



УДК 551.21

В. А. Дрознин, С. А. Чирков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский*

Особенности дистанционного измерения температуры при изучении вулканических извержений

Анализируются особенности термограмм, полученных тепловизором Flir ThermoCAM SC 640 во время извержения вулкана Горелый (2008–2013 гг.) и Нового Трещинного Толбачинского извержения имени 50-летия ИВиС (2012–2014 гг.).

Введение

В настоящее время широко используются дистанционные способы измерения температуры: инфракрасные пирометры, тепловизоры, которые особенно полезны в труднодоступных местах и в частности при извержении вулканов. В подобных приборах регистрируется не непосредственно температура поверхности, а радиационный поток и поэтому для пересчёта регистрируемого сигнала в температуру поверхности необходимо учитывать коэффициент излучения поверхности, поглощение сигнала в атмосфере, пространственное разрешение прибора. По умолчанию полагается, что регистрируется радиационный поток от излучающей поверхности. На практике встречаются случаи, когда в поле зрения прибора попадает сигнал не только от излучающей поверхности, но и отражённый от внешнего (для неё) источника. В сообщении рассматриваются примеры ситуаций, где регистрируемый сигнал не соответствует температуре измеряемой поверхности, так как совмещён с отражённым радиационным потоком.

Напомним, что первые модели тепловизоров фирмы AGA (прародительницы фирмы Flir) комплектовались отражающими полированными металлическими зеркалами, т. к. их рабочее положение должно было быть субгоризонтально из-за использования жидкого азота для охлаждения регистрирующего элемента. Коэффициент отражения был близок к 100% и, соответственно, поток отражаемый зеркалом, практически не искажал распределения температуры исследуемой поверхности.

Извержение вулкана Горелый 2010–2014 гг.

Рассмотрим рис. 1 с термограммой за 21 июня 2010 г. места выхода парогазовой струи, при извержении вулкана Горелый, на которой регистрируется отражённый сигнал. Очевидно, что на термограмме красное пятно на озере (посредине внизу низ кадра) не соответствует фактическому повышению температуры поверхности озера, а соответствует отражению радиационного потока от высокотемпературной области в центре кадра. Температура воды

в озере практически одинакова, а на термограмме правая часть представляется как существенно выше. Изображение на термограмме можно сравнить с ночной фотографией у костра, когда на лицах виден отблеск костра и цветовая температура явно выше фактической. На термограмме отражённый радиационный поток наблюдается от озера до места выхода струи и далее выше, где суммируется с обрамлением струи. Поэтому даже точность определения по термограмме диаметра парогазовой струи не представляется возможной.

Как отмечалась ранее [1] точное определение температуры струи также не возможно, так как тепловизор SC 640 фирмы Flir регистрирует радиационный поток в области прозрачности атмосферы 7,5–13 мкм и, соответственно, в этом диапазоне высоко температурная парогазовая струя прозрачна.

Для иллюстрации эффекта прозрачности на рис. 2 приведена термограмма пламени газовой горелки. Радиационная температура пламя горелки AR01 всего 96°С, хотя температура нагретой части сопла AR02 достигает 327°С. Непосредственно тепловизором измерить температуру пламени невозможно. Поэтому приходится поместить в пламя посторонний предмет, например проволоку AR03, и значением её температуры 499°С характеризовать температуру пламени. Аналогично по термограмме рис. 1 не может быть определена температура струи, мы можем определить лишь температуру нагретой стенки.

В итоге при интерпретации термограммы рис. 1 следует выделять три области: область струи, область ложных температур и обычную (штатную) область. В последней можно характеризовать регистрируемый сигнал распределением температуры поверхности. В области струи интерпретация затруднена, но можно оценить максимальную температуру (поверхности) в месте выхода струи. По экспериментам она составила 817°С.

Заметим, что в работе [1] по пульсациям струи, представляемой в виде последовательности плюмов, определялась скорость струи, как скорость подъёма плюма. Характер изменения температуры в начале

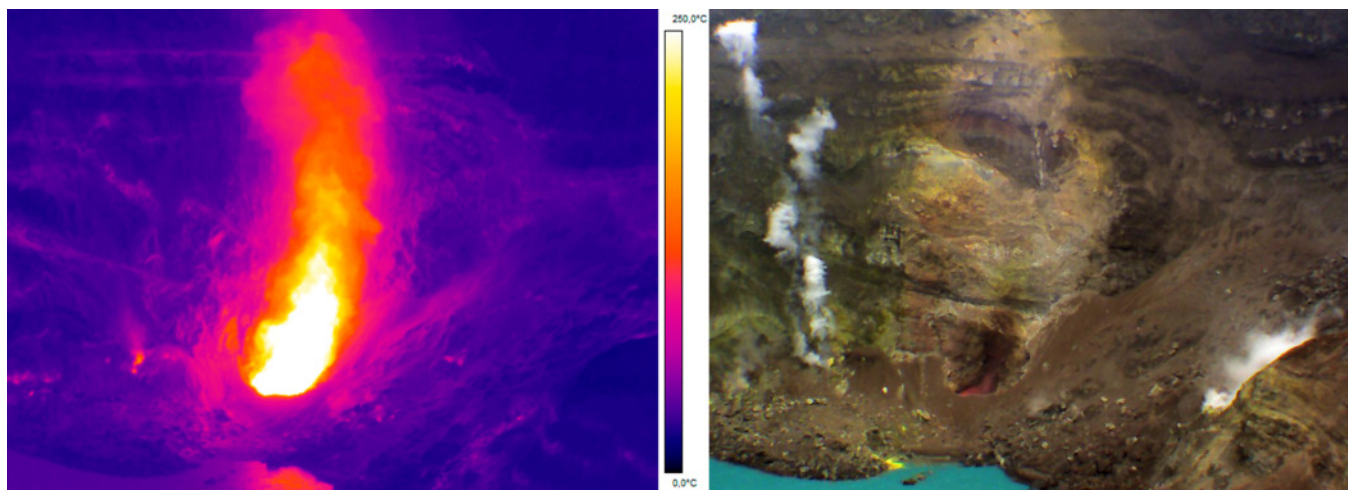


Рис. 1. Вулкан Горелый 21 июня 2010 г. Термограмма и фото места выхода газа.

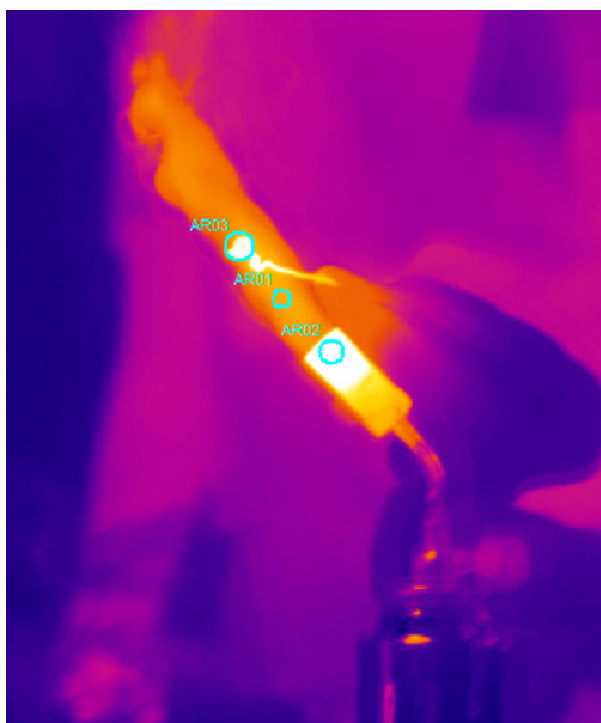


Рис. 2. Термограмма нагрева проволоки в пламени газовой горелки

струи при извержении вул. Горелый иной: скорее пульсации температуры отражают конвективное изменение формы пламени костра.

НТТИ имени 50-летия, частота выбросов

Эффузивная активность НТТИ имени 50-летия весной 2013 г. в основном проявлялась в виде стромболианских взрывов. На рис. 3 представлена термограмма северного кратера центра имени С. И. Набоко. Для описания основных черт объекта на термограмме выделены пять областей и одна точка.

Для определения частоты выбросов на термограмме над кратером выделена прямоугольная область AR02, через которую проходит полёт бомб.

Для этой области по последовательности термограмм строился график AR02 средней температуры (рис. 4) и по нему считалось число выбросов (число пиков на графике) в каждой последовательности (табл. 1). Средняя скважность выбросов составила 7 с.

Отражённая температура

Огонь костра создаёт магическое, завораживающее чувство. Подобный эффект возникает при наблюдении извержения. Термограмма даже при удачном выборе палитры цветов не передаёт изменчивость игры цвета. Нужна динамика, т. е. видео запись. Тогда можно ощутить выбросы бомб как вспышки. Была выделена область AR01 для рассмотрения изменения температуры внутренней поверхности кратера. Выделенная область находится среди участка с большей крутизной склона и на неё в течении эксперимента практически не падали бомбы. На рис. 4 приведён график средней температуры области AR01. Очевидно, что температура поверхности кратера не может мгновенно измениться из-за пролёта бомб, т. к. процесс теплообмена достаточно инерционен. Поэтому изменение регистрируемой температуры в области связано с отражённым сигналом, источником которого являются выбросы бомб, на что указывает высокая корреляция температур областей AR01 и AR02.

Остывание бомбы

Над кратером постоянно клубился сизый газ. При выбросах бомб в большинстве случаев количество пепла было не значительно. Пепловые султаны не образовывались, тем не менее, на термограммах фиксировались кратковременные области высоких температур, типа облака как в центре рис. 3. Причиной образования этих областей является наличие пепла, но (как и в примере с горелкой) регистрируемая радиационная температура скорее характеризует температуру пепла, чем температуру газа. Размер частиц на порядки меньше разрешения

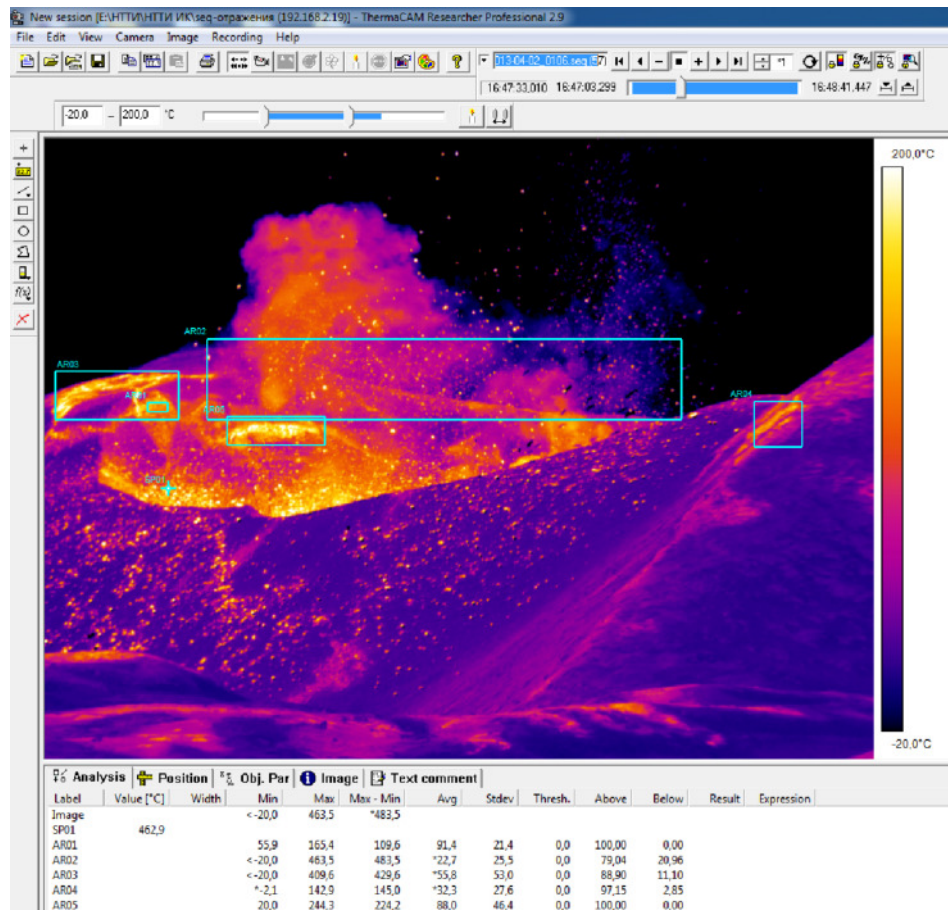


Рис. 3. Термограмма северного кратера центра имени С. И. Набоко за 02,04.13. Выделены прямоугольные области и одна точка, температуры в которых анализируются (см. текст).

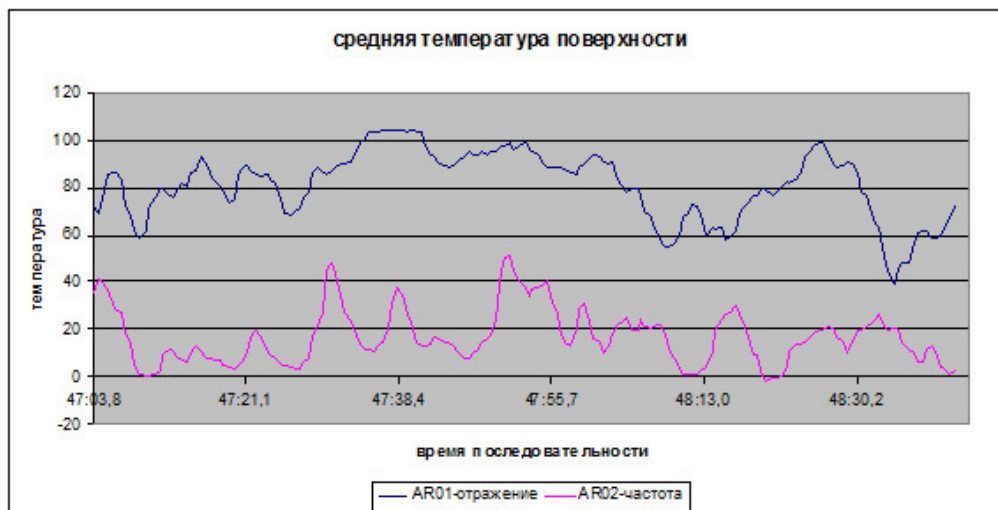


Рис. 4. Средняя температуры области AR02, через которую проходит полёт бомб, и области AR01, через которую в ходе эксперимента бомбы не залетали (см. рис. 3).

и регистрируемая температура зависит от концентрации пепла в потоке газа. Разница регистрируемой температуры в газо-пепловой смеси свидетельствует как о разнице в концентрации пепла, так и о разнице температуры пепла. Представле-

ние о размере пепловых частиц даёт фотография образца лапилли рис. 5.

На термограмме рис. 3 видны высокотемпературные точки летящих и упавших бомб. Точкой Sp01 отмечено место падение одиночной бомбы, для кото-

Таблица 1. Распределение температуры вокруг бомбы с координатами $x = 95$, $y = 270$.

номер	дата	время начала	Длительность записи, сек	Число взрывов	Скважность, сек
0039	26.03.2013	13:59:57,54	184	25	7,4
0044	26.03.2013	14:06:59,34	184	21	8,8
0047	26.03.2013	14:13:48,30	98	15	6,5
0062	26.03.2013	14:27:52,96	98	17	5,8
0063	26.03.2013	14:35:13,53	98	13	7,5
0064	26.03.2013	14:40:44,57	184	21	8,8
0069	02.04.2013	14:48:24,57	184	24	7,7
0056	02.04.2013	13:03:17,80	98	13	7,5
0106	02.04.2013	16:47:03,23	98	17	5,8
0141	09.04.2013	16:11:32,58	67	11	6,1
0144	09.04.2013	16:18:08,31	37	8	4,6

**Рис. 5.** Образец лапилли в виде «пакли».**Рис. 6.** Остывание упавшей бомбы.

рой прослежен темп остывания рис. 6. Полученный темп остывания $1,44^{\circ}\text{C}/\text{с}$ отнесен к температуре $425^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Разрешение тепловизора в данном эксперименте было $0,6 \text{ м}/\text{пл}$. Бомба имеет размер больше 1 пиксела. На это указывает распределение температур вокруг точки с координатами бомбы $x = 95$, $y = 270$ табл. 2.

Аномальные зоны

На термограмме рис. 3 выделены области повышенной температуры AR03, AR04, AR05. Они расположены на внешней поверхности в при вершинной части конусов. В целом эти термоаномалии соответствуют термоаномалиям типа «парящий грунт». Такие аномалии для шлаковых конусов известны как конвекционные системы, долго существующие после извержения в основном за счёт окислительных процессов кислорода атмосферы и, по-видимому, практически без подпитки магматическими газами (эндогенным флюидом).

Представляет интерес аномалия AR05 в центре термограммы рис. 3, расположенной как горизонтальная толща. Механизм её образования очевидно отличен от приповерхностных аномалий AR03 и AR04. Расположение этих трёх аномалий, как видно на рис. 7, связано с окисленными породами (красного цвета).

Выделенные термоаномалии показаны на рис. 3 и на рис. 7, когда эксплозии в кратере закончились.

Отметим, что на фотографиях НТТИ наблюдается чередование не окисленных (чёрных) и окисленных (красноватых) пород. Хотя особенностью этого извержения было разрушение старого конуса Красный и растаскивание первоначальной постройки северного кратера, возникает предположение, что окисление пород (вторичный разогрев) происходит и в ходе извержения и не только вблизи дневной поверхности.

Снежная стенка

рис. 8 демонстрирует ситуацию при контакте лавы со снегом; а) фото и термограммы, снятые в разных диапазонах: б) от -30°C до $+150^{\circ}\text{C}$, в) от 0°C до $+500^{\circ}\text{C}$, г) от 300°C до 1200°C .

На рис. 8-б показано место расположения профиля, а на рис. 9 распределение температур. Температура снега повышается по мере приближения к лаве и, что важно она больше нуля. Это обстоятельство указывает на то, что регистрируется суммарное

Таблица 2. Распределение температуры вокруг бомбы с координатами $x = 95$, $y = 270$

X/Y	92	93	94	95	96	97	98
266	44,0	57,1	47,2	56,4	59,4	74,7	92,8
267	52,2	67,7	65,8	71,3	92,1	79,5	62,2
268	82,6	104,3	150,1	210,6	209,9	112,3	58,9
269	110,3	240,0	338,4	330,6	190,4	110,6	69,2
270	125,7	334,1	455,6	462,9	303,3	140,3	73,1
271	140,7	179,7	282,2	335,3	314,7	125,8	80,0
272	125,9	167,2	206,1	163,2	134,5	97,0	113,0
273	103,4	216,7	210,3	111,2	74,0	95,8	116,1
274	92,3	190,4	133,3	85,3	60,0	76,5	81,6

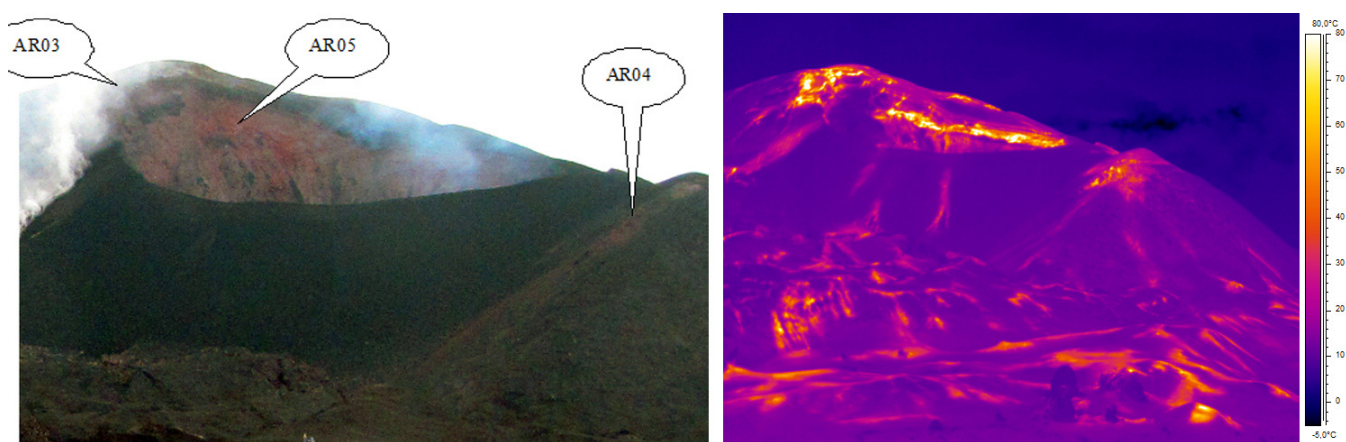


Рис. 7. Фото и термограмма северного кратера центра имени С. И. Набоко 28 августа 2013 г., демонстрирующие существование термоаномалий типа «парящий грунт».

излучение: от поверхности снега (определяемое его температурой) и отраженное (определяемое температурой лавы и коэффициентом отражения от снежной поверхности.).

Максимальная температура поверхности лавы в этом эксперименте достигала 942°C , средняя порядка 435°C . (зафиксированная максимальная температура лавы составила 1047°C)

Окно в лавоводе

На рис. 10 приведены фотографии и термограмма отложений возгонов в окне над лавовым (толдским) потоком за 28 августа 2013 г. Для характеристики радиационных температур по цвету отложений были выделены четыре области: голубая AR03 и три зеленоватых: AR01 — зелено-голубая, AR02 — зеленая AR04 — зелено-жёлтая. На фотографии можно выделить области с отложениями сиреневого и белого цвета, но им соответствует радиационная температура $<200^{\circ}\text{C}$, т. е. ниже диапазона регистрации, который составлял от 300°C до 1200°C . (максимальная температура на термограмме рис. 5б составила 923°C)

Таблица 3. Радиационная температура в областях, выделенных на рис. 10

		мини- мум	макси- мум	сред- няя
зелёно-голубая	AR01	460,6	615,5	508,1
зелёная	AR02	521,7	649,2	562,8
голубая	AR03	375,4	518,3	407,9
зелёно-жёлтая	AR04	495,5	681,3	568,2

Заключение

Рассмотренные примеры демонстрируют, что значения радиационной температуры не соответствуют истинной температуре поверхности. Оценить в мощности излучения регистрируемой тепловизором долю излучения от измеряемой поверхности лавы от доли отражённого от измеряемой поверхности радиационного потока не представляется возможным.

По-видимому, обнаружение отражённого сигнала требует изменения процедуры измерения. Например, установления защитных экранов. По крайней

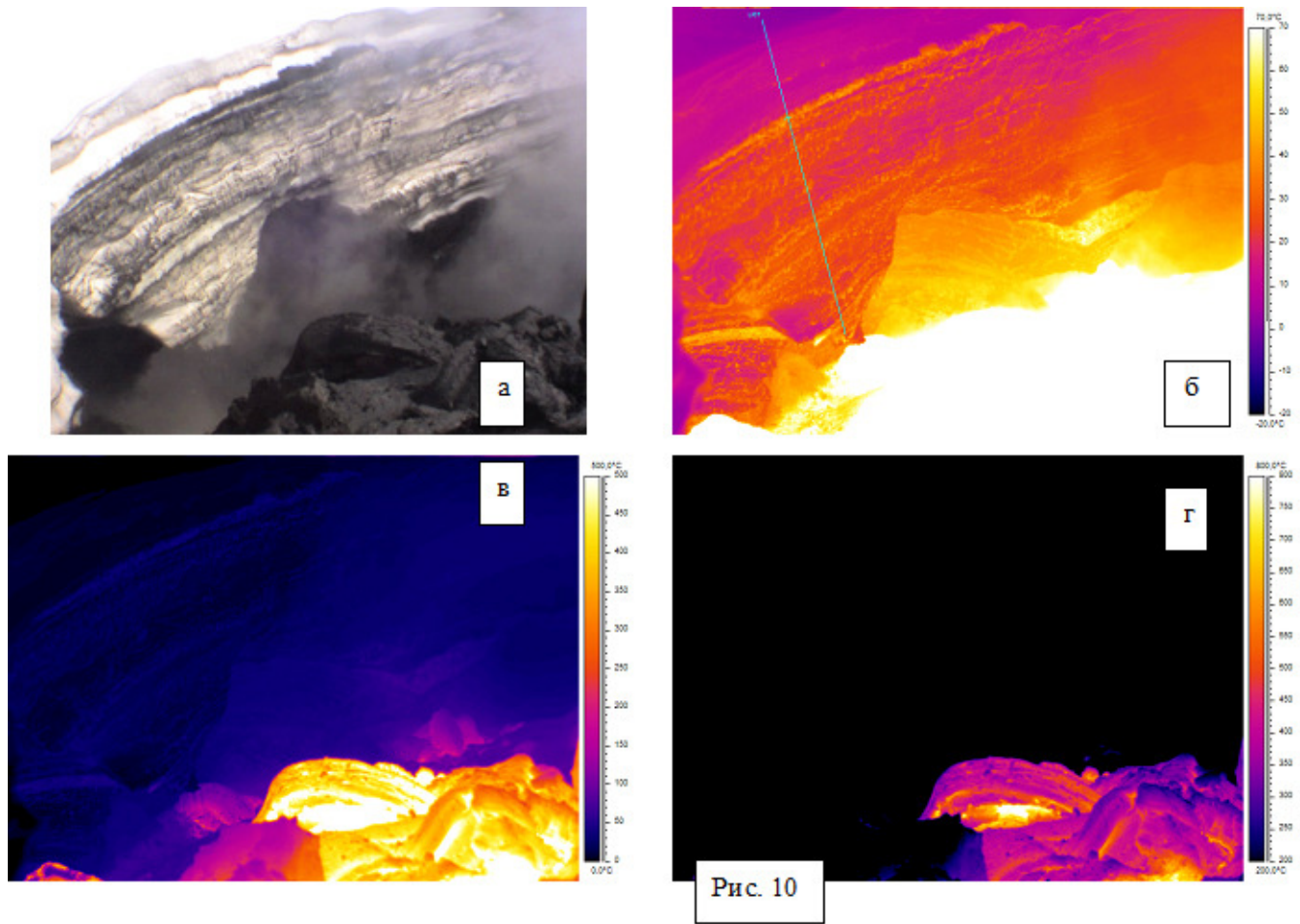


Рис. 10

Рис. 8. Контакт снега с лавой температурой до 942°C . Фотография — а) и термограммы, снятые в разных диапазонах: б) от -30°C до $+150^{\circ}\text{C}$, в) от 0°C до $+500^{\circ}\text{C}$, г) от 300°C до 1200°C . На рис. 8б указано расположение температурного профиля.



Рис. 9. Радиационная температура снега по профилю, указанному на рис. 8а

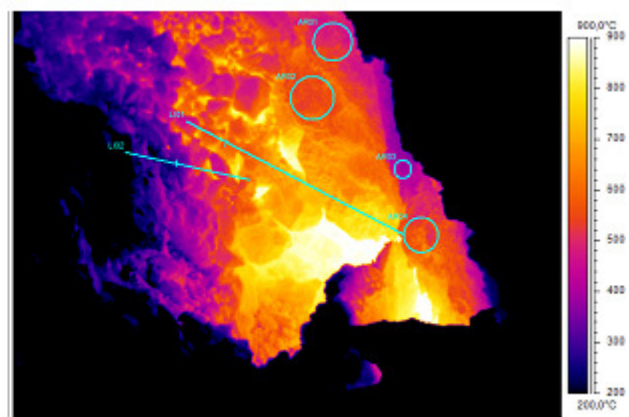
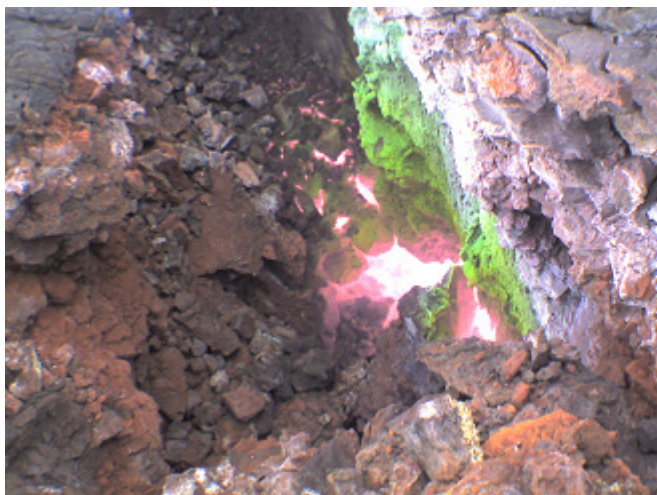


Рис. 10. Фотографии и термограмма отложений возгонов в окне над лавовым (Толудским) потоком за 28 августа 2013 г.

мере при измерениях поверхностей не перпендикулярных линии визирования надо помнить про эффект отражения.

Не исключено, что совместный анализ 3-Д поверхности и термограмм позволит выявить наличие отражённого сигнала, но сомнительно, что будут найдены инженерные формулы для его расчёта.

Список литературы

1. Гордеев Е. И., Дрознин В.А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. ДАН 430 № 3, сс.349–351
2. Дрознин В. А., Дубровская И. К. Термограммы газового извержения вулкана Горелый 2010–2011 г.г.// «Вулканизм и связанные с ним процессы» Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2012 г., сс. 63