

УДК 551.214

ИЗУЧЕНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Гирина О.А.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, girina@kscnet.ru

Изучение вулканов Камчатки

На Камчатке расположено 30 действующих и потенциально активных вулканов. Четыре вулкана находятся в состоянии почти непрерывного слабого извержения, на фоне которого происходят кульминационные сильные эксплозивные события: влк. Ключевской активен на протяжении нескольких сотен лет; влк. Молодой Шивелуч - с августа 1980 г., со времени начала роста лавового купола в эксплозивном кратере, образовавшемся при катастрофическом извержении 12 ноября 1964 г.; влк. Безымянный - с 22 октября 1955 г., с момента пробуждения после тысячелетнего молчания; влк. Карымский - с 1 января 1996 г. Кроме этого, время от времени активизируются влк. Авачинский, Мутновский, Горелый и др. В среднем сильные эксплозивные извержения камчатских вулканов, при которых пеплы поднимаются на высоту более 8-15 км над уровнем моря (н.у.м.), происходят примерно один раз в полтора года [3].

Изучение вулканов Камчатки имеет многовековую историю, но первым их исследователем с научной точки зрения был С.П. Крашенинников. С организацией Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга в п. Ключи в 1935 г., учеными проводились планомерные исследования каждого из вулканов полуострова, и на сегодняшний день опубликованы многочисленные данные по геологии, тектонике, составу пород, характеристике извержений, истории развития и т.д. многих вулканов Камчатки. С 1946 г. по настоящее время активно развиваются сейсмологические исследования действующих вулканов [6, 8-12 и др.].

В 1993 г. для повышения безопасности авиаполетов при извержениях вулканов с выбросом вулканических пеплов на Камчатке была создана Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT - Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) [2, 3]. В настоящее время KVERT – некоммерческий Проект ученых института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, Камчатского филиала геофизической службы (КФ ГС) РАН и Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО) Геологической службы (ГС) США. Целью Проекта 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. В связи с этим, учеными Проекта ежедневно семь дней в неделю осуществляется мониторинг вулканов Камчатки: сейсмический (КФ ГС), видео-визуальный (ИВиС и КФ ГС) и спутниковый (АВО и ИВиС). Анализ имеющихся опубликованных сведений о вулканах, а также данных, полученных учеными KVERT в течение 18-летнего непрерывного мониторинга вулканов, помогает лучше понять происходящую вулканическую активность и определить степень ее опасности для населения Камчатки и авиатранспорта, находящегося в воздушном пространстве полуострова.

Спутниковый мониторинг Камчатки

Ученые Аляскинской вулканологической обсерватории имеют большой опыт интерпретации спутниковой информации. Для мониторинга вулканической активности они используют данные спутников NOAA 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) и другие [2, 3, 13, 15 и др.]. Температурные данные различных каналов AVHRR, GOES и MODIS используются для обнаружения на снимках термальных аномалий и отделения пепловых облаков от обычных. Время обработки полученного спутникового сигнала составляет от 15 мин (GOES) до 1.5 ч (GMS). Например, пепловое облако при извержении влк. Безымянный 5 октября 1995 г. было прослежено с помощью спутников на расстоянии 5000 км: от вулкана до о-ва Уналашка (Алеутские

острова). Тесное сотрудничество ученых KVERT и ABO в использовании спутниковой информации совместно с данными сейсмологических (предоставляемых КФ ГС РАН) и наземных наблюдений помогло снизить опасность для авиации в этом регионе. В связи с извержением Безымянного были отменены 15 авиарейсов [3].

В 1999 г. ABO предоставила ученым KVERT доступ в Интернете к спутниковым снимкам NOAA для мониторинга состояния активных вулканов Камчатки, а также возможность пройти обучение обработке спутниковых снимков. С 2002 г. ученые группы KVERT сами 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, обмениваясь информацией и обсуждая неясные вопросы с коллегами из ABO.

Предвестники извержений вулканов

Люди, проживающие вблизи вулканов, для повышения своей безопасности всегда искали предвестники извержений. Ими были и цветы примулы, если они необычно рано появлялись на склонах вулканов, и слышимый гул со стороны вулкана, и свечение над кратером и т.д. В настоящее время одним из главных визуальных предвестников эксплозивного извержения активного вулкана является его мощная фумарольная деятельность (подъем парогазовой колонны до нескольких километров над кратером вулкана). Кроме этого, предвестниками сильных эксплозивных событий на вулканах могут служить хорошо заметные в темное время суток: Стромболианская активность вулканов, извергающих лаву базальтового состава; и обрушения раскаленных лавин с лавовых куполов вулканов, извергающих лаву андезитового и дацитового состава.

В 50-60 гг. прошлого столетия появились описания сейсмических предвестников, явившиеся результатом детальных сейсмологических исследований вулканов. Например, в работе Т. Минаками [14] все 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. П.И. Токарев в своей книге [8] дал характеристику сейсмичности действующих вулканов Ключевской и Безымянный и описал предвестники извержений, характерные именно для этих вулканов. Например, схема предсказания извержения вулкана Безымянный по сейсмическим данным (по П.И. Токареву) такова: задолго до извержения начинают отмечаться землетрясения 2-го типа и частота их постепенно растет; постепенно и непрерывно возрастает средняя скорость нарастания условных деформаций; энергия вулканических землетрясений уменьшается [8]. П.И. Токарев внес весомый вклад в развитие сейсмологии, в том числе он разработал методику работы с сейсмическими данными; описал характеристики различных сейсмических сигналов; выявил сейсмологические предвестники извержений вулканов Ключевской, Шивелуч, Толбачик, лавового купола Безымянного [6, 8-11 и др.]. На основании этих предвестников он успешно предсказал катастрофическое извержение вулкана Шивелуч 1964 г., Большое трещинное Толбачинское извержение 1975 г., боковой прорыв вулкана Ключевской в 1983, извержения вулкана Безымянный в октябре 1959 г., апреле 1960 г. и марте 1961 г. [6]. В дальнейшем его метод прогноза извержений вулканов по сейсмологическим данным совершенствовался В.И. Горельчик и др.

С развитием космических исследований, Интернет-ресурсов, появилась возможность найти предвестники извержений с помощью спутниковых данных. Это актуально, так как за некоторыми вулканами наблюдения проводятся только с помощью спутников. Например, действующих вулканов, на которых не установлены сейсмические станции, 19 на Камчатке (Ичинский, Высокий, Гамчен, Комарова, Кроноцкий, Крашенинникова, Кихпиныч, Тауишиц, Малый Семячик, Жупановский, Опала, Ксудач, Желтовский, Ильинский, Кошелева, Камбальный, Ходутка, Хангар, Дикий Гребень) и 6 на Северных Курилах (Алаид (станция установлена, но сейчас не работает), Эбеко, Чикурачки, пик Фусса, Татаринова, Карпинского). Кроме этого, бывают ситуации, когда даже при наличии визуального и сейсмического мониторинга, эти методы не работают. Например, под воздействием высокой циклонической активности, частой на Камчатке, вулкан полностью закрывается плотными облаками, в это же время по той или иной причине с сейсмостанции перестают поступать данные. В таком случае остается только спутниковый мониторинг, с помощью которого можно отслеживать изменения активности вулкана и предупреждать население об опасности, если таковая возникнет.

Предвестники извержений вулканов по данным спутникового мониторинга

Одной из пионерных работ, в которой рассматривается изменение температуры и размера термальной аномалии в районе вулкана в качестве предвестника скорого кульминационного эксплозивного извержения, является статья о наблюдении с помощью спутниковых данных за развитием извержения вулкана Безымянный [15]. Длительный опыт американских и российских ученых по спутниковому мониторингу активных вулканов Камчатки в рамках проекта KVERT подтвердил действенность этого предвестника не только для Безымянного, но и для всех вулканов вне зависимости от состава извергаемой ими магмы.

В основу этого предвестника положено классическое определение термина «извержение вулкана»: извержение вулкана представляет собой поступление на поверхность земли магматического вещества [1, 7]. Так как магматическое вещество высокотемпературно (900-1200°C), в месте появления его на поверхности земли на спутниковых снимках регистрируется термальная аномалия. Размер и температура аномалии косвенно указывают на количество ювенильного вещества, поступающего на поверхность земли в момент ее регистрации на спутниковом снимке. Появление термальной аномалии в районе того или иного вулкана, характер развития каждого из которых в настоящее время в основном известен вулканологам, говорит о подготовке его к эксплозивному извержению. Степень опасности такого извержения для населения и окружающей среды напрямую зависит от состава магматического вещества, извергаемого конкретным вулканом. Рассмотрим несколько примеров.

Ключевской вулкан (состав пород – базальты, андезитобазальты)

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 аномалия, обусловленная подъемом свежей лавы к вершинному кратеру [4]. *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 были отмечены пепловые шлейфы, протягивавшиеся до 40 км на северо-восток от вулкана. Свечение отмечалось 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 – время 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, 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 [5]. 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 вулканологами. 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 [4]. 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 и на его вершине образовался глубокий кратер. Новой лаве «потребовалось» два месяца на заполнение кратера вулкана, прежде чем стромболианская активность начала отмечаться визуально. Приведенные примеры демонстрируют, что в любом случае – есть ли в кратере шлаковый конус или он пуст, появление термальной аномалии в районе вулкана указывает на скорое начало его эксплозивного извержения.

Безымянный вулкан (состав пород – андезиты)

Особенность вулкана в том, что после катастрофического извержения 30 марта 1956 г. в его кратере *непрерывно* растет лавовый купол. Как известно из многих публикаций [4, 5, 8, 12 и др.], 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. Начало роста сейсмических событий в районе вулкана прямо указывает на подготовку сильного эксплозивного извержения вулкана [8, 12 и др.]. 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 размера и яркости 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 аномалии составил 10 пикселей, температура достигла ~50°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, 25 декабря в 08:10 UTC 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 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), 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) [5]. 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 объединились и дальше двигались единой массой. Вследствие сильной циклонической деятельности в районе Северной группы вулканов, позже на спутниковых снимках отмечались различные направления пеплового шлейфа. Пеплопад в п. Ключи отмечался с 16:00 до ~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 роста термальной аномалии, автором был опубликован прогноз сильного извержения Безымянного, которое произойдет 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, 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. Отдельное облако размером ~200x50 км в течение 01-04 июня дрейфовало более 700 км из района северной части Камчатского полуострова на юго-запад и юг до акватории Северных Курильских островов (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/updates/>).

Непрерывный спутниковый мониторинг вулкана Безымянный осуществляется учеными группы KVERT ИВиС ДВО РАН с 2002 г., эпизодический – с 1998 г. [2-5]. Благодаря наблюдениям за изменением температуры и размера термальной аномалии в районе лавового купола, учеными KVERT ИВиС 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 мая 2007 г., 19 августа 2008 г., 31 мая 2010 г.). Реализацией прогнозов были публикации KVERT Information Releases, содержащие АЦК «Оранжевый» или «Красный» и предупреждение о близком сильном извержении вулкана, **ДО начала извержений**.

Заключение

Развитие дистанционных методов наблюдений позволяет в настоящее время проводить непрерывный спутниковый мониторинг вулканов. Это дает возможность зафиксировать появление термальной аномалии в районе каждого вулкана, проследить рост ее размера и температуры во времени. Опыт ежедневного спутникового мониторинга вулканов Камчатки в совокупности с анализом их исторической деятельности позволяет предсказывать сильные эксплозивные извержения вулканов.

Список литературы

1. Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
2. Гирина О.А. 15 лет деятельности Камчатской группы реагирования на вулканические извержения // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 52-59.
3. 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. С. 100-109.
4. 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.
5. 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.
6. Горельчик В.И. К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 341-351.
7. Макдональд Г. Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
8. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
9. Токарев П.И. Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108-119.
10. 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.
11. Токарев П.И. Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47-61.
12. 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.
13. Dehn J., Dean K., Engle K. Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space // Geology. August 2000. V.28. N. 8. P. 755-758.
14. Minakami T. Fundamental research for predicting volcanic eruptions // Pt. 1. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 1960. V.38. Pt. 4.
15. 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 116. 2000. P. 65-85.