

УДК 551.23(571.66)

ГИДРОТЕРМЫ КАЛЬДЕРНОГО КОМПЛЕКСА ВУЛКАНА КСУДАЧ (КАМЧАТКА)

Г.Ф. Пилипенко, А.А. Разина

Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: razina@kcs.iks.ru

Горячие источники вулкана Ксудач на южной Камчатке известны с давних времен, посещались многими исследователями, но специально никогда не изучались. В результате об этих гидротермах создано представление, как о небольших источниках на берегу кальдерного озера и слабых паровых струях на экструзивных куполах [3, 5, 8]. Однако, при детальном обследовании термопроявлений, оказалось, что они представляют собой крупный очаг разгрузки высокотемпературной гидротермальной системы, длительно развивающейся в недрах кальдерного комплекса [6].

Формирование вулкана Ксудач началось на границе раннего и среднего плейстоцена. В результате длительной эксплозивно-эффузивной деятельности был образован стратовулкан высотой до 2000 м, диаметром основания 25 км, с пологими внешними склонами. В позднем плейстоцене-голоцене вулкан становится центром катастрофических кальдерообразующих извержений, сопровождающихся выбросом огромных масс пирокластического материала андезит-дацит-риолитового состава. В результате на вершине массива возник сложный комплекс кальдер [4, 7, 8]. На месте взрывопробальных воронок, последовательно возникавших одна в другой, образовалась полигенная кальдерная депрессия площадью 65 км², глубиной до 700 м, с крутыми бортами и холмистым дном. Впадины в дне заполнены озерами. Система озер и река Теплая формируют поверхностный сток из кальдерной депрессии.

Кальдерные озера.

Современное озеро Ключевое – реликт праязера, заполнявшего голоценовые кальдеры до начала формирования (~1600 л.н.) конуса Штюбеля в северной части этого водоема. По мере роста конуса кальдерное озеро меняло конфигурацию и его площадь сокращалась. В итоге, в южной части озеро сохранило очертания, близкие прежним, а в северной – превратилось в узкую протоку между новым конусом и восточным бортом кальдеры. Последнее

очень мощное извержение в марте 1907 г. привело к формированию на конусе взрыво-провального кратера. Через разрушенную северную стенку кратер заполнился водой из кальдерного озера. Образовались два разделенных перемычкой озера. Представление о размерах озер, глубине и рельефе их дна дает рис. 1.

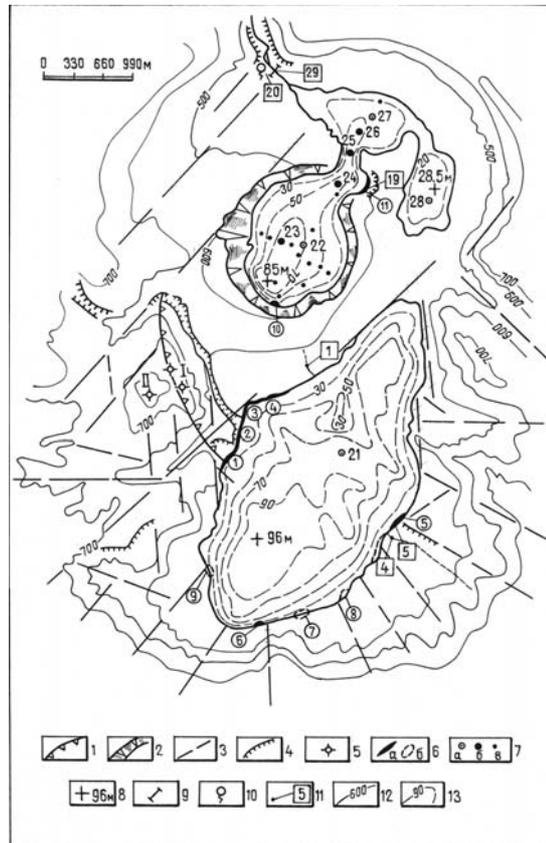


Рис. 1. Структурная схема участков разгрузки гидротерм в кальдере Ксудач: 1 – фрагмент бровки бортового уступа одной из голоценовых кальдер; 2 – кратерные стенки оз. Штюбеля; 3 – предполагаемые тектонические нарушения; 4 – обрывы (тектонические, эрозийные); 5 – выходы паровых струй; 6 – участки разгрузки термальных вод: заверенные (а), предполагаемые (б); 7 – точки вертикального зондирования озер: опорные (а), их номера; фиксирующие донную разгрузку гидротерм (б), их номера; другие (в); 8 – максимальные глубины озер, м; 9 – гидрометрический створ; 10 – холодный грунтовый источник; 11 – место отбора пробы воды и номер водопроявления; 12 – изогипсы, м; 13 – изобаты, м (промеры глубин эхолотом, июль 1991 г.) - неопубликованные данные А.С. Николаева, С.Н. Синякова, С.И. Куренкова (КамчатНИРО). Прочие обозначения: I и II - термальные площадки экструзий Парящий Уступ и Парящий Гребень; цифры в кружках – номера участков разгрузки гидротерм (1-3 – Горячий пляж; 4 – Каменистый; 5 – Восточный; 6-9 – Южно-Бережные; 10, 11 – озера Штюбеля).

Озеро Ключевое. Абсолютная отметка водного зеркала – 416.8 м, водосборная площадь 44 км². Озеро не имеет видимого поверхностного стока, хотя в него впадает до десятка временных водотоков.

Озеро Штюбеля. Абсолютная отметка водного зеркала 415 м. Поверхностный сток в озеро очень мал. Однако из озера вытекает река с расходом 4.3 м³/с (август, 1991 г.). Водосборная площадь озера (16 км²) явно недостаточна, чтобы обеспечить такой речной сток.

Следовательно, водное питание озера Штюбеля осуществляется, в основном, за счет фильтрации воды из озера Ключевое.

Термопроявления располагаются по берегам озер Ключевое и Штюбеля. Вся термальная вода стекает в озера. Ранее было известно два участка разгрузки гидротерм: участки 2 и 10 (рис. 1). Теперь выделено одиннадцать участков (рис. 1) и установлены главные очаги

разгрузки гидротерм: Горячий пляж на западном берегу оз. Ключевое и кратерное оз. Штюбеля [6].

Горячий пляж. Тепловая аномалия захватывает всю ширину песчаного пляжа и продолжается вдоль берега как на юг, так и на север от известного ранее участка разгрузки терм. Общая протяженность ее составляет 1000 м. Разгрузка термальных вод происходит у кромки озера из песка и имеет характер линейного высачивания. Вода с температурой более 50°C имеет видимый сток в озеро. Если температура воды ниже 50°C , сток фиксируется лишь по нагреву воды в озере у берега. В северной части, из-под лавового потока, перекрывающего песчаный пляж, в нескольких местах на уровне зеркала озера вытекает горячая вода. Таким образом, собственно коренных выходов термальной воды нет, и вся она до появления на поверхности смешивается в разных пропорциях с холодными водами рыхлых покровных отложений (рис. 2).

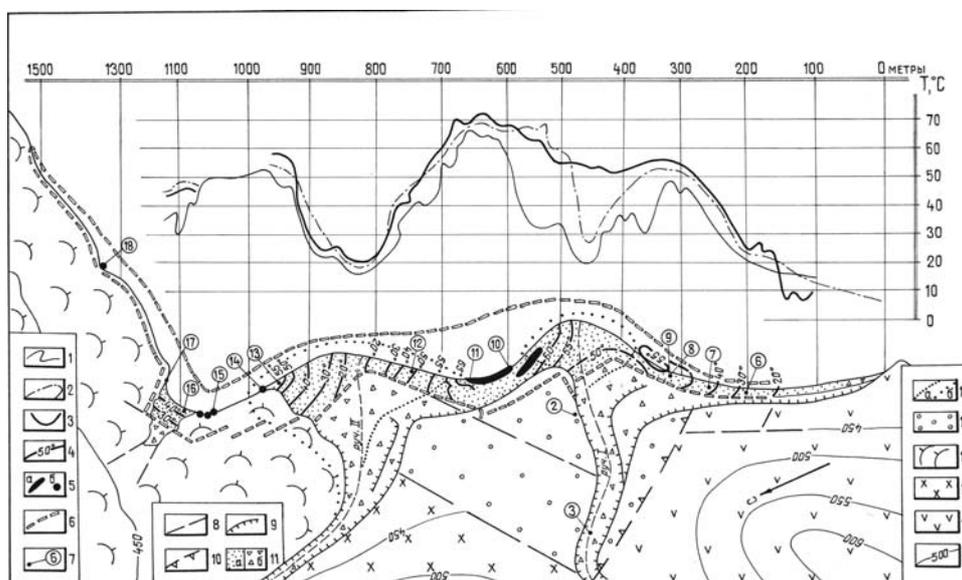


Рис.2. Схематический план и температурные характеристики очага разгрузки гидротерм на западном берегу оз.Ключевое (участки – 1-4): 1 – кривая изменения температуры воды в мелких закопущках на берегу в 0.3 м от зеркала озера; 2 – кривая изменения температуры грунта на глубине 1 м в зондировках на берегу, в 1 м от зеркала озера; 3 – то же, в дне озера, в 1 м от берега; 4 – изотермы по замерам температуры грунта на глубине 1 м (площадное зондирование) $^{\circ}\text{C}$; 5 – участки максимального прогрева грунта ($T > 68^{\circ}$) на глубине 1 м (а), термальные источники (б); 6 – видимые границы зон прогрева и разгрузки термальных вод (по отсутствию снежного покрова на берегу, по польнье в озере – аэрофотосъемка 1984 г., до начала снеготаяния в кальдере); 7 – место отбора пробы воды и номер водопроявления; 8 – предполагаемые тектонические нарушения; 9 – эрозионные обрывы; 10 – тектонический (?) уступ; 11 – песчаный пляж (а), современные аллювиально-пролювиальные отложения (б); 12 – контуры конусов выноса: видимые (а), скрытые (б); 13 – рыхлые озерные отложения; 14 –

лавово-пирокластические потоки конуса Штюбеля; 15 – дациты экструзии Парящий Уступ; 16 – андезиты экструзии Домашняя; 17 – изогипсы (м).

Главными термовыводящими каналами служат разломы, пересекающие берега озера и экзоконтакты экструзии Парящий Уступ, примыкающей к Горячему пляжу. По системе трещин в привершинной части экструзии выходят слабые струи пара (газовая составляющая, об. %: N₂ - 82.0, O₂ - 16.0, Ar - 1.15, CO₂ - 0.81) с температурой до 96⁰С. В таком случае, гидротермы с температурой, близкой к точке кипения, разгружаются под озерной террасой, перекрывающей подножие экструзии. Смешиваясь с холодными грунтовыми водами они образуют горячие водные потоки, направленные к оз. Ключевое.

В кратерном озере Штюбеля разгрузка терм тяготеет к месту обрушений, по воронке взрыва, северной стенки кратера. На восточном склоне воронки у подножия экструзии выходят Штюбельские источники (температура 38.5⁰С, линейные высачивания на протяжении 40 м). На южном берегу озера известны выходы воды с температурой 25⁰С [3].

Химический состав вод. Метеорные, поверхностные и грунтовые воды, определяющие местный гидрохимический фон, имеют очень низкую минерализацию (11-37 мг/л). При этом концентрация Cl⁻ составляет 0.7-1.4 мг/л, а SiO₂ - 0.1-2.6 мг/л. Химический состав гидротерм отражает особенности их разгрузки (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав воды термальных источников, озер и реки Теплая

Названия источников и озер	T, °C	pH	M общ	Формула ионного состава, экв. %	Cl ⁻	SiO ₂
Ксудачские	68	7.8	873	HCO ₃ 82Cl15/Na82Ca7K6	44	112
Оз. Ключевое, у поверхности (т.21)	15	7.5	168	HCO ₃ 54SO ₄ 30Cl16/Na65Ca24Mg9	9.2	28
Штюбельские	38	6.1	1011	HCO ₃ 50Cl29SO ₄ 21/Na77Mg10Ca8	118	88
Оз. Штюбеля, у дна (т.23)	?	8.0	445	Cl34SO ₄ 33HCO ₃ 33/Na59Ca22Mg16	62	50
Оз. Штюбеля, у поверхности (т.22)	16	7.9	310	SO ₄ 43HCO ₃ Cl18/Na52Ca28Mg18	22	40
Река Теплая	13.5	6.7	315	SO ₄ 43HCO ₃ 38Cl18/Na48Ca33Mg17	21	40

Ксудачские источники (Горячий пляж). При максимальной температуре имеют очень простой химический состав. Это слабо щелочная кремнистая хлоридно-гидрокарбонатная натриевая вода с невысоким содержанием микрокомпонентов (F - 1.5, Li - 0.2, As - 0.1, В - 2.4 мг/л). Газосодержание очень низкое. Состав спонтанного газа (об. %): N₂ - 87.0, O₂ - 4.24, Ar - 1.10, CO₂ - 7.45.

Штюбельские источники. Характеризуются более сложным химическим составом. В термах повышается содержание Cl, Na+, В, CO₂. Относительно низкая температура и появление в воде ионов сульфата и кальция объясняется смешением глубинных терм с приповерхностными холодными водами, тяготеющими к вулканитам конуса Штюбеля, содержащим тонкодисперсную серу и гипс (табл. 1). Состав спонтанного газа (об.%): N₂ - 66.5, O₂ - 8.45, Ar - 0.85, CO₂ - 24.15.

Озерные воды представляют собой смесь поверхностных, грунтовых и термальных вод, в которой доля термальной составляющей, если судить по содержанию Cl, близка 20% (табл. 1).

В озере Ключевое (точка 21) состав воды постоянен от поверхности до дна. Вода слабо щелочная с низкой минерализацией. Придонная температура воды 4⁰С.

В озере Штюбеля концентрация всех компонентов с глубиной увеличивается и общая минерализация воды возрастает. Придонная температура воды в т.22 составляет 7.2⁰С. В нескольких местах в придонном слое обнаружены признаки разгрузки термальных вод. В этих точках озерная вода обогащена хлоридами натрия и по соотношению компонентов минерализации близка Штюбельским источникам (табл. 1, т.23). При зондировании озера в ряде точек со дна были подняты теплые обломки пород. На водной поверхности кратерной части озера наблюдаются выходы спонтанного газа. Состав (об.%): N₂ - 89.5, O₂ - 8.46, Ar - 0.53, CO₂ - 1.47, He - 0.02, CH₄ - 0.02. Преобладают N₂ и O₂, отмечается высокое содержание He. Низкое содержание CO₂ в сравнении со Штюбельскими источниками объясняется растворением газа в толще холодных вод озера и частичным переходом в HCO₃⁻ (табл. 2).

Таблица 2. Дебит и тепловая мощность гидротерм.

Участок разгрузки	Дебит, л/с	Q		
		тыс. ккал/с	МВт	%
1	110	7,5	31,4	22,5
2	164	11,2	46,9	33,7
3	110	7,5	31,4	22,5
4	46	3,1	13,0	9,3
5-9	60	4,0	16,7	12,0
∑ 1-9	490	33,3	129,4	100%
оз. Ключевское	560*	38,0	159,0	68,0
оз. Штюбеля	500*	18,0	75,4	32,0
∑	1000	56,0	234,4	100%

* Гидрохимический метод подсчета дебита, с учетом подводной разгрузки термальных вод в оз. Ключевское и Штюбеля. Дебит, л/с в пересчете на T = 68⁰С.

Водная разгрузка гидротерм и их тепловая мощность.

Подсчет дебита термальных вод, стекающих в озеро Ключевое, сделан по данным прямых полевых измерений, результаты которых отражены на рисунке 2. Расчеты дебита ос-

нованы на определении модулей линейного стока горячеводной составляющей (л/с на один погонный метр) для воды разной температуры и промерах длины участков их разгрузки (видимой и грунтовой). Модули линейного стока оцениваются в 0.30-0.08 л/с на один погонный метр, при температуре воды, меняющейся от 72 до 20⁰С.

Делается допущение, что величина стока инфильтрационной воды в озера пропорциональна их водосборным площадям и что это соотношение сохраняется в их суммарном стоке по реке Теплая. В таком случае, в озеро Ключевое стекает, а затем, путем подземной фильтрации, перетекает в озеро Штюбеля 3.1 л/с воды. Принятое допущение позволяет оценить дебит термальных вод, с учетом подводной разгрузки, в озерах Ключевое и Штюбеля. Используются гидрохимические методы подсчета. Все расчеты ведутся по концентрации Сиона в водных растворах. Получены неожиданные результаты (табл. 2).

Озеро Ключевое. Береговая разгрузка гидротерм оценивается в 490 л/с (полевые измерения). Общий приток гидротерм - 560 л/с (гидрохимический метод подсчета). Это означает, что разгрузка гидротерм сосредоточена на берегах озера, а в донной части выходов горячих вод нет или почти нет.

Озеро Штюбеля. Суммарная разгрузка в озеро термальных вод, аналогичных Штюбельским источникам, оценивается в 500 л/с (гидрохимический метод подсчета). Дебит береговых источников - 20-25 л/с (полевые наблюдения). Вывод однозначен, основная разгрузка терм происходит в донной части кратерного озера.

По величине разгрузки термальных вод сделана оценка конвективного выноса тепла (тепловой мощности) по отдельным термопроявлениям и по кальдерной депрессии в целом.

Общая тепловая мощность гидротерм составляет ~230 Мвт. Максимальное количество тепла (~50% от общего) выносят термы Горячего пляжа, термы озера Штюбеля ~35%. Удельный вынос тепла на Горячем пляже составляет ~790 Вт/м². По показаниям гидрохимических геотермометров (Na-K, Na-K-Ca) температура на глубине формирования гидротерм ~180⁰С.

Приведенные выше данные дают основание утверждать, что в недрах кальдерной депрессии Ксудач существует мощная высокотемпературная гидротермальная система.

Выводы. Кальдерная гидротермальная система сформировалась как наложенная гидрогеологическая структура в недрах вулкана Ксудач в плейстоцен-голоценовое время. Транскоровые разломы, с которыми связано развитие вулкана, в течение длительного времени обеспечивают приток в систему глубинного тепла и вещества.

По нашим представлениям, кальдерную депрессию пересекает система разрывных нарушений субмеридионального простирания, подобная Карымско-Академической [1]. Она контролирует линейный ряд эруптивных центров голоценовых кальдер. Здесь расположены

современные озера Ключевое и Штюбеля. Ленияменты того же простирания прослеживаются в их очертаниях и рельефе дна. По берегам озер происходит открытая разгрузка термальных вод (рис. 1).

Горячий пляж - самый мощный и длительно действующий очаг разгрузки гидротерм, по крайней мере, со времен К.Дитмара. В кратерном озере Штюбеля термовыводящие трещины образовались в процессе катастрофического извержения конуса Штюбеля в марте

1907 г. Разгрузка терм в настоящее время идет по трещинам в стенках и на дне кратера, на треть заполненного озером.

Геолого-структурные позиции, химический состав и высокая тепловая мощность гидротерм дают основание полагать, что они являются производными глубинных вод, близким аналогом которых являются кипящие источники Карымского озера в кальдере Академии Наук. Глубинные термы преобразуются по пути к поверхности при смене Р-Т условий и смешении с инфильтрационными водами.

Поверхностная разгрузка гидротермальной системы осуществляется, в основном, низкотемпературными термами. Воды с температурой менее 50⁰С выносят 75% тепла. Однако, по тепловой мощности (230 Мвт) и масштабу выноса минеральных компонентов эта система сопоставима с такими крупнейшими гидротермальными системами, как Узонская (270 Мвт), Академии Наук (130 Мвт), Карымская (146 Мвт) [1, 2].

Полученные характеристики могут быть использованы как исходные при возможных их изменениях в связи с активизацией вулкана Ксудач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 3-27.
2. Пилипенко Г.Ф. Парогидротермы кальдеры Узон // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 237-266.
3. Дубик Ю.М., Меняйлов И.А. Газогидротермальная деятельность кальдеры Ксудач // Бюл. Вулканол. станций. 1971. № 47. С. 40-43.
4. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 28-53.
5. Пийп Б.И. Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки // Тр. Камчатской вулканол. станции. 1947. Вып. 3. С. 89-134.

6. Пилипенко Г.Ф., Разина А.А., Фазлуллин С.М. Гидротермы вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С.
7. Селянгин О.Б. Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 16-27.
8. Шеймович В.С. Вулкан Ксудач в августе 1963 г. // Бюл.вулканол. станций. 1966. № 41. С 25-28.