



УДК 551.21

В. А. Дрознин, С. А. Чирков

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

Тепловая мощность парогазовых шлейфов вулкана Жупановский

На примере регистрации тепловизором Flir ThermaCAM SC 640 парогазовых шлейфов в ходе извержения 2013–2015 гг. вулкана Жупановский демонстрируются приёмы и методики реализации способа расчёта продуцируемого расхода пара и продуцируемой тепловой мощности.

Введение

Вулкан можно рассматривать как механизм, представляющий на дневную поверхность глубинное вещество Земли. Основным параметром при этом является продукция, в частности массовый расход продуцируемого газа. Полагая, что продуцируемый газ в основном состоит из водяного пара, в том случае, когда вынос газа производится в виде паровых шлейфов, его продукция может быть оценена.

Расчёт продуцируемого пара

Для расчёта расхода надо определить сечение потока, концентрацию измеряемой компоненты и скорость. Сечение потока продуцируемого пара можно сопоставить (приравнять) с сечением парового шлейфа и измерить дистанционно, например, по фотографии. Так как, как правило, паровые шлейфы имеют пульсационный характер и являются чередой плюмов, скорость подъёма куполов плюмов может быть измерена, например, с помощью видеозаписи. Концентрация продуцируемого пара в шлейфе может быть рассчитана по температуре шлейфа, измеряемой, например, тепловизором.

Расчёт концентрации продуцируемого пара в паровом шлейфе был выполнен в работе [1]. При этом полагается, что атмосферный воздух, имеющий температуру T влажность φ , нагревается паром до температуры шлейфа T_2 и пар в шлейфе становится насыщенным. т. е. его концентрация однозначно определяется температурой шлейфа. Пар в шлейфе частично состоит из того, что был в атмосферном воздухе и частично из пара продуцируемого вулканом. Для названия концентрации продуцируемого пара в работе [2, 3] было предложено определение недосыщенности.

Расчёт недосыщенности

Атмосферный воздух является смесью газов: собственно сухого воздуха, (состоящего из азота, кислорода и т.д.) и паров водяного пара. В смеси газов по закону Дальтона давление смеси равно сумме парциальных давлений отдельных составных

частей смеси, т. е. давлений, которые имел бы каждый из данных газов, если бы он один занимал весь объём газовой смеси. Плотность, или что тоже. концентрация газа в смеси выражается через парциальное давление. При низких температурах и давлениях газы в воздухе подчиняются уравнению идеального газа — уравнению Клапейрона — Менделеева.

Если известна температура t , влажность воздуха φ и атмосферное давление — P , то можно выразить соотношение массы пара к сухому воздуху β через их парциальные давления φE и $(P - \varphi E)$, молекулярные веса пара μ и сухого воздуха $\mu_в$

$$\beta = \frac{\varphi E \mu}{(P - \varphi E) \mu_в}$$

Заметим, что если мы переместим воздух в другие P - T условия, то плотности пара и сухого воздуха изменятся, но соотношение масс β сохранится. Так если в новых условиях изменилась температура с t на T_2 , то в соответствии с формулой Магнуса (характеризующей линию насыщения):

$$E = E_0 10^{\frac{7.45t}{235+t}}, \text{ где } E_0 = 6.1 \text{ мб, } t - \text{ температура } ^\circ \text{C}$$

изменилось и парциальное давление пара с E на E_2 . При этом концентрация сухого воздуха стала

$$m_в = \frac{(P - E_2) \mu_в}{RT_2}$$

Соответственно, умножая на соотношение β , получим концентрацию пара, поступившим с сухим воздухом, в виде:

$$\beta m_в = \frac{\varphi E \mu (P - E_2)}{(P - \varphi E) RT_2}$$

Определим недосыщенность воздуха как концентрацию водяного пара, которую надо добавить к атмосферному воздуху, чтобы он стал насыщенным при другой температуре, например в шлейфе. Тогда

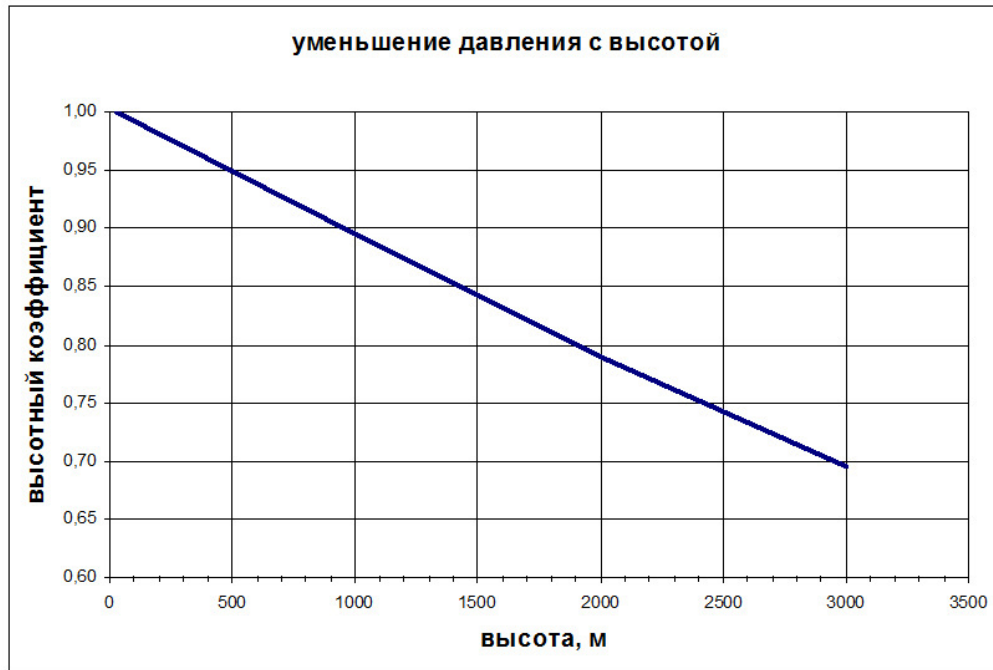


Рис. 1. График для коррекции атмосферного давления в зависимости от высоты измеряемого сечения шлейфа.

его недосыщенность можно выразить как разницу плотности насыщенного пара при новой температуре (и упругости) и концентрации (плотности) пара, поступившего с атмосферным воздухом:

$$\gamma = \frac{\mu}{RT_2} \left(E_2 - \frac{\varphi E(P - E_2)}{P - \varphi E} \right), \quad (1)$$

где P – атмосферное давление, E – упругость пара в атмосфере, E_2 – упругость пара в шлейфе, μ – молекулярный вес пара.

Паровой шлейф становится видимым, когда в нём находятся капли (туман), образующиеся за счёт конденсации части продуцируемого пара. Концентрация капельной жидкости в метеорологии называется водностью. Тепло конденсации увеличивает теплосодержание шлейфа. Обозначим:

ρ_{κ} – водность
 γ – недосыщенность
 c_n, c_e – удельную теплоёмкость пара, воздуха
 r – теплота парообразования
 T_0 температура пара на устье
 T, T_2 – температура воздуха, в шлейфе; $\Delta T = T_2 - T$
 β – соотношение массы пара к сухому воздуху в атмосфере (см. Приложение)
 m_e – концентрация сухого воздуха (см. Приложение)

Запишем калориметрическое уравнение передачи продуцируемого тепла и теплоты конденсации к атмосферному воздуху

$$c_n T_0 \gamma + r \rho_{\kappa} = (c_n \beta m_e + c_e m_e) \Delta T \quad (2)$$

и получим из него выражение для расчёта водности

$$\rho_{\kappa} = \frac{(c_n \beta m_e + c_e m_e) \Delta T - c_n \gamma T_0}{c_n T_0 + r} \quad (3)$$

Массовый расход продуцируемого пара получим, умножая концентрацию продуцируемого пара $\gamma + \rho_{\kappa}$ на сечение шлейфа и на скорость в нём.

Умножая полученные значения массового расхода на теплоёмкость пара при температуре на устье, определяем тепловую мощность продуцируемого пара.

В табл. 1 для сравнения приводится и тепловая мощность шлейфа (которая за счёт конденсации будет больше).

Физические свойства

- Теплоёмкость пара, как 3-х атомного газа
 $c_n = 1,84755 \text{ Кдж/кг}\cdot\text{К}$
- Теплоёмкость воздуха как 2-х атомного газа
 $c_e = 1,00341 \text{ Кдж/кг}\cdot\text{К}$
- Плотность воздуха при нормальных условиях
 $\rho_{\kappa} = 29/22,4 = 1,29 \text{ кг/м}^3$
- Плотность пара при нормальных условиях
 $\rho_{\kappa} = 18/22,4 = 0,8 \text{ кг/м}^3$
- Теплота парообразования $r = 2258 \text{ Кдж/кг}$

Для расчёта будем использовались изменение свойства газов от температуры и давления в соответствии с законом идеального газа.

Так как давление в шлейфе на высоте измерения не измерялось, то оно учитывалось через высотный коэффициент. На рис. 1 представлен график изменения высотного коэффициента, построенный на основе значений среднего давления за 2013 г. по данным метеостанции Петропавловск-Камчатский.

Таблица 1. Параметры фумарол вулкана Жупановский.

	Температура на устье, Т ₀	Температура шлейфа Т	Температура воздуха Т _а	Диаметр, м D	ΔТ	скорость, м/с u	объём- ный расход в шлейфе, МЗ/с V	тепловая мощность шлейфа, МВт W _ш	недосы- щенность, кг/м ³ γ	водность кг/м ³ ρ _к	Массовый расход проду- цируемого пара, кг/с Q _п	Тепловая мощность про- дукции, МВт W
25,10.13												
Октябрьская	200	-5	-10	45	5	5,5	8747	47	0,001777	0,001803	31	12
26,10.13												
Октябрьская	200	20	-10	13	30	4	531	17	0,015876	0,010084	14	5
AR01	200	24,5	-10	10	34,5	4,5	386	14	0,021058	0,011203	12	5
AR02	200	15,5	-10	14	25,5	4,5	693	19	0,011746	0,008818	14	5
AR03	200	7,17	-10	17	17,17	4,5	1064	20	0,006276	0,006167	13	5
AR04	200	0	-10	21	10	4,5	1575	17	0,00324	0,00365	11	4
Под скалой	200	-1,2	-12	13	10,8	4	531	6	0,003083	0,004035	4	1
Доступная	200	-20	-30	60	10	4	11310	132	0,000759	0,004337	58	21
Недоступная	200	-20	-30	100*30	10	4	12500	145	0,000759	0,004337	64	24
02,07.14												
Дубль	100	49	18	4,4	31	2	26	1	0,069268	0,007134	2,0	0,4
Верхняя seg268	100	40	16	10	24	6	471	11	0,042159	0,006457	23	4
Верхняя seg227	100	62	14	7	48	5	204	10	0,134884	0,009223	29	5
Под скальная	100	26	16	5	10	5	99	1	0,015042	0,002881	1,8	0,3

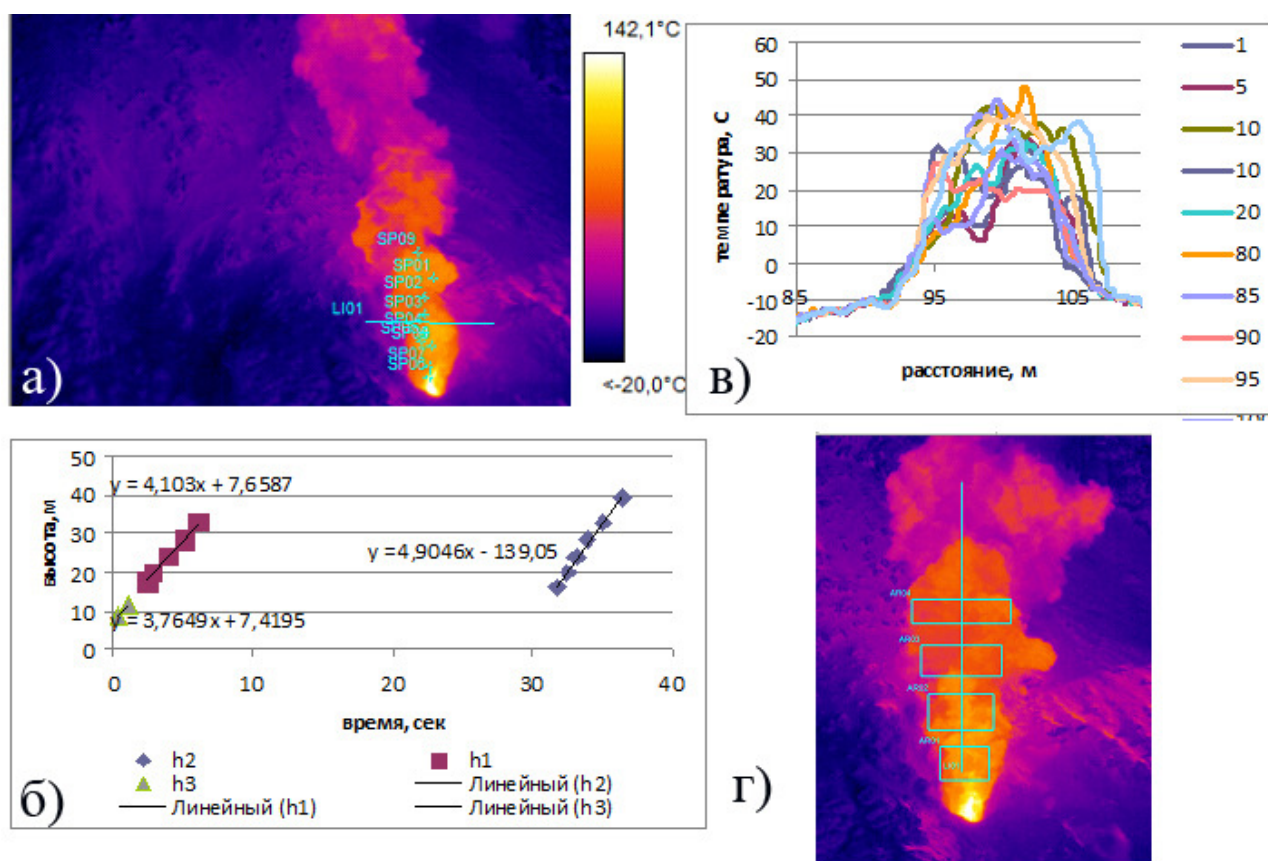


Рис. 2. Термограмма парового шлейфа фумаролы Октябрьская за 26-10-2013 (Жупановский вулкан).

Расстояние 1100 м.

а) SP – положение неоднородности в шлейфе при подъёме

б) графики подъёма неоднородностей

в) распределение температуры на профиле LI01, указанном на рис. 2а.

г) положение площадей для определения средней температуры в шлейфе.

Параметр графика – номер кадра в последовательности.

Определение параметров шлейфа

Измерения выполнялись с помощью тепловизора высокого разрешения Flir ThermaCAM SC 640 с матрицей 640*480. Анализировались последовательности термограмм. Без компьютера тепловизор запоминает последовательность в 186 кадров. Сквозность между кадрами устанавливалась, как правило, в 1 с. В комплекте с компьютером выбор сквозности и длительности регистрации не лимитирован.

На рис. 2а показано изменение расположения точек вершины купола плюма (неоднородности шлейфа) для различных кадров последовательности. С учётом масштаба изображения и сквозности термограмм строится график подъёма купола и определяется скорость рис. 2б. Среднее из полученных значений принимается за значение скорости в шлейфе.

На рис. 2в приведены графики распределения температур на профиле, показанном линией LI01 на рис. 2а. Параметром кривых является номер кадра. Полагая, что сечение шлейфа соответству-

ет кругу, найдем, что средний диаметр шлейфа равен $106 - 94 = 12$ м, а точность его определения порядка 10%.

Определение средней температуры шлейфа можно произвести по графикам рис. 2в (среднее сначала определяется по каждому графику, потом по полученными средними). При другом способе выделяем прямоугольную область, как показано на рис. 2г, и получаем среднюю температуру с помощью опции измерения средней температуры в области и затем по полученному ряду находим среднее значение за время последовательности. Высота прямоугольной области произвольная, ширина чуть меньше диаметра шлейфа на выбранной высоте.

Активность вулкана Жупановский

Фумарольная активность вулкана в 1970 г. (когда она впервые была измерена [5]) проявлялась в виде четырёх полей: внешнее северо-западное поле третьего конуса – 47 МВт, 10,5 кг/с, воронка Доступная – 115 МВт, 35 кг/с, воронка Недоступная – 96 МВт, внешнее юго-западное поле второго конуса 9,3 МВт, 3,5 кг/с. Выделены два



Рис. 3. Вид с Халактырского пляжа 25 октября 2013 г., фумарола Октябрьская, расстояние 46 км, высота шлейфа 300 м.

типа фумарол: высокотемпературные 410–430°С и низкотемпературные — около 96°С. Скорость пара на устье различна, в замерах встречалась и 29 м/с, но в наиболее продуктивных фумаролах составляла 1–2 м/с.

По данным тепловой аэросъёмки конфигурация фумарольных полей сохранилась к 2010 г. [3].

23 октября 2013 г. началась активизация Жупановского вулкана. На западном склоне третьей вершины вулкана Жупановского на высоте примерно 2600 м образовалась новая фумарола — Октябрьская, из которой в течение 23–24 октября 2013 г. извергались вулканический пепел и газ. 25 (рис. 3) и 26 октября (рис. 4, когда выполнялась ИК съёмка) наблюдалась только парогазовая деятельность [7].

По описанию Н.Малик фумарола находится на высоте ~2450 м н. у. м.¹ 013.html); представляет собой глубокую трещину (провал) размером 2–3х8–10 м. Температура на пирометре 2000С.

Истечение пара не стационарное. По термограммам (рис. 2) видно, что шлейф образуется плюмами, следующими друг за другом. Сквашность плюмов можно оценить по графику рис. 5; изменения во времени максимальной температуры в шлейфе. Сквашность плюмов составила 1–2 секунды. Очевидная разница максимальных температур в последовательностях на этом рисунке получается за счёт применения разных объективов. Последовательность 2623 получена при фокусе 130 мм, 2610–при фокусе 40 мм, соответственно с разными разрешениями 0,2 м и 0,74 м (при удалении 1100 м), а элемент с максимальной температурой явно меньше 0,7 м.

В июне кратер III-его конуса активизировался в виде мощных пепловых выбросов. Пепловые вы-

бросы стали носить эпизодический характер с периодичностью от 30 до 90 мин. Постройка III-его конуса была разбита трещинами субширотного направления. Образовались многочисленные фумаролы. Это состояние было зафиксировано при облёте 13 июня 2014 г. [7] и представлено на рис. 6.

Дальнейшая активность вулкана характеризуется деятельностью прежних и новых фумарольных выходов на раскрывшихся трещинах и в кратере III-его конуса, и эпизодическими пепловыми выбросами из него; чаще высотой в первые сотни метров и существенно реже в несколько километров. Продолжающаяся интенсивность продукции ниже, чем в июне-июле, но не достаточно данных, чтобы оценить тенденцию к уменьшению или росту продукции. Если же признать, что максимум активности был в июне-июле, то вряд ли следует ожидать развития извержения, скорее будет возвращение к начальной фумарольной активности.

В табл. 1 представлены результаты анализа термограмм последовательностей, полученных для определения мощности продукции отдельных фумарол.

Обсуждение результатов

1. В рассматриваемой модели теплообмена в паровом шлейфе различаются тепловая мощность шлейфа и тепловая мощность продуцируемого пара, т. е. в общей тепловой мощности шлейфа выделяется та доля, которая нагревает атмосферный воздух за счёт охлаждения продуцируемого пара, а не за счёт его конденсации

2. Сравнение результатов, с ранее полученными в [5], не указывает на уменьшение тепловой мощности со временем, а скорее указывает на то, что измеряются разные потоки. При наземных работах определяется мощность всего фумарольного поля; а в нашем случае только выноса пара, участвующего в формировании шлейфа. Поэтому логично было бы сопоставить с мощностью отдельных (крупных) фумарол. Но и они отдельно в [5] не определены. Так в воронке Доступная авторами выделяются пять площадей в районе Главной фумаролы, и из них две площади в 50 и 20 м² с выносом 50 и 40 МВт. При этом «высокотемпературные фумаролы представляют собой площадки размерами в несколько метров, покрытые пористой каменной массой, через многочисленные отверстия которой выходит низконапорный перегретый пар». То есть по терминологии [6] эти аномалии не являются сосредоточенными источниками тепла. Кроме того не указано, что измерение скорости и температуры производилось на одном уровне от поверхности и в пару, а не в смеси с воздухом и т. п.

3. Фумарола Октябрьская за 26 октября 2013 г. оказалась удачным, практически идеальным объектом для демонстрации методики измерений. Можно полагать, что измерение тепловой мощности продукции воспроизводится с погрешностью не более 20%. Такая методика рекомендуется, если не для из-

¹http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messaages/2013/Gupanovsky_261

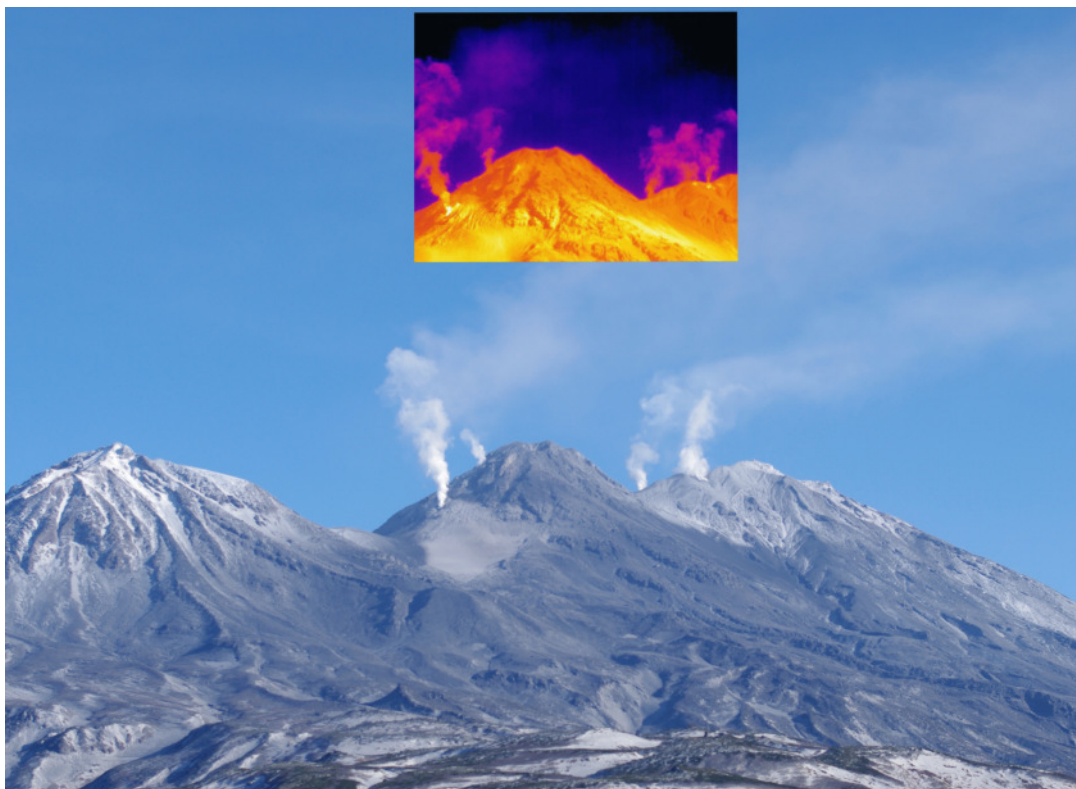


Рис. 4. Вулкан Жупановский 26 октября 2013 г. Видны паровые шлейфы (слева направо) фумарол: Октябрьская, внешнего северо — западного термального поля III-его конуса, Доступная, Недоступная. На тепловом снимки выделяются ещё и термоаномалии внешнего юго-западного склона II-ого конуса (светлые точки на гребне под фумаролой Недоступная).

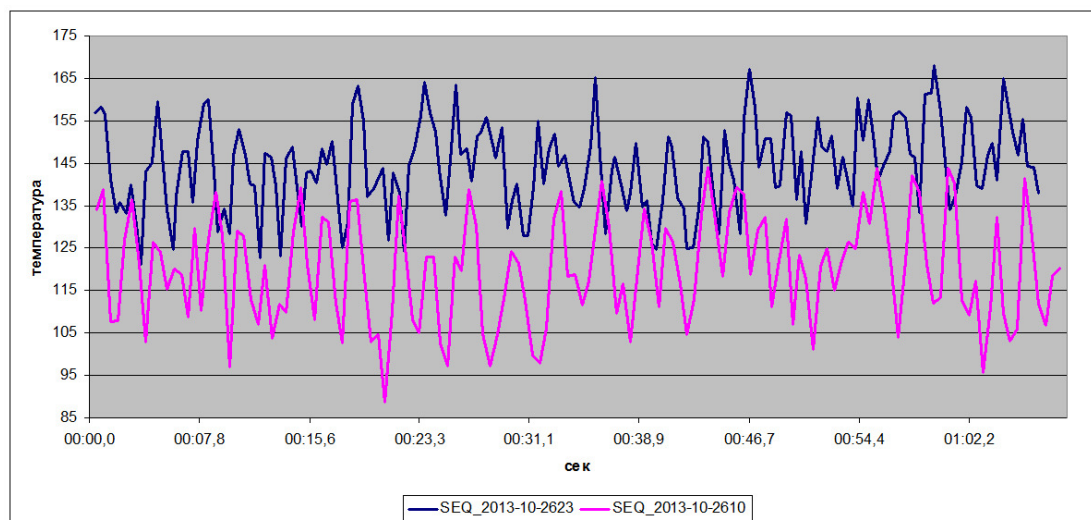


Рис. 5. Графики максимальной температуры на устье фумаролы Октябрьская демонстрируют пульсационных характер истечения. Последовательность 2623 получена при фокусе объектива тепловизора 130 мм, последовательность 2610-при фокусе 40 мм.

мерения абсолютного значения тепловой мощности, то по крайней мере как количественный параметр её изменения во времени

4. Интенсивность Октябрьской фумаролы 25 октября 2013 г. была выше, чем на следующий день, 26 октября. Её деятельность прекратилась в конце

мая 2014 г. до того как 6–7 июня произошло образование системы трещин на западном склоне III-его конуса [7].

5. Тепловая мощность и массовый расход продукции фумарол Доступная 21 МВт (58 кг/с) и Недоступная порядка 24 МВт (64 кг/с) существенно пре-

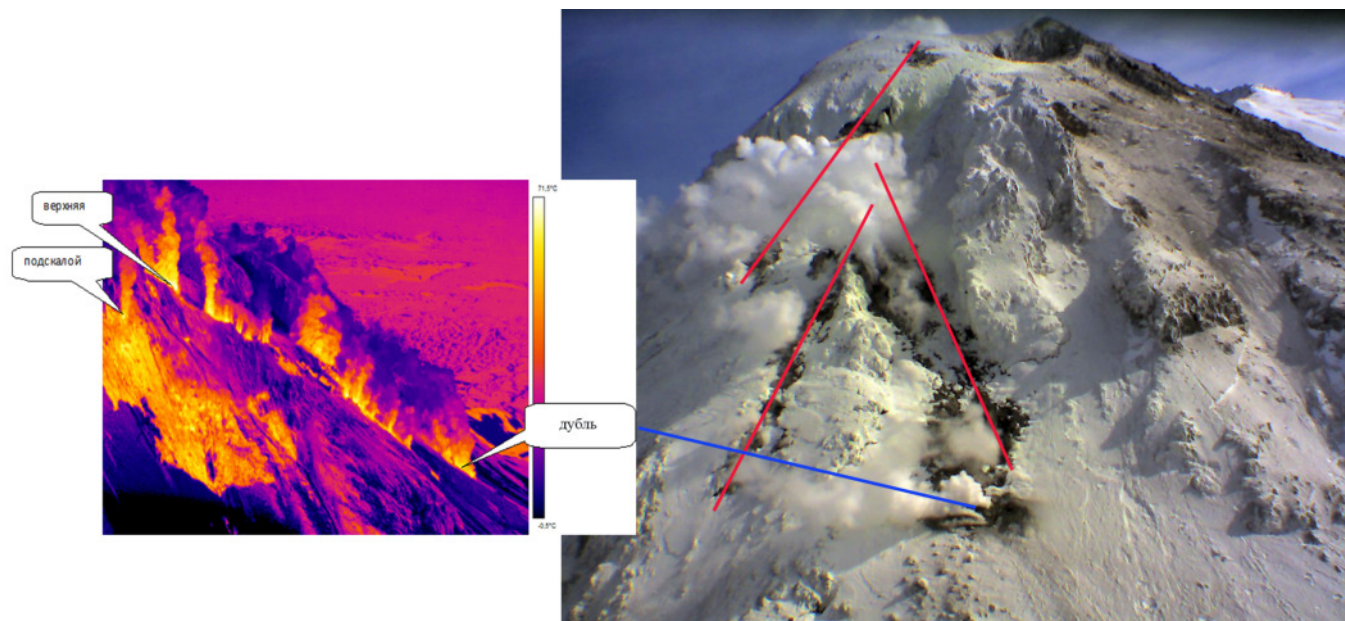


Рис. 6. Термограмма западного склона III-го конуса вулкана Жупановский 2 июля 2014 г., после июньской активизации. Слева, с фумаролой Под скальная фиксируется область активизации, на месте ранее существовавшего внешнего северо-западного термального поля. Многочисленные фумарольные и термоаномалии фиксируются на фотографии за 17 октября 2014 г. как трассирующие три линейных нарушения субширотного простирания. Наиболее мощная фумарола — Верхняя. Дубль — фумарола получила название так как первоначально казалось, что это Октябрьская.

вышает тепловую мощность и расход новообразованных фумарол Октябрьская <12 МВт (<31 кг/с), Верхняя <5 МВт (29 кг/с), но новообразованные не могли образоваться за счёт падения расхода постоянно действующих.

Список литературы

1. А.П Горшков, Слёзин Ю. Б. «Тепловая мощность вулкана Жупановский в 1970 г.»//Бюлл. вулк. ст. № 48, 1972 г., сс.29–32
2. Дрознин В. А., Дубровская И.К. Тепловизионные исследования вулканов Камчатки, вулкан Жупановский. Региональная конференция ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, март 2011 г. сс 65
3. Дрознин В. А., Дубровская И. К. Фумарольная активность вулкана Авачинского в 2004–2005 гг. (Дистанционные измерения).// Материалы Международного симпозиума по проблемам эксплозивного вулканизма, г. Петропавловск-Камчатский, март 2006 г. сс 120–126
4. Дрознин В. А. Способ определения массового расхода водяного пара на вулканах. Патент № 2511 024 6 февраля 2014 г.
5. Иванов В. В. Об облаках парогазовых извержений и фумарол. //Вулканология и сейсмология, 1988, № 4 С. 37–50
6. Муравьёв 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.
7. Самойленко С. Б., Мельников Д. В., Чирков С. А., Маневич Т.М. Активизация Жупановского вулкана в 2013–2014 гг../КРАУНЦ, 2014, 1, Вып.№ 23, сс 21–26