

УДК 550.34+551.21

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

© 2008 О.В. Соболевская, С.Л. Сениюков

*Камчатский филиал Геофизической службы Российской Академии наук,
683006 Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа 9;
e-mail: sva06@emsd.ru, ssl@emsd.ru*

Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит мониторинг активности действующих вулканов с целью оценки вулканической опасности. Одним из методов наблюдений является спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов на основе обработки и интерпретации данных датчика AVHRR спутников NOAA 16 и 17. Основным параметром для прогноза извержений вулкана Безымянный (Россия, Камчатка) остается сейсмический мониторинг, как наиболее информативный и надежный метод. По техническим причинам или по причине высокой сейсмической активности вулкана Ключевской, сейсмический мониторинг вулкана Безымянный иногда бывает невозможен или некорректен. В таких случаях, спутниковый мониторинг термальной аномалии позволит сделать краткосрочный прогноз извержений вулкана Безымянный. Для этой цели был проведен ретроспективный анализ температур термальной аномалии и окружающей среды по данным архива, созданного сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) КФ ГС РАН. Всего с 2002 по 2007 гг. на вулкане Безымянный произошло 10 эксплозивных извержений. На основе анализа температурных данных, были выделены следующие прогностические значения температур аномалии: «нормальная» — это диапазон температур, при котором вулкан находится в состоянии между эксплозивными извержениями, и не наблюдается подготовки крупных событий; «повышенная» — это диапазон температур, при котором вулкан готовится к какому-либо событию, будь то крупный обвал, пепловый выброс или эксплозивное извержение; «критическая» — температура, по достижении которой, извержение произойдет в ближайшие 1-4 дня. В результате исследований были выявлены критерии, по которым определяется текущее состояние вулкана при наличии только спутниковых данных. Были выделены значения «нормальной», «повышенной» и «критической» температур с учетом сезона года.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковый мониторинг термальных аномалий получил широкое распространение в конце прошлого века и зарубежными учеными впервые был зафиксирован рост температуры аномалии перед извержениями на некоторых вулканах (Harris et al, 1997; Lardy, Tabbagh, 1999).

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. (Сениюков, 2004а).

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 приобрела международное значение и решается на основе объединения усилий многих организаций и комплекса 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 на данный момент.

В настоящее время оценка состояния вулканов делается ежедневно на основе данных трех дистанционных видов наблюдений: 1) сейсмический мониторинг в режиме, близком к реальному времени, – наиболее информативный и надежный метод, качество данных не зависит от погодных условий; 2) визуальные и видео наблюдения – по оценкам не более 25 % от всех вулканических событий можно зафиксировать в условиях Камчатки, так как они напрямую зависят от погодных условий (Сенюков и др., 2004б); 3) спутниковый мониторинг термальных аномалий и пепловых выбросов на основе обработки и интерпретации данных датчика AVHRR спутников NOAA.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Прием данных со спутников NOAA 16 и 17 осуществляет Камчатский центр связи и мониторинга. Начиная с сентября 2002 г., обработка данных сенсора AVHRR осуществляется ежедневно в лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА) КФ ГС РАН с помощью программы HRPT Reader, и результаты публикуются в Интернете (<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) (Сенюков, 2004а; Сенюков и др., 2006б). Благодаря помощи Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), предоставившему программу переформатирования XV_HRPT и Аляскинской вулканологической обсерватории (АВО), предоставившей средства на приобретение программы ENVI 4.0, в рамках проекта KVERT для совместного использования сотрудниками КФ ГС РАН и Института Вулканологии и Сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, в октябре 2006 г. были начаты измерения температур термальных аномалий.

Для этого данные сначала переформатируются из формата L1f в формат L1b, при помощи модуля Frame программы XV_HRPT, а потом проводится измерение температуры в градусах Кельвина с помощью встроенной в программу ENVI 4.0 процедуры. Температура из градусов Кельвина переводится в градусы Цельсия. В более ранних работах (Сенюков и др., 2004б; Сенюков и др., 2006а; Dehn et al., 2000; Schneider et al., 2000) для некоторых активных вулканов Камчатки и мира было зафиксировано появление термальной

аномалии в период от нескольких дней до нескольких недель до начала извержения. Для Камчатки, исключение составляет лишь присутствие постоянной термальной аномалии на лавовом потоке Второго конуса Северного прорыва в районе вулкана Плоский Толбачик, который излился в период извержения 1975-1976 гг. (БТТИ - 1975 г.).

К сожалению, измерение температуры по данным сенсора AVHRR имеет следующие недостатки:

- во-первых, 1 пиксель на снимке представляет собой значительную площадь на поверхности Земли (в надире), размером приблизительно 141 км;

- во-вторых, диапазон измерения температур ограничен от -66 до +66 градусов Цельсия; поэтому, если температура пикселя выше этого предела, то измерение невозможно, это так называемые «перегретые» пиксели.

На качество измеряемых параметров оказывают также 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.

Вулкан Безымянный (Россия, п-ов Камчатка) – координаты вершины: 55°04' с.ш., 160°43' в.д. Абсолютная высота вулкана 2869 м. В постройке вулкана и в экструзивных образованиях резко преобладают андезиты и меньшую долю составляют андезито-базальты и дациты. Последнее катастрофическое извержение вулкана произошло 30 марта 1956 г. В настоящее время для вулкана свойственны довольно частые эксплозивные извержения умеренной силы, 1-2 раза в год, сопровождающиеся образованием пирокластических потоков, а так же более редкие извержения с излиянием вязких лав (Богоявленская и др., 1991).

При ежедневной обработке определяется расположение пикселей аномалии относительно вершины вулкана, максимальная температура аномалии (Т_{Бзм}) и средняя температура фона (Т_{Бзм фон (ср.)}). Максимальная температура аномалии представляет собой максимальную температуру из общего количества (температур) пикселей аномалии. Температура фона – это температура земной поверхности непосредственно в районе вулкана, представленная пикселями, окружающими аномалию и отличающимися от нее по цвету. Параметры аномалии измеряются на вулкане 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

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

отсутствии визуальных и видео данных, точно будет иметь данные сейсмических и спутниковых наблюдений для выделения и приблизительной оценки площади лавовых и пирокластических потоков. Для вулкана Безымянный температура аномалии сравнивалась с максимальной температурой лавового потока Второго конуса Северного прорыва в районе вулкана Плоский Толбачик. Температура этого потока (Т Тлб) принята за точку отсчета, так как она сохраняется приблизительно постоянной в течение длительного периода времени, так как извержение закончилось в сентябре 1975 г.

При ежедневной обработке также вычисляется разница температур аномалии и фона и разница температур аномалии и лавового потока из Второго конуса Северного прорыва БТТИ -1975 г. (Т Бзм – Т Тлб). Так же замеряются температуры пирокластических потоков. Все эти данные используются для построения совместных графиков изменения различных температур и количества сейсмических событий во времени. Анализ таких графиков позволяет более достоверно оценивать ситуацию на вулкане и делать прогноз активности.

Основным параметром для прогноза извержений вулкана Безымянный остается сейсмический мониторинг, как наиболее информативный и надежный метод (Сенюков и др., 2004в; Senyukov,

2006). По техническим причинам или по причине высокой сейсмической активности вулкана Ключевской, сейсмический мониторинг вулкана Безымянный иногда бывает невозможен или некорректен. В таких случаях, спутниковый мониторинг термальной аномалии позволит сделать краткосрочный прогноз извержений вулкана Безымянный. Для этой цели был проведен ретроспективный анализ температур термальной аномалии и окружающей среды по данным архива, созданного сотрудниками лаборатории ИСВА КФ ГС РАН. Всего с 2002 по 2007 гг. на вулкане Безымянный произошло 10 эксплозивных извержений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так как извержения вулкана Безымянный происходят в разное время года, то при измерении температуры фона вулкана и температуры аномалии на лавовом потоке Северного прорыва вулкана Толбачик, необходимо учитывать сезонные изменения температур в районе измерения.

По данным измерений температур для исследуемого района в период 2002-2007 гг. были выделены следующие температурные данные по сезонам (табл. 1).

При накоплении данных о повышении температуры аномалии перед извержением вулкана,

Таблица 1. Температурные данные по сезонам за период 2002-2007 гг.

Лето	месяц/год	Т Тлб(ср), °С	Т Бзм фон (ср), °С	(Т Бзм-Т Тлб) ср, °С	Т Бзм (ср), °С
	Июнь 2004	6	-6	-3	3
	Июнь 2007	5	-7	-3	3
	Июль 2003	17	4	-4	8
	Июль 2007	14	1	-5	6

Весна	месяц/год	Т Тлб(ср), °С	Т Бзм фон (ср), °С	(Т Бзм-Т Тлб) ср, °С	Т Бзм (ср), °С
	Март 2007	-6	-19	-6	-12
	Апрель 2006	-7	-21	<i>1</i>	<i>-6</i>
	Апрель 2007	-5	-20	<i>-6</i>	<i>-11</i>
	Май 2006	0	-13	4	4
	Май 2007	4	-8	<i>-8</i>	5

Осень	месяц/год	Т Тлб(ср), °С	Т Бзм фон (ср), °С	(Т Бзм-Т Тлб) ср, °С	Т Бзм (ср), °С
	Сентябрь 2007	3	-9	-4	3
	Октябрь 2007	2	-15	-3	0
	Ноябрь 2005	-8	-20	2	-6
	Ноябрь 2007	-10	-20	1	-8

Зима	месяц/год	Т Тлб(ср), °С	Т Бзм фон (ср), °С	(Т Бзм-Т Тлб) ср, °С	Т Бзм (ср), °С
	Декабрь 2002	-14	-27	0.5	-14
	Декабрь 2006	-14	-26	0.1	-14
	Декабрь 2007	-16	-23	0.1	-16
	Январь 2004	-16	-26	-6	<i>-17</i>
	Январь 2005	-13	-24	-2	-15
	Январь 2007	-15	-25	0.2	-11

Примечание: *курсивом* выделены данные, которые были получены до и после «температурного скачка».

возникла необходимость определить температурные параметры, на основании которых можно будет делать выводы о состоянии вулкана в данный момент при отсутствии сейсмических данных. Готовится ли вулкан к извержению или другому крупному событию (крупный обвал или пепловый выброс).

На основе анализа температурных данных, были выделены следующие прогностические параметры температур аномалии:

- «нормальная» – это диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., при котором вулкан находится в состоянии между эксплозивными извержениями, и не наблюдается подготовки крупных событий;

- «повышенная» – это диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., при котором вулкан готовится к какому-либо событию, будь то крупный обвал, пепловый выброс или эксплозивное извержение;

- «критическая» – температура параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., по достижении которой, извержение произойдет в ближайшие 1-4 дня;

- резкий температурный скачок параметра Т Бзм за 1-2 дня до извержения;

- состояние параметра (Т Бзм – Т Тлб) ср.

Эти параметры изменения температур были протестированы на каждом извержении вулкана

по сезонам года, а так же на мощном обвале в сентябре 2007 г., по сейсмическим и спутниковым данным.

Анализ температурных данных позволил сделать следующий вывод - для *Зимних* извержений вулкана Безымянный, произошедших 25 декабря 2002 г., 13 января 2004 г., 11 января 2005 г. и 24 декабря 2006 г., диапазоны температур перед извержениями имеют следующий вид:

1) «нормальный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., $=+10 \div 12^{\circ}\text{C}$;

2) «повышенный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет $+12 \div 14^{\circ}\text{C}$;

3) «критическая» температура параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет $+17 \div 19^{\circ}\text{C}$;

4) в течение 2-3 дней до извержения происходит резкий температурный скачок параметра Т Бзм ~ на $10-30^{\circ}\text{C}$;

5) изменение параметра (Т Бзм – Т Тлб) ср. определить не удалось по причине недостаточного количества данных из-за неблагоприятных метеорологических условий или же по техническим причинам.

В качестве примера для зимних извержений приведены таблицы и графики, которые были построены для извержения в декабре 2002 г. (рис.1, 2).

25 декабря 2002 г.

Т-ра Бзм фон(ср. за месяц)~ -27°C ; Т-ра Тлб (ср. за месяц) ~ -14°C

Дата	Т Бзм, $^{\circ}\text{C}$	Т Бзм фон (ср), $^{\circ}\text{C}$	Т Тлб, $^{\circ}\text{C}$	Т Бзм-Т Тлб, $^{\circ}\text{C}$	Кол-во пикс	Поверхн. события	ПГД,ПГВ
18.12.2002	-15.1	-30	-12.1	-3	2		150 м
19.12.2002	-21	-29	-16	-5	2		800 м
20.12.2002				0			1 закрыт
21.12.2002	-15	-27	-16	1	3		1 закрыт
22.12.2002	-10.5	-28	-15.7	5.2	5		50 м
23.12.2002	-8.3	-26	-12.2	3.9	4		2 50 м
24.12.2002	18.9	-25	-12.2	31.1	6		6 50 м
25.12.2002	66.1	-25	-14.5	80.6	17	79	закрыт
26.12.2002	33.6	-23			5		закрыт

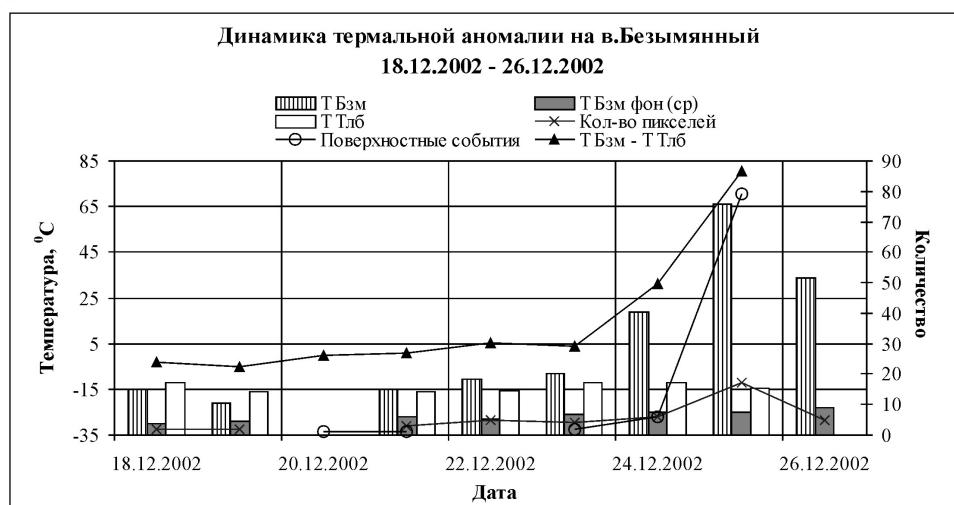


Рис. 1. Исходные данные по термальной аномалии в. Безымянный перед извержением 25.12.2002.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

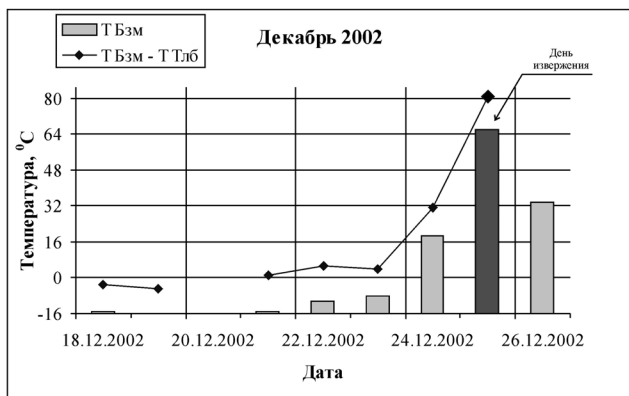


Рис. 2. Корреляция термальных аномалий на в. Безымянный и на лавовом потоке Северного прорыва БТТИ-1975.

метра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет $+10 \div 12^{\circ}\text{C}$;

3) «критическая» температура параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет $+13 \div 15^{\circ}\text{C}$;

4) в течение 1-3 дней до извержения происходит резкий температурный скачок параметра Т Бзм ~ на $20-30^{\circ}\text{C}$;

5) значение разницы температур Т Бзм – Т Тлб (за неделю до извержения), варьирует от -9 до -1°C . Если мы имеем Т Бзм – Т Тлб приближающуюся к -3°C и выше, то, возможно, что готовится крупное событие.

Для летних извержений вулкана Безымянный, произошедших 26 июля 2003 г. и 18 июня 2004 г. диапазоны температур перед извержениями имеют следующий вид:

- 1) «нормальный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., $= +5 \div 8^{\circ}\text{C}$;
- 2) «повышенный» диапазон температур пара-

В качестве примера анализируемых данных, приведены таблицы и графики, которые были построены для анализа извержения в июле 2003 г. (рис. 3, 4). Для весенних извержений вулкана Безымянный, произошедших 9 мая 2006 г. и 12 мая

26 июля 2003 г.
Т-ра Бзм фон(ср.за месяц)~ $+5^{\circ}\text{C}$; Т-ра Тлб (ср.за месяц) ~ $+17^{\circ}\text{C}$

Дата	Т Бзм, $^{\circ}\text{C}$	Т Бзм фон (ср), $^{\circ}\text{C}$	Т Тлб, $^{\circ}\text{C}$	Т Бзм- Т Тлб, $^{\circ}\text{C}$	Кол-во пикс	Поверхн. события
11.07.2003	5.6	2	15	-9.4	2	1
13.07.2003						1
15.07.2003	8.4	2	16	-7.6	2	2
16.07.2003	9.4	5	10	-0.6	3	
17.07.2003						1
18.07.2003						2
19.07.2003						
20.07.2003	12.3	1	15	-2.7	3	
21.07.2003	13.2	2	15	-1.8	3	
22.07.2003	15.3	9		15.3	3	
23.07.2003						1
24.07.2003	66.4	5	18	48.4	6	
25.07.2003	66.4	6	16	50.4	7	5
26.07.2003	66.6	7	20	46.6	15	44
27.07.2003	34.5	7	20	14.5	6	
28.07.2003	38.1	6	21	17.1	6	
29.07.2003	35.2	6	22	13.2	5	
30.07.2003	35.1	5	16	19.1	3	
31.07.2003	27	5	16	11	3	



Рис. 3. Исходные данные по термальной аномалии в. Безымянный перед извержением 26.07.2003.

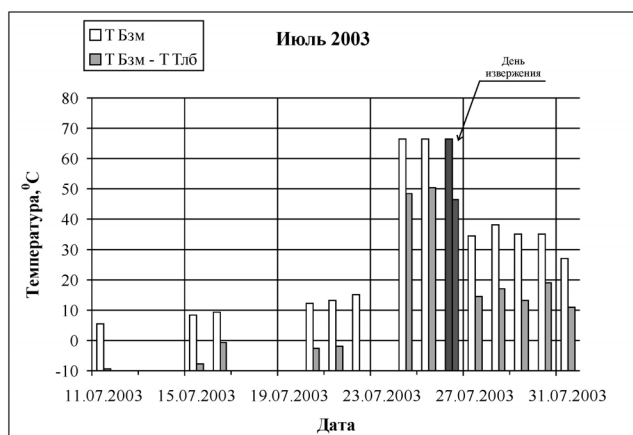


Рис. 4. Корреляция термальных аномалий на в. Безымянный и на лавовом потоке Северного прорыва БТТИ-1975.

3) «критическая» температура параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет порядка $+20^{\circ}\text{C}$;

4) в течение 1-3 дней до извержения происходит резкий температурный скачок параметра Т Бзм ~ на $20-30^{\circ}\text{C}$;

5) значение разницы температур Т Бзм – Т Тлб (за неделю до извержения), варьирует от $+4$ до $+7^{\circ}\text{C}$. Если мы имеем Т Бзм – Т Тлб приближающуюся к $+5^{\circ}\text{C}$ и выше, то возможно, что готовится крупное событие.

В качестве примера анализируемых данных, приведены таблицы и графики, которые были построены для анализа извержения в мае 2006 г. (рис. 5, 6).

Для *осенних* извержений вулкана Безымянный, произошедших 30 ноября 2005 г. и 14-15 октября 2007 г. диапазоны температур перед извержениями имеют следующий вид:

2007 г. диапазоны температур перед извержениями имеют следующий вид:

1) «нормальный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., $=+10 \div 17^{\circ}\text{C}$;

2) «повышенный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет $+15 \div 20^{\circ}\text{C}$;

9 мая 2006 г.

Т-ра Бзм фон(ср.за месяц)~ -13°C ; Т-ра Тлб (ср.за месяц) ~ -0.5°C

Дата	Т Бзм, $^{\circ}\text{C}$	Т Бзм фон (ср.), $^{\circ}\text{C}$	Т Бзм-Т Бзм фон(ср.), $^{\circ}\text{C}$	Т Тлб, $^{\circ}\text{C}$	ТБзм-Т Тлб, $^{\circ}\text{C}$	Кол-во пикс.	Поверхн. события	ПГД,ПГВ
24.04.2006							7	спокоен
25.04.2006							5	спокоен
26.04.2006	1.1	-11	12.1	-3.2	4.3	4	6	спокоен
27.04.2006							4	спокоен
28.04.2006	5.6	-13	18.6			4	2	закрыт
29.04.2006							7	спокоен
30.04.2006							6	спокоен
01.05.2006							11	спокоен
02.05.2006	-0.3	-15	14.7				21	закрыт
03.05.2006	-8	-18	10			4	18	закрыт
04.05.2006	4.3	-14	18.3	-2.4	6.7	3	23	100 м
05.05.2006	7.2	-14	21.2	2.2	5	5	34	700 м
06.05.2006	3.4	-13	16.4	2	1.4	6	58	800 м (выброс)
07.05.2006	7.8	-13	20.8			4	50	300 м
08.05.2006	33.8	-13	46.8	-0.4	34.2	4	95	1200 м (выброс)
09.05.2006	62.6	-9	71.6	-4	66.6	20	41	15000 м
10.05.2006							1	закрыт
11.05.2006							0	закрыт
12.05.2006							0	закрыт
13.05.2006							1	закрыт
14.05.2006							0	закрыт
15.05.2006							1	закрыт
16.05.2006	5.3	-9	14.3	3	2.3	2	0	закрыт
17.05.2006	-2.2	-15	12.8	-0.2	-2	2	0	закрыт



Рис. 5. Исходные данные по термальной аномалии в. Безымянный перед извержением 09.05.2006.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

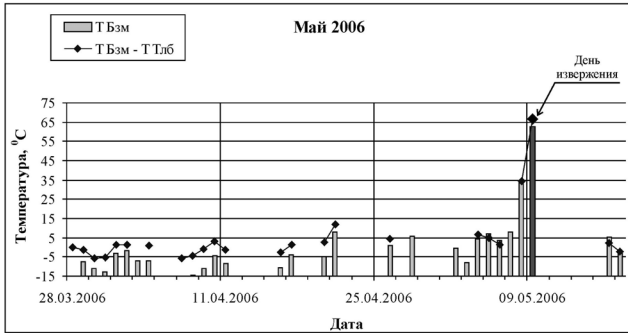


Рис. 6. Корреляция термальных аномалий на в. Безымянный и на лавовом потоке Северного прорыва БТТИ-1975.

- 1) «нормальный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., = +9÷11⁰С;
- 2) «повышенный» диапазон температур параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет +13÷15⁰С;
- 3) «критическая» температура параметра (Т Бзм – Т Бзм фон (ср.)) ср., составляет порядка +19⁰С;
- 4) в течение 1-2 дней до извержения происходит резкий температурный скачок параметра Т Бзм ~ на 20-30⁰С;
- 5) значение разницы температур Т Бзм – Т Тлб (за неделю до извержения), варьирует от +1 до +7 ⁰С. Если мы имеем Т Бзм – Т Тлб

30 ноября 2005 г.

Т-ра Бзм фон(ср.за месяц)~ -20 °С; Т-ра Тлб (ср.за месяц) ~ -4 °С

Дата	Т Бзм, °С	Т Бзм фон (ср.), °С	Т Тлб, °С	Т Бзм - Т Тлб, °С	Кол-во пикс.	Поверхн. события	ПГД,ПГВ
08.11.2005	-15.7	-25			2		закрыто
09.11.2005							закрыто
10.11.2005							закрыто
11.11.2005						4	закрыто
12.11.2005	-5	-14			1		закрыто
13.11.2005	-14	-21			2		СФД
14.11.2005	1.2	-14			2		закрыто
15.11.2005	0.1	-15	-5	5.1	2		СФД
16.11.2005	1.5	-14	-6	7.5	4	1	СФД
17.11.2005	-4.4	-20	-5	0.6	4	4	закрыто
18.11.2005	-9.9	-21	-9	-0.9	3	11	закрыто
19.11.2005	-9	-22	-10.3	1.3	3	2	закрыто
20.11.2005	0.1	-18			3		закрыто
21.11.2005	-0.7	-21	-7	6.3	2	3	50 м
22.11.2005	-5.6	-20			3	5	500 м
23.11.2005						7	СФД
24.11.2005						2	закрыто
25.11.2005					5	5	СФД
26.11.2005	-3.8	-18	-6	2.2	5	8	закрыто
27.11.2005						10	закрыто
28.11.2005	-13.5	-23				15	700 м
29.11.2005	25.3	-21	-10	35.3	6	39	100 м
30.11.2005	66.8	-19			5	21	6000 м
01.12.2005						1	закрыто
02.12.2005							закрыто
03.12.2005							закрыто
04.12.2005						1	закрыто
05.12.2005							закрыто
06.12.2005	-15.5	-22	-11	-4.5	3		400 м
07.12.2005	-10.7	-23			4		закрыто



Рис. 7. Исходные данные по термальной аномалии в. Безымянный перед извержением 30.11.2005.

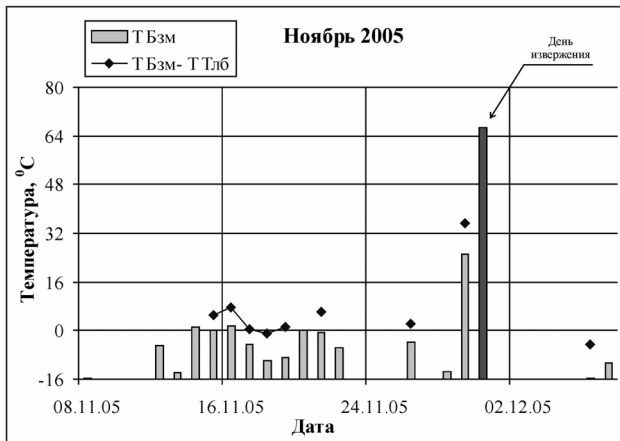


Рис. 8. Корреляция термальных аномалий на в. Безымянный и на лавовом потоке Северного прорыва БТТИ-1975.

приближающуюся к $+7^{\circ}\text{C}$ и выше, то возможно, что готовится крупное событие.

В качестве примера анализируемых данных, приведены таблицы и графики, которые были построены для анализа извержения в ноябре 2005 г. (рис. 7, 8).

Помимо эксплозивных извержений, на вулкане Безымянный происходят и крупные обвалы, которые продолжаются в течение нескольких минут и образуются практически без подготовки. Такое событие на вулкане произошло, по сейсмическим и спутниковым данным, 25 сентября 2007 г., при следующих условиях: $T_{\text{Бзм фон (ср. за месяц)}} \sim -9^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{Тлб (ср. за месяц)}} \sim +3^{\circ}\text{C}$ (рис. 9). Это событие имело следующие температурные параметры:

1) разность температур ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., за 15 дней перед обвалом $= \sim +5^{\circ}$. Т.е. меньше $+9-11^{\circ}\text{C}$ (среднего значения для осени);

2) за 2 дня до извержения произошел резкий температурный скачок \sim на 15° , который меньше обычного, для этого сезона, равного $20-30^{\circ}$; но этот скачок температур был зафиксирован по данным АВО (при облачности), по данным снимков с КЦСМ была плотная облачность, аномалии не наблюдались;

3) зафиксировано резкое снижение температуры аномалии в течение нескольких часов, а не дней, как это было обычно после 10 исследуемых извержений.

По сейсмическим данным для этого события не было зафиксировано резкого увеличения количества поверхностных сейсмических событий в постройке вулкана.

Таким образом, в будущем, при регистрации подобных параметров, можно ожидать, что в постройке происходит процесс выжимания материала, вследствие чего образуются слабые обломочные лавины, предвещающие обвал, но эксплозивного извержения умеренной силы не ожидается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Было установлено, что во все сезоны, примерно за неделю до извержения начинает происходить неравномерное увеличение значения параметра $T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Тлб}}$. Поэтому, временное снижение значения $T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Тлб}}$, на общем фоне увеличения температуры аномалии и увеличения количества поверхностных сейсмических событий, не должно восприниматься как снижение активности вулкана, а это - лишь «затишье» перед основным событием.

В процессе обработки спутниковых данных об извержениях вулкана за последние 6 лет, выявились основные параметры изменения температуры перед извержениями. Эти параметры одинаково применимы к извержениям в любой сезон года. Параметрами прогноза являются:

1) «нормальная» разность температур ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., для каждого сезона она своя;

2) «повышенная» разность температур ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., для каждого сезона своя;

3) «критическая» разность температур ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., для каждого сезона своя;

4) наличие «температурного скачка» параметра $T_{\text{Бзм}}$ за 1-3 дня до извержения, независимо от сезона;

5) наличие «температурного скачка» параметра $T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Тлб}}$ за 1-3 дня до извержения, независимо от сезона;

6) выявляются температурные вариации параметра $T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Тлб}}$ относительно средних температур фона в районе вулкана и лавового потока Второго конуса Северного прорыва БТТИ.

Все данные по температурам аномалий обязательно сопоставляются с сейсмическими данными, когда таковые имеются.

К достоинству метода можно отнести контроль температуры на вулкане Безымянный по отношению к температуре окружающего фона и по отношению к температуре аномалии на лавовом потоке Северного прорыва для более достоверного краткосрочного прогноза извержений вулкана.

К недостаткам метода относится прямая зависимость от метеорологических условий и отсутствие данных по техническим причинам.

ВЫВОДЫ

Перед всеми 10 извержениями вулкана Безымянный, на нем был зафиксирован рост температуры термальной аномалии.

Установлено, что «нормальный» диапазон температур параметра ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., для нормального состояния вулкана в зимний период составляет $+10 \div 12^{\circ}\text{C}$, в весенний сезон $\sim +10 \div 17^{\circ}\text{C}$, в летний период этот диапазон

25 сентября 2007 г.

Т-ра Бзм фон(ср.за месяц)~ -9 °С; Т-ра Тлб (ср.за месяц) ~ +3 °С

Дата	Т Бзм, °С	Т Бзм фон (ср.), °С	Т Бзм - Т Тлб, °С	Т Бзм - Т Бзм фон (ср.), °С	Кол-во пикселей	Примечания
10.9.07	-5.4	-11		5.6	2	слабые
11.9.07						нет данных
12.9.07	1.5	-8		9.5	2	
13.9.07	5.6	-3		8.6	3	
14.9.07						облачно
15.9.07						нет данных
16.9.07					0	
17.9.07	1.4	-10		11.4	2	облачно
18.9.07	-2.8	-13		10.2	2	
19.9.07						
20.9.07	-1.5	-3	-8.5	1.5	1	
21.9.07	1.3	-6	-0.8	7.3	2	
22.9.07						нет данных
23.9.07	8.5	-13		21.5	6	аво
24.9.07	-7.8	-14		6.2	2	
25.9.07	27.1	-13		40.1	4	
26.9.07						
27.9.07	1.4	-8		9.4	4	
28.9.07						
29.9.07						
30.9.07						



Рис. 9. Исходные данные по термальной аномалии в. Безымянный для обвала 25.09.2007.

равен $\sim +5 \div 8^\circ\text{C}$, и в *осенний* период $\sim +9 \div 11^\circ\text{C}$.

«Повышенный» диапазон температур параметра ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., для нестабильного состояния вулкана в *зимний* период составляет $+12 \div 14^\circ\text{C}$, в *весенний* сезон $\sim +17 \div 20^\circ\text{C}$, в *летний* период этот диапазон равен $\sim +10 \div 12^\circ\text{C}$, и в *осенний* период $\sim +13 \div 15^\circ\text{C}$.

«Критический» диапазон температур параметра ($T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Бзм фон (ср.)}}$) ср., для состояния вулкана перед извержением, в *зимний* период составляет $+17 \div 19^\circ\text{C}$, в *весенний* сезон - свыше $+20^\circ\text{C}$, в *летний* период этот диапазон равен $+13 \div 14^\circ\text{C}$, и в *осенний* период - свыше $+19^\circ\text{C}$.

«Температурный скачок» параметра $T_{\text{Бзм}}$ за 1-3 дня до извержения *зимой, весной и осенью* происходит примерно на $20-30^\circ\text{C}$, а *летом* - более чем на 30°C .

Во все сезоны, примерно за неделю до извержения, начинает происходить неравномерное увеличение значения параметра $T_{\text{Бзм}} - T_{\text{Тлб}}$. Поэтому, временное снижение значения этого параметра, на общем фоне увеличения температуры аномалии и увеличении количества поверхностных сейсмических событий, не должно восприниматься как снижение активности вулкана, а это - лишь «затишье» перед основным событием.

В будущем планируется, что при последующем непрерывном спутниковом мониторинге термальной аномалии вулкана Безымянный, будет происходить дополнение полученных данных, уточнение закономерностей изменения температуры аномалии перед извержением, выявление более точной зависимости температуры аномалии с физическими процессами, происходящими на вулкане.

Все эти данные в комплексе, в дальнейшем помогут давать более достоверный краткосрочный прогноз извержения вулкана на основе только спутниковых данных. При достаточном накоплении температурных данных и уточнении закономерностей динамики температур перед извержениями, планируется использование выявленных прогностических параметров в оперативной работе дежурных сотрудников для краткосрочного прогноза извержений вулкана Безымянный.

Список литературы

Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. Москва. 1991. С. 168-197.
 Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004а. С. 279-291.
 Сеньюков С.Л., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я. и др. Вулканы Камчатки // Землетрясения Северной

Евразии в 2000 году. Обнинск: ГС РАН, 2006а. С. 321-336.

Сеньюков 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: Камчатский печатный двор, 2004б. С. 292-300.

Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др. Исследования активности вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000-03 гг. дистанционными средствами наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004в. С. 301-318.

Сеньюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н. и др. Исследования вулканов Камчатки дистанционными методами в 2005 г // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма» к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный. 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006б. С. 69-79.

Dehn J., Dean K., Engle K. Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space // Geology. 2000. Vol. 28. № 8. P. 755-758.

Harris A.J.L., Butterworth A.L., Carlton R.W. et al. Low-cost volcano surveillance from space: case studies from Etna, Krafla, Cerro Negro, Fogo, Lascar and Erebus. // Bull. Volcanol. 1997. Vol. 59. № 1. P. 49-64.

Lardy M., A. Tabbagh. Measuring and interpreting heat fluxes from shallow volcanic bodies using vertical temperature profiles: a preliminary test // Bull. Volcanol. 1999. V. 60. № 6. P. 441-447.

Schneider D.J., Dean K.G., Dehn J. et al. Monitoring and Analysis of Volcanic Activity Using Remote Sensing Data at the Alaska Volcano Observatory: Case Study for Kamchatka, Russia, December 1997 // Remote sensing of active volcanism / eds. Mouginiis-Mark P., Crisp J., Fink J. American Geophysical Union Geophysical Monograph 0116, 2000. P. 65-86.

Senyukov Sergey L. Algorithm of the eruption prediction of Bezymianny volcano (Kamchatka) // 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students. Linkages among tectonics, magma genesis, and eruption in the northern Pacific arc. Hokkaido University International Congress Hall, Sapporo, Hokkaido, Japan. July 9-14, 2006. P. 57.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
**RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE THERMAL ANOMALY TEMPERATURE
CHANGE AT BEZYMIANNY VOLCANO 2002-2007, AS A PRECURSOR OF IT'S
ERUPTIONS, BY AVHRR NOAA 16 AND 17 SATELLITE DATA**

O.V. Sobolevskaya, S.L. Senyukov

*The Kamchatka branch of geophysical survey of Russian Academy of science,
Petrovavlovsk-Kamchatsky, 683006,
e-mail: sva06@emsd.ru; ssl@emsd.ru*

The Kamchatka branch of geophysical survey of RAS (KB GS RAS) is carry out a monitoring of activity of active volcanoes with the purpose of estimation of volcanic danger. One of the sections of observations is the satellite monitoring of thermal anomalies and ash plumes. They are based on a treatment and interpretation of satellite data information of AVHRR sensor of NOAA 16 and 17 satellites.

The seismic monitoring is the main parameter for the volcano eruptions precursor as the most informative and authoritative method, because the quality of the seismic data is independent of the weather conditions. The seismic monitoring of the Bezymianny volcano is sometimes impossible or wrong. For the technical reasons or when strong seismic activity at the Klyuchevskoy volcano obscures the seismic data for the Bezymianny. So, the satellite monitoring of the thermal anomalies and research of its parameters are allows us to make a short-dated forecast for the Bezymianny volcano eruptions. The main aim of this article is an investigation of the thermal anomalies temperatures as a short-dated precursor for the Bezymianny volcano eruptions.

There were 10 eruptions of the Bezymianny volcano in 2002-2007.

The «normal», «higher» and «emergency» levels of anomaly temperatures with an allowance for the seasons of the year were separated.

We separated such forecasting anomalies temperature values: «normal level» – is a temperature range, wherein the volcano activity on the ground level; «higher level» – is a temperature range, wherein the volcano prepare for any event (large rock fall, ash plume or eruption); «emergency level» – is temperature range, wherein the eruption will happen in the next 1-4 days.

There are some criteria were mark out as a results of our researches. These criteria allow us to know the current status of volcano in presence using satellite data.

The got information is compared with seismic, visual and video data, that allows us to trace the process of preparation of volcano to eruption much high-quality.

The research results of the thermal anomaly temperatures are using as a secondary parameter to the seismic data for the Bezymianny volcano eruption precursor.