

УДК 550.34+551.21

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ В 2000–2010 гг.

© 2013 г. С. Л. Сеньюков

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: ssl@emsd.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2012 г.

Благодаря установке новых радиотелеметрических сейсмических станций вблизи активных вулканов и внедрению современных цифровых технологий передачи, сбора и обработки информации в 1996–1998 гг. были существенно улучшены условия сейсмологических наблюдений на Камчатке. Такой качественный скачок позволил не только создать эффективную систему мониторинга состояния вулканов Камчатки и своевременно и обоснованно оценивать их состояние, но и делать выводы о вулканической опасности. Накопленный опыт позволил в 2004–2010 гг. сделать успешные краткосрочные прогнозы для 8 умеренных эксплозивных извержений вулкана Безымянный из 10, успешные среднесрочные прогнозы развития активности вулкана Ключевской в трех случаях, а также один успешный прогноз эксплозивного извержения вулкана Кизимен.

DOI: 10.7868/S0203030613010070

ВВЕДЕНИЕ

На Камчатке находятся наиболее активные вулканы нашей планеты [Действующие вулканы ..., 1991]. Ежегодно здесь наблюдаются эксплозивные извержения 3–5 вулканов. Камчатский филиал Геофизической службы (КФ ГС) РАН проводит мониторинг активности вулканов Камчатки в режиме, близком к реальному времени, с 2000 г. [Сеньюков, 2006]. Исследования ведутся по трем направлениям: 1) сейсмологический мониторинг; 2) визуальные и видеонаблюдения; 3) спутниковый мониторинг. В настоящее время ежедневно проводимая КФ ГС РАН работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о возможном развитии вулканической активности. Срочная информация о вулканической опасности передается по электронной почте или по телефонам в ГУ МЧС Камчатского края, а также в рамках международного проекта KVERT [Кириянов и др., 2001; Neal et al., 2009] в Аляскинскую Вулканологическую Обсерваторию (АВО) и в Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН в группу KVERT (Камчатская Группа Реагирования на Вулканические Извержения).

Из всех перечисленных выше направлений сейсмологический мониторинг является ведущим методом, потому что обеспечивает непрерывный круглосуточный контроль в режиме ре-

ального времени. Видео- и визуальные наблюдения в условиях Камчатки часто невозможны из-за плохой погоды или темноты, что составляет по нашим оценкам до 75% от общего времени. Более половины активных вулканов расположены вдали от населенных пунктов, и постоянные визуальные (или видео-) наблюдения для них отсутствуют. Спутниковые данные позволяют контролировать большие территории, и не зависят от времени суток. Однако они сильно зависят от погодных условий, носят дискретный характер и доступны только с некоторой задержкой (минимум – 30 мин, в среднем – 2 ч). Дискретный характер не дает возможности определить точно время начала извержения.

Целью настоящей статьи является краткий обзор работ, проведенных в 2000–2010 гг. лабораторией исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) КФ ГС РАН, по изучению и прогнозу активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным.

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Первые исследования взаимосвязи активности Камчатских вулканов с сейсмическими событиями были проведены известным камчатским вулканологом Г.С. Горшковым [1961]. П.И. Токарев в 1960 г. начал создавать методы и службу прогноза вулканических извержений [Токарев, 1966, 1976, 1981, 1983, 1985, 1988]. Детальный анализ сейсмичности за более чем 40-летний период на-

блюдений за Камчатскими вулканами позволил ученым сейсмологам: П.И. Токареву, В.И. Горельчик, С.А. Федотову, Е.И. Гордееву, В.М. Зобину, В.А. Широкову, В.Т. Гарбузовой А.В. Сторчеусу, В.В. Иванову не только изучить сейсмологические предвестники извержений (к сожалению, формат статьи не позволяет даже перечислить публикации по этой теме), но и успешно спрогнозировать наиболее сильные из них, как, например, Большое трещинное Толбачинское извержение в 1975 г. [Токарев, 1976], побочное извержение вулкана Ключевской в 1983 г. [Токарев, 1983] и экстремивно-эксплозивное извержение вулкана Шивелуч в 2001 г. [Иванов, 2003; Федотов и др., 2001].

Эффективность мониторинга состояния и прогноза активности вулканов определяется тремя главными факторами.

1) Детальность системы наблюдений (рис. 1). В настоящее время исторически сложившаяся радиотелеметрическая сеть КФ ГС РАН [Гордеев и др., 2006; Чебров, 2006; Ящук и др., 2009] позволяет проводить сейсмический мониторинг вулканов Камчатки с разной степенью детальности. Наиболее детальные наблюдения проводятся на Авачинской и Северной группах вулканов, а также на вулканах Кизимен, Горелый и Мутновский. На вулканах Карымский, Алаид (о. Атласова) и Эбеко (о. Парамушир) установлено только по одной станции, что позволяет фиксировать слабые локальные землетрясения, но не позволяет определять их пространственное положение. На остальных вулканах возможна регистрация только сильных сейсмических событий по удаленным станциям.

2) Обеспеченность системы наблюдений современными средствами связи и обработки [Гордеев и др., 2004а]. В 1996–1998 гг. был произведен качественный скачок в обработке сейсмической информации. В эти годы был осуществлен перевод сейсмической информации в цифровой формат и переход на обработку сейсмограмм с экрана компьютера [Дрознин, Дрознина, 2010]. Также было завершено объединение всех телеметрических сейсмических данных в рамках единой корпоративной сети, что позволило иметь доступ к сейсмической информации в реальном режиме времени.

3) Обеспеченность квалифицированным персоналом, имеющим необходимый опыт.

Результаты сейсмического мониторинга публикуются в различных информационных ресурсах [Гордеев и др., 2008; Гордеев и др., 2010]. Ежедневно информация о вулканических землетрясениях и о состоянии вулканов передается по установленному регламенту в заинтересованные организации и размещается на сервере КФ ГС РАН в Интернете.

1) <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm> – фактографическая база данных “Активность вулканов Камчатки”, ресурс включен в Государственный регистр баз и банков данных, № 0220711891.

2) <http://www.emsd.ru/ts> – текущая база данных землетрясений Камчатки;

3) <http://www.emsd.ru/ts/datareload.php?id=1> – землетрясения Северной группы вулканов;

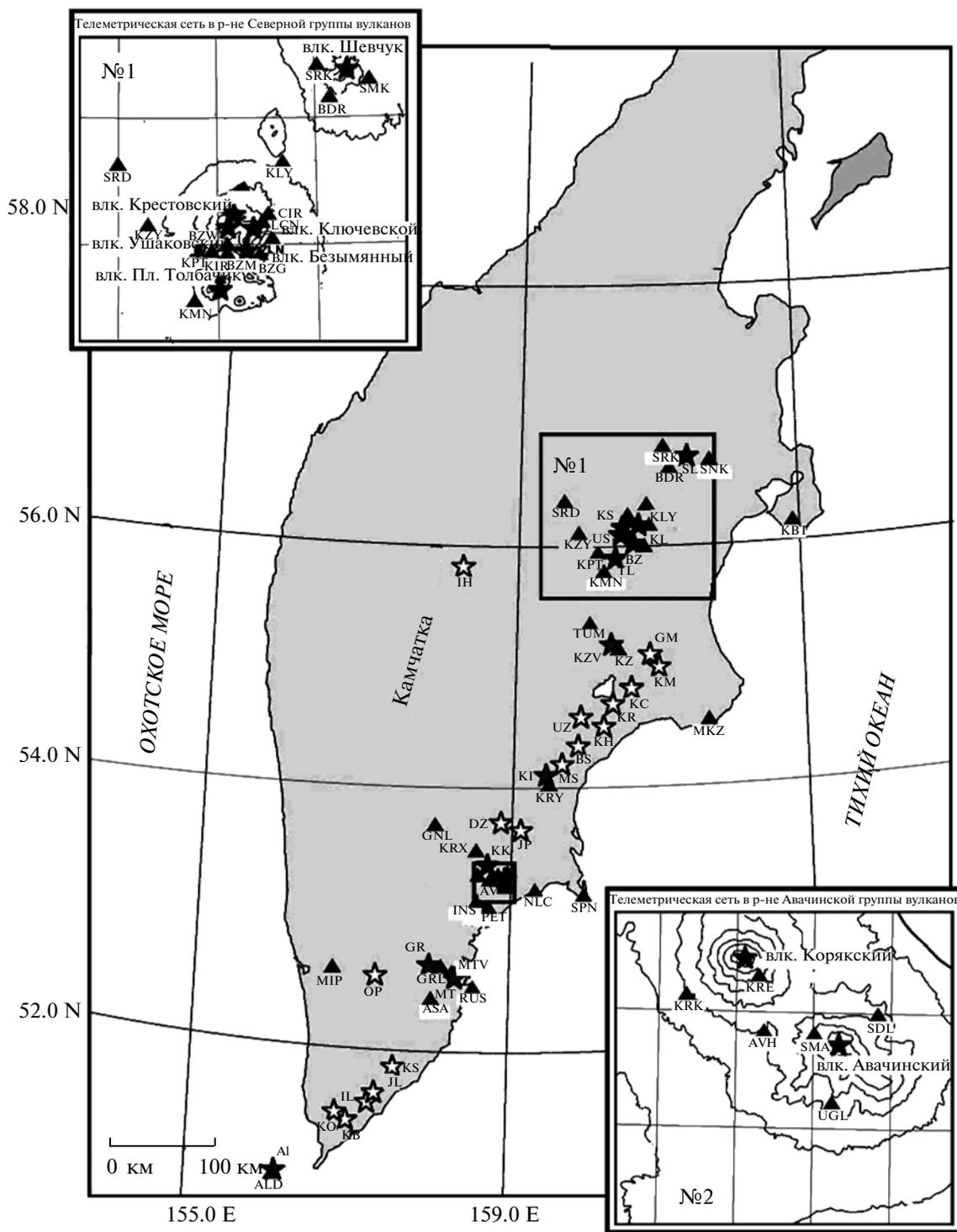
4) <http://www.emsd.ru/ts/datareload.php?id=0> – землетрясения Авачинско-Корякской группы вулканов.

5) <http://www.emsd.ru> – видеонаблюдения в реальном времени за состоянием камчатских вулканов: Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Кизимен, Авачинский и Корякский.

Каталоги землетрясений включают основные параметры землетрясений, зарегистрированных тремя и более станциями: время в очаге, координаты гипоцентра и энергетическую характеристику события. КФ ГС РАН публикует каталоги локализованных землетрясений и обзоры по сейсмическому мониторингу вулканов Камчатки в ежегодных сборниках Геофизической службы РАН “Землетрясения Северной Евразии” и “Землетрясения России”. В настоящее время опубликованы материалы за 1999–2009 гг., которые также включают CD диски с данными. Каталог, содержащий стандартные кинематические и энергетические параметры всех локализованных землетрясений Камчатки за текущий год, ежедневно дополняется, и доступен в Интернете: <http://www.emsd.ru/ts/>. Волновые формы (цифровые записи) землетрясений хранятся в зарегистрированном ресурсе “Волновые формы вулканических землетрясений Камчатки”, который включен в Государственный регистр баз и банков данных, № 0220913209. Землетрясения, которые невозможно локализовать, делятся по виду, в соответствии с классификацией П.И. Токарева [1981], подсчитывается их количество, измеряются их амплитудные характеристики и все параметры публикуются в разделе “Землетрясения” в Интернете: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНОВ И ПРОГНОЗ ИХ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

При регистрации сейсмических сигналов на действующих вулканах по числу землетрясений и их распределению в пространстве и времени, по выделившейся энергии, а также по спектральному составу сигналов и другим параметрам, идентифицируются два уровня сейсмической активности: “фоновая” (или нормальная) и “выше фона” (или повышенная). Понятие “фоновая” – индивидуальное для каждого вулкана, оценивается по опыту регистрации. Уровень “фоновой”



▲ — станции РТСС ★ — вулканы: белый цвет — нет контроля сейсмичности;
 серый цвет — ненадежный контроль сейсмичности;
 черный цвет — надежный контроль сейсмичности.

Рис. 1. Сеть радиотелеметрических сейсмических станций и действующие вулканы.
 Код и название вулканов: SL — Шивелуч, KL — Ключевской, US — Ушковский, BZ — Безымянный, TL — Плоский Толбачик, IH — Ичинский, KZ — Кизимен, GM — Гамчен, KM — Комарова, KC — Кроноцкий, KR — Крашенинникова, KH — Кихпинич, UZ — Узон, BS — Большой Семячик, MS — Малый Семячик, KI — Карымский, DZ — Дзензур, JP — Жупановский, KK — Корякский, AV — Авачинский, GR — Горелый, MT — Мутновский, OP — Опала, KS — Ксудач, JL — Желтовский, IL — Ильинский, KO — Кошелевский, KB — Камбалный.

активности характеризуется отсутствием проявлений вулканической активности, представляющей реальную опасность (пепловые выбросы, лавовые потоки, лавины из раскаленного материала).

Если на вулкане фиксируется повышенная сейсмичность, то это означает, что вулкан неспокоен и представляет опасность. Именно на этом основана система предупреждения о повышении вулканической опасности, без детализации каких-либо параметров. Система предупреждения реализована с помощью четырехцветной шкалы кодов опасности. Впервые такая шкала была использована Аляскинской вулканологической обсерваторией для обозначения степени опасности вулканов для авиации. Существенным дополнением к этой шкале стало выставление цветового кода по зарегистрированной в данные сутки сейсмической активности. Для этого каждому цветовому коду для отдельно взятого вулкана было сопоставлено фиксированное количество, энергия и тип сейсмических событий. Таким образом была создана возможность в режиме реального времени быстро оценивать состояние вулканов и представлять зарегистрированные результаты в Интернете (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) в простом и удобном формате. Постепенный сбор, накопление и исследование зарегистрированных данных для разных состояний вулканов позволило создать предпосылки для составления прогнозов извержений.

Прогноз о возможном извержении (или предупреждение об активизации вулкана) с указанием типа извержения, его масштабов, времени начала и продолжительности события, степени опасности для населения делается только в том случае, если для этого есть веские основания, и такой официальный документ, подписанный авторами, передается в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС) по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности и риска. Вескими основаниями для составления прогноза являются следующие факторы:

- на вулкане фиксируется повышенная сейсмичность;
- динамика развития уровня сейсмической активности соответствует типичному сценарию подготовки извержения вулкана. Для определения типичного сценария необходимо зарегистрировать несколько извержений изучаемого вулкана, выделить характерные предвестники извержений и оценить их количественные параметры. Обычно сценарий включает последовательность предвестников, отражающих механизм подготовки извержения вулкана.

Первый официальный прогноз был передан в КФ РЭС в январе 2005 г. К 2011 г. накоплен достаточный опыт для уверенной оценки состояния и прогноза активности для вулканов Безымянный

и Ключевской. Это позволило сделать 8 успешных краткосрочных прогнозов из 10 эксплозивных извержений вулкана Безымянный [Сенюков, 2008; 2010] и 3 успешных среднесрочных прогноза развития активности вулкана Ключевской [Сенюков и др., 2009], произошедших в 2004–2010 гг. В конце 2010 г. был сделан один успешный прогноз эксплозивного извержения вулкана Кизимен [Сенюков и др., 2011а] при отсутствии опыта регистрации извержений этого вулкана по сейсмологическим данным, благодаря накопленному опыту по слежению за Камчатскими вулканами с привлечением литературных данных о подобных вулканах мира. Таким образом, прогноз был сделан при отсутствии эмпирического опыта для этого вулкана, а следуя только общим теоретическим закономерностям. Все прогнозы зарегистрированы в КФ РЭС, и получена справка № 28 от 29.12.2011 г.

В 2000–2010 гг. для 9 вулканов Камчатки из 10 (для которых возможен детальный сейсмологический мониторинг) были зафиксированы проявления различной степени вулканической активности. Информация об активности этих вулканов опубликована в сборниках “Землетрясения Северной Евразии”, “Землетрясения России” и материалах конференций, посвященных Дню вулканолога в Петропавловске-Камчатском. Наиболее интересные результаты исследований по отдельным вулканам были обобщены в статьях: Шивелуч [Сенюков и др., 2004а; Сенюков и др., 2004б], Безымянный [Сенюков и др., 2004а; Сенюков, 2008, 2010; Thelen et al., 2010], Ключевской [Сенюков и др., 2006а; Сенюков и др., 2008; Сенюков и др., 2009], Кизимен [Гарбузова, Соболевская, 2008; Сенюков и др., 2011а], Карымский [Сенюков, 2003; Сенюков и др., 2006в; Кожевникова, 2008], Авачинский [Мелекесцев и др., 2002; Сенюков и др., 2006б], Корякский [Сенюков, Нуждина, 2010], Горелый [Соболевская, 2010], Мутновский [Зеленский и др., 2002].

КОНТРОЛЬ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Проблема оценки вулканической опасности дистанционными методами независимо от погодных условий и наличия наблюдателей остается весьма актуальной в настоящее время, прежде всего для обеспечения безопасности авиаполетов [Кирьянов и др., 2001; Neal et al., 2009]. Для решения этой проблемы сейсмический мониторинг в отличие от остальных наблюдений имеет неоспоримые преимущества: данные доступны в режиме реального времени, являются непрерывными и не зависят от погоды и времени суток. В мировой практике обычно именно по сейсмологическим данным определяют начало и продолжительность

эксплозивных извержений, представляющих наибольшую опасность для авиации.

В работе [Сенюков и др., 2004б] был предложен оригинальный эмпирический метод выделения пепловых выбросов и оценки их высоты на примере вулкана Шивелуч. Метод имеет два главных отличия.

1) Использование временного спектрального анализа показало на относительное повышение частоты от 1 до 2–4 гц со временем для сигналов сопровождающих пепловые выбросы вулкана Шивелуч, это позволило отделить их от других сигналов, регистрируемых в районе этого вулкана. Такое увеличение также было отмечено в результате совместных сейсмических и акустических наблюдений [Chouet et al., 2003; Ripepe et al., 2001] на других вулканах. По результатам моделирования в работе [Ripepe et al., 2001] показано, что первоначальный низкочастотный импульс на сейсмической записи может генерироваться в результате быстрого всплывания газа в магматической колонне, а последующий высокочастотный импульс генерируется разрывом газового пузыря на поверхности. Необходимо также отметить, что на сейсмической записи от пепловых выбросов в последующих вступлениях может регистрироваться ударная звуковая волна от взрыва [Zobin et al., 2006]. Звуковая волна, имея более высокочастотный состав по сравнению с сейсмическими волнами, повышает долю высокочастотных компонент в сигнале.

2) Благодаря непрерывным видеонаблюдениям была отмечена корреляция амплитуды огибающей сейсмического сигнала (абсолютная скорость смещения грунта), сопровождающего пепловый выброс со скоростью подъема пеплового облака. Логичным следствием этой корреляции стало получение зависимости высоты пеплового выброса от интеграла абсолютной скорости (кумулятивное абсолютное смещение). Таким образом, в оценке высоты участвует не только амплитуда сигнала, но и его продолжительность.

На рис. 2–5 представлены данные по сопоставлению высоты пепловых выбросов с интегралом абсолютной скорости для вулканов Шивелуч, Карымский, Кизимен и Безымянный соответственно [Сенюков и др., 2011б]. Использование разработанного метода в режиме реального времени для 4-х активных вулканов (Шивелуч, Карымский, Безымянный и Кизимен) показало его высокую эффективность при отсутствии визуальных и видеонаблюдений. Он позволял давать наиболее быструю и достаточно точную для реальной практики оценку высоты пепловых выбросов. Из нашего опыта можно заключить, что точность оценки высоты по сейсмологическим данным примерно равна точности по спутниковым данным, и составляет в среднем 30% от высоты. На основе раз-

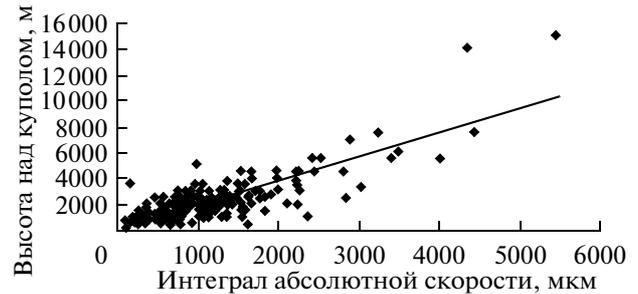


Рис. 2. График корреляции высоты пепловых выбросов вулкана Шивелуч и интеграла абсолютной скорости по станции “SVL” для 255 случаев, зарегистрированных визуальными, фото- и видеонаблюдениями в 1999–2004 гг.

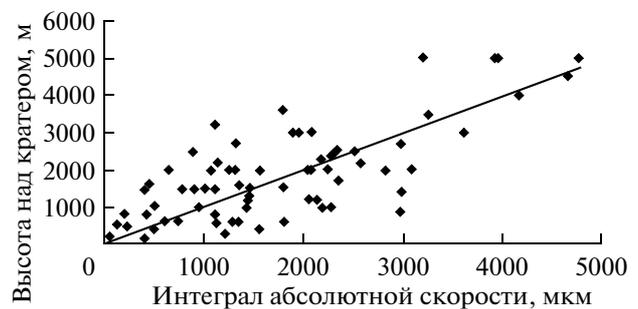


Рис. 3. График корреляции высоты пепловых выбросов вулкана Карымский и интеграла абсолютной скорости по станции “KRY” для 70 случаев, зарегистрированных визуальными, фото- и видеонаблюдениями в 2004–2007 гг.

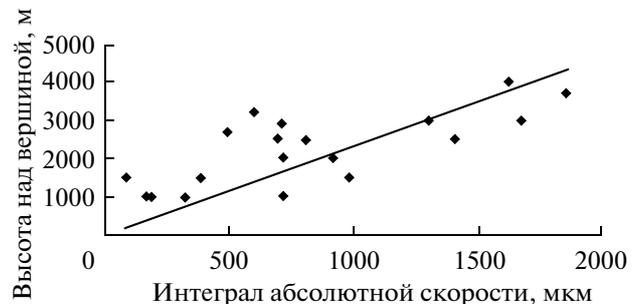


Рис. 4. График корреляции высоты пепловых выбросов вулкана Кизимен и интеграла абсолютной скорости по станции “KZV” для 19 случаев, зарегистрированных визуальными, фото- и видеонаблюдениями в 2011 г.

работанного метода, начиная с 01.01.2006 по 01.05.2011 гг., в рамках международного проекта KVERT [Кирьянов и др., 2001; Neal et al., 2009] передано более 680 срочных сообщений о пепловых выбросах, представляющих опасность для авиации: Шивелуч ~400, Карымский ~230, Безымянный ~10, Кизимен – 46. В соответствии с ре-

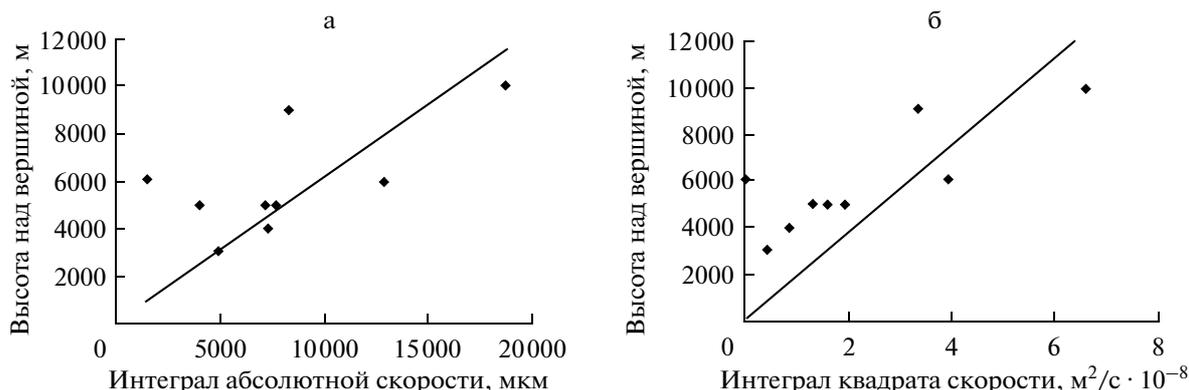


Рис. 5. Графики корреляции высоты пепловых выбросов вулкана Безымянный: а – с интегралом абсолютной скорости; б – с интегралом квадрата скорости. Анализировались записи станции “LGN” для 9 случаев, зарегистрированных визуальными, фото- и видеонаблюдениями.

гламентом эти сообщения на английском языке передавались как можно быстрее участникам проекта KVERT (АВО, ИВиС), в Центры слежения за вулканическими облаками в Токио, Анкоридже и Вашингтоне, а также в Елизовский Метеоцентр и Главное управление МЧС по Камчатской области (всего более 300 адресов).

Применить данный метод для оценки высоты пепловых шлейфов на вулкане Ключевской не удалось из-за невозможности выделить соответствующий сигнал на фоне сильного вулканического дрожания сопровождающего вершинные извержения этого вулкана.

ПРОГНОЗ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ В 2004–2010 гг.

Вулкан Безымянный – координаты вершины 55°58' с.ш., 160°35' в.д. Абсолютная высота вулкана 2869 м. Последнее катастрофическое извержение произошло 30 марта 1956 г., после 900–1000-летнего периода покоя [Действующие вулканы ..., 1991]. После этого события на вулкане происходят 1–2 эксплозивных извержения в год с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 км над уровнем моря. Перед извержениями в 1957–1961 гг. были зафиксированы сейсмические предвестники в виде роев поверхностных землетрясений, и в таких случаях П.И. Токарев сообщал о возможности извержений в октябре 1959 г., апреле 1960 г. и в марте 1961 г. [Токарев, 1966]. В работе О.С. Чубаровой [Chubarova, 1995], 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 $M = 5$ ($K_s = 12.1$) [Федотов, 1972], в 1957–1970 гг. величина M достигала 3 ($K_s = 9.1$), а за последние де-

сятилетия 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 1950–1960 гг., прогнозировать извержения вулкана Безымянный по сейсмологическим данным”. Таким образом, за почти 40-летний период наблюдений на вулкане Безымянный произошло большое количество умеренных эксплозивных извержений, представляющих реальную опасность, но ни одного успешного прогноза с указанием времени начала извержения по сейсмологическим данным не было сделано. Главной причиной этого, видимо, были недостаточно хорошие условия наблюдений.

С февраля 2000 г. по февраль 2004 г. было зарегистрировано и изучено 7 извержений вулкана Безымянный. В результате их исследований в мае 2004 г. был сформулирован первый вариант алгоритма прогноза извержений этого вулкана по сейсмологическим и спутниковым данным [Сенюков, 2008]. Алгоритм прогноза извержений вулкана Безымянный был определен как формализованная процедура принятия решения о возможности извержения в режиме реального времени на основе накопленных данных.

Алгоритм прогноза извержений вулкана Безымянный (пункт № 3 был включен в алгоритм после извержения 11 января 2005 г.) (табл. 1):

1) Вероятность извержения вулкана Безымянный равна нулю, если в районе вулкана регистрируется “фоновая”, нормальная сейсмичность (не более 10 поверхностных землетрясений с $K_s \geq 3.0$ ($M \geq 0.75$) за сутки или нет землетрясений с $K_s \geq 4.0$ ($M \geq 1.25$)), и максимальная температура термальной аномалии на куполе вулкана не превышает максимальную температуру аномалии ла-

Прогнозы и результаты

№	Время объявления прогноза (UTC)	Прогноз			Время извержения, высота пеплового выброса н.у.м.	Подтверждение
		Время начала извержения	Высота пеплового выброса, н.у.м	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	Сейсмические, спутниковые, 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	КФ РЭС		
3	2005, 24 ноября	следующие 30 дней	6–10 км	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			
4	2006, 02 мая	следующие 30 дней	6–10 км	КФ РЭС, ИВС(KVERT), АВО и КФГС	09 мая 2006 г. с 08:21 до 08:45 UTC, 12-15 км	Сейсмические, спутниковые, визуальные и видео данные
	06 мая (уточнение)	следующие 7 дней	6–10 км			
5	2006, 22 декабря	следующие 30 дней	6–10 км	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			
6	2007, 10 мая*	следующие 14 дней	6–15 км	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
8	2008, 12 августа*	следующие 7 дней	6–15 км	КФ РЭС, ИВС(KVERT), АВО и КФГС	2008, 19 августа с 10:30 до 11:15 UTC, >7 км	Сейсмические и спутниковые данные
9	2009, 11 декабря	следующие 30 дней	6–15 км	КФ РЭС, ИВС(KVERT), АВО и КФГС	2009, 16 декабря с 21:45 до ~24:00 UTC, >8 км	Сейсмические и спутниковые данные
	14 декабря (уточнение)	следующие 7 дней	6–15 км			
10	—	—	—	—	2010, 31 мая с 12:34 до 12:50 UTC, 11 км	Сейсмические, спутниковые и визуальные данные

Примечание. * – прогноз был сделан только по спутниковым данным [Соболевская, Сеньюков, 2008]. ИВС(KVERT) – Институт Вулканологии и Сейсмологии (группа 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.

вового 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 $K_s \geq 3.0$ за сутки или хотя бы одно с $K_s \geq 4.0$).

3) Извержение произойдет в следующие 30 дней с вероятностью 90%, если в течение последних трех 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-ти за сутки), сопровождающие по нашей интерпретации сход лавин, что может свидетельствовать о вздымании купола.

Примечания к алгоритму: 1) по интенсивности предваряющего роя землетрясений можно делать приблизительную оценку масштабов будущего извержения путем сравнения с интенсивностью сейсмической подготовки зарегистрированных извержений; 2) 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:

1) прогнозы для извержений №№ 2–6, 8–9 были признаны успешными в КФ РЭС;

2) один прогноз от 12 июля 2008 г. не оправдался;

3) перед извержениями № 7 и № 10 были зафиксированы предвестники, но официальных прогнозов не было.

В результате применения алгоритма в режиме реального времени, а также накопленного опыта было успешно спрогнозировано 8 умеренных эксплозивных извержений вулкана Безымянный из 10, зарегистрированных с февраля 2004 г. по декабрь 2010 г., при одной ложной тревоге. Пропуски и ложная тревога свидетельствуют о необходимости продолжения исследований по совершенствованию алгоритма с учетом комплексного использования сейсмологических и спутниковых данных. Также можно отметить, что на момент написания этой статьи произошло еще два уме-

ренных эксплозивных извержения вулкана Безымянный — 13 апреля 2011 г. и 08 марта 2012 г., которые были успешно спрогнозированы.

Вулкан Ключевской (координаты вершины $56^{\circ}04'$ с.ш., $160^{\circ}38'$ в.д.) — самый высокий, активный и мощный базальтовый вулкан Курило-Камчатской вулканической области [Действующие вулканы ..., 1991]. Абсолютная высота вулкана ~4750 м. В течение 2000–2010 гг. на Ключевском произошло 5 продолжительных извержений в центральном кратере с мощными пепловыми выбросами и излияниями лавовых потоков, побочных прорывов при этом не зафиксировано.

По результатам сейсмологических наблюдений можно выделить следующие периоды в деятельности вулкана [Сенюков и др., 2009]: спокойный и период активизации. Активизация вулкана — это временной интервал, в течение которого сейсмичность превышает “нормальный” или “фоновый” уровень. Если активизация закончилась эксплозивным или эксплозивно-эффузивным извержением, то она включает в себя два периода: 1) сейсмическая подготовка; 2) извержение. Сейсмическая подготовка — время от начала активизации до извержения. За время исследований на вулкане были зарегистрированы 5 периодов активизации, закончившихся извержениями в центральном кратере:

1) 28 октября 2002 г.—27 февраля 2004 г.: 21 марта 2003 г. — первые слабые пепловые выбросы высотой 200 м, 15 апреля 2003 г. — выбросы пепла высотой 500 м, 15 мая 2003 г. — впервые зафиксирована термальная аномалия, 17 мая — начало свечения над кратером, в ноябре-декабре были зафиксированы максимальная амплитуда вулканического дрожания, максимальные пепловые выбросы высотой до 2.5 км над кратером и наибольший размер термальной аномалии, 26 января 2004 г. началось резкое уменьшение амплитуды вулканического дрожания и размера термальной аномалии. Необходимо отметить, что излияния лавовых потоков на склоны вулкана в течение этого извержения не отмечено;

2) 12 января—28 апреля 2005 г.: 15 января — появление термальной аномалии; 16 января — начало свечения в кратере; 21 января — первый выброс бомб и пепловые шлейфы; 7 февраля — начало излияния лавового потока на северо-западный склон вулкана протяженностью несколько километров. В течение двух месяцев наблюдалось излияние лавового потока длиной до несколько километров и выбросы пепла на высоту до 4 км над кратером; 7 апреля уровень дрожания резко упал; 11 апреля начали регистрироваться единичные землетрясения с глубины 30 км; 29 апреля уровень сейсмичности стал фоновым;

3) 15 декабря 2006 г.—27 июля 2007 г.: 15 декабря 2006 г. — появление термальной аномалии;

15 февраля 2007 г. — первые слабые пепловые выбросы высотой до 300 м; 28 марта — начало излияния лавового потока по Крестовскому желобу; с 15 апреля по 26 июня 2007 г. — максимальные амплитуды вулканического дрожания и максимальные вулканические события: пепловые шлейфы протяженностью несколько тысяч километров распространялись в разные стороны в зависимости от направления ветра на высоте 10–12 км над уровнем моря, излияние 3 лавовых потоков длиной несколько километров на северо-западный, северо-восточный и юго-восточный склоны вулкана; в течение июля амплитуда вулканического дрожания значительно уменьшилась, а пепловые выбросы и излияние лавовых потоков прекратились;

4) 4 июня 2008 г.—01 февраля 2009 г.: 13 июня 2008 г. — появление термальной аномалии; 8 октября 2008 г. — появление свечения в кратере; 21 ноября 2008 г. — начало излияния лавового потока по северо-западному склону; 4 декабря 2008 г. — первые пепловые выбросы; в январе 2009 г. — уменьшение и прекращение вулканической активности;

5) 30 июля 2009 г.—7 декабря 2010 г.; 2 августа 2009 г. — появление активности в виде всплесков горячей магмы в кратере; в дальнейшем, до конца 2009 г. в вершинном кратере вулкана Ключевской фиксировалась вулканическая активность в виде всплесков магмы и слабых пепловых выбросов высотой не более 300 м; в 2010 г. продолжение вершинного извержения, сопровождавшегося мощными пепловыми выбросами высотой до 9 км над уровнем моря и излиянием нескольких лавовых потоков, протяженностью несколько километров; в конце 2010 г. извержение постепенно прекратилось.

В результате исследований зарегистрированных периодов покоя и активизации можно выделить следующий сценарий подготовки вершинных извержений вулкана Ключевской.

1) Начало активизации вулкана начиналось обычно с роя глубоких землетрясений (до 100 событий за сутки с глубины $20 < h < 35$ км и классом $K_S \leq 6.5$). К сожалению, этот предвестник неоднозначен, так как не после всех роев начинается миграция очагов к поверхности, но перед всеми вершинными извержениями наблюдалось большое количество землетрясений на глубине $20 < h < 35$ км.

2) Перед всеми вершинными извержениями наблюдалась миграция очагов землетрясений (96% этих событий имеют энергетический класс $4.0 \leq K_S \leq 6.0$) с глубины около 30 км к вершине вулкана. Наиболее наглядно этот процесс показывает подъем центра выделенной сейсмической энергии (ЦВСЭ) [Федотов и др., 1988; Сеньюков и др., 2008; Сеньюков и др., 2009], продолжитель-

ность которого может составлять от недели до нескольких месяцев.

3) По мере приближения ЦВСЭ к поверхности, начинали фиксироваться землетрясения 4-ого типа, и затем появлялось вулканическое дрожание. Источниками землетрясений 4-ого типа и вулканического дрожания для вулкана Ключевской обычно является дегазирующая магма.

4) Во время появления магмы в кратере сначала фиксировалась термальная аномалия по спутниковым данным в районе кратера Ключевского, а потом происходили пепловые выбросы, всплески лавы или ее излияние на склон. В это время ночью обычно наблюдалось свечение в кратере.

Именно совокупность всех предвестников: подъем центра выделенной сейсмической энергии с глубины ~30 км к кратеру, появление и увеличение количества землетрясений 4-ого типа (взрывы газов), появление и нарастание амплитуды вулканического дрожания, появление термальной аномалии в кратере по спутниковым данным свидетельствуют о подъеме новой порции магмы, обогащенной газами, которая вызывает новые извержения.

Главная особенность всех зарегистрированных вершинных извержений вулкана Ключевской — это постепенное развитие активности, поэтому их прогноз менее значим в сравнении с внезапными, мощными взрывными извержениями Безымянного. Но, тем не менее, использование в режиме реального времени отмеченного выше сценария подготовки дало основание сделать три среднесрочных прогноза развития активности вулкана Ключевской для четырех последних извержений. Документы, подписанные сотрудниками лаборатории ИСВА с указанием типа извержения, времени начала и продолжительности, масштабов вулканической активности, а также степени опасности для населения, были переданы в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС): 1) 17 января 2005 г., 2) 20 февраля 2007 г., 3) 16 марта 2007 г., 4) 01 июля 2008 г. (02 октября 2008 г. было сделано продление прогноза). Все прогнозы, кроме № 2 от 20 февраля 2007 г., по развитию активности вулкана Ключевской впоследствии в целом оправдались, и были признаны успешными в КФ РЭС.

Вулкан Кизимен (координаты вершины 55.13° с.ш., 160.33° в.д., абсолютная высота 2375 м) — самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии [Действующие вулканы ..., 1991]. Он расположен на юго-восточном борту Щапинского грабена и приурочен к системе крупноамплитудных сбросов северо-восточного простирания зоны сочленения этого грабена с горстом хребта Тумрок. За период детальных сейсмологических наблюдений, начиная с 1961 г., в районе вулкана Кизимен произошло

два сильных роя землетрясений: 1) Шапинский рой землетрясений в 1963 г. [Гордеев и др., 2004б], и 2) рой землетрясений, начавшийся весной 2009 г. [Сенюков и др., 2011а]. Если после Шапинского роя наблюдалось только усиление фумарольной деятельности, то в течение последнего роя наблюдалось сначала появление новых фумарол, потом парогазовая эмиссия с пеплом и затем эксплозивные извержения.

По данным КФ ГС мощный рой землетрясений в районе вулкана Кизимен начался в апреле 2009 г. [Сенюков и др., 2011а]. Несмотря на то, что в районе вулкана Кизимен более чем 1.5 года происходили достаточно сильные и многочисленные землетрясения, до октября 2010 г. никаких внешних изменений в деятельности вулкана не наблюдалось. По-прежнему фиксировалась только эмиссия газов из многолетней фумаролы, расположенной на северном склоне, 400 м ниже вершины. В октябре 2010 г. произошли три наиболее сильных землетрясения в диапазоне глубин от –2 до 3 км: 1) 09 октября в 17:19 UTC с $K_s = 10.9$; 2) 13 октября в 11:50 UTC с $K_s = 10.2$ и 3) 19 октября в 10:06 UTC с $K_s = 11.2$ ($M_s = 5.2$). Все эти события вызвали сотрясения до 6 баллов на базе “Тумрок”, расположенной в 10 км к северо-востоку от вулкана Кизимен.

По данным фотосъемки М. Жукова с базы “Тумрок” была отмечена следующая активизация (данные носят дискретный характер, обусловленный наличием видимости и возможностью для фотосъемки): 1) впервые новая фумарола была сфотографирована на юго-восточном склоне близко к вершине 16 октября 2010 г., 10 октября 2010 г. – ее еще не было; 2) первая паро-газовая эмиссия с пеплом из новой фумаролы была зафиксирована 11 ноября 2010 г., 9 ноября 2010 г. пепла в выбросах еще не было. Эмиссия с пеплом высотой до 1 км над вершиной продолжалась несколько дней, после чего существенно уменьшилась. Также отмечено выпадение свежего пепла в привершинной части вулкана.

27 ноября 2010 г. в 18:56 UTC ($K_s = 11.4$, $M_s = 5.0$) и в 19:29 UTC ($K_s = 11.9$, $M_s = 5.3$) произошли два сдвоенных во времени и пространстве близ поверхностных землетрясения вблизи вулкана. После таких сильных сдвоенных событий обычно происходят сильные извержения вулканов (устное сообщение Randall A. White, Геологическая служба США). В мировой практике такие сдвоенные события свидетельствуют о движении интрузии. На основании всех зарегистрированных данных 29 ноября 2010 г. сотрудниками лаборатории ИСВА было передано предупреждение о возможности сильного эксплозивного извержения вулкана Кизимен в КФ РЭС по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности и риска. 9 декабря 2010 г. были отмечены сей-

смические события, возможно, сопровождающие газовые взрывы с обломочными лавинами, и стало регистрироваться вулканическое дрожание. Максимальное сейсмическое событие было зафиксировано 9 декабря в 16:20 UTC и продолжалось 20 минут. По визуальным данным с базы “Ипуин”, расположенной в 25 км к западу от вулкана Кизимен (наблюдатель – Е. Власов, сотрудник Кроноцкого заповедника), в 10 ч утра местного времени 10 декабря (или 23:00 UTC 9 декабря) были отмечены периодические пепловые выбросы серого цвета, которые сносил сильный ветер (скорость ветра ~10 м/сек, с юга на север), поэтому их высота не превышала вершины вулкана.

По данным АВО было отмечено появление яркой термальной аномалии в районе вулкана Кизимен на снимках из космоса в 23:13 UTC (9 декабря) и в 01:50 UTC (10 декабря), что указывало на близость горячего материала к поверхности. На основании этих данных 10 декабря 2010 г. сотрудники лаборатории ИСВА передали в КФ РЭС и участникам проекта KVERT (АВО и ИВиС) прогноз развития активизации вулкана Кизимен: “... Все представленные данные свидетельствуют об активизации вулкана, разрушении его постройки и о подготовке к сильному эксплозивному извержению ($VEI = 3-4$), которое может произойти в ближайший месяц”.

По сейсмическим данным 12 декабря 2010 г. в 19:49 UTC была зарегистрирована серия поверхностных сейсмических событий, продолжительность 20 минут, которая сопровождала сильное эксплозивное извержение вулкана Кизимен. По спутниковым данным АВО в 20:30 и 21:30 UTC наблюдалось распространение пеплового шлейфа от вулкана Кизимен на высоте около 10 км в северо-западном направлении через поселки Козыревск и Тигиль. Выпадение пепла в пос. Козыревск началось в 20:00 UTC, а в пос. Тигиль – в 23:30 UTC. В дальнейшем, до конца года продолжала наблюдаться сейсмическая, в виде большого количества слабых локальных поверхностных землетрясений и слабого вулканического дрожания, и вулканическая активность, в виде пепловых выбросов. 31 декабря в 17:56 UTC зафиксирована еще одна серия поверхностных сейсмических событий, продолжительность 20 минут, которая сопровождала сильное эксплозивное извержение вулкана Кизимен. По спутниковым данным пепловый шлейф от этого события распространился в юго-западном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная в КФ ГС РАН система мониторинга состояния вулканов Камчатки показала свою высокую эффективность в 2000–2010 гг. В настоящее время ежедневно проводимая КФ ГС

РАН работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о вулканической опасности.

Срочная информация о вулканической опасности передается по электронной почте или телефонам в ГУ МЧС Камчатского края, а также в рамках международного проекта KVERT в АВО и в ИВиС ДВО РАН (в группу KVERT).

К 2011 г. накоплен достаточный опыт не только для уверенной оценки состояния, но и для прогноза активности вулканов Безымянный и Ключевской. Сделаны успешные краткосрочные прогнозы для 8-ми умеренных эксплозивных извержений вулкана Безымянный из 10-ти, и 3 успешных среднесрочных прогноза развития активности вулкана Ключевской из 4-х. Также в конце 2010 г. был сделан один успешный прогноз эксплозивного извержения вулкана Кизимен при отсутствии опыта регистрации извержений этого вулкана по сейсмическим данным, благодаря накопленному опыту по слежению за Камчатскими вулканами и использованию литературных данных о подобных вулканах мира.

Среди возможных основных направлений развития и улучшения системы мониторинга вулканов можно отметить следующие:

- продолжение расширения сети телеметрических сейсмических станций на активных вулканах Камчатки, с внедрением цифровых широкополосных сейсмометрических каналов;
- развитие методов контроля вулканической активности;
- создание баз данных комплексных наблюдений по извержениям вулканов с привлечением спутниковой и видео- информации;
- создание экспертных информационно-аналитических систем для оценки состояния и прогноза развития вулканической активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гарбузова В.Т., Соболевская О.В.* Сейсмичность в районе вулкана Кизимен 1996–2007 гг. // Труды региональной научно-технической конференции “Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России”. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 64–68.
- Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др.* Коровая сейсмичность Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004б. С. 62–74.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Дроздин Д.В. и др.* Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004а. С. 43–61.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6–27.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Банк сейсмологических данных Камчатки // Открытое образование. 2008. № 4. С. 16–22.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Сеньюков С.Л. и др.* Информационные ресурсы для вулканологических исследований на Камчатке // Открытое образование. 2010. № 5. С. 73–82.
- Горшков Г.С.* О связи сейсмических и вулканических явлений при извержении вулкана Безымянный (1956–1957) // Бюл. вулканол. станций. 1961. № 31. С. 32–37.
- Действующие вулканы Камчатки* // Под ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П. М.: Наука, 1991. Т. 1. 302 с.; Т. 2. 415 с.
- Дроздин Д.В., Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН, 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Зеленский М.Е., Овсянников А.А., Гавриленко Г.М., Сеньюков С.Л.* Извержение вулкана Мутновский (Камчатка) 17 марта 2000 г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 25–28.
- Иванов В.В.* Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправдываемость // Вестник ДВО РАН. 2003. № 5. С. 97–108.
- Кириянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеньюков С.Л. и др.* Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 408–423.
- Кожевникова Т.Ю.* Электронная база эталонов сейсмических сигналов и сопутствующих им вулканических событий для вулкана Карымский // Труды региональной научно-технической конференции “Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 171–175.
- Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сеньюков С.Л.* Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79–80.
- Сеньюков С.Л.* Скоростные модели вулкана Карымский по данным локальных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 54–63.
- Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Нурждина И.Н. и др.* Исследования активности вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000–2003 гг. дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке, Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004а. С. 301–318.
- Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Дроздин 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: КОМСП ГС РАН, 2004б. С. 292–300.

- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами в 2001–2005 гг. // Материалы научно-технической конференции “Геофизический мониторинг Камчатки”, Петропавловск-Камчатский, 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2006а. С. 94–100.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я. и др.* Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994–2005 гг. // Материалы научно-технической конференции “Геофизический мониторинг Камчатки”, Петропавловск-Камчатский, 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2006б. С. 101–105.
- Сенюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я. и др.* Исследования активности вулкана Карымский дистанционными методами в 2001–2005 гг. // Материалы научно-технической конференции “Геофизический мониторинг Камчатки”, Петропавловск-Камчатский, 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2006в. С. 202–206.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я.* Пространственно-временной анализ землетрясений вулкана Ключевской за 1999–2007 гг. // Труды региональной научно-технической конференции “Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г., Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 120–124.
- Сенюков 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”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г., Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 59–63.
- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 50–59.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.* Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–18 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 91–95.
- Сенюков 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”, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2009 г., Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 239–243.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я. и др.* Сейсмичность вулкана Кизимен // Труды Третьей научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011а. С. 140–144.
- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Кожеевникова Т.Ю.* Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным для вулканов Шивелуч, Карымский, Кизимен и Безымянный с 01.01.2003 по 01.05.2011 гг. // Труды Третьей научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011б. С. 139–143.
- Соболевская О.В., Сенюков С.Л.* Ретроспективный анализ изменения температуры термальной аномалии на вулкане Безымянный в 2002–2007 гг., как предвестника его извержений, по данным сенсора AVHRR спутников NOAA 16 и 17 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 147–157.
- Соболевская О.В.* Сейсмичность вулкана Горелый в 1984–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–18 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 382–386.
- Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
- Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала Большого трещинного Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН. 1976. Т. 229. № 2. С. 439–442.
- Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- Токарев П.И.* Прогноз побочного извержения вулкана Ключевской в марте 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 3–8.
- Токарев П.И.* Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108–119.
- Токарев П.И.* Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47–61.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3–42.
- Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 3–15.
- Чебров В.Н.* Развитие сейсмологических наблюдений, оценка сейсмической опасности на Камчатке (1915–2006 гг.) // Материалы Международной сейсмологической школы “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 135–139.
- Яцук В.В., Дрознин Д.В., Ляник Ю.А. и др.* Сеть радиотелеметрических сейсмических станций на Камчатке // Тезисы Второй региональной научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 11–18 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С. 50.

Chouet B., Dawson P., Ohminato T. et al. Source mechanisms of explosions at Stromboli volcano, Italy, determined from moment-tensor inversions of very-long-period data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108 (B1). P. 2019–2044.

Chubarova O.S. Bezmyanny 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.

Neal C., Girina O., Senyukov S. et al. Russian eruption warning system for aviation // *Nat. Hazards.* 2009. V. 51. P. 245–262.

Ripepe M., Ciliberto S., Della Schiava M. Time constraints for modeling source dynamics of volcanic explosions at Stromboli // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 8713–8727.

Thelen W., West M., Senyukov S. Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezmyanny Volcano, Russia // *J. of Volcanology and Geothermal Research.* 2010. V. 194. P. 201–213.

Zobin V.M., Navarro-Ochoa C.J., Reyes-Davila G.A. Seismic quantification of the explosions that destroyed the dome of Volcan de Colima, Mexico, in July–August 2003 // *Bull. Volcanol.* 2006. V. 69. P. 141–147.

Monitoring and Prediction of Volcanic Activity in Kamchatka from Seismological Data: 2000–2010

© 2013 г. S. L. Senyukov

*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii,
bul'var Piipa 9, 683006 Russia*

Abstract—Seismological Observations in Kamchatka were significantly improved due to the installation of new telemetered seismograph stations near active volcanoes and the introduction of modern digital technologies for data transmission, acquisition, and processing in 1996–1998. This qualitative leap forward made it possible, not only to create an effective system for monitoring Kamchatka volcanoes and for timely and reliable assessment of the state of these volcanoes, but also to draw conclusions about volcanic hazard. The experience that was gained enabled us to make successful short-term forecasts for eight moderate explosive eruptions on Bezmyannyi Volcano of the ten that have occurred in 2004–2010, successful intermediate-term forecasts of evolving activity on Klyuchevskoi Volcano in three cases, as well as providing a successful forecast of an explosive eruption on Kizimen Volcano.

Сдано в набор 04.12.2012 г.	Подписано к печати 14.01.2013 г.	Формат бумаги 60 × 88 ¹ / ₈
Офсетная печать	Усл. печ. л. 13.5	Уч.-изд. л. 14.0
	Усл. кр.-отт. 2.8 тыс.	Бум. л. 6.75
	Тираж 198 экз.	Зак. 923

Учредитель: Российская академия наук, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6