

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР ТЕРМАЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ
НА АКТИВНЫХ ВУЛКАНАХ КАМЧАТКИ В 2006-2007 гг.
С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ
ПО ДАННЫМ СЕНСОРА AVHRR СПУТНИКОВ NOAA 16 и 17**

Соболевская О.В., Сеников С.Л.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, sva06@emsd.ru

Введение

На территории полуострова Камчатка располагается 29 действующих вулканов. Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит мониторинг активности действующих вулканов с целью оценки вулканической опасности с февраля 2000 г. [1].

Проблема предупреждения о возможной вулканической опасности является актуальной по многим причинам. Своевременное предупреждение населения о предстоящем извержении призвано уменьшить последствия катастрофических событий. В связи с увеличением количества российских и международных авиалиний, пролегающих в зоне воздействия камчатских вулканов, проблема обеспечения безопасности полетов приобретает международное значение и решается на основе объединения усилий многих организаций и комплексирования разных методов.

Проблема прогноза извержений вулканов является сложной и до настоящего времени в целом не решена, несмотря на некоторые успешные прогнозы для отдельных вулканов.

Мониторинг вулканической активности направлен на предупреждение о вулканической опасности. Таким образом, ставится задача не определения даты и масштабов будущего извержения, а решается вопрос об активности вулкана и, следовательно, опасен ли он в настоящее время. Зафиксировать начало пробуждения вулкана и проследить его дальнейшее состояние и есть задача мониторинга вулканической активности.

В настоящее время оценка состояния вулканов делается ежедневно на основе данных трех дистанционных видов наблюдений: 1) сейсмического мониторинга в режиме, близком к реальному времени, – наиболее информативному и надежному методу, качество данных которого не зависит от погодных условий; 2) визуальных и видео наблюдений (не более 25% от всех вулканических событий можно зафиксировать в условиях Камчатки, т. к. они напрямую зависят от погодных условий [3]); 3) спутникового мониторинга термальных аномалий и пепловых выбросов на основе обработки и интерпретации данных датчика AVHRR спутников NOAA.

За исследуемый период извергались вулканы Шивелуч, Ключевской, Безымянный и Карымский. Целью работы является изучение зафиксированных термальных аномалий на этих вулканах для выявления предвестников их извержений.

Метод исследования

Прием данных со спутников NOAA 16 и 17 осуществляет Камчатский центр связи и мониторинга (КЦСМ). С сентября 2002 г. обработка данных сенсора AVHRR осуществляется ежедневно в лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН с помощью программы ReadHRPT и результаты публикуются в Интернете (<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) [1, 2].

Благодаря помощи Института космических исследований (ИКИ), предоставившего программу переформатирования Frame, и Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО), подарившей программу ENVI 4.0, в октябре 2006 г. были начаты измерения температур термальных аномалий. Для этого данные сначала переформатируются из формата L1f в формат L1b, а потом проводится измерение температуры в градусах Кельвина с помощью процедуры, встроенной в программу ENVI 4.0. Температура из градусов Кельвина переводится в градусы Цельсия. В более ранних работах [4, 5] для некоторых активных вулканов Камчатки было зафиксировано появление термальной аномалии в течение от нескольких дней до нескольких недель до начала извержения. Исключение составляет лишь присутствие постоянной термальной аномалии на лавовом потоке из Второго конуса Северного прорыва в районе вулкана Плоский Толбачик, который излился во время извержения 1975-1976 гг.

К сожалению, измерение температуры по данным сенсора AVHRR имеет следующие ограничения. Во-первых, 1 пиксель на снимке представляет собой площадь размером

приблизительно 1×1 км на поверхности земли, что соответствует разрешающей способности снимков. Во-вторых, измерение температуры ограничивается диапазоном от –66° до +66° С. Поэтому, если температура пикселя более +66° С, то измерение невозможно.

На качество измеряемых параметров также оказывают влияние такие факторы, как метеорологические условия и мнение оператора, который определяет количество пикселей в аномалиях. Значительная степень облачности делает невозможным определение количества пикселей и максимальной температуры. Разные операторы по-разному определяют количество пикселей в зависимости от их интенсивности.

При ежедневной обработке определяется положение пикселей аномалии относительно вершин вулканов, максимальная температура аномалии и средняя температура фона. Максимальная температура аномалии представляет собой наибольшую температуру из общего количества пикселей аномалии. Температура фона – это температура земной поверхности непосредственно в районе вулкана, представленная пикселями, окружающими аномалию и отличающимися от нее по цвету. Параметры аномалий замеряются на вулканах и пирокластических потоках, а температурный фон – на прилегающей к вулкану поверхности.

Расположение пикселей аномалии относительно вершин вулканов позволяет с большой долей вероятности предполагать наличие лавовых и пирокластических потоков. В дальнейшем, при отсутствии визуальных и видео данных, достаточно будет иметь данные сейсмических и спутниковых наблюдений для выделения и оценки размеров лавовых и пирокластических потоков. Для вулканов Шивелуч, Ключевской, Безымянный и Карымский температура аномалии, по возможности, сравнивалась с температурой лавового потока из Второго конуса Северного прорыва в районе вулкана Плоский Толбачик. Температура этого потока принята за точку отсчета, т. к. она сохраняется приблизительно постоянной в течение длительного периода времени после окончания извержения в 1976 г.

При ежедневной обработке дополнительно вычисляется разница температур аномалии и фона и разница температур аномалии и лавового потока из Второго конуса Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) 1975 г. Таким же образом замеряется температура пирокластических потоков. Полученные данные используются для построения совместных графиков изменения температуры и количества сейсмических событий во времени. Анализ таких графиков позволяет более достоверно оценивать активность вулкана и делать прогноз его опасности.

Результаты

Вулкан Ключевской. За рассматриваемый период с 01.01.2006 по 30.04.2007 гг. можно выделить два периода: 1) с 01.01.2006 до 15.12.2006 гг., когда термальная аномалия отсутствовала; 2) с 15.12.2006 по 30.04.2007 гг., когда термальная аномалия выделялась. Было проведено сопоставление параметров термальной аномалии с сейсмическими данными.

В период активности вулкана с 15.12.2006 по 30.04.2007 гг. термальная аномалия впервые появилась 15 декабря 2006 г. и имела значение +11° С при температуре фона 34° С. При этом наблюдалось повышенное количество поверхностных землетрясений в постройке вулкана (до 300 событий за сутки) и парогазовая деятельность в кратере. Затем наблюдался постепенный рост температуры аномалии, и когда значение достигло +16° С (15.02.2007 г.), то впервые было отмечено свечение в кратере. Дальнейший рост температуры до предела измерений можно связать с постепенным заполнением кратера горячим магматическим материалом. При этом количество пикселей оставалось неизменным. Появление первого лавового потока было зафиксировано 28.03.2007 г. (по визуальным данным), что хорошо согласуется с увеличением количества пикселей. Излияние второго лавового потока еще больше увеличило размер термальной аномалии.

По соотношению интенсивности вулканического дрожания и количества пикселей прослежены начальные стадии появления двух лавовых потоков на север-северо-восточном и западном склонах вулканов. Количество пикселей резко возрастало с увеличением амплитуды вулканического дрожания. Первый поток начал изливаться на западный склон, а второй - на север-северо-восточный. Разная интенсивность дрожания, возможно, зависит от расстояния до ближайшей опорной сейсмической станции. Ближайшая опорная сейсмическая станция С1R располагается в 13 км от кратера на северо-восточном склоне, чем и объясняется резкое увеличение амплитуды дрожания при излиянии второго потока.

Сопоставление спутниковых и визуальных данных дало возможность оценить значения максимальных температур термальных аномалий, соответствующих определенным событиям,

происходящим на вулкане, рис. 1. В дальнейшем, выявленные закономерности можно использовать в качестве прогностических признаков активизации вулкана и его подготовки к извержению. Так появление температурной аномалии в кратере может свидетельствовать о начале активизации вулкана. При достижении температуры аномалии значения около 15°C в кратере вулкана появляется раскаленный материал. При возрастании температуры до 60°C и более возможно появление лавового озера и фонтанирование лавы в пределах кратера. При появлении пикселей аномалии с температурой выше предела измерения, в совокупности с увеличением размера аномалии, можно предполагать появление лавового потока на склоне вулкана.

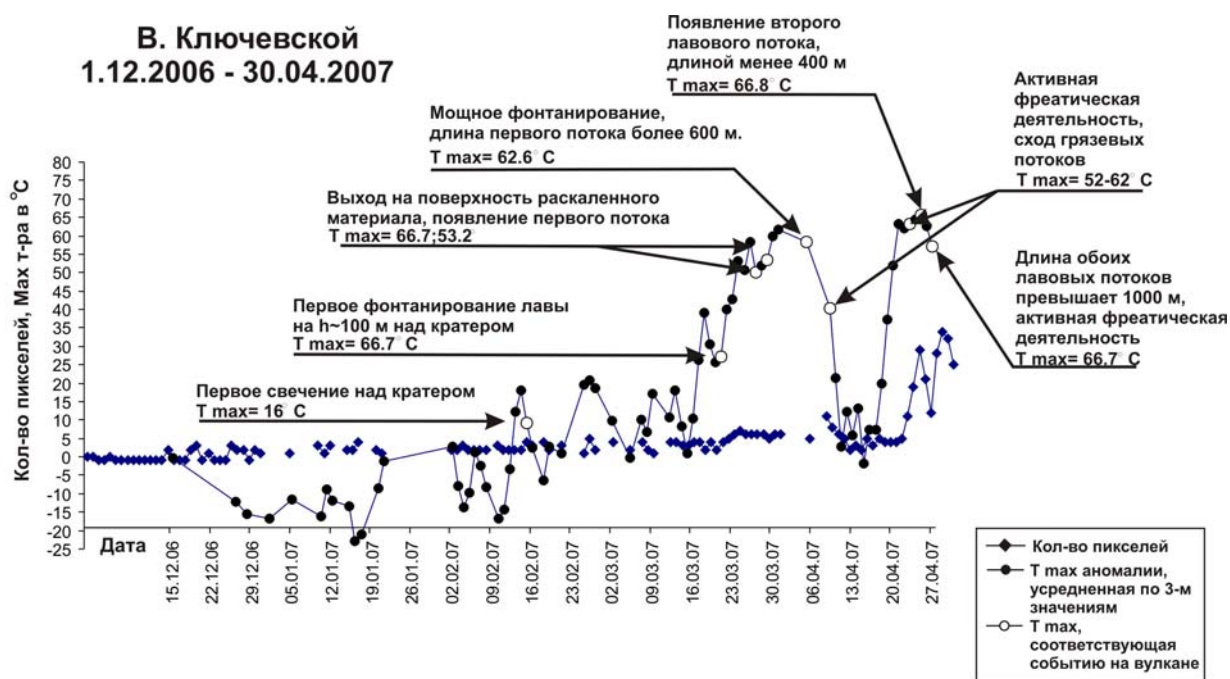


Рис. 1. График изменения параметров термальной аномалии. На графике отмечены вулканические события, происходившие в это время на вулкане.

Вулкан Шивелуч. Термальная аномалия на вулкане Шивелуч наблюдалась в течение всего периода с 01.01.2006 по 30.04.2007 гг. Вулкан находился в спокойном состоянии с 01.01.2006 до 04.12.2006 г. 04.12.2006 г. началось извержение, которое продолжается до настоящего времени.

Так же как и для вулкана Ключевской, проведено сопоставление параметров термальной аномалии с сейсмическими событиями. Анализ соотношения количества пикселей и максимальной температуры аномалии для спокойного временного интервала выявил плавное повышение и снижение температуры аномалии, не связанное с повышением активности вулкана. Это явление связано с сезонными колебаниями температуры. В подтверждение этому предположению проведен анализ параметров термальной аномалии лавового потока из Второго конуса Северного прорыва в районе вулкана Плоский Толбачик. Так как это извержение закончилось в 1976 г., то можно предположить, что температура этой аномалии определяется температурой горячего тела лавового потока и колебаниями температуры окружающей среды. Но разница температуры аномалии и температуры фона оставалась постоянной независимо от времени года и составляла примерно 5°C .

На фоне сезонного изменения температуры аномалии можно выделить ее повышение в конце октября и в ноябре с последующим спадом. К сожалению, у нас отсутствуют данные по количеству пикселей и температуре аномалии за несколько дней до начала извержения 4 декабря 2006 г., поэтому в данном случае нельзя однозначно утверждать о постепенном повышении температуры в течение месяца перед извержением. Но для будущих исследований этот факт очень важен.

В период извержения температура аномалии повышалась в зависимости от интенсивности извержения. При температуре свыше $40-50^{\circ}\text{C}$ регистрировались пепловые выбросы на высоту выше 4500 м над уровнем моря. После мощных пепловых выбросов с пирокластическими потоками, как правило, наблюдался рост количества пикселей в аномалии. По мере остывания

потоков количество пикселей и температура аномалии уменьшались, и температурная аномалия вновь сосредотачивалась в районе растущего купола.

Вулкан Безымянный. На снимках со спутников NOAA16 и NOAA17, предоставляемых КЦСМ, наличие на вулкане постоянной термальной аномалии с сентября 2002 г. (начало изучения спутниковых данных) свидетельствовало о том, что горячий материал находится близко к поверхности и вулкан может начать извергаться без сильной сейсмической подготовки. На основании предыдущего опыта (в течение 2000-2004 гг. было зарегистрировано 7 извержений) для вулкана Безымянный был определен и протестирован алгоритм прогноза (автор С.Л. Сенюков) его извержений [7]. С помощью этого алгоритма были успешно спрогнозированы 6 извержений в 2004-2007 гг. без пропусков и ложных тревог. Алгоритм построен на использовании, главным образом, сейсмических данных. В этом алгоритме в качестве одного из предвестников извержений вулкана Безымянный используется такой параметр как повышение разницы температуры аномалии и температуры лавового потока из Второго конуса Северного прорыва БТТИ 1975 г. В спокойные периоды между извержениями температура аномалии на вулкане Безымянный обычно не превышает температуру указанного выше лавового потока.

За последние полтора года на вулкане Безымянный произошло три извержения. Два из них 09.05.2006 г. и 24.12.2006 г. были спрогнозированы при использовании комплекса сейсмических, спутниковых, видео и визуальных данных [6]. Извержение 11.05.2007 г. было спрогнозировано, опираясь только на данные спутниковых снимков, т. к. корректный сейсмический мониторинг был невозможен из-за сильного вулканического дрожания вулкана Ключевской, а видео и визуальным наблюдениям препятствовали неблагоприятные погодные условия. За 4 дня до эксплозивного извержения умеренной силы 09.05.2006 г. на вулкане количество пикселей начало увеличиваться с каждым днем. За сутки до извержения фиксировалось резкое увеличение температуры аномалии. За несколько часов до извержения количество пикселей достигло своего максимального значения в 20 пикселей, температура достигла 62.5° С. Все поступающие данные о количестве пикселей и температуре сопоставлялись с сейсмическими и видео данными. Совместный анализ таких параметров, как температура аномалии, количество пикселей и количество поверхностных сейсмических событий позволил сделать успешный краткосрочный прогноз извержения вулкана Безымянный.

За сутки до эксплозивного извержения 24.12.2006 г. также произошел резкий скачок температуры термальной аномалии в совокупности с увеличением числа поверхностных сейсмических событий. После извержения наблюдался быстрый спад температуры при большом количестве пикселей, т. к. для вулкана Безымянный в постэруптивный период характерен сход раскаленных обломочных лавин и пирокластических потоков.

Извержение 11.05.2007 г. было также спрогнозировано за сутки до события по резкому увеличению температуры аномалии и количеству пикселей на спутниковом снимке за текущие сутки. По алгоритму прогноза извержение ожидалось в ближайшие дни. Прогноз оправдался и 11 мая 2007 г. произошло извержение, которое на спутниковом снимке обозначилось в виде мощного пеплового шлейфа и в появлении нового, горячего пирокластического потока на юго-восточном склоне вулкана.

Проведенные исследования на вулкане Безымянный позволяют сделать следующие выводы.

1. Вулкан находится в спокойном состоянии, если температура аномалии не превышает температуру аномалии на лавовом потоке БТТИ - 1975 г.
2. Накануне извержения происходит резкое увеличение температуры аномалии и количества поверхностных событий, которые интерпретируются как сход обломочных лавин.
3. Количество пикселей в аномалии увеличивается в периоды роста купола вулкана и достигает своего максимума при образовании пирокластического потока.

Вулкан Карымский. За рассматриваемый период с 01.01.2006 по 15.04.2007 гг. вулкан продолжал находиться в стадии извержения до 20.01.2007 г. Затем его активность понизилась и регистрировались только слабые локальные события без значительных пепловых выбросов, за исключением одиночного пеплового выброса 04.04.2007 г., достигшего высоты 4100 м над уровнем моря.

Термальная аномалия фиксировалась только в периоды извержений, сопровождавшихся пепловыми выбросами и сходом потоков раскаленного материала. Изучение параметров термальной аномалии показывает, что ее максимумам соответствуют пепловые выбросы высотой выше 3000 м над уровнем моря с одновременным выбросом горячего материала на склоны

вулкана. Температура аномалии при таких событиях превышает значение 30-35° С, а количество пикселей достигает 16. Поэтому в будущем, опираясь на полученные данные, можно с большой долей вероятности предполагать, что происходит на вулкане только по спутниковым наблюдениям, даже в отсутствии сейсмических и визуальных данных, рис. 2.

Следует отметить, что в районе вулкана прослеживаются сезонные колебания температуры аномалии.

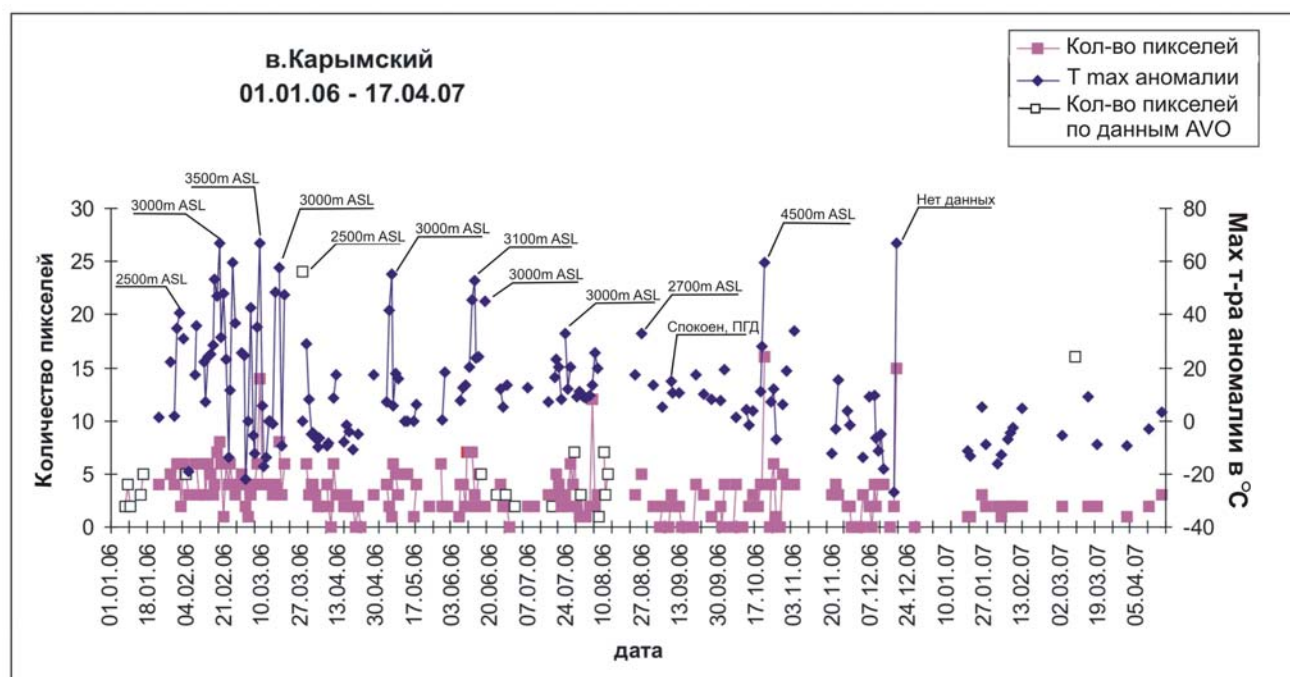


Рис. 2. График изменения параметров термальной аномалии. На графике отмечены вулканические события, происходившие в это время на вулкане.

Выводы

В результате исследований было установлено, что перед извержениями вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный наблюдается появление и рост температуры (или только рост) термальной аномалии в период времени от одной до нескольких недель перед извержением. На вулкане Карымский термальная аномалия наблюдается только в периоды извержений.

Результаты изучения температур термальных аномалий позволяют в режиме реального времени оценивать состояние вулканов. Сделан успешный краткосрочный прогноз времени извержения вулкана Безымянный 11.05.2007 г. по спутниковым данным.

Очевидна необходимость продолжения таких работ.

Список литературы

1. Сенюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 279-291.
2. Сенюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Толокнова С.Л. Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 321 – 336.
3. Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Дрознин Д.В. Опыт выделения пепловых выбросов и оценка их высоты по сейсмическим данным на примере вулкана Шивелуч (Камчатка) // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 292-300.
4. Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Дрознин Д.В., Кожевникова Т.Ю. Исследования активности вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000-03 гг. дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 301-318.
5. Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю. Исследования вулканов Камчатки дистанционными методами в 2005 г. // Материалы конференции, посвященной 50-летию извержения вулкана Безымянный. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 69-79.
6. Сенюков С.Л. Результаты применения алгоритма прогноза извержений вулкана Безымянный в 2004-2007 гг. в режиме реального времени. // (см. настоящий сборник).
7. Senyukov S. L. Algorithm of the eruption prediction of Bezymianny volcano (Kamchatka) // Programme and Abstracts of 5th Biennial Workshop on Subduction emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5). Sapporo, July 2006. P. 57.