

УДК 551.214

О ПРЕДВЕСТНИКЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ, ОСНОВАННОМ НА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

© 2012 г. О. А. Гирина

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9, e-mail: girina@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 07.06.2011 г.

Камчатка — один из наиболее активных районов нашей планеты. Сильные эксплозивные извержения вулканов, при которых пеплы поднимаются на высоту 8–15 км над уровнем моря, происходят здесь каждые полтора года. Исследование предвестников извержений вулканов для предупреждения и оценки будущей вулканической опасности — актуальная фундаментальная проблема вулканологии. Рассмотрен предвестник сильных эксплозивных извержений вулканов, выявленный по спутниковым данным (термальные аномалии), а также примеры успешной реализации прогнозов извержений на основе этого предвестника.

ИЗУЧЕНИЕ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

На Камчатке расположено 30 действующих и потенциально активных вулканов. Четыре вулкана находятся в состоянии почти непрерывных слабых или умеренных извержений, на фоне которых происходят пароксизмальные эксплозивные события: Ключевской активен на протяжении нескольких сотен лет; Молодой Шивелуч — с августа 1980 г., со времени начала роста лавового купола в эксплозивном кратере, образовавшемся при катастрофическом извержении 12 ноября 1964 г.; Безымянный — с 22 октября 1955 г., с момента пробуждения после тысячелетнего молчания; Карымский — с 1 января 1996 г., с начала новой фазы активности вулкана. Время от времени активизируются вулканы Авачинский, Мутновский, Горелый и др. В среднем, сильные эксплозивные извержения камчатских вулканов, при которых пеплы поднимаются на 8–15 км над уровнем моря (н.у.м.) и выше, происходят примерно один раз в полтора года [Гирина, Гордеев, 2007].

Изучение вулканов Камчатки имеет многовековую историю, но первым их исследователем с научной точки зрения по праву считается С.П. Крашенинников. С организацией в 1935 г. Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга в п. Ключи, начались планомерные исследования каждого из вулканов полуострова, и к настоящему времени опубликованы многочисленные данные по геологии, тектонике, составу пород, характеристике извержений, истории развития многих вулканов Камчатки [Влодавец, 1984; Влодавец, Пийп, 1957; Горшков, Богоявленская, 1965; Дубик, Волынец, 1972; Мелекесцев и др., 1997; Набоко, 1963; Пийп, 1956 и многие др. авторы]. С 1946 г. активно развиваются сейсмо-

логические исследования действующих вулканов [Горшков, 1956, 1961; Гонтовая и др., 2004; Горельчик, 2001; Токарев, 1966, 1981; Федотов, 2008; Чубарова и др., 1983; Широков, 2009; Gordeev, 1992 и др.].

Для повышения безопасности авиapolетов при эксплозивных извержениях вулканов в 1993 г. на Камчатке была создана Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) [Гирина, 2008; Гирина, Гордеев, 2007; Miller, Casadevall, 2000; Neal et al., 2009]. Целью KVERT является уменьшение риска столкновения самолетов с пепловыми облаками в северной части Тихоокеанского региона с помощью своевременного обнаружения повышения активности вулканов, распознавания и отслеживания облаков вулканического пепла, и оперативного оповещения администраций авиакомпаний о появлении опасности, связанной с вулканическим пеплом. При попадании в пепловое облако современного реактивного самолета может возникнуть реальная угроза жизни людей на борту, в первую очередь, в связи с остановкой авиационных двигателей при плавлении захваченных частиц пепла с последующей их аккумуляцией и затвердеванием в области двигателя (температура плавления пепловых частиц ниже рабочей температуры двигателя) [Гирина, Гордеев, 2007; Miller, Casadevall, 2000]. Кроме этого, под действием вулканических пеплов или аэрозолей может происходить абразивное истирание оконных стекол и аэродинамических поверхностей; засорение вентиляционной и топливной систем, приемников воздушного давления; эрозия движущихся частей (компрессора, лопастей турбин); закупорка форсунок и радиаторов охлаждения; засорение и перегрев электроники и т.д.

Цвет	Авиационные цветовые коды, рекомендованные Международной организацией гражданской авиации (the International Civil Aviation Organization – ICAO)
Зеленый	Вулкан находится в нормальном - неэруптивном состоянии. <i>или, после того, как перешел от более высокого уровня активности:</i> Вулканическая активность считается прекратившейся, или вулкан вернулся к нормальному – неэруптивному состоянию.
Желтый	Вулкан проявляет признаки повышенной активности выше известного уровня фона. <i>или, после того, как перешел от более высокого уровня активности:</i> Вулканическая активность значительно снизилась, но тщательный мониторинг продолжается, потому что возможно возобновление ее роста
Оранжевый	Вулкан проявляет повышенную активность с высокой вероятностью извержения <i>или,</i> Извержение идет с отсутствием или незначительным выбросом пепла. (указать высоту пеплового шлейфа, если это возможно)
Красный	Извержение по прогнозам неизбежно со значительным выбросом пепла в атмосферу. <i>или,</i> Извержение идет со значительным выбросом пепла в атмосферу. (указать высоту пеплового шлейфа, если это возможно)

Рис. 1. Авиационный цветовой код.

В настоящее время Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН выполняет функции Вулканологической обсерватории Российской Федерации по обеспечению информацией о вулканической деятельности на Дальнем Востоке международного аэронавигационного обслуживания пользователей воздушного транспорта¹. За обеспечение информацией о вулканической деятельности международного аэронавигационного обслуживания пользователей воздушного пространства в ИВиС ДВО РАН отвечает группа KVERT. В связи с этим, учеными из KVERT ежедневно семь дней в неделю в рабочее время анализируются данные мониторинга действующих вулканов Камчатки: сейсмического, осуществляемого Камчатским филиалом Геофизической службы (КФ ГС) РАН, видео-визуального (ИВиС и КФ ГС) и спутникового (ИВиС и Аляс-кинской вулканологической обсерваторией (АВО) Геологической службы США). Многосторонний анализ имеющихся опубликованных сведений о деятельности вулканов, а также данных, полученных сотрудниками KVERT в течение

18-летнего непрерывного мониторинга вулканов, позволяет с большой надежностью оценивать степень вулканической опасности для авиаполетов и населения Камчатки. Для оценки степени опасности для авиации каждого из активных вулканов Камчатки ученые используют *Авиационные цветовые коды*, разработанные Международной организацией гражданской авиации (ICAO – International Civil Aviation Organization) (рис. 1). Прогноз опасности действующих вулканов Камчатки для авиаполетов (VONA – Volcano Observatory Notice for Aviation) – еженедельно, а также по мере необходимости (в оперативном режиме при обнаружении пепловых выбросов и пепловых шлейфов в районе Камчатки; при регистрации подготовки или начала сильных взрывных извержений) в любой день недели, в том числе в праздники и выходные, публикуется на официальном сайте KVERT: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index.php>

ПРЕДВЕСТНИКИ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ

Для повышения своей безопасности, люди, проживающие в разных странах вблизи вулканов, всегда искали предвестники извержений. Ими были и слышимый гул со стороны вулкана, и свечение над кратером и т.д. Учеными описано множество предвестников взрывных извержений, выяв-

¹ “Соглашение между Федеральным агентством воздушного транспорта, Российской Академией наук и Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по обеспечению информацией о вулканической деятельности на Дальнем Востоке международного аэронавигационного обслуживания пользователей воздушного пространства” от 06.12.2010.

ленных различными методами исследований. Например, резкий рост фумарольной активности вулкана или быстрое увеличение числа раскаленных лавин на экструзиях вулканов, извергающих лаву андезитового и дацитового состава, видимые визуально; появление деформаций на склонах вулкана, регистрируемых с помощью наклономеров, GPS-приемников или спутниковых данных; повышение температуры вулканических газов и содержания в них HCl, непосредственно измеренные на вулкане; и т.д. [Токарев, 1985; и др.]. Осознание высокой опасности сильных извержений для населения послужило мощным толчком для развития дистанционных методов исследований вулканов и поиском предвестников извержений в рамках этих методов.

В 1950–1960 гг. появились описания сейсмических предвестников, явившиеся результатом детальных сейсмологических исследований вулканов. Например, в работе Т. Минаками [Minakami, 1960] вулканические землетрясения разделяются на четыре типа (А, Б, В и вулканическое дрожание) и отмечается, что увеличение частоты землетрясений “типа В” является предвестником извержений андезитовых вулканов и прорывов побочных кратеров. В монографии П.И. Токарева [1966] дана характеристика сейсмичности действующих вулканов Ключевской и Безымянный, выделено несколько типов характерных для них вулканических землетрясений, описаны предвестники их извержений. Например, схема подготовки извержения вулкана Безымянный по сейсмическим данным [Токарев, 1966] такова: задолго до извержения начинают отмечаться землетрясения 2-го типа и частота их постепенно растет; постепенно и непрерывно возрастает средняя скорость нарастания условных деформаций; непосредственно перед извержением энергия вулканических землетрясений уменьшается. В связи с тем, что подготовка нового извержения вулкана Безымянный на протяжении многих лет почти не изменилась, постоянный сейсмический мониторинг вулкана позволяет предсказывать его извержения.

П.И. Токарев внес весомый вклад в развитие сейсмологии, в том числе разработал методику прогноза извержений по сейсмологическим данным; описал характеристики различных сейсмических сигналов; выявил сейсмологические предвестники извержений вулканов Ключевской, Шивелуч, Плоский Толбачик, Безымянный [Горельчик, 2001; Токарев, 1966, 1976, 1981, 1985, 1988]. На основании этой методики им было сделано несколько краткосрочных прогнозов: Большое трещинное Толбачинское извержение в 1975 г.; боковой прорыв вулкана Ключевской в 1983 г.; извержения вулкана Безымянный в октябре 1959 г., апреле 1960 г. и марте 1961 г. [Горельчик, 2001]. В дальнейшем методика краткосрочного прогноза извержений вулканов по сейсмологиче-

ским данным совершенствовалась В.И. Горельчик² [1985, 1986] и др.

С развитием космических исследований, Интернет-ресурсов появилась возможность выявления предвестников извержений с помощью спутниковых данных. Это актуально, так как за некоторыми вулканами наблюдения проводятся только с помощью спутников; например, на Камчатке нет сейсмических станций на 19 действующих вулканах (Ичинский, Высокий, Гамчен, Комарова, Кроноцкий, Крашенинникова, Кихпинич, Тауншиц, Малый Семячик, Жупановский, Опала, Ксудач, Желтовский, Ильинский, Кошелева, Камбальный, Ходутка, Хангар, Дикий Гребень); иногда сейсмический мониторинг вулканов отсутствует по техническим причинам; следовательно, в настоящее время на Камчатке спутниковый мониторинг является одним из наиболее информативных методов слежения за вулканической активностью.

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ КАМЧАТКИ

Для мониторинга действующих вулканов в разных странах мира используются данные спутников NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) с датчиками высокого разрешения AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), геостационарных спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), GMS (Geostationary Meteorological Satellite), TERRA и AQUA с датчиками MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и другие [Пирина, Гордеев, 2007; Carter et al., 2000; Dehn et al., 2000; Kearney et al., 2008; Miller, Casadevall, 2000; Ramsey, Dehn, 2004; Schneider et al., 2000; Watson et al., 2004; Yu et al., 2002]. Время обработки получаемого спутникового сигнала составляет от 15 мин (GOES) до 1.5 ч (GMS).

На протяжении более двадцати лет основным источником информации для оперативного мониторинга вулканической активности (отслеживания термальных аномалий на вулканах и пепловых шлейфов при их эксплозивных извержениях) во всем мире являются данные полярно-орбитальных спутников серии NOAA (AVHRR) [Glaze et al., 1989; Miller, Casadevall, 2000; Prata, 1989; Ramsey, Dehn, 2004; Schneider et al., 2000; Schneider, Rose, 1994; Watson et al., 2004; Wen et al., 1994]. Это связано с тем, что на орбитах одновременно находится несколько (до 4) спутников, каждый из которых в сутки проходит над любой

² Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Левина В.И., Чубарова О.С. Разработка и опробование системы прогноза вулканических извержений на Камчатке. Отчет о НИР ВНИИЦентр; ГР 81068164; Инв. № 528. М., 1986. Гл. 3.1. С. 63–141.

территорией примерно в одно и то же местное время [Гарбук, Гершензон, 1997; Кронберг, 1988; Тертышников, Кучейко, 2010; Толмачева, Шкляева, 2006]. Высота орбиты спутников — около 800 км. Орбиты проходят вблизи полюсов Земли, это позволяет получать широкий обзор территории (ширина полосы обзора — 3000 км) и гарантирует съемку любого участка поверхности (пространственное разрешение в центре полосы обзора — 1.1 км; размер пиксела — 1.1×1.1 км) не менее 4-х раз в сутки с каждого спутника. Сканирующий радиометр AVHRR формирует изображение подстилающей поверхности в 5-ти спектральных каналах: 1-й (0.58–0.68 мкм) — измерение отраженного земной поверхностью излучения; 2-й (0.725–1.1 мкм) — измерение излучения в ближней инфракрасной (ИК) области; 3-й (3.55–3.93 мкм) — измерение собственного и отраженного землей излучения; 4-й и 5-й (11.5–12.5 и 10.5–11.5 мкм) — измерение собственного теплового излучения земной поверхности. Разрядность изображения — 10 бит/пиксел/канал. Скорость передачи цифровой информации со сканера AVHRR составляет 665.4 Кбит/с. Данные со спутников NOAA размещены в Интернете на сайте www.saa.noaa.gov (Satellite Active Archive) и доступны любым пользователям. Кроме этого, согласно концепции “Открытое небо”, Всемирная метеорологическая организация обеспечивает возможность свободного приема спутниковой информации любыми наземными станциями мира.

В 1999 г. АВО предоставила KVERT доступ к информации с NOAA для мониторинга состояния активных вулканов Камчатки, а также возможность пройти обучение обработке спутниковых снимков. С 2002 г. ученые из KVERT сами обрабатывают и анализируют различные спутниковые данные (MTSAT, NOAA (AVHRR), TERRA и AQUA (MODIS), OMI, ASTER и др.) близко к реальному времени для выявления пепловых шлейфов и термальных аномалий на активных вулканах Камчатки. Обнаружение пеплового шлейфа указывает на реальную опасность авиapolетов в районе конкретного вулкана, поэтому в оперативном режиме сообщение об этом шлейфе (с указанием его размеров и местоположения) по электронной почте передается всем заинтересованным пользователям. В 2002–2007 гг. ученые из КФ ГС тоже проводили спутниковый мониторинг вулканов Камчатки в рамках программы KVERT (по договору с ИВиС ДВО РАН), но не указывали эту программу в своих публикациях [Сенюков, 2006].

Ученые из KVERT продолжают обмениваться информацией по вулканам Камчатки и обсуждать вопросы спутникового мониторинга с коллегами из АВО. Например, пепловое облако при извержении Безымянного 5 октября 1995 г. было прослежено с помощью спутников от вулкана до ост-

рова Уналашка на Алеутах на расстоянии 5000 км. Тесное сотрудничество ученых из KVERT и АВО в использовании спутниковой информации совместно с данными сейсмологических (предоставляемых КФ ГС) и наземных наблюдений помогло снизить опасность для авиapolетов в этом регионе. В связи с извержением Безымянного были отменены 15 авиарейсов [Гирина, Гордеев, 2007].

ПРЕДВЕСТНИК ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ, ОСНОВАННЫЙ НА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА (ТЕРМАЛЬНАЯ АНОМАЛИЯ)

Потоки тепла, поступающие в атмосферу из районов активных вулканов при их извержениях (при выбросах раскаленных вулканических продуктов в течение стромболианской, вулканской, пелейской, плинианской активности; с поверхности лавовых озер, изливающихся лавовых потоков, низвергающихся пирокластических потоков и т.д.) или в межэруптивную фазу (парогазовые эмиссии из фумарол или сольфатар) в настоящее время хорошо изучены [Dehn et al., 2000; Glaze et al., 1989; Harris et al., 1995, 2000; Oppenheimer et al., 1993, 1997; Schneider et al., 2000; Watson et al., 2004; Wright et al., 2002 и др.]. Одними из первых работ, в которых изменение температуры и размера термальной аномалии в районе вулкана рассматривается в качестве оперативного предвестника сильного взрывного извержения, являются статьи о наблюдениях с помощью спутниковых данных за развитием извержений вулкана Безымянный в 1997 и 1998 гг. [Dehn et al., 2000; Schneider et al., 2000]. Накопленный за два десятилетия опыт американских и российских ученых по спутниковому мониторингу активных вулканов Камчатки в рамках программы KVERT подтвердил эффективность этого предвестника не только для Безымянного, но и для вулканов с другим составом изверженных вулканических продуктов.

В основу этого предвестника положено классическое определение термина “извержение вулкана”: извержение вулкана представляет собой поступление на поверхность земли магматического вещества [Влодавец, 1984; Макдональд, 1975]. Так как магматическое вещество высокотемпературно (900–1200°C), при приближении его к поверхности земли в атмосферу поступает все более увеличивающийся поток тепла, который на спутниковых снимках отмечается как термальная аномалия. Размер и температура аномалии линейно связаны с количеством ювенильного вещества, поступающего на поверхность земли в момент ее регистрации на спутниковом снимке. Появление термальной аномалии в районе того или иного вулкана свидетельствует о подготовке или скором начале взрывного извержения. Степень опасности такого извержения

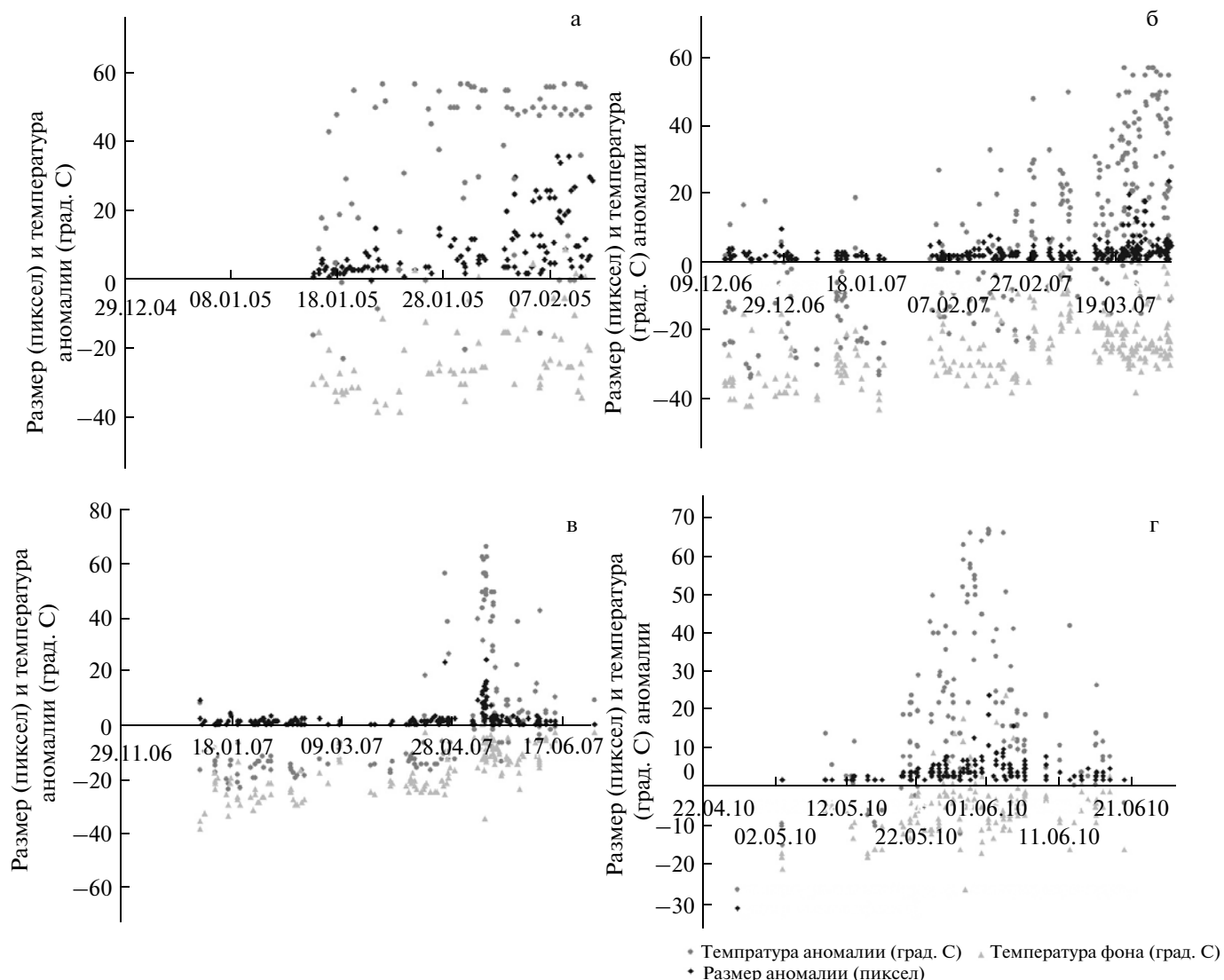


Рис. 2. Изменение температуры и размера термальных аномалий на вулканах Ключевской в 2005 г. (а) и 2007 г. (б), Безымянный в 2007 г. (в) и 2010 г. (г).

для населения и окружающей среды напрямую зависит от состава магматического вещества, извергаемого конкретным вулканом. Рассмотрим несколько примеров.

Ключевской вулкан (состав пород — базальты, андезибазальты)

2005 г. С конца октября 2004 г. по 11 января 2005 г. сейсмичность вулкана (по данным КФ ГС РАН) была преимущественно на уровне фона. Фиксировалась только фумарольная деятельность вулкана с высотой парогазового столба в среднем до 5 км н.у.м. 12 января сейсмичность вулкана повысилась: начало регистрироваться вулканическое дрожание. По спутниковым данным, с 15 января в районе вулкана стала отмечаться термальная ано-

малия, обусловленная подъемом свежей лавы к вершинному кратеру (рис. 2а) [Гирина и др., 2007]. *Появление термальной аномалии в районе вершинного кратера вулкана ясно указывало на начало его нового извержения.* 16 января впервые визуально было зарегистрировано свечение над вулканом, то есть лава появилась в кратере и, вероятно, началась стромболианская активность вулкана. Высота фумарольного столба в этот день увеличилась до 6 км н.у.м., в нем начал отмечаться пепел; на спутниковых снимках наблюдались пепловые шлейфы, протянувшиеся до 40 км на северо-восток от вулкана. Свечение регистрировалось в течение восьми дней, и только 21 января визуально была зафиксирована стромболианская активность вулкана. Несмотря на это, началом эксплозивной фазы извержения принято считать 16 января — вре-

мя начала свечения над кратером. В 00:25 UTC 16 января для вулкана был установлен “Оранжевый” Авиационный цветовой код (АЦК), характеризующий высокую степень опасности вулкана для авиации (KVERT Information Release 05-05 (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/updates/>)).

2007 г. С 14 декабря 2006 г. в районе вершинного кратера начала отмечаться слабая термальная аномалия (см. рис. 2б), стало ясно, что готовится новое извержение, поэтому 19 декабря в 01:05 UTC АЦК вулкана был изменен с “Зеленого” на “Желтый” (KVERT Information Release 58-06). В январе и до середины февраля наблюдалась преимущественно умеренная фумарольная активность вулкана, но температура аномалии постепенно росла. Сейсмичность вулкана (по данным КФ ГС РАН) в январе была относительно невысокой, но с 1 февраля повысилась – начало фиксироваться вулканическое дрожание [Гирина и др., 2009]. 15 февраля впервые визуально наблюдалась стромболианская активность вулкана, то есть началась эксплозивная фаза извержения. В 09:10 UTC 15 февраля для вулкана был установлен АЦК “Оранжевый” (KVERT Information Release 07-07).

В этих двух случаях термальная аномалия в районе кратера впервые была зафиксирована за восемь дней (2005 г.) и за два месяца (2007 г.) до активной стромболианской фазы извержения, непосредственно увиденной наблюдателями. В 2003–2007 гг. извержения Ключевского происходили: с 16 апреля 2003 г. по 15 февраля 2004 г.; с 15 января по 19 мая 2005 г.; с 15 февраля по 27 июля 2007 г. При продолжительном извержении 2003–2004 гг. лавовых потоков не было; в кратере вырос шлаковый конус, сохранившийся до начала извержения 2005 г. (перерыв между извержениями был около 10 месяцев). Новая лава относительно легко прошла через толщи пирокластических отложений, оставшихся в канале вулкана, поэтому термальная аномалия появилась почти одновременно со стромболианской активностью вулкана. Во время извержения 2005 г. излился сравнительно небольшой объем лавы в Крестовский желоб [Гирина и др., 2007]. Кроме этого, перед извержением 2007 г. существовал длительный перерыв в активности вулкана (20 месяцев), во время которого, вероятно, произошла осадка лаво-пирокластического материала в канале вулкана, так как на его вершине образовалась глубокая воронка. Кратер вулкана заполнялся новой лавой в течение двух месяцев, прежде чем стромболианская активность начала отмечаться визуально. Приведенные примеры демонстрируют, что в любом случае – заполнен ли кратер шлаковым материалом или он пуст, появление термальной аномалии в районе вулкана указывает на скорое начало его эксплозивного извержения.

На начальных этапах эксплозивные извержения вулкана Ключевской, как правило, представляют опасность только для местных авиалиний, так как пепловые шлейфы преимущественно распространяются на высотах до 6–7 км н.у.м. на первые десятки километров от вулкана. Ближе к окончанию извержений *всегда* наблюдается усиление эксплозивной активности вулкана с подъемом пепловых шлейфов до 8–10 км н.у.м. и распространением пепловых шлейфов до 5000 км от вулкана [Гирина и др., 2007; Гирина и др., 2009]. В такие периоды становится реальной опасностью для международных авиоперевозок. Вблизи расположенных к вулкану населенных пунктах возможны пеплопады, опасность которых для населения зависит от мощности извержения и продолжительности выпадения пепла.

Безымянный вулкан (состав пород – андезиты)

После катастрофического извержения 30 марта 1956 г. в его кратере *непрерывно* растет лавовый купол. Как известно, сейсмичность вулкана в периоды между кульминационными событиями очень слабая, хотя в это время визуально может отмечаться медленное выжимание лавовых потоков на склон купола, а на спутниковых снимках фиксируется слабая термальная аномалия [Гирина и др., 2007; Гирина и др., 2009; Токарев, 1966; Чубарова и др., 1983]. Постепенное увеличение количества и энергии сейсмических событий в районе вулкана прямо указывает на подготовку сильного эксплозивного извержения вулкана [Токарев, 1966; Чубарова и др., 1983]. Но бывают случаи, когда подготовка извержения Безымянного начинается на фоне сильного эксплозивного извержения вулкана Ключевской, высокая сейсмичность которого “вуалирует” сейсмические события, происходящие в районах соседних вулканов. Тогда наиболее эффективным предвестником извержения Безымянного является изменение температуры и размера термальной аномалии в районе его лавового купола.

2002 г. С 1 по 24 декабря наблюдалась умеренная фумарольная активность вулкана. С 9 по 22 декабря, по данным КФ ГС РАН, отмечались редкие слабые поверхностные землетрясения. С 23 декабря сейсмичность начала быстро расти, 25 декабря появилось слабое вулканическое дрожание, затем рой землетрясений (около 70 событий). Термальная аномалия размером 1 пиксел с разницей температур аномалии и фона 18°C впервые была отмечена 23 декабря. 24 декабря наблюдалась аномалия в 2 пиксела с разницей температур 33°C. В связи с сейсмической активизацией, ростом температуры и размера термальной аномалии, 25 декабря в 03:25 UTC для Безымянного был установлен АЦК “Желтый” (KVERT Information Release 61-02). Позднее размер анома-

лии составил 10 пикселей, температура достигла $+50^{\circ}\text{C}$ при температуре фона -25°C . Кроме этого, на спутниковом снимке в 01:21 UTC 25 декабря в районе вулкана автором был обнаружен очень яркий шлейф длиной более 15 км, который спустя ~ 2.5 часа растянулся на 200 км к западу от Безымянного. В связи с увеличением температуры и размера аномалии, а также появлением яркого шлейфа, в 08:10 UTC 25 декабря АЦК был изменен на “Оранжевый” (KVERT Information Release 62-02), было указано, что извержение уже близко. Сильное эксплозивное извержение вулкана началось в 19:15 UTC 25 декабря. Примерно через 2 ч после начала извержения в п. Козыревск начался пеплопад. Мощность слоя пепла достигала ~ 3 мм.

2007 г. С 1 января по 10 мая отмечалась слабая или умеренная фумарольная деятельность вулкана, а также иногда слабая термальная аномалия в районе его лавового купола, поэтому АЦК был “Желтый”. 8 мая учеными из KVERT был отмечен резкий рост температуры и размера термальной аномалии (с 4°C и 2 пикселей 6 мая до 40°C и 10 пикселей 8 мая) (см. рис. 2в), поэтому 10 мая в 22:55 UTC АЦК был изменен на “Оранжевый” и было указано, что пепловые эксплозии высотой до 10 км н.у.м. могут случиться в любое время (KVERT Information Release 16-07, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/updates/>). Сильное извержение Ключевского, происходившее в это время, не позволяло проследить рост сейсмической активности Безымянного и предсказать его извержение по сейсмологическим данным. Последовательность событий извержения Безымянного была восстановлена автором по косвенным данным и опубликована 13 мая (KVERT Information Release 17-07). Эксплозивное извержение вулканического типа произошло 11 мая с 14:30 до 15:00 UTC (по данным КФ ГС РАН) [Пирина и др., 2009]. По спутниковым данным, мощный пепловый шлейф протянулся от Безымянного на северо-восток и тонкий пепловый шлейф от Ключевского на восток-северо-восток. На расстоянии 20–30 км от вулканов шлейфы объединялись и дальше двигались единой массой. Вследствие сильной циклонической деятельности в районе Северной группы вулканов, позже на спутниковых снимках отмечались различные направления перемещения пеплового шлейфа. Пеплопад в п. Ключи произошел с 16:00 до $\sim 22:00$ UTC 11 мая, там отложился преимущественно серый пепел Безымянного, в котором в качестве примеси наблюдался черный пепел Ключевского.

2010 г. 20 мая, на основании анализа изменения температуры и размера термальной аномалии, автором был опубликован прогноз сильного извержения Безымянного, которое ожидалось в период с 21 мая по 10 июня. В связи с повышением температуры аномалии в районе лавового купола с 18°C 19 мая до 49°C 23 мая (см. рис. 2г), в

02:20 UTC 24 мая АЦК вулкана был изменен на “Оранжевый”, было указано, что идет подготовка нового эксплозивного извержения (KVERT Information Release 23-10). Главная фаза сильного извержения была зарегистрирована (по данным КФ ГС РАН) с 12:34 до 12:50 UTC 31 мая. Первые пепловые выбросы, вероятно, не превышали 10 км н.у.м., пепловый шлейф протянулся на 250 км на запад от вулкана, в п. Козыревск прошел пеплопад. При дальнейшей эксплозивной деятельности вулкана пепел поднимался выше 10 км н.у.м., шлейфы перемещались на северо-северо-восток на 160 км. Далее отдельное пепловое облако размером $\sim 200 \times 50$ км в течение 01–04 июня дрейфовало более 700 км на юго-запад и юг до акватории Северных Курильских островов (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/updates/>).

Непрерывный спутниковый мониторинг вулкана Безымянный осуществляется учеными из KVERT с 2002 г., эпизодический – с 1998 г. [Пирина, 2008; Пирин, Гордеев, 2007; Пирин и др., 2007, 2009]. Благодаря наблюдениям за изменением температуры и размера термальной аномалии в районе лавового купола, учеными из KVERT в 2001–2010 гг. было предсказано 8 извержений Безымянного (16 декабря 2001 г., 25 декабря 2002 г., 11 января 2005 г., 9 мая 2006 г., 11 мая 2007 г., 14–15 октября 2007 г., 19 августа 2008 г., 31 мая 2010 г.). Реализацией прогнозов в реальном времени были публикации в Интернете KVERT Information Releases, содержащие АЦК “Оранжевый” или “Красный” и предупреждение о близком сильном извержении вулкана, **до начала извержений**.

Фумарольная активность вулкана Безымянный в периоды между эксплозивными извержениями представляет опасность только для местных авиалиний. При подготовке, а тем более кульминационной стадии эксплозивного извержения вулкана, *всегда* существует высокая опасность для международных авиаперевозок, так как извержение развивается, как правило, стремительно, пепловые шлейфы поднимаются до 8–15 км н.у.м. и распространяются до 5 000 км от вулкана [Пирина и др., 2007, 2009]. В п. Козыревск и п. Ключи возможны пеплопады, но мощность слоя выпавшего пепла обычно не превышает нескольких миллиметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие дистанционных методов наблюдений позволяет в настоящее время проводить непрерывный спутниковый мониторинг действующих вулканов. Это дает возможность зафиксировать появление термальной аномалии в районе каждого активного вулкана, а также проследить рост ее размера и температуры во времени. Опыт ежедневного спутникового мониторинга действующи-

ших вулканов Камчатки в течение 9 лет, в совокупности со знаниями особенностей их эруптивной активности, позволяет предсказывать сильные эксплозивные извержения.

Автор искренне признательна коллегам из KVERT, выполняющим спутниковый мониторинг вулканов Камчатки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-07-12026-офи-м-2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Влодавец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
- Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 5–95.
- Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
- Гирина О.А.* 15 лет деятельности Камчатской группы реагирования на вулканические извержения // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 52–59.
- Гирина О.А., Гордеев Е.И.* Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2 (132). С. 100–109.
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Малик Н.А. и др.* Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил в 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2007. № 4. С. 29–40.
- Гирина О.А., Ушаков С.В., Малик Н.А. и др.* Действующие вулканы Камчатки и о. Парамушир Северных Курил в 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1. С. 3–20.
- Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л.* Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
- Горельчик В.И.* К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВиГ ДВО РАН, 2001. С. 341–351.
- Горельчик В.И.* Сейсмическая активность Ключевского вулкана в период подготовки и развития прорыва “Предсказанный” в марте–июле 1983 года // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 71–87.
- Горельчик В.И.* Сейсмичность района Ключевской группы вулканов и связь сейсмических и вулканических явлений на Ключевском вулкане, 1971–1983 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз на Дальнем Востоке. Тезисы докладов Выездной сессии МСССС и VI научной сессии Дальневосточной секции МСССС. Петропавловск-Камчатский, 1986. С. 25–26.
- Горшков Г.С.* О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703–705.
- Горшков Г.С.* О связи вулканических и сейсмических явлений при извержении вулкана Безымянного (1955–1956 гг.) // Бюл. вулканол. станций. 1961. № 31. С. 32–37.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955–1963 гг.). М.: Наука, 1965. 171 с.
- Дубик Ю.М., Волынец О.Н.* Влияние характера эруптивного процесса на кристаллизацию плагиоклаза // Бюл. вулканол. станций. 1972. № 48. С. 64–70.
- Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988. 260 с.
- Макдональд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержский Л.Д.* Крупнейшие эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 тысяч лет // Вестник РФФИ. 1997. № 1. С. 21–29.
- Набоко С.И.* Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.
- Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Труды Лаборатории вулканол. 1956. Вып. 11. 309 с.
- Сеньюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Тертышников А.В., Кучейко А.А.* Оперативный космический мониторинг ЧС: история, состояние и перспективы // Земля из космоса. 2010. Вып. 4. С. 7–12.
- Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
- Токарев П.И.* Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108–119.
- Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала Большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439–442.
- Токарев П.И.* Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47–61.
- Толмачева Н.И., Шкляева Л.С.* Космические методы экологического мониторинга. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2006. 296 с.
- Федотов С.А.* К 50-летию детальных сейсмологических исследований на Курило-Камчатской дуге // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 153–160.
- Чубарова О.С., Горельчик В.И., Гарбузова В.Т.* Сейсмический режим вулкана Безымянный в 1975–1979 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 58–69.
- Широков В.А.* Разработка моделей подготовки сильных землетрясений и вулканических извержений на основе изучения их связи с космическими ритмами // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908–1910 гг. 22–27 сентября 2008. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 241–253.
- Carter A.J., Girina O.A., Ramsey M.S., Demyanchuk Y.V.* ASTER and field observations of the 24 December 2006

- eruption of Bezymianny Volcano, Russia // *Remote Sensing of Environment*. V. 112. 2008. P. 2569–2577.
- Dehn J., Dean K., Engle K. Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space // *Geology*. 2000. V. 28. № 8. P. 755–758.
- Glaze L., Francis P.W., Rothery D.A. Measuring thermal budgets of active volcanoes by Satellite remote sensing // *Nature*. 1989. V. 338. P. 144–146.
- Gordeev E.I. Modeling of volcanic tremor wave fields // *J. Volcanol. Geoth. Res.* 1992. V. 51. P. 145–160.
- Harris A.J.L., Flynn L.P., Dean K.G. et al. Real-time monitoring of volcanic hot spots, in remote sensing of active volcanism // *AGU Monograph*. 2000. V. 116. P. 139–159.
- Harris A.J.L., Swabey S.E.J., Higgins J. Automated thresholding of active lavas using AVHRR data // *Int. J. Rem. Sens.* 1995. V. 16. № 18. P. 3681–3686.
- Kearney C.S., Dean K., Realmuto V.J. et al. Observations of SO₂ production and transport from Bezymianny volcano, Kamchatka using the MODerate resolution Infrared Spectroradiometer (MODIS) // *Int. J. Rem. Sens.* 2008. V. 29. № 22. P. 6647–6665.
- Miller T.P., Casadevall T.J. Volcanic ash hazards to aviation // *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, California. 2000. P. 915–930.
- Minakami T. Fundamental research for predicting volcanic eruptions // *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.* 1960. V. 38. P. 497–544.
- Neal Ch., Girina O., Senyukov S. et al. Russian eruption warning systems for aviation // *Natural Hazards*. Springer Netherlands. 2009. V. 51. № 2. P. 245–262.
- Oppenheimer C., Francis P. Remote sensing of heat, lava and fumarole emission from Erta 'Ale volcano, Ethiopia // *Int. J. Rem. Sens.* 1997. V. 18. P. 1661–1692.
- Oppenheimer C., Francis P.W., Rothery D.A. et al. Infrared image analysis of volcanic thermal features: Lascar volcano, Chile, 1984–1992 // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 4269–4286.
- Prata A.J. Observation of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances // *Int. J. Rem. Sens.* 1989. V. 10 (4). P. 751–761.
- Ramsey M., Dehn J. Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER into near real-time monitoring using AVHRR // *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2004. V. 135. P. 127–146.
- Schneider D.J., Dean K.G., Dehn J. et al. Monitoring and Analyses of Volcanic Activity Using Remote Sensing Data at Study for Kamchatka, Russia, December 1997 // *Remote Sensing of Active Volcanism*. Geophysical Monograph. 2000. P. 65–85.
- Schneider D.J., Rose W.I. Observations of the 1989-1990 Redoubt volcano eruption clouds using AVHRR satellite imagery // *US Geological Survey Bull.* 1994. V. 2047. P. 405–418.
- Watson I.M., Realmuto V.J., Rose W.I. et al. Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging Spectroradiometer // *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2004. V. 135 (1–2). P. 75–89.
- Wen S., Rose W.I. Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5 // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99(D3). P. 5421–5431.
- Wright R., Flynn L.P., Garbeil H. et al. Automated volcanic eruption detection using MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 82. P. 135–155.
- Yu T., Rose W.I., Prata A.J. Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using “split window” IR data from GOES and AVHRR // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107 (D16). P. 4311.

On Precursor of Kamchatkan Volcanoes Eruptions Based on Data from Satellite Monitoring

O. A. Girina

Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: girina@kscnet.ru

Abstract—Kamchatka is one of the most active volcanic regions on the planet. Large explosive volcanic eruptions, in which the ash elevates up to 8–15 km above sea level, occur here every 1.5 years. Study of eruptions precursors in order to reduce a volcanic risk for the population is an urgent problem of Volcanology. The available precursor of strong explosive eruptions of volcanoes, identified from satellite data (thermal anomaly), as well as examples of successful prediction of eruptions using this precursor, are represented in this paper.