерную форму в виде резкого всплеска с последующим постепенным уменьшением по экспоненциальному закону.

Декабрь 2001 г. Следующая активизация началась 8 декабря, и она была наиболее интенсивной по количеству землетрясений в сравнении с другими периодами (рис. 6, 7). Термальная аномалия, впервые появившаяся 9 декабря (рис. 7D), резко увеличилась в размерах – с 4 пикселей 12 декабря до 10 пикселей 13 декабря. Такое количество «горячих» пикселей обычно наблюдается накануне извержения. Однако сопутствующая сейсмичность свидетельствовала только о возможных слабых лавинах. 14 декабря термальная аномалия еще увеличилась в размерах до 14 пикселей. Извержение началось 15 декабря приблизительно в 20:00, когда амплитуда вулканического дрожания стала резко возрастать. По визуальным данным из п. Козыревск в 20:45 наблюдался мощный парогазовый шлейф протяженностью 60 км на северо-запад. В 20 км от вулкана шлейф был темный, с возможным содержанием пепла, высота 4000 м над уровнем моря. К сожалению, это были последние визуальные данные по этому извержению, так как мощный циклон и продолжительная пурга

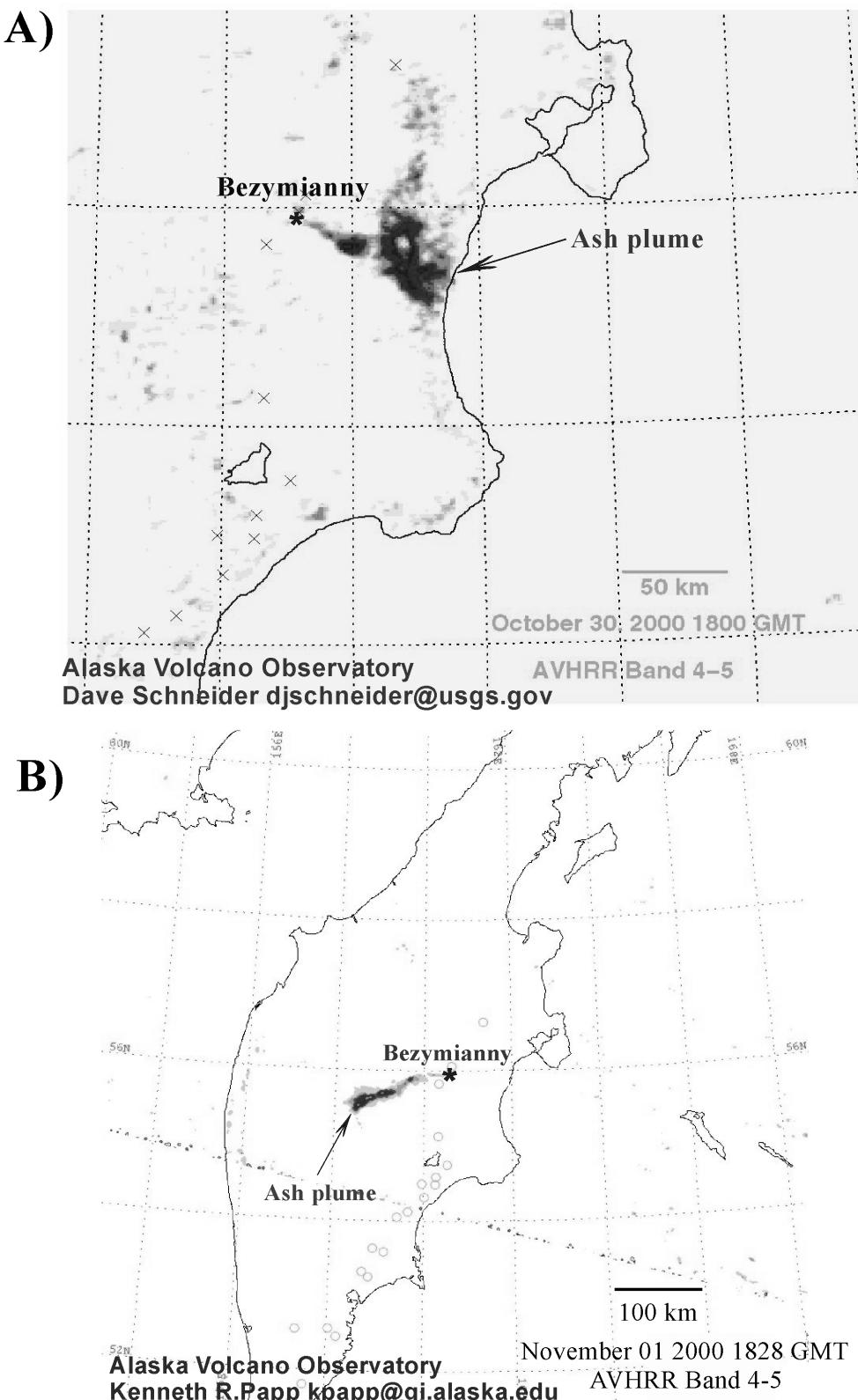


Рис. 9. Снимки спутника NOAA12, приемник AVHRR, канал 4 минус 5. Данные Аляскинской Вулканологической Обсерватории:

А) пепловое облако при извержении вулкана Безымянного 30 октября 2000 года; В) пепловое облако при извержении вулкана Безымянного 01 ноября 2000 года.

Fig. 9. Images of NOAA12 satellite, AVHRR, band 4 minus 5. Data from AVO.

А) ash cloud from Bezymianny volcano eruption on October 30, 2000; B) ash cloud from Bezymianny volcano eruption on November 01, 2000.

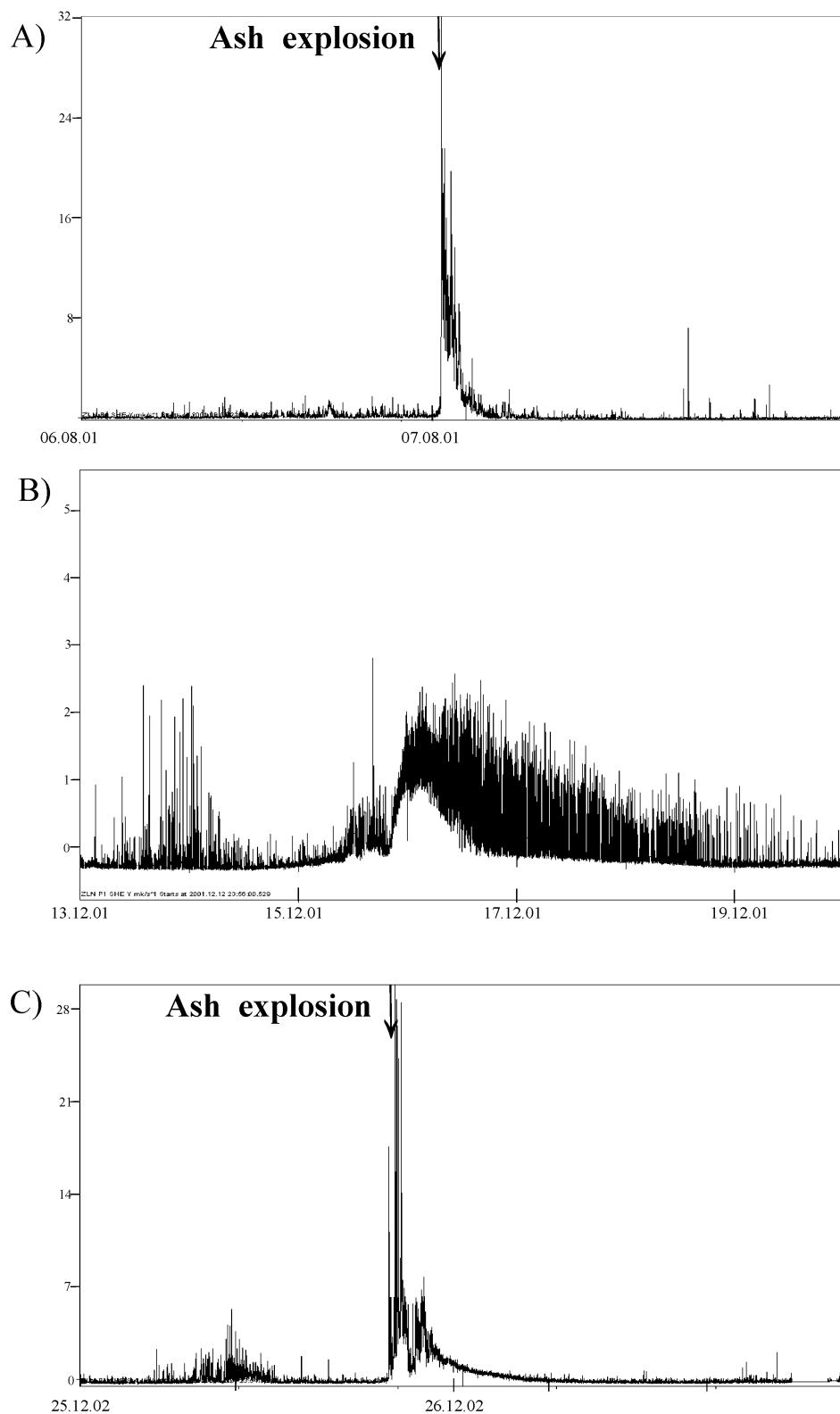


Рис. 10. Амплитуда огибающей сейсмического сигнала (безразмерная единица), осредненная в 10-секундном интервале:

А) извержение вулкана Безымянный в августе 2001 года; В) извержение вулкана Безымянный в декабре 2001 года; С) извержение вулкана Безымянный в декабре 2002 года.

Fig. 10. Seismic signal envelope (dimensionless unit), average within 10 sec window.

A) eruption of Bezymianny volcano in August 2001; B) eruption of Bezymianny volcano in December 2001; C) eruption of Bezymianny volcano in December 2002.

скрыли вулкан до 20 декабря. Также были невозможны наблюдения со спутников. Единственным источником информации осталась регистрация сейсмичности. Вулканическое дрожание, начавшееся 15 декабря, достигло максимума 16 декабря с 00:00 до 14:00 по Гринвичу. В дальнейшем характер дрожания стал изменяться с непрерывного на спазматический. Средняя амплитуда стала уменьшаться, и к концу суток 16 декабря появилась возможность выделять отдельные землетрясения. Из-за высокого фона вулканического дрожания определить координаты этих землетрясений было невозможно, и они были внесены в базу по аналогии с другими землетрясениями. В итоге за 16–19 декабря в базу было внесено около 800 землетрясений, отличительной чертой которых было то, что их энергетический класс не превышал 4.5. 20 декабря сейсмичность вернулась к фоновому уровню.

Отличительной особенностью извержения в декабре 2001 года было отсутствие всплеска амплитуды на огибающей сейсмического сигнала (рис. 10В). Такой всплеск наблюдается для других извержений (рис. 10) и обычно сопровождает пепловый выброс. В данном случае можно предположить, что извержение сопровождалось только излиянием лавового потока. На спутниковых снимках пепловые облака не обнаружены.

Декабрь 2002 г. К первым признакам активизации вулкана Безымянного можно отнести 3 землетрясения, которые произошли 16 и 17 декабря (рис. 6, 7Е). Но действительным доказательством активизации стал, наблюдаемый с 20 декабря, рост термальной аномалии, сначала по данным спутника NOAA16, а с 23 декабря и спутника NOAA12 (рис. 7Е). По данным спутника NOAA16, слабая термальная аномалия на вулкане Безымянный наблюдалась на всехочных, без облачности, снимках, начиная с первого дня наблюдений 16 сентября 2002. До этой даты данные спутника NOAA16 не обрабатывались. Можно предположить, что наличие постоянной термальной аномалии, свидетельствует о том, что вулкан готов к извержению без сильной предварительной сейсмической подготовки. На снимках NOAA12 термальная аномалия появилась только 23 декабря, до этого она была не видна, что свидетельствует о меньшей чувствительности приемника AVHRR спутника NOAA12. С 18 декабря по 22 декабря сейсмичность вулкана Безымянного была ниже уровня регистрации. 23 декабря стали регистрироваться слабые поверхностные события, возможно связанные со сходом лавин. Слабое вулканическое дрожание от вулкана впервые было зарегистрировано 24 декабря в 23:35. 25 декабря в ~04:00 (за ~15 часов до извержения) начался рой поверхностных землетрясений (более 50 событий, рис. 6, 7Е), который закончился в ~12:30. И после непродолжительной паузы в ~19:20 стало регистрироваться сильное вулканическое дрожание, что свидетельствовало о начале извержения.

К сожалению, как и в декабре 2001 года, мощный циклон не дал возможности получить визуальные или спутниковые доказательства извержения, но через 2 часа после начала извержения в 21:10 в п. Козыревск начал выпадать пепел серого цвета с запахом серы. Этот факт, в сочетании с направлением и скоростью ветра в это время, подтвердил возможность эксплозивного извержения вулкана Безымянного. За 2 часа в п. Козыревск выпало около 3 мм пепла, после чего пеплопад прекратился. Начиная с 00:00 26 декабря вулканическое дрожание постепенно стало ослабевать и достигло уровня фона в течение четырех часов.

Июль 2003 г. Извержение в июле 2003 года совпало с активизацией на Ключевском вулкане. На фоне большого количества землетрясений и непрерывного вулканического дрожания от вулкана Ключевской было трудно выделить слабую сейсмичность, предваряющую и сопровождающую извержение Безымянского вулкана.

Первый признак активизации вулкана Безымянного был зафиксирован 11 июля, когда было зарегистрировано 1 поверхностное землетрясение (рис. 6, 7F). В дальнейшем, вплоть до 24 июля регистрировались отдельные поверхностные землетрясения. 24 июля был зафиксирован рост термальной аномалии по данным спутника NOAA16 (рис.

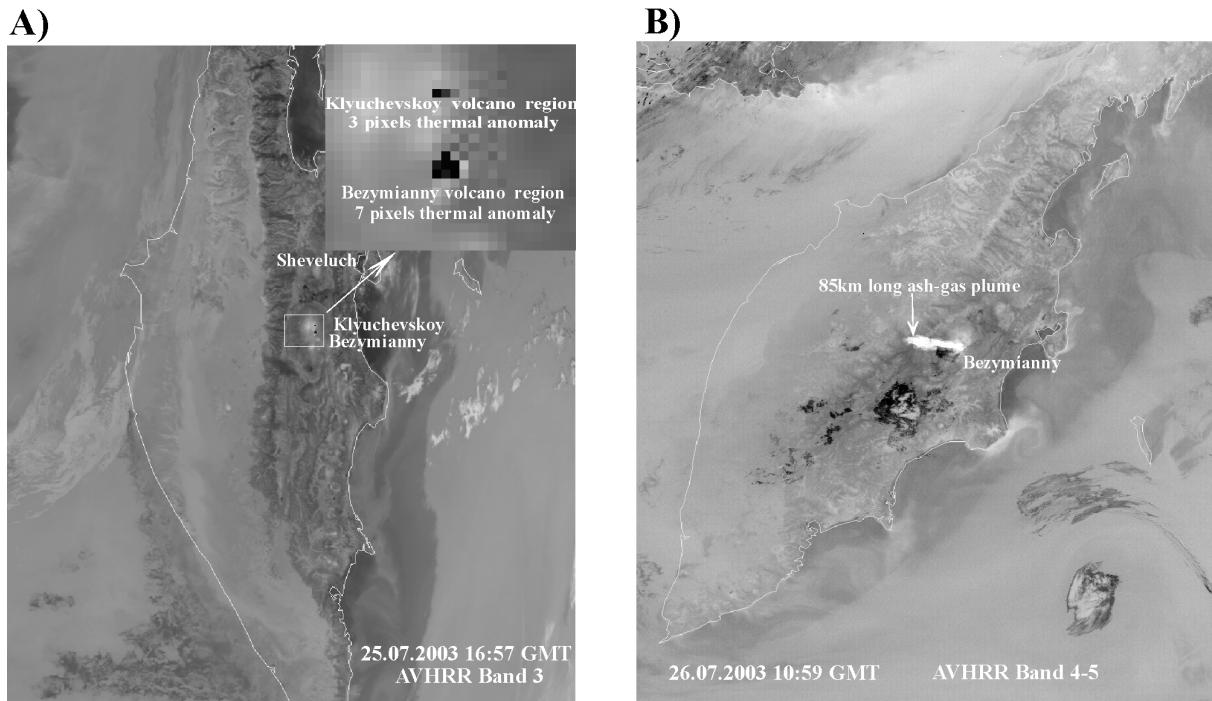


Рис. 11. Снимки спутника NOAA16. Предоставлены Камчатским центром связи мониторинга, обработка ЛИСВА КОМСП ГС РАН:

А) термальная аномалия 3 пикселя на Ключевском вулкане и термальная аномалия 7 пикселей на Безымянном вулкане, AVHRR канал 3, 25 июля 2003 г 16:57 Гринвичского времени; В) пепловое облако от вулкана Безымянный, протяженность облака около 85 км на запад, AVHRR канал 4-5, 26 июля 2003 год 10:59 Гринвичского времени.

Fig. 11. Images of NOAA16 satellite. Data – Kamchatkan Centre of Communication and Monitoring. Data processing – KEMSD:

А) 3 pixels thermal anomaly at Klyuchevskoy volcano, 7 pixels thermal anomaly at Bezymianny volcano, AVHRR band 3, June 25, 2003; В) 85 km ash plume from Bezymianny volcano to west on June 26, 2003, AVHRR band 4-5.

7F). 25 июля возросла сейсмическая активность, и было зафиксировано 6 поверхностных землетрясений с $K_s < 5.5$. Термальная аномалия продолжает увеличиваться и достигает размера 7 пикселей на спутниковом снимке, сделанном 25 июля в 16:57 (рис. 11А). По данным видео наблюдений эксплозивное извержение началось 26 июля в 08:45. По визуальным данным сейсмической станции «Козыревск» высота эруптивной колонны достигала высоты 8000 м над уровнем моря. Спутниковые данные позволили проследить распространение пеплового облака на расстояние более 200 км в западном направлении (рис. 11В). По данным сейсмического мониторинга извержение продолжалось не более 3 часов.

Заключение

Исследования вулканов Шивелуч и Безымянного, результаты которых представлены выше, стали возможны после внедрения на приемных центрах радиотелеметрической системы цифровой системы регистрации сейсмических сигналов и создания программного обеспечения для их обработки. Очевидно, что одной сейсмической станции на вулкане Шивелуч недостаточно для его полноценного контроля. Слабая сейсмичность вулкана Безымянного до 1997 г. контролировалась также по одной сейсмической станции «Зеленая». Установка станций «Копыто» (1997 г.), «Цирк» (1998 г.) и «Логинов» (1999 г.) позволила обрабатывать землетрясения из района вулкана Безымянного с энергетического класса 4.5. До 1999 г надежно регистрировались

землетрясения с класса 5.5, что иногда не давало возможности фиксировать сейсмическую подготовку перед слабыми и умеренными извержениями [5,10,11]. Результаты исследований извержений вулкана Безымянного в 2000-2003 гг. показали необходимость установки телеметрической станции непосредственно вблизи вулкана. Это позволит понизить энергетический класс регистрируемых землетрясений и надежно идентифицировать события из района вулкана Безымянного в условиях высокой активности вулкана Ключевской.

Комплексный анализ сейсмических данных с данными визуальных и видеонаблюдений, а также с данными спутниковых наблюдений за термальными аномалиями и распространением пепловых выбросов повышает надежность оперативных оценок состояния вулканов.

Список литературы

1. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Дроздин Д.В., Левина В.И., Фирстов П.П., Чубарова О.С., Широков В.А. Вулкан Шивелуч: глубинное строение и прогноз извержения по данным детальной сейсмичности 1962-1994гг. // Вулканология и сейсмология 1995 № 4-5. С. 54-75.
2. Действующие вулканы Камчатки // Под ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П., М.: Наука, 1991. Т. 1. С.84-97.
3. Жаринов Н.А., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А., Демянчук Ю.В. Новый эruptивный цикл вулкана Шивелуч – 1980-1993гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 20-28.
4. Жаринов Н.А., Горельчик В.И., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гарбузова В.Т., Демянчук Ю.В., Жданова Е.Ю. Извержения и сейсмический режим Северной группы вулканов в 1986-1987 гг. // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 3-20.
5. Малышев А.И. Жизнь вулкана // Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
6. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки // М.: Наука, 1981. 164 с.
7. Токарев П.И. Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4 С. 108-119.
8. Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А., Иванов В.В., Селиверстов Н.И., Хубуная С.А., Демянчук Ю.В., Марков И.А., Осипенко Л.Г., Смелов Н.П. Извержение вулкана Шивелуч в мае – июле 2001г. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 3-15.
9. Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д., Иванов В.В., Богоявленская Г.Е., Новгородцева Т.Ю., Демянчук Ю.В., Будников Ю.В., Фазлуллин С.М. Извержение вулкана Шивелуч в 1993г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3-19.
10. Чубарова О.С. О связи сейсмичности с характером активности вулкана Безымянного в 1971-1984 гг. // Тезисы доклада VI Всесоюзного вулканологического совещания. Петропавловск-Камчатский, сентябрь 1985 года. С. 231.
11. Чубарова О.С., Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмический режим вулкана Безымянного 1975-1979гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 58-68.
12. Harris A.J.L., Butterworth A.L., Carlton R.W., Downey I., Miller P., Navarro P., Rothery D.A. (1997) Low-cost volcano surveillance from space: case studies from Etna, Krafla, Cerro Negro, Fogo, Lascaar and Erebus. Bull Volcanol 59: 49-64.
13. 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) 62: 385-399.