



УДК 551.231

В. А. Дроздин, И. К. Дубровская, С. А. Чирков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: dva@kscnet.ru*

К расчёту выноса тепла по данным тепловизионных исследований (на примере вулкана Мутновский, Камчатка)

Применение цифрового тепловизора при исследовании вулканов требует поиска соотношений параметров теплообмена с регистрируемой температурой поверхности. Естественным является расчёт радиационных теплопотерь. В статье предлагается и используется расчёт аномального (дополнительного) радиационного теплопотока от гидротермальных аномалий, показана возможность расчёта через радиационный поток теплопотерь на распределённых источниках типа «парящий грунт». Локализованы места изменения конфигурации термоаномалий в период между тепловизионным аэросъёмками 2009 и 2013 гг.

Объект исследования

Вулкан Мутновский с геологических позиций описывается [3] как «хребтообразный горный массив, состоящий из четырёх усечённых небольшими вершинными кальдерами конусов-стратовулканов (Мутновский 1–4). Он начал свою деятельность в позднечетвертичное время (60–80 тыс. л. н.) и развивался по устойчиво повторяющейся схеме: рост конуса — образование провала на вершине (вершинной кальдеры или крупного кратера) — рост внутрикальдерной постройки и полное затухание конуса, после чего происходило смещение магмово-водящего канала, и цикл повторялся на новом месте. Три ранних конуса Мутновского сложены породами ряда: базальт — андезит — риодацит, четвёртый — базальтами. Объём конусов был М-1 — 56 км³; М-2 — 24 км³, М-3 — 5 км³; М-4 — 3,8 км³. Время деятельности М-2 — 30–40 тыс. л. н.; М-4 от 11 тыс. л. н. Позднейший этап деятельности вулкана Мутновский в основном был связан с Активной Воронкой — молодым взрывным кратером, возникшим на общем гребне кальдеры М-3 и Кратера М-4. С Активной Воронкой, вероятней всего, связаны отложения крупного эксплозивного извержения, произошедшего 1,2–1,3 тыс. л. н.

С момента возникновения Активная Воронка является местом проявления интенсивной фумарольной деятельности и центром периодических эксплозивных извержений. С первого, в 1848 г. зафиксированного в литературе извержения, произошло около 15 извержений с интервалом от 1–2 лет до 44 лет. Все извержения носили взрывной характер с выносом резургентного материала с примесью ювенильного магматического вещества андезито — базальтового состава.

Из последних эруптивных событий отметим:

– короткое извержение в последние дни 1960 г. — первый день 1961 г.

– 17 марта 2000 г. фреатические взрывы в Активной Воронке и в кратере конуса М-4; приведшие к обновлению крутосклонного кратера с образованием горячего озера. (замёрзло зимой 2001/2002 г.; весной оттаяло, а зимой 2003/2004 г. окончательно замёрзло).;

– 23 декабря 2012 г. парогазовый выброс с пеплом (сообщение В. Татищева)

– 3 июля 2013 г. выбросы пепла со дна активной воронки (сообщение Ф. Фарберова).

Вулкан характеризуется высокой газо-гидротермальной активностью, которая проявляется на четырёх участках: Активная Воронка, поля Донное, Верхнее и Западное (последнее было выделено тепловой съёмкой 2007 г.). Взаимное расположение этих полей показано на термограмме рис. 1, полученной тепловизором Flir ThermaCAM P 640 во время аэросъёмки 24 сентября 2013 г.

Методика измерений выноса тепла

Исследования тепловой мощности вулкана начались в конце 50-х годов в рамках программы поиска геотермальных ресурсов в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского.

По способам измерений термопроявления классифицировались на сосредоточенные и распределённые. Сосредоточенные — это фумаролы (паровые струи) и тёплые ручьи (реки). Распределённые — это вынос тепла и газа через грунт к дневной поверхности, в частности, с образованием участков типа «парящий грунт».

Так в 1981 г. из общего количества тепла 380 МВт, выделяющегося в атмосферу в кратере вулкана Мутновский (без учёта выноса тепла из Активной Воронки), 85% выносятся парогазовыми струями,

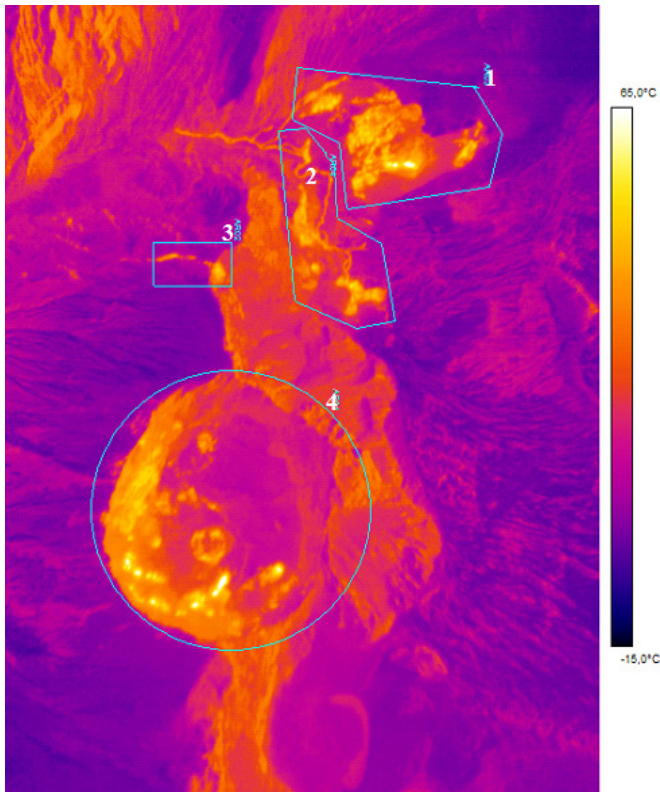


Рис. 1. Термограмма гидротермальных проявлений Мутновского вулкана: 1 — Верхнее поле, 2 — Донное поле, 3 — Западное поле, 4 — Активная воронка

8,6% — с водой р. Вулканная, 3,4% — с поверхности горячих водоёмов, 2,6% — рассредоточенным парением и лишь менее 1% — кондуктивным теплопоток через грунт [2].

Способ расчёта интенсивности выноса тепла паровыми струями с помощью тепловизора был предложен в работе [3]. Тепловая мощность оценивалась по превышению температуры в шлейфе над температурой в окружающем воздухе. В последствии было показано [5], что рассчитанная тепловая мощность существенно, до 30% больше продуцируемой непосредственно вулканом, т. к. в расчётное значение входит тепловая мощность, выделяемая при конденсации пара в паровом шлейфе.

Теплоотдача с открытых водоёмов, происходящая в основном за счёт испарения, рассчитывается через температуру поверхности водоёма, которая непосредственно может быть измерена тепловизором.

На практике наиболее трудоёмкой оказалась работа по измерениям распределённого теплопотока.

Для определения теплопотока от распределённых термопроявлений измерялась [2] температура грунта и строились распределения температур на различных глубинах: 15, 50, 100 см. Там, где видимая разгрузка термальных флюидов не наблюдалась (сопровождается линейному росту температуры с глубиной), тепловой поток рассчитывался по формуле

$$q = \lambda(T_{100} - T_{15})/0,85 \text{ Вт/м}^2,$$

теплопроводность принималась $\lambda = 0,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; T_{100} и T_{15} температуры на глубине 100 и 15 см в градусах С.

В большинстве пунктов измерения градиент температуры с глубиной уменьшался, теплопоток рассчитывался по эмпирической формуле Даусона [4], полученной при использовании тепломеров различных конструкций, специально разработанных для выполнения непосредственного измерения теплопотока

$$q = 5,18 \cdot T_{15}^4 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/м}^2.$$

Для больших потоков предлагается формула расчёта теплопотока по глубине — d размещения температуры 97°С (температура кипения на высоте термопроявления).

$$q = 9800/d^{1,05} \text{ Вт/м}^2.$$

С помощью тепловизора можно измерить только температуру поверхности. Поэтому необходимо иметь зависимость теплопотока от температуры поверхности грунта. Существование возможности такой зависимости демонстрирует рис. 2, построенный по данным работы [4].

На рис. 2 также нанесены экспериментальные данные по измерению теплопотока в кратере вулкана Авача (1964 г.). Для сравнения на рис. 2 приведена кривая радиационного потока тепла с нагретой поверхности в среду с температурой 15°С

$$Q_r = \sigma(T_s^4 - T_a^4)$$

и обобщающая экспериментальные данные линия, рассчитанная через радиационный поток по формуле

$$Q_{\text{расч}} = 2,3Q_r.$$

Примечание. Измерения выноса тепла на вулкане Авача производилось устройством, выполненным в виде жестяного цилиндра со встроенным в него конусом, обращённым вершиной вниз. Цилиндр устанавливался на термоплощадку. В конус закладывался снег; под конус ставилась ёмкость (банка). Пар, выходящий из грунта в цилиндр, конденсировался на поверхности конуса и собирался в ёмкость; снег в конусе таял. Таким образом расчёт интенсивности теплопотока дублировался.

Радиационный поток

Вынос тепла излучением или радиационный поток определяется через температуру поверхности источника и температуру принимающей поверхности. В качестве температуры принимающей поверхности обычно используют температуру окружающей среды (воздуха), или можно использовать температуру нижней границы облачности или что-то подобное. В соответствии с нашей задачей измерения аномального потока надо использовать температуру фона или пороговое (пограничное) значение температуры.

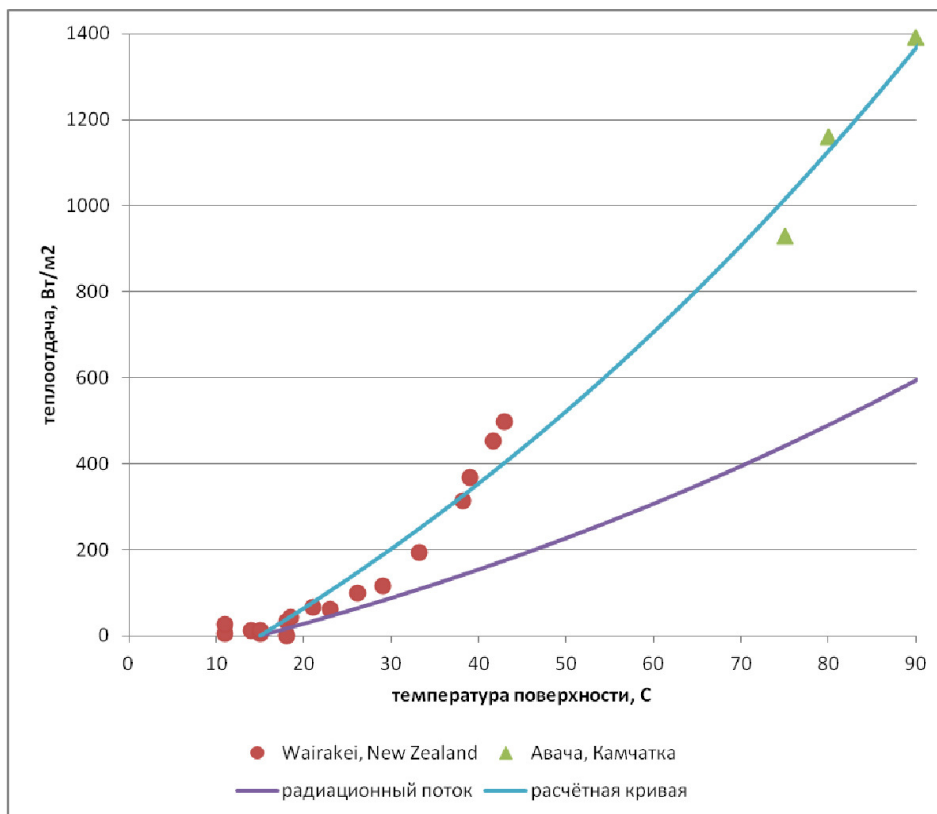


Рис. 2. Зависимость выноса тепла от температуры поверхности гидротермоаномалии.

Таблица 1. Характерные температуры к термограммам рис. 3.

		T_{cp}	T_{max}	T_{min}	изотерма		
					низ	верх	порог
2009	Активная воронка	-5,6	130	-14	2	15	-2
	Донное + Верхнее	-6,2	106,5	-12,7	2	15	-2
2013	Активная воронка	-0,8	115	-8,9	6	14	0
	Донное + Верхнее	-2,8	85,5	-9	6	14	0

Таблица 2. Характеристики аномального радиационного потока.

	температура >° C	Активная воронка		Донное+Верхнее	
		площадь, м ²	МВт	площадь, м ²	МВт
2009	4° C	10 000	3,26	12 240	2,84
	15° C	2280	2,34	2900	1,65
	50° C	200	0,38	115	0,25
2013	4° C	18 500	4,12	14 500	2,08
	15° C	3150	2,71	1850	1,12
	50° C	250	0,50	90	0,18

В штатной программе обработки термоизображений ThermaSAM Researcher имеется опция «изотерма», применение которой позволяет контрастным цветом выделить область площади, расположенную в пределах задаваемых границ температур. С помощью этой опции визуально можно определить

пороговое значения температуры. Для этого надо верхнюю границу «изотермы» установить так, чтобы более высокие температуры термоаномалии были видны. Нижнюю температуру «изотермы» будем понижать.

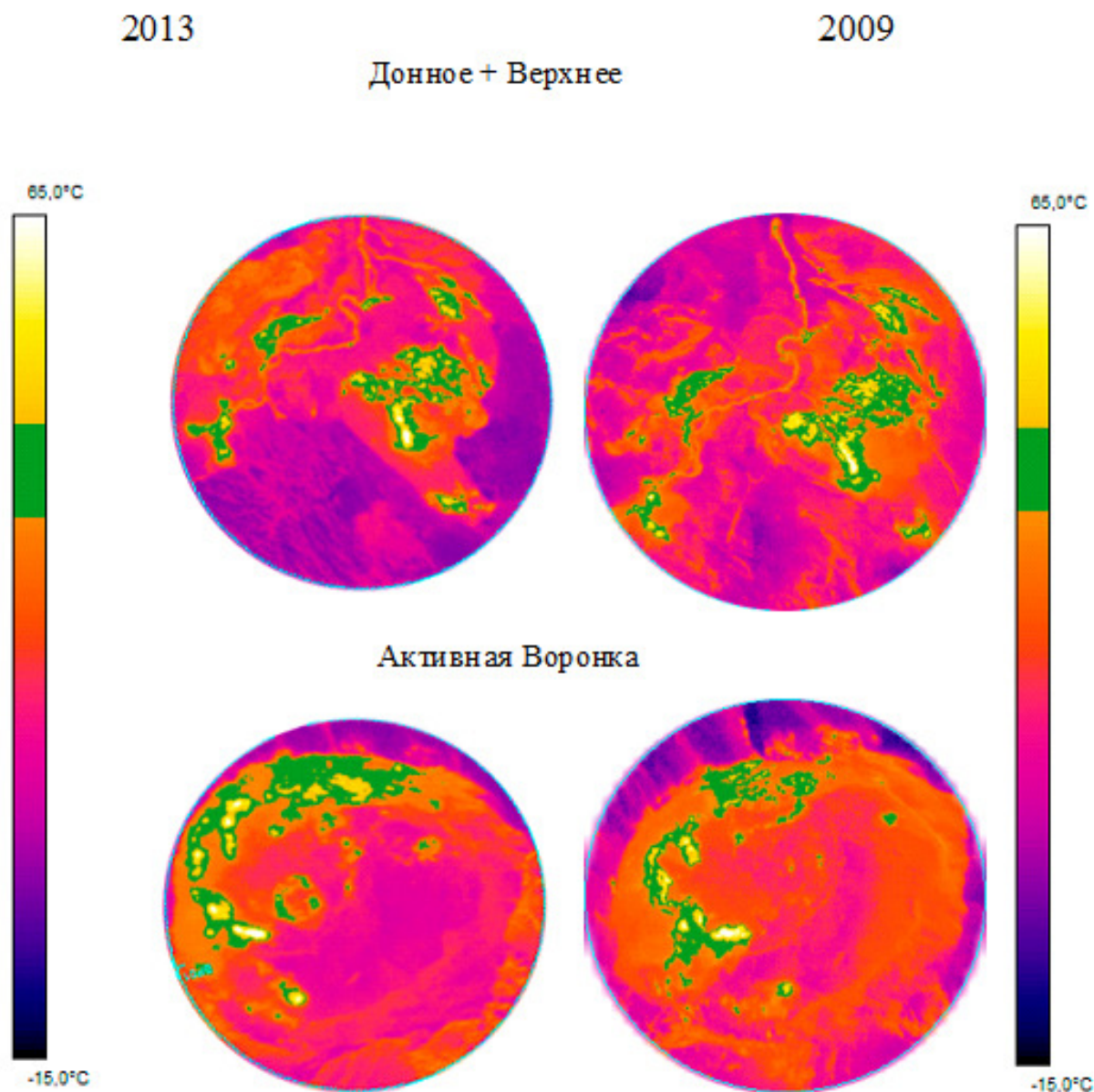


Рис. 3. Сравнение термограмм за 2009 и 2013 г.

Естественно внутренняя область, соответствующая высоким температурам термоаномалии, будет оставаться неизменной, а площадь «изотермы» будет увеличиваться. Как правило, термоаномалии локальны и их площади не связаны. Какое-то время при расширении «изотермы» она как бы повторяют их контуры, но потом все локальные зоны оказываются связанными. Переход от несвязанных контуров к связанной области отражает значение искомой пороговой температуры.

На рис. 3 показаны термограммы термопроявлений Мутновского вулкана с изотермами, соответствующими начальным положением изотермы при поиске порогового значения.

Другим вариантом нахождения пороговых температур является анализ гистограмм распределения температур. С учётом точности построения 0,01%

и максимально возможного в программе ThermaCAM Researcher количества диапазонов –62, расчёт был выполнен для диапазона температур от –15 до 65° С с дискретностью 2° С, т.е. для 40 диапазонов. Анализировались графики рис. 4 изменения доли площади в зависимости от температуры диапазона и изменение отношения площади занятой температурой диапазона к суммарной площади более высоких температур (для использования единой шкалы отношение увеличено в 10 раз).

Видно, что доля площади монотонно растёт с понижением температуры, по «отношению» можно выделить пороговое значение в 10° С, когда темп роста существенно изменяется. Полученное значение согласуется и с пороговыми значениями в табл. 1, поэтому в формуле расчёта аномального радиационного потока принято $T_a = 273 + 1 = 274$ К.

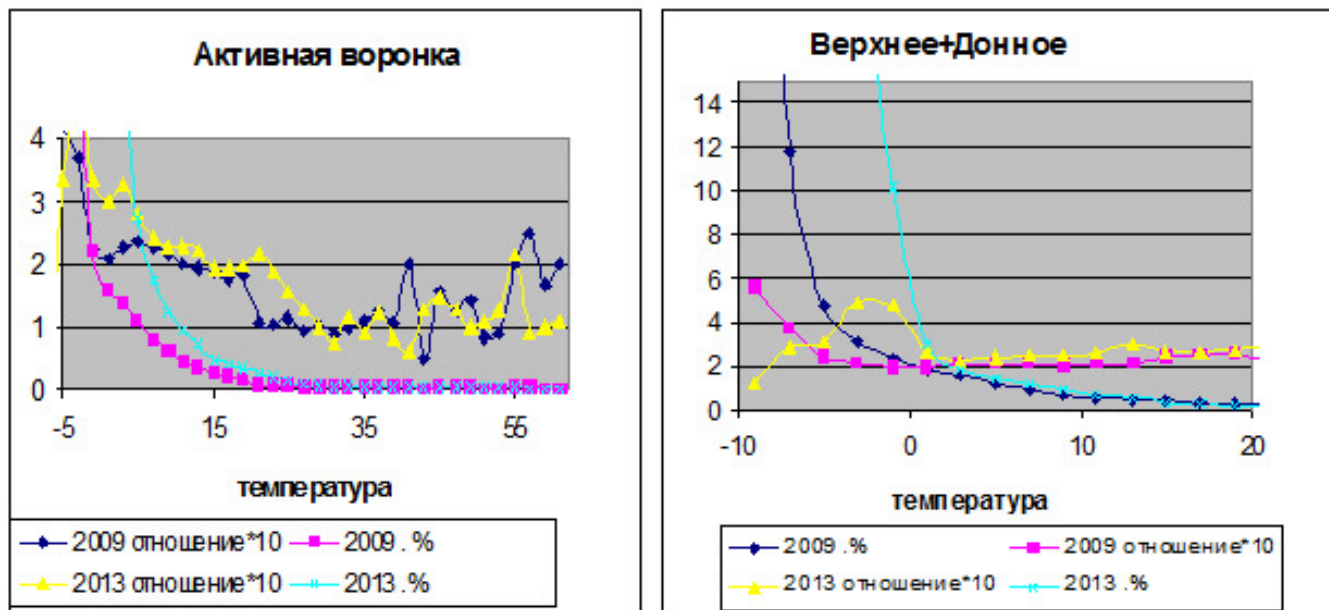


Рис. 4. Доля площади круга (рис. 3) в зависимости от температуры.

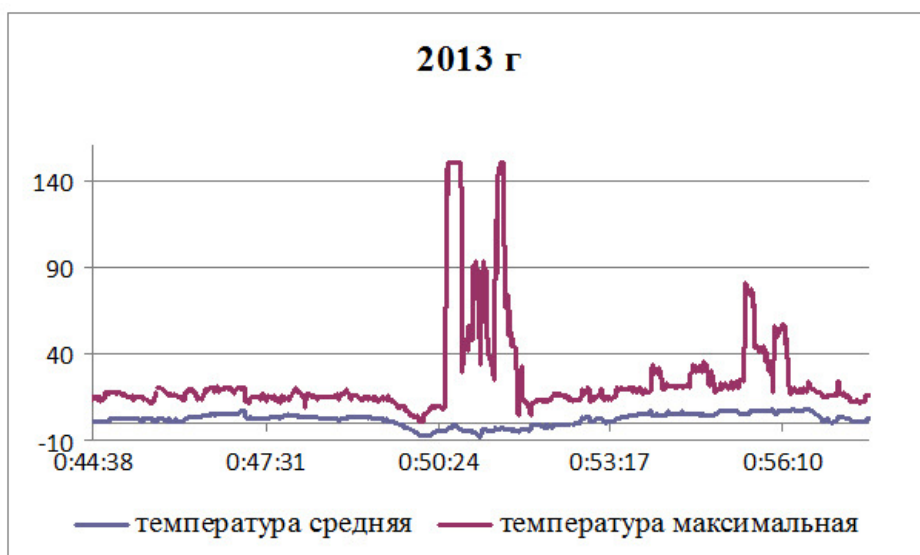


Рис. 5. Температуры термограмм во время полёта 24 сентября 2013 г.

В табл. 2 вынесены итоговые значения аномального радиационного потока. Различия по годам скорее характеризует точность расчёта по изображению центрального типа, чем изменения во времени.

Анализ изображений

Не смотря на то, что как указывалось выше, доля радиационного потока мала в общем выносе тепла именно структура радиационного потока (температуры) отражает изменение интенсивность теплообмена. Два основных фактора мешают выполнению сравнительного анализа разновременных термограмм. Это солнечная радиация (авиаполёты возможны только днём) и отображение горной поверхности в виде центральной поверхности.

На рис. 5 приведены графики изменения температуры во время полёта 24 сентября 2013 г. максимальной и средней на изображении (на оси абсцисс — время после 10:00). Пики максимальной температуры в пределах 50–52 минут соответствуют пролёту над термоаномалиями Мутновского вулкана, а в районе 55:40–56:10 над термопроявлением Дачные.

Примечательно, что средняя температура термограмм не увеличивается над термоаномалиями. Максимум средней температуры зависит не от наличия термоаномалий (они относительно малы по площади), а от солнечной радиации, при этом минимум средней температуры зависит и от абсолютной высоты поверхности.



Рис. 6. Профиль температур через место пеплогазовой эксплозии, произошедшей 03.07.2013. (Разрешение 1,7 м/рл)

Из-за использования центральной проекции нельзя переносить конкретную изотерму для разновременных изображений на один рисунок. Увидеть изменения температурных полей можно, сравнивая два изображения. Так, например, сравнивая термограммы за 2009 и 2013 гг. (рис. 3) можно увидеть:

– уменьшение в 2013 г. на изображениях Донного поля (в центре круга) — высокотемпературной аномалии в центре выделенной площади.

– появление в 2013 г. на изображениях Активной воронки высокотемпературной аномалии в северной и в центре выделенной площади. Последняя, вероятно, является следствием эксплозии 3 июля 2013 г. На рис. 6 показан профиль температур через это место.

Благодарность. за поддержку и участия в проведении работ авторы выражают Я. Д. Муравьеву, постоянному инициатору и организатору полевых исследований.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Дрознин В.А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. ДАН 430 №3, сс349–351
2. Муравьев А.В., Поляк Б.Г., Турков В.П., Козловцева С.В. Повторная оценка тепловой мощности фумарольной деятельности на вулкане Мутновский (Камчатка). // Вулканология и сейсмология, 1983, №5, сс 51–63.
3. Селянгин, О. Б. К вулканам Мутновский и Горелый: вулканологический и туристический путеводитель / Селянгин О.Б. — Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2009. — 108 с.
4. Dawson G.B. The nature and assessment of heat flow from hydrothermal arrears.//N.Geol Z.J..Geoph.1964, Vol. 7, №1, P. 155–171
5. E.I Gordeev, Droznin V. A., N.A, I.K. Dubrovskaya. Estimate of mass flow in gas plumes from the 2010–2012 eruptions of Gorely Volcano, Kamchatka // IAVCEI, 19–24 July, Kagoshima, 2013