

УДК 551.23(571.66)

ГИДРОТЕРМЫ КАЛЬДЕРЫ ВУЛКАНА КСУДАЧ

© 2001 г. Г. Ф. Пилипенко*, А. А. Разина*, С. М. Фазлуллин**

*Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

**Институт вулканогеологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 18.08.2000 г.

Изложены новейшие данные о состоянии гидротермальной активности в кальдере Ксудач (Южная Камчатка). Впервые дается описание всех известных термопроявлений с детальными схемами главных из них. Обсуждаются особенности разгрузки термальных вод. Приводятся сведения о химическом составе, дебите и выносе тепла по отдельным группам источников, по озерам и по кальдере в целом. На основе анализа новых данных прогнозируется существование в недрах кальдерного вулкана Ксудач мощной высокотемпературной гидротермальной системы.

Ксудач – это расположенный на юге Камчатки вулканический массив, увенчанный глубокой кальдерной котловиной с обширными озерами и горячими источниками на их берегах. Он выделяется среди других вулканов, в первую очередь, благодаря катастрофическим извержениям в голоцене, сформировавшим сложный вершинный кальдерный комплекс. Последнее, самое мощное кальдерообразующее извержение произошло всего 1700–1800 ¹⁴C лет назад [6]. Именно эти явления и привлекают обычно внимание исследователей, отодвигая на второй план, казалось бы, заурядную гидротермальную активность.

Горячие источники в кальдере Ксудач¹ известны с давних времен, но до сих пор не сделано сколько-нибудь подробного специального описания этих термопроявлений, а имеющиеся публикации составлены на основе попутных наблюдений исследователей, решавших иные задачи. В результате о гидротермах Ксудача создано представление как о небольших источниках на берегу кальдерного озера и слабых паровых струях на экструзивных куполах. Эти сведения были механически перенесены в гидрогеологические каталоги и сводки по ресурсам термальных вод.

В предлагаемой статье в свете современных знаний о геологическом строении и истории вулканизма района обобщены результаты геотермических, гидрохимических и лимнологических исследований, проведенных авторами в разные годы в кальдере Ксудач. Анализ этих данных заставляет кардинально изменить бытующие представления и рассматривать термопроявления в кальдере Ксудач как энергетически мощный очаг разгрузки высокотемпературной гидротермальной систе-

мы, длительно развивающейся в недрах кальдерного комплекса.

Изученность термопроявлений. Ксудачские источники уже в 1854 году были отмечены “со слов охотников” К. Дитмаром на составленной им “Карте вулканов и термальных источников Камчатки” [3]. Н.Г. Келль и С.А. Конради, посетившие вулкан в 1910 г., сообщили о существовании лишь паровых струй в кальдере [5]. Первое краткое описание и гидрохимическое опробование источников на западном берегу кальдерного озера было сделано Б.И. Пийпом в 1937 г. [7]. В 1963 г. источники обследовал В.С. Шеймович [10]. В 1968 г. вулканогеологи И.А. Меняйлов и Ю.М. Дубик обнаружили теплые источники на южном берегу озера Штюбеля [4]. Все эти исследования сводились к осмотру источников и отбору единичных проб воды и газа. На основании этих очень ограниченных данных в каталоге термальных источников Камчатки показана температура Ксудачских источников 70°С², дебит – 4 л/с, потенциальные ресурсы – 30 л/с. Е.А. Вакин, посетивший источники в 1990 г., сообщил, что по его оценке их дебит в десятки раз превосходит эту цифру.

Проведенные исследования. В восьмидесятые годы кальдера Ксудач была использована НПО “Энергия”, а позже ЦНПО “Комета” как полигон для отработки дистанционных (авиационно-космических) методов обнаружения геотемпературных аномалий. В рамках этих программ на полигоне выполнен большой комплекс наземных и авиационных наблюдений. Проведены аэрофотограмметрические работы, создана топографическая карта кальдеры масштаба 1 : 20000 (В.Н. Двигало и др.). А.А. Разиной выполнен комплекс наземных термометрических наблюдений. Термометричес-

¹ “Кальдера Ксудач” – название, традиционно употребляемое вулканогеологами [4, 7, 10]. В действительности, это сложная полигенная кальдерная депрессия [6, 9].

² Здесь и далее положительные температуры измерялись в °С.

кие съемки включали измерения температур в зондировочных шпурах глубиной до 1.0 м по сетке и по профилям с шагом 20 м, со сгущением сетки до 5 м на аномальных участках. Замеры делались на берегу озер и на мелководье в прибрежной зоне. В данной работе использованы результаты замеров по 200 точкам. В специально оборудованных пунктах велись режимные наблюдения суточного и сезонного хода температур грунта на глубине до 1.5 м. Эти данные применялись для внесения поправок при обработке результатов съемки. В августе 1991 г. в кальдере Ксудач при финансовой поддержке международного общества “Подводный мир” работала комплексная экспедиция под руководством С.М. Фазлуллина. В составе этой экспедиции Г.Ф. Пилипенко проведены гидрогеологические исследования по методике, успешно применявшейся ранее при изучении крупных гидротермальных систем [2]. На Горячем пляже повторена термометрическая съемка по сетке 20 × 20 м с измерением температур на глубине от 0.3 до 1.2 м, сделаны массовые замеры температур термальных и холодных источников и линейной разгрузки вод по периметру озер. При этом были измерены дебиты основных термальных источников и определена величина рассредоточенной разгрузки гидротерм в озера. Такая разгрузка оценивалась с применением “модулей линейного стока” (л/с на погонный метр). Для определения модулей измерялся сток в озеро из дренажных канавок фиксированной длины, прокопанных вдоль берега на участках выхода вод с максимальной температурой и минерализацией. На участках с меньшей температурой модули линейного стока определялись путем экстраполяции. Измерен также расход реки Теплой на выходе из кальдеры. Гидрохимическое опробование проводилось с учетом результатов термометрических наблюдений. Пробы воды отбирались как в источниках с максимальной температурой, так и в более холодных. Для определения “гидрохимического фона” опробованы холодные источники, ручьи, талые воды снежников, вода озер и реки на истоке из кальдеры.

С.М. Фазлуллиным с сотрудниками проведено вертикальное температурное и гидрохимическое зондирование озер Штюбеля и Ключевое на глубины до 82 м с применением стандартного гидрометрического оборудования. В статье рассмотрены результаты зондирования по 22 станциям.

История формирования вулкана. Современные представления исследователей о геологическом строении и эволюционном развитии вулкана Ксудач неоднозначны [6, 9]. Главная причина – исключительно сложное строение кальдерного комплекса этой вулканической постройки (рис. 1).

Предположительно, формирование вулкана Ксудач началось на границе раннего и среднего плейстоцена. В результате длительной экспло-

зивно-эффузивной деятельности был образован стратовулкан высотой до 2000 м с диаметром основания ~25 км. В позднем плейстоцене-голоцене этот вулкан становится центром катастрофических кальдерообразующих извержений, сопровождавшихся выбросом огромных масс пирокластического материала андезит-дацит-риолитового состава. По частоте и мощности голоценовых кальдерообразующих извержений Ксудач не имеет аналогов среди других вулканов Камчатки [6]. В результате этих извержений на вершине массива возник сложный комплекс полностью или частично вложенных друг в друга кальдер. Характер вулканической активности циклично сменялся, и внутри самой ранней кальдерной котловины последовательно возникали положительные (конусы стратовулканов) и отрицательные (кальдеры и кратеры) вулканические формы. В малых кальдерах покровные отложения налегают на неровную поверхность вулканитов провально-взрывного генезиса, заполнивших эксплозивные воронки и участки обрушений. Кальдерные котловины периодически заполнялись озерами. По реликтам древних озерных террас установлено, в частности, что вся система голоценовых кальдер заполнялась водой до уровня +650 м. Кальдерообразующие извержения в озерных условиях начинались как фреатомагматические [6, 9].

Самая молодая вулканическая постройка в кальдере Ксудач – конус Штюбеля. Его формирование началось ~1600 л. н. Эксплозивные извержения этого стратовулкана произошли 900–1000 л. н., 300 л. н. и в марте 1907 г. Последнее очень мощное извержение привело к формированию на конусе большого взрыво-провального кратера и озера в нем.

В современном виде Ксудач представляет собой глубоко эродированный усеченный конус с эллипсовидным основанием размером 18 × 22 км и пологими внешними склонами. Его вершинная часть разрушена многочисленными эксплозивными извержениями. На месте взрывопровальных воронок, последовательно возникавших одна в другой, в теле вулкана образовалась полигенная кальдерная депрессия, срезающая конус вулкана на абсолютных отметках 1000–700 м. Это чашеобразная впадина размером по верхней кромке 8 × 10 км, площадью ~65 км², глубиной до 700 м с крутыми бортами и холмистым дном. Впадины в дне заполнены двумя озерами (рис. 2).

Гидрогеологическая обстановка. Возвышающийся над окружающей местностью вулканический массив Ксудач является областью водного питания и создания напора для горизонтов подземных вод на водоразделе бассейнов рек Тихого океана и Охотского моря. В границах вершинной кальдерной депрессии сплошность пород первичной постройки вулкана сильно нарушена после-

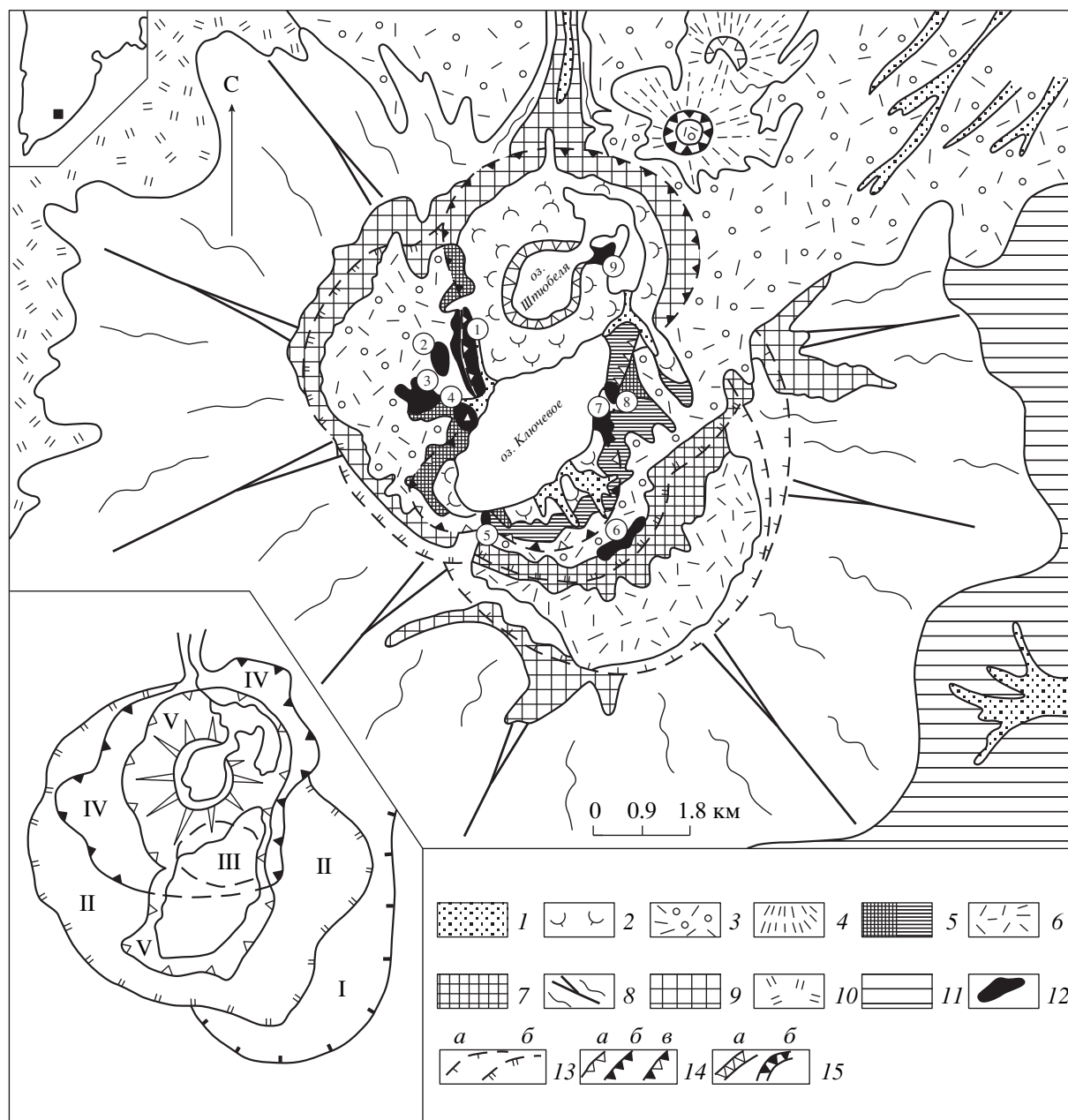


Рис. 1. Геологическая карта вулкана Ксудач, по [9] с генерализацией. Голоцен: 1 – современные аллювиальные и пролювиально-озерные отложения; 2 – эффузивно-пирокластические отложения конуса Штубеля: базальты, андезиты и их шлаки, дациты и их пемзы с локальной фацией игнимбритов, взрывные отложения; 3 – сложный пирокластический покров, связанный с образованием голоценовых кальдер: андезитовые пемзы и игнимбриты, дацитовые пемзы. Верхний плейстоцен: 4 – комплекс горы Каменистая – андезиты и преимущественно базальты; 5 – лавы (базальты и андезиты, клетчатый крап) влк. Ксудач III, озерные и пролювиально-озерные отложения (линейная штриховка) – алевропелиты, пески, гравийники. Средний, верхний плейстоцен: 6 – пирокластический покров, связанный с образованием кальдеры II – андезитовые шлаки и преимущественно дацитовые пемзы; 7 – лавы и пирокластические отложения (базальты, андезиты) влк. Ксудач II; 8 – пирокластический покров, связанный с образованием кальдеры I – спекшиеся агломератовые туфы с фациями игнимбритов и не спекшихся гравийных туфов и составом от андезитов до базальтов; 9 – эффузивно-пирокластические отложения (базальты, андезиты) влк. Ксудач I; 10 – нерасчлененные, частично перетолженные, пемзовые отложения кальдерного комплекса влк. Ксудач. Ранний плейстоцен: 11 – покровные базальты комплекса основания влк. Ксудач I. 12 – экструзии андезитов-дацитов разного возраста (цифры в кружках: 1 – Парящий Уступ; 2 – Парящий гребень; 3 – Черный Утес; 4 – Домашняя; 5 – Тонкая; 6 – Стена; 7 – Замок; 8 – Сфинкс; 9 – Незаметная). Границы кальдер разного возраста (по бровкам уступов): 13а, 13б – кальдеры I, II (плейстоцен); 14а–14в – кальдеры III-1, III-2, III-3, 4 (голоцен); 15 – кратеры: а – конуса Штубеля, б – горы Каменистая. На врезке: кальдерный комплекс (I–V) вулканического массива Ксудач [6]. Линии с залитыми зубцами – бровка кальдеры IV (6100–6000 ¹⁴С л. н.), с полными зубцами – кальдеры V (1800–1700 ¹⁴С л. н.); пунктирная линия – примерное положение кальдеры III (8800–8700 ¹⁴С л. н.); I, II – позднплейстоценовые кальдеры.

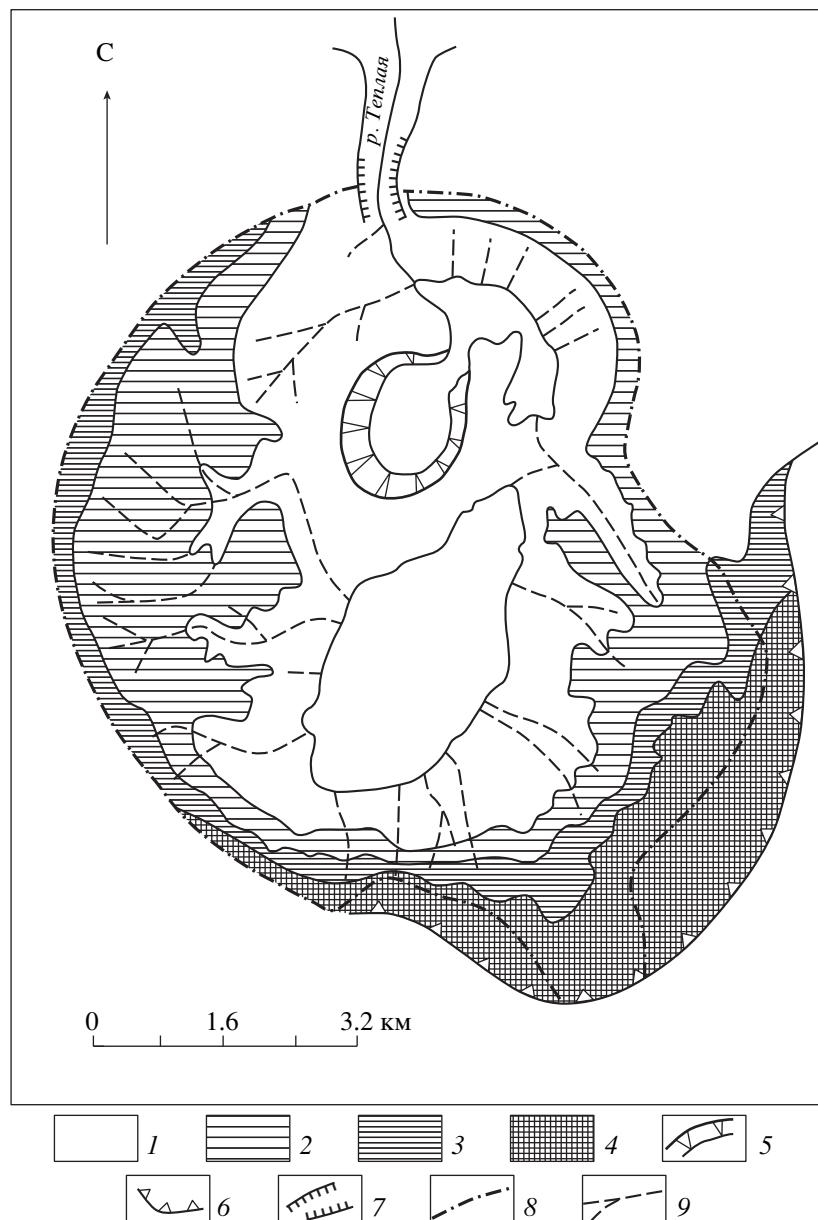


Рис. 2. Современное морфологическое строение кальдерного комплекса влк. Ксудач. Разновысокие внутрикальдерные поверхности с абсолютными отметками: 1 – ниже 650 м; 2 – 650–800 м; 3 – 800–900 м; 4 – более 900 м с отметками отдельных высот до 1079 м; 5 – кратер конуса Штюбеля; 6 – бровка уступа кальдеры I; 7 – ущелье р. Теплая; 8 – граница местной области инфильтрационного питания подземных вод кальдеры Ксудач; 9 – временные поверхностные водотоки.

довательно повторявшимися извержениями. Заполняющие депрессию отложения представляют собой сложное напластование перемежающихся водоносных и относительно водоупорных горизонтов. Секущие их магматические тела-внедрения осложняют условия циркуляции вод и в ряде случаев могут играть роль барражирующих поверхностей, определяющих восходящее движение глубинных вод [8].

По нашим представлениям, кальдеру Ксудач пересекает система разрывных нарушений суб-

меридионального простирания. Она контролирует линейный ряд эруптивных центров голоценовых кальдер. Здесь расположены современные озера Ключевое и Штюбеля. Линеаменты того же простирания прослеживаются в их очертаниях и рельефе дна. По берегам озер происходит открытая разгрузка термальных вод (рис. 3). Предположение о заложении на Ксудаче вулканического рифта высказывалось ранее в [9].

В кальдере созданы благоприятные условия для обильного инфильтрационного питания подземных

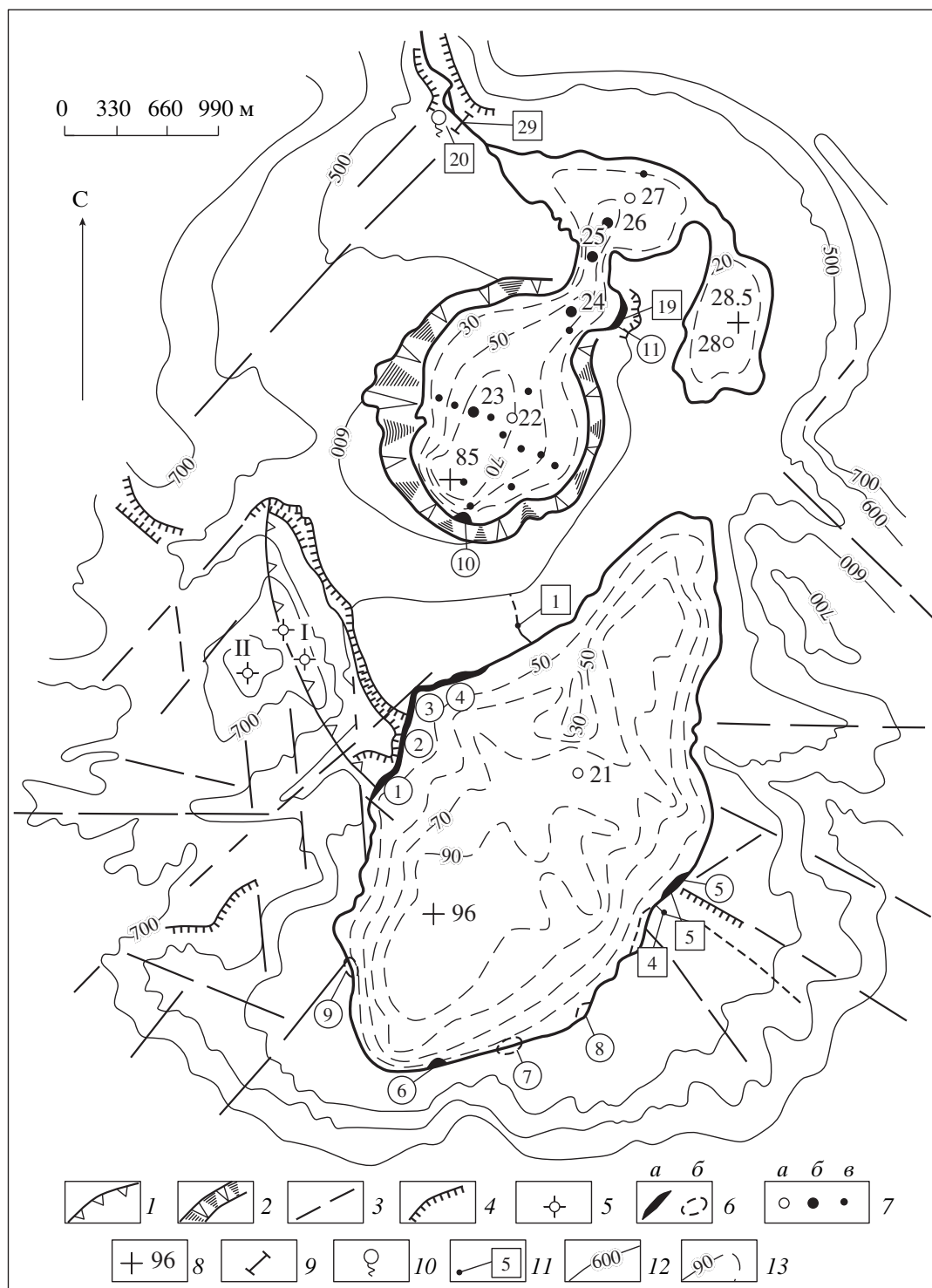


Рис. 3. Структурная схема участков разгрузки гидротерм в кальдере Ксудач: 1 – фрагмент бровки бортового уступа одной из голоценовых кальдер; 2 – кратерные стенки оз. Штюбеля; 3 – предполагаемые тектонические нарушения; 4 – обрывы (тектонические, эрозийные); 5 – выходы паровых струй; 6 – участки разгрузки термальных вод: заверенные (а), предполагаемые (б); 7 – точки вертикального зондирования озера: опорные (а), их номера; фиксирующие донную разгрузку гидротерм (б), их номера; другие (в); 8 – максимальные глубины озера, 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. Сняжкова, 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).

вод. Это вызвано несколькими причинами: хорошей проницаемостью выполняющих кальдеру отложений, большим количеством атмосферных осадков, особым режимом сезонного накопления запасов грунтовых вод и режимом их речного стока, регулируемого озерами. Система озер и река Теплая формируют поверхностный сток из кальдеры Ксудач.

Приведем ориентировочную оценку элементов водного баланса для кальдеры Ксудач. Водосборная площадь кальдеры составляет $\sim 65 \text{ км}^2$, количество атмосферных осадков около 3200 мм/год (101.5 л/с км^2). На испарение и транспирацию уходит приблизительно 280 мм/год (9.2 л/с км^2). Поверхностный и местный грунтовый сток дренируется озерами. Расход единственной вытекающей из кальдеры реки Теплой в период межени (август) равен $4.3 \text{ м}^3/\text{с}$ (модуль речного стока 65 л/с км^2). В таком случае на глубинный сток уходит около 25% (26 л/с км^2) метеорной воды.

Озера кальдеры Ксудач. Озера Ксудача заслуживают более подробного описания. Они не только создают неповторимый колорит кальдеры. Озера обусловили специфические особенности водного питания и разгрузки гидротермальной системы, от их существования зависит характер будущих извержений.

Современное оз. Ключевое – реликт праозера, заполнявшего голоценовые кальдеры до начала формирования конуса Штюбеля в северной части этого водоема. По мере роста вулкана кальдерное озеро меняло конфигурацию и его площадь сокращалась. В итоге в южной части озеро сохранило очертания, близкие прежнему, а в северной – превратилось в узкую протоку между новым вулканом и восточным бортом кальдеры. Озеро таких очертаний просуществовало до извержения конуса Штюбеля в марте 1907 г., в результате которого на конусе образовался глубокий взрывопрорывной кратер. Этот кратер через разрушенную северную стенку заполнился водой из кальдерного озера. Такой переток привел к общему падению уровня воды в образовавшейся системе озер на несколько метров. Практически синхронно взрывные отложения перекрыли исток реки из кальдеры, и уровень воды начал вновь подниматься. На рисунке, сделанном Н.Г. Келлем в 1910 г., в кальдере изображено единое озеро [5]. Б.И. Пийп в 1937 г. наблюдал уже два озера, разделенные перемычкой [7]. Именно в этот период образовались два изолированных озера, Ключевое и Штюбеля. Масштабы сброса воды зафиксированы двумя террасовидными поверхностями 3- и 7-метрового уровня, которые хорошо видны на берегах оз. Ключевое [4, 10]. Представление о размерах озер и рельефе их дна дает рис. 3.

Озеро Ключевое. Площадь водной поверхности озера – 5.4 км^2 , объем водной массы – 326.7 млн. м^3 ,

абсолютная отметка водного зеркала – 416.8 м , площадь водосборного бассейна $\sim 44 \text{ км}^2$, максимальная глубина – 96 м . Озеро заполняет плоскодонную котловину. В рельефе дна прослеживаются линейные неровности, указывающие на молодые тектонические подвижки. С внутренних склонов кальдеры в озеро впадают 10 крупных водотоков. К концу лета все они, за редким исключением, пересыхают. Озеро не имеет видимого поверхностного стока.

Озеро Штюбеля. Вода озера заполняет кратер конуса Штюбеля и впадины в лавово-пирокластических отложениях у его северо-восточного подножия. Выделяются кратерная, северная и кутовая части озера, соединенные проливами. Площади их водной поверхности – $1.37, 0.65$ и 0.47 км^2 , объем водной массы – $64.1, 11.5$ и 7.9 млн. м^3 . Глубина озера в кратерной части до 85 м , абсолютная отметка зеркала водной поверхности – 415 м , почти на 2 м ниже, чем в оз. Ключевое. Из озера вытекает река Теплая. Ее ширина $12\text{--}14 \text{ м}$, глубина до 0.6 м , расход в межень – $4.3 \text{ м}^3/\text{с}$. Поверхностный сток в озеро очень мал, водосборная площадь озера ($\sim 16 \text{ км}^2$) явно недостаточна, чтобы обеспечить расход вытекающей из озера реки. Вода поступает в озеро подземным путем, в основном, за счет фильтрации из оз. Ключевое.

Озера являются эффективным регулятором стока: сезонные колебания уровня воды в них не превышают 0.3 м . Водное питание озер осуществляется, в основном, за счет метеорных вод. Пополнение озер поверхностными водами происходит за короткий ($3\text{--}4$ мес.) весенне-летний период. В остальное время полностью преобладает грунтовый сток.

Термопроявления кальдеры Ксудач. В кальдере выходы термальных вод располагаются по берегам озер Ключевое и Штюбеля. Вся термальная вода стекает в эти озера. До наших исследований в кальдере было известно два участка разгрузки гидротерм. Это, по нашей нумерации, участок 2 (Горячего пляжа) и участок 10 – южный берег оз. Штюбеля. Наиболее детально обследованы участки 1–3 (Горячий пляж) и участок 11 (Штюбельские источники). Участки 4–9 выделены по данным специальной аэрофотосъемки, из них 4–6 заверены наземными измерениями. В западном секторе кальдеры, на экстремальных куполах, наблюдаются прогретые площадки со слабыми струями пара (рис. 3).

Термопроявления экстрезий Парящий Уступ и Парящий Гребень. На этих экстрезиях, на отметках $750\text{--}800 \text{ м}$ отмечаются термопроявления в виде парящих площадок, нагретых у поверхности до $30\text{--}40^\circ\text{C}$, и слабых струй пара с температурой, близкой к 90°C [4]. Несколько парящих площадок размером $10\text{--}20 \text{ м}$ располагаются вблизи вершины и на северо-восточном склоне Парящего Гребня.

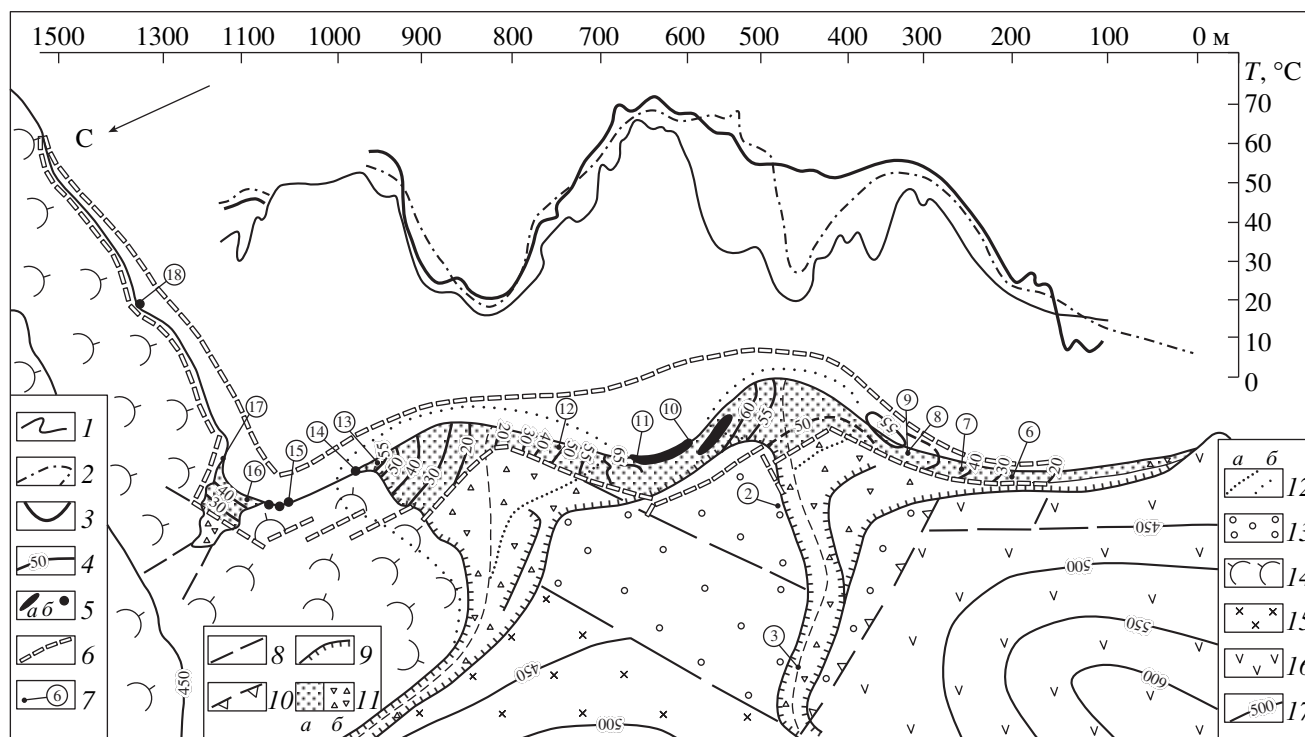


Рис. 4. Схематический план и температурные характеристики очага разгрузки гидротерм на западном берегу оз. Ключевое (участки 1–4, рис. 3): 1 – кривая изменения температуры воды в закопашках на берегу в 0,3 м от зеркала озера; 2 – кривая изменения температуры грунта на глубине 1 м в зондировках на берегу, 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) °C; 5 – участки максимального прогрева грунта ($T \geq 68^\circ\text{C}$) на глубине 1 м (а), термальные источники (б); 6 – видимые границы зон прогрева и разгрузки термальных вод (по отсутствию снежного покрова на берегу, по полынье в озере – аэрофотосъемка 1984 г., до начала снеготаяния в кальдере); 7 – место отбора пробы воды и номер водопровяления; 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.

Основные выходы парогазовых струй сосредоточены в привершинной части обрывистого северо-восточного склона экструзии Парящий Уступ. Здесь прогретые площадки интенсивно измененных пород с отдельными парогазовыми струями, нагретыми до $50\text{--}90^\circ\text{C}$, с перерывами прослеживаются на расстоянии около 300 м. Вокруг выходов пара отлагаются возгоны гипса. По наблюдениям Е.А. Вакина (1990 г.), эти площадки локализованы вдоль склона в узкой, до 10 м, полосе с простиранием, близким к меридиональному. При отборе газа через трубку, заглубленную в трещину на 50 см, на этом участке была замерена максимальная для Ксудача температура – 92°C . Газ не имеет запаха и почти полностью состоит из воздуха с примесью водяного пара. Ближайшие площадки с выходами парогазовых струй находятся в 700 м северо-западнее Горячего пляжа, на 300 м выше гипсометрически.

Горячий пляж. Находится на западном берегу оз. Ключевое, в двухстах метрах от подножия экструзии Парящий Уступ (рис. 4). Большую

часть площади между Горячим пляжем и экструзией занимает озерная терраса, сложенная, в основном, вулканическим песком. Она имеет слабый уклон к озеру и обрыв к Горячему пляжу высотой до 5 м. Густой покров ольхового стланика защищает террасу от разрушения. Терраса с двух сторон ограничена глубокими распадками ручьев I и II, сформировавших на Горячем пляже обширные конусы выноса. Северная часть Горячего пляжа перекрыта лавовым потоком конуса Штюбеля. Последний обнаженный участок пляжа “зажат” между лавами в том месте, где берег озера резко поворачивает на восток. Здесь начинается подножие южного склона конуса Штюбеля, ставшее берегом озера.

Проведенные на Горячем пляже термометрические измерения выявили обширную тепловую аномалию (рис. 4). Она захватывает всю ширину пляжа и продолжается вдоль берега как на юг, так и на север от известного ранее участка разгрузки терм. Общая протяженность ее составляет около 1000 м. Неожиданным оказалось то, что

термоаномалия распространяется и на северо-западный берег озера, вдоль подножия конуса Штюбеля, еще на 400 м (участок 4).

На Горячем пляже три термальных участка: Южный (1), Центральный (2), Северный (3). Естественными границами участков служат ручьи I и II.

На Южном, Центральном и на флангах Северного участков разгрузка термальных вод происходит у кромки озера и имеет характер рассредоточенного линейного высачивания разной интенсивности. Вода с температурой 50°C и более стекает в озеро хорошо заметными струйками. Чем выше температура, тем обильнее струйки. В таких местах горячая вода растекается по поверхности озера на десятки метров, нагревая самый верхний, до 50 см, слой воды. Если температура воды ниже 50°C, сток выглядит как слабое высачивание или не виден вовсе и фиксируется лишь по нагреву воды в озере у берега. Видимый сток термальной воды в озеро характерен для Центрального участка. Конусы выноса, насыщенные грунтовой водой, оказывают охлаждающее действие на подстилающие их прогретые зоны.

Северный участок наполовину перекрыт лавовым потоком. Его край, обращенный к ручью II, сильно разрушен. Из трещин поступает теплый воздух с температурой до 56°C. Протяженность прогретой зоны вдоль фронта потока около 80 м. Максимальная температура была замерена в глубокой щели в развалах лав в 50 м от берега озера.

Фронтальная часть лавового потока, обращенная к озеру, образует береговой обрыв высотой до 7 м и протяженностью до 100 м. С юга, на первых 50 метрах, обрыв представляет собой отвесную стенку, сложенную сливными андезитами. В основании скального обрыва, на южном его краю, из открытых трещин в андезитах, на площадке в 1 м², высачивается вода с температурой 53°C. Наблюдается слабое пробулькивание газовых пузырьков. Видимый дебит источника не более 1.5 л/с. Источник получил название Трещинный.

Севернее береговой обрыв сложен вулканитами меньшей плотности. На склоне формируются распадки. От верхней бровки, по склону вниз, по трещинам отрыва видны нагромождения и вывалы блоков пород. Они прослеживаются до берега и скрываются под водой, образуя в отдельных местах ниши, нависающие над озером. В одной из таких ниш нами обнаружен мощный источник – Гротовый. Горячая вода на уровне зеркала озера вытекает из-под скал тремя потоками, каждый шириной до 0.5 м. Температура воды 48–50°C. Севернее, на протяжении нескольких метров, вода в озере у берега между валунами теплая. Береговой обрыв заканчивается скальным выступом – прижимом.

Малый песчаный пляж, расположенный за прижимом, прогрет по всей площади (рис. 4).

Максимально прогретый участок пляжа – это узкая, до 3 метров, зона протяженностью 50 м, идущая от начала пляжа по берегу вдоль кромки озера. Здесь в нескольких шпурх зафиксирована температура 47°C. Термальная вода видимыми слабыми струйками и скрытым стоком попадает в озеро, прогревая дно и слой воды у берега. Этим участком заканчивается Горячий пляж.

Участок 4 (Каменистый). У подножия надводной части южного склона конуса Штюбеля в уходящей под воду осыпи на высоте 0.3–0.5 м образовался узкий горизонтальный уступ, сложенный крупным щебнем. Вдоль этого каменистого пляжа, на протяжении 400 м, вода в озере вдоль кромки берега прогрета от 36°C, на границе с Горячим пляжем, до 28°C в средней части и до 20°C у восточного окончания. Видимый сток воды со стороны берега отмечен только в одном месте, в точке 18 (рис. 4). Здесь на мелководье, образованном на месте обрушения берегового обрыва, вода с температурой 28°C высачивается между камнями на уровне зеркала озера. Вспененные глыбы пемз и андезитовых шлаков характерного красно-бурого цвета, разбросанные по мелководью, обрамляют выходы термальных вод.

Участок 5 расположен на восточном берегу оз. Ключевое, на серповидном пляже длиной 600 м и шириной до 30 м. Пляж сужается по краям, перекрыт в средней части пролювиальным конусом выноса шириной до 250 м, выступающим в озеро на 60 м.

На зимних аэрофотоснимках 1984 г. вдоль берега по всей длине пляжа видна узкая полынья. Наземное термометрическое зондирование (замеры на глубине 1 м) подтвердило существование здесь обширной низкотемпературной тепловой аномалии протяженностью 600 м. Участок максимального прогрева (16–20°C) размером 100 × 60 м находится на северной границе конуса выноса с песчаным пляжем. В 1991 г. на том же месте обнаружены признаки разгрузки термальных вод в озеро: вдоль берега на протяжении 150 м на мелководье, на глубине до 1 м, наблюдалось пробулькивание газовых пузырьков, вода на всю глубину прогрета до температуры 17°C. Температура воды в закопушках вдоль пляжа составляла 19–26°C. Несомненно, что конус выноса перекрывает аномалию.

Участки 6–9 расположены на южном берегу озера (рис. 1, 3). Протяженность каждого из них 100–150 м. На участке 6, западнее экструзии Тонкая, берег покрыт крупными валунами, вода у берега на протяжении 150 м заметно прогрета, максимальная температура 26°C. На южной оконечности аномалии на отрезке 23 м проведено термопрофилирование: на глубине 1 м зафиксирована температура от 17 до 21°C. В южном направлении аномалия затухает.

Таблица 1. Химический состав термальных и сопутствующих им вод кальдеры Ксудач, мг/л

Номер водных проб	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	H ₃ BO ₃	H ₄ SiO ₄ (раств.)	М общ.	T°С	pH лаб.
1	0.3	<0.5	0.4	0.0	1.4	<1.0	6.1	<1.2	0.1	11.0	5	5.7
2	0.6	<0.5	2.0	1.7	0.7	4.8	15.2	<1.2	0.2	27	–	5.6
3	0.5	<0.5	1.2	0.0	0.7	<1.0	9.8	<1.2	1.6	16.5	10	6.3
4	2.3	<0.5	1.6	0.0	1.4	1.9	13.4	<1.2	14.2	37.0	10	6.6
5	30	3.5	7.2	2.4	11.3	20	73	<1.2	25	173	17	7.7
6	52	6.3	8.4	2.6	16.7	16	128	8	48	286	21	8.4
7	78	9.3	4.4	1.7	25	8.6	190	7.4	108	432	35	7.9
8	121	11.5	4.4	1.5	36	16	256	12.4	112	571	48	7.5
9	118	11.5	4.0	1.5	36	16	256	11.1	192	648	50	7.4
10	156	14.5	8.8	2.9	42	13.4	360	12.4	182	792	55	7.8
11	168	19.5	13.2	6.1	44	11.5	418	13.6	179	873	68	7.1
12	133	13.3	14.0	8.3	38	22	338	12.4	170	749	42	7.0
13	104	11.2	18.4	10.7	23	44	308	7.4	125	652	48	7.1
14	98	10.8	20	10.2	25	48	306	12.4	170	700	53	6.8
15	77	8.6	25	9	21	62	240	8.6	131	582	48	6.7
16	110	10.4	30	11.2	25	64	284	6.2	118	659	40	8.2
17	46	5.5	14.8	4.4	27	46	99	7.4	58	308	32	7.3
18	88	9.0	38	6.8	73	124	121	24.7	84	568	28	7.8
19	198	21.1	17.2	14.3	118	115	348	37.5	142	1011	37	6.1
20	35	3.8	45	8.5	20	140	70	6.8	65	394	5	7.9

Примечание. Места отбора водных проб см. на рис. 3, 4. Озеро Ключевое: 1 – талая вода (ручей из-под снежника); 2 – дождевая вода; 3, 4 – ручьи на западном и восточном берегах озера; 5 – озерная вода у восточного берега. Горячий пляж: 6–13, 16 – вода из закопшек в песке у кромки озера; 14, 15 – источники Трещинный и Гrotовый. 17, 18 – вода в озере у берега между валунами, из-под которых высачивается теплая вода (участок Каменистый). Озеро Штjубеля: 19 – источники Штjубельские; 20 – источник “Сульфатный”, у истока р. Теплой. Пробы отобраны Г.Ф. Пилипенко в августе 1991 г. Формулы ионного состава:

$$5. \frac{\text{HCO}_3 62 \text{ SO}_4 21 \text{ Cl} 17}{\text{Na} 67 \text{ Ca} 18 \text{ Mg} 10} \cdot 6. \frac{\text{HCO}_3 72 \text{ Cl} 16 \text{ SO}_4 12}{\text{Na} 74 \text{ Ca} 14 \text{ K} 5} \cdot 7. \frac{\text{HCO}_3 78 \text{ Cl} 18}{\text{Na} 85 \text{ K} 6} \cdot 8. \frac{\text{HCO}_3 76 \text{ Cl} 18}{\text{Na} 89 \text{ K} 5} \cdot 9. \frac{\text{HCO}_3 76 \text{ Cl} 18}{\text{Na} 89 \text{ K} 5} \cdot 10. \frac{\text{HCO}_3 80 \text{ Cl} 16}{\text{Na} 86 \text{ Ca} 6} \cdot$$

$$11. \frac{\text{HCO}_3 82 \text{ Cl} 15}{\text{Na} 82 \text{ Ca} 7} \cdot 12. \frac{\text{HCO}_3 78 \text{ Cl} 15}{\text{Na} 77 \text{ Ca} 9} \cdot 13. \frac{\text{HCO}_3 76 \text{ SO}_4 14 \text{ Cl} 10}{\text{Na} 86 \text{ Ca} 14 \text{ Mg} 13} \cdot 14. \frac{\text{HCO}_3 75 \text{ SO}_4 15 \text{ Cl} 10}{\text{Na} 66 \text{ Ca} 16 \text{ Mg} 13} \cdot 15. \frac{\text{HCO}_3 68 \text{ SO}_4 22 \text{ Cl} 10}{\text{Na} 60 \text{ Ca} 23 \text{ Mg} 13} \cdot$$

$$16. \frac{\text{HCO}_3 70 \text{ SO}_4 20 \text{ Cl} 10}{\text{Na} 64 \text{ Ca} 20 \text{ Mg} 12} \cdot 17. \frac{\text{HCO}_3 48 \text{ SO}_4 29 \text{ Cl} 23}{\text{Na} 62 \text{ Ca} 23 \text{ Mg} 11} \cdot 18. \frac{\text{SO}_4 39 \text{ Cl} 31 \text{ HCO}_3 30}{\text{Na} 59 \text{ Ca} 29} \cdot 19. \frac{\text{HCO}_3 50 \text{ Cl} 29 \text{ SO}_4 21}{\text{Na} 77 \text{ Mg} 10 \text{ Ca} 8} \cdot$$

$$20. \frac{\text{SO}_4 63 \text{ HCO}_3 25 \text{ Cl} 12}{\text{Ca} 49 \text{ Na} 33 \text{ Mg} 15} \cdot$$

Аналитик В.К. Марьнова (Ин-т вулканологии ДВО РАН).

На участках 7–9 наземные наблюдения не проводились. На аэрофотоснимках они выглядят аналогично участкам 5 и 6. Можно ожидать, что температура воды, поступающей в озеро, там также 17–20°С.

Участок 10. На южном берегу озера Штjубеля, под обрывистой стенкой кратера, из-под крупнокаменной осыпи вытекает вода с температурой 25°С [4]. Других сведений об этих источниках нет.

Участок 11 (Штjубельские источники) расположен на восточном берегу “горловины”, соединяющей кратерную и северную части озера, на склоне заполненной водой воронки взрыва (рис. 1, 3).

Здесь, у подножия дацитовый экструзии, А.А. Разина в 1982 г. обнаружила прогрев воды у берега вдоль крупнокаменного пляжа. На расстоянии 1 м от берега по песчаному дну был заложен термометрический профиль длиной 160 м. Температура измерялась в шпурах глубиной 1 м с интервалом 20 м. Тепловая аномалия с температурами выше 20°С прослежена на протяжении 100 м. В средней части профиля на отрезке 40 м отмечен температурный максимум: 37–38.5°С. При обследовании этого участка в 1991 г. было обнаружено, что под каменной осыпью вдоль кромки берега в озеро сочится вода с температурой до 37°С.

Таблица 2. Состав спонтанного газа термопроявлений кальдеры Ксудач, объемные %

№ п/п	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	He	CH ₄ × 10 ⁻⁴	C ₂ H ₆ × 10 ⁻⁶	C ₂ H ₄ × 10 ⁻⁶	C ₃ H ₈ × 10 ⁻⁶
1	78.3	20.6	–	1.1	–	–	–	–	–
2	82.0	16.04	1.15	0.81	–	сл.	–	–	–
3	91.57	5.98	–	2.45	–	–	–	–	–
4	87.0	4.24	1.1	7.45	–	0.02	–	–	–
5	85.98	10.58	1.09	2.34	сл.	2.23	сл.	7.0	2.1
6	84.56	12.49	0.98	1.97	сл.	0.66	сл.	сл.	сл.
7	90.08	8.99	0.49	0.42	0.011	143.9	13.6	6.0	7.3
8	89.50	8.46	0.53	1.47	0.01	223.4	57.3	12.0	14.5
9	90.73	8.68	0.38	0.17	0.02	191.1	114.7	16.0	8.3
10	90.11	9.10	0.45	0.32	0.01	176.2	95.3	9.0	13.5
11	86.58	12.70	0.51	0.17	0.02	165.1	122.5	14.0	10.4
12	87.47	10.90	0.96	0.67	сл.	1.34	сл.	1.5	сл.
13	74.47	9.52	0.89	15.12	сл.	11.45	13.6	6.0	2.1
14	66.55	8.46	0.85	24.15	сл.	2.61	4.9	1.5	2.1

Примечание. 1, 2 – экструзия Парящий Уступ, выходы парогазовых струй в привершинной части; 3 – Горячий пляж, разгрузка газа у кромки озера в месте высачивания горячей воды; 4, 5 – источник Трещинный; 6 – восточный берег озера Ключевое, разгрузка газа у кромки озера; 7–12 – газ, собранный на акватории кратерной части озера Штюбеля; 13, 14 – источники Штюбельские. При анализе газовых проб водород не был обнаружен. Прочерк – анализ не проводился; сл. – следы. Пробы 5–14 отобраны авторами в августе 1991 года, аналитик В.М. Шапарь (Институт вулканологии ДВО РАН); пробы 2, 4 – Е.А. Вакиным в сентябре 1990 г., аналитик В.И. Гусева (Ин-т вулканологии ДВО РАН). 1, 3 данные [4].

Зона линейной разгрузки термальных вод на берегу повторяет размеры и температурные характеристики аномалии, обнаруженной ранее на дне. Дно вдоль берега покрыто зелеными термофильными водорослями, наблюдаются слабые выходы газа.

Химический состав вод. В кальдере Ксудач исследован состав всех встречающихся здесь типов природных вод: от ультрапресных холодных до слабо минерализованных термальных. Анализы состава вод приводятся в табл. 1.

Метеорные воды, поверхностные и грунтовые, определяющие местный гидрохимический фон, имеют очень низкую минерализацию: 11–37 мг/л (табл. 1, № 1–4). На таком фоне контрастно выделяются даже самые слабые аномалии.

В молодых вулканитах конуса Штюбеля, содержащих гипс и тонкодисперсную серу, инфильтрационные воды обогащаются сульфатами. У подножий конуса возник ареал холодных сульфатно-кальциевых вод приповерхностного формирования с минерализацией почти 400 мг/л (табл. 1, № 20). Источники таких вод разгружаются на левом берегу реки Теплой, на выходе из кальдеры. Сульфатные воды оказывают сильное влияние на состав воды в оз. Штюбеля и Штюбельских гидротерм. Несмотря на низкую для термальных вод минерализацию, гидротермы кальдеры Ксудач резко отличаются по составу от холодных вод. На участках их разгрузки, помимо тепловых, возникают и хорошо выраженные гидрохимические аномалии.

В кальдере по химическим характеристикам различаются два типа гидротерм: Ксудачские (с разгрузкой на берегах оз. Ключевое) и Штюбельские.

Ксудачские гидротермы имеют максимальную температуру 72°C, минерализацию до 0.9 г/л и очень простой химический состав (табл. 1, № 10, 11). Это нейтральная или слабощелочная кремнистая хлоридно-гидрокарбонатная натриевая вода с невысоким содержанием микрокомпонентов (F – 1.5, Li – 0.2, As – 0.1 мг/л). Газосодержание очень низкое, в составе спонтанного газа преобладает азот (табл. 2).

Воды с максимальной температурой характеризуются и самой высокой минерализацией. На Горячем пляже, к югу и северу от основной зоны разгрузки, вместе со снижением температуры наблюдается и закономерное понижение минерализации термальных вод. При этом в южном направлении химический тип воды не меняется (табл. 1, № 7–12). Это значит, что термы смешиваются с пресной водой. На Северном участке гидротермы Горячего пляжа смешиваются с холодными сульфатными водами конуса Штюбеля и в их составе появляется сульфат (табл. 1, № 13–17).

Штюбельские гидротермы. Это слабощелочные кремнистые воды сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого состава. Их общая минерализация 1.0 г/л. Температура до 38.5°C (табл. 1, № 19). По химическому составу они заметно отличаются от гидротерм Горячего пляжа. В Штюбельских термах повышается содержание таких глубинных

компонентов, как Cl^- , Na^+ , B , а также CO_2 и He в спонтанном газе. К этому же гидрохимическому типу терм относятся и воды источника № 18, расположенного на южном внешнем склоне конуса Штюбеля.

Относительно низкая температура воды и повышенное содержание SO_4^{2-} в воде Штюбельских источников объясняется смешением глубинных терм с сульфатными водами приповерхностного формирования. Тренды смешения показаны на рис. 5. Термальные воды кальдеры Ксудач не отлагают минеральных осадков и не цементируют в местах разгрузки вмещающие породы.

Озерные воды заметно отличаются по составу от остальных поверхностных вод кальдеры.

В озере *Ключевое* состав воды постоянен от поверхности до дна (табл. 3, рис. 6). Вода слабощелочная с низкой минерализацией (~180 мг/л). Это смесь поверхностных, грунтовых и термальных вод, в которой доля термальной воды, если судить по содержанию Cl^- , близка к 20%. Вода в озере хорошо перемешана благодаря вертикальной конвекции, обусловленной зимним охлаждением поверхности. Гидрохимических признаков донной разгрузки гидротерм не обнаружено.

На озере *Штюбеля* гидрохимическая обстановка значительно сложнее, поэтому здесь проведены более детальные исследования. Выявлена вертикальная зональность в распределении растворенных компонентов в толще воды. Концентрации всех компонентов, кроме SO_4^{2-} , с глубиной увеличиваются. Содержание сульфат-иона скачкообразно нарастает в интервале глубин 15–30 м и далее не увеличивается. В придонном слое в нескольких местах обнаружены признаки разгрузки термальных вод (табл. 3, рис. 6, т. 23–26). В этих точках вода приобретает щелочную реакцию, резко обогащена хлоридами натрия и по химическому типу соответствует Штюбельским источникам. На водной поверхности кратерной части озера наблюдаются выходы спонтанного газа, в составе которого преобладает N_2 и O_2 и отмечается очень высокое содержание He . Низкое по сравнению с газом источников содержание CO_2 объясняется растворением в толще холодных вод озера и частичным переходом CO_2 в HCO_3^- (табл. 2).

В воде озер в интервале глубин 0–75 м определялся состав растворенных газов: N_2 , CO_2 , H_2 , CH_4 . В оз. Ключевое (т. 21) концентрации газов следующие: N_2 14.5 – 14.4; CO_2 1.7 – 10.6; H_2 – до 0.0002; CH_4 – до 0.0007 мл/л. В оз. Штюбеля (т. 22): N_2 14.4 – 13.6; CO_2 7.6 – 60.8; H_2 – до 0.0003; CH_4 – до 0.0003 мл/л. Содержание всех газов (кроме CO_2) в воде обоих озер низкое. Наблюдается повышение концентрации растворенного CO_2 с глубиной, особенно значительное в оз. Штюбеля.

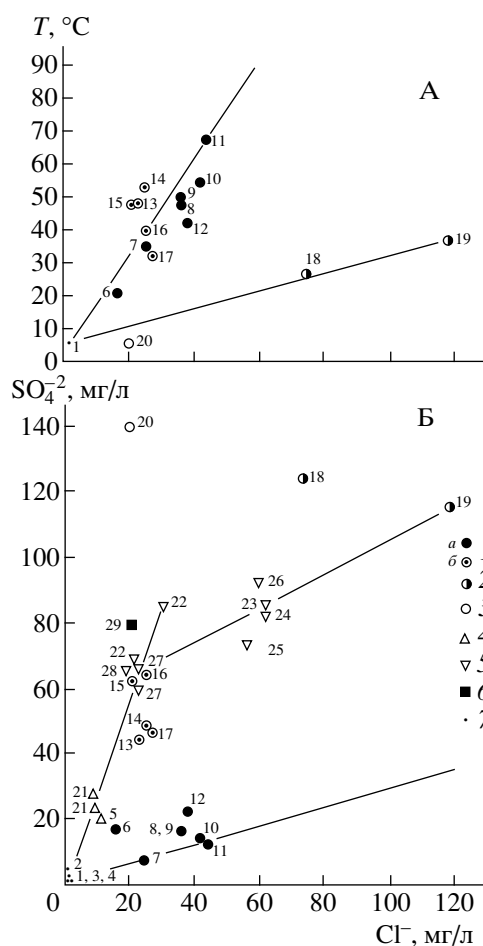


Рис. 5. Соотношение концентраций компонентов минерализации и температуры в источниках и озерах кальдеры Ксудач: А – соотношение концентрации Cl^- -иона и температуры в источниках; Б – соотношение концентраций SO_4^{2-} и Cl^- в источниках и озерах. 1 – источники Горячего пляжа: а – участок Южный и Центральный, б – участок Северный; 2 – источники, пространственно связанные с постройкой конуса Штюбеля; 3 – холодный грунтовый источник; 4 – оз. Ключевое; 5 – оз. Штюбеля; 6 – р. Теплая (в источке); 7 – метеорные и поверхностные воды. Цифры – номера водопроявлений и зондировочных точек озер (см. рис. 3, 4, табл. 1, 3).

Вертикальная гидрохимическая зональность озер хорошо согласуется с распределением температур по глубине (рис. 6). В обоих озерах нагрев воды с поверхности, в теплое время года, распространяется на глубину ~20 м, глубже ход температур различен. В оз. Ключевое спад температуры идет до глубины 40 м ($T = 4.3^\circ\text{C}$), а в интервале 40–82 м она понижается всего на 0.3°C . Температурный минимум (4.0°C) фиксируется у дна. В оз. Штюбеля минимальная температура (6.2°C) наблюдается на глубине 35 м, ниже идет медленное повышение температуры до 7.2°C у дна. При зондировании в ряде точек со дна озера

Таблица 3. Химический состав воды в озерах кальдеры Ксудач, мг/л

Номер водных проб	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	H ₃ BO ₃	H ₄ SiO ₄ (раств.)	М общ.	T, °C	pH лаб.
21/0	24	2.1	7.6	1.7	9.2	23	54	1.4	45	168	15.1	7.4
21/10	24	2.1	7.6	1.7	9.2	23	54	1.4	45	168	9.0	7.5
21/20	24	2.1	7.6	1.7	9.2	23	54	1.4	45	168	5.8	7.6
21/40	24	2.1	7.6	1.7	9.2	23	54	1.4	45	168	4.3	7.6
21/60	24	2.1	7.6	1.7	9.2	23	54	1.4	45	168	4.2	7.4
21/82	25	2.1	8.0	1.8	9.2	27	55	1.4	49	178	4.0	7.8
22/0	40	3.2	18.4	7.2	22	69	78	6.8	65	310	16.0	7.9
22/10	38	3.1	18.0	6.7	21	69	77	6.8	65	305	9.0	7.6
22/20	40	3.3	19.0	6.7	21	77	82	6.8	67	323	6.4	7.4
22/40	45	3.9	22	7.9	25	85	97	6.8	77	370	6.6	6.9
22/60	50	4.2	25	8.5	28	85	105	7.5	81	394	6.8	6.8
22/75	50	4.2	24	8.5	30	85	105	7.5	82	396	7.2	7.1
23/76	72	4.4	24	10.5	62	85	106	6.8	74	445	–	8.0
24/54	72	5.3	23	10.2	62	82	106	6.2	74	441	–	7.7
25/28	69	4.7	20	8.5	59	72	96	7.4	65	402	–	7.8
26/35	71	5.0	22	9.2	60	92	98	6.2	72	436	–	7.7
27/0	40	4.2	18.8	6.6	23	60	78	4.9	69	304	15.0	7.6
27/22	41	4.4	18.8	7.8	23	66	85	2.5	62	310	–	7.8
28/28	37	3.4	18.4	6.1	19	65	79	6.8	65	300	–	7.5
29 (река)	37	3.2	22	7.1	21	79	75	6.8	64	315	13.5	6.7

Примечание. У номеров водных проб через косую черту даны горизонты отбора проб воды, в метрах. Положение точек отбора см. на рис. 3. Пробы отобраны С.М. Фазлуллиным в августе 1991 г. Формулы ионного состава:

21/0	$\frac{\text{HCO}_3\text{54 SO}_4\text{30 Cl16}}{\text{Na65 Ca24 Mg9}}$	21/82	$\frac{\text{HCO}_3\text{53 SO}_4\text{33 Cl14}}{\text{Na64 Ca24 Mg10}}$	22/0	$\frac{\text{SO}_4\text{43 HCO}_3\text{38 Cl18}}{\text{Na52 Ca28 Mg18}}$	22/75	$\frac{\text{SO}_4\text{41 HCO}_3\text{40 Cl19}}{\text{Na52 Ca29 Mg17}}$
23/76	$\frac{\text{Cl14 SO}_4\text{33 HCO}_3\text{33}}{\text{Na59 Ca22 Mg16}}$	24/54	$\frac{\text{Cl14 SO}_4\text{33 HCO}_3\text{33}}{\text{Na60 Ca22 Mg16}}$	25/28	$\frac{\text{Cl15 HCO}_3\text{32 SO}_4\text{32}}{\text{Na62 Ca21 Mg14}}$	26/35	$\frac{\text{SO}_4\text{37 Cl33 HCO}_3\text{30}}{\text{Na61 Ca22 Mg15}}$
27/0	$\frac{\text{HCO}_3\text{40 SO}_4\text{39 Cl21}}{\text{Na52 Ca28 Mg16}}$	27/22	$\frac{\text{HCO}_3\text{41 SO}_4\text{40 Cl19}}{\text{Na52 Ca27 Mg18}}$	28/28	$\frac{\text{SO}_4\text{43 HCO}_3\text{40 Cl17}}{\text{Na52 Ca30 Mg16}}$	29(река)	$\frac{\text{SO}_4\text{43 HCO}_3\text{38 Cl18}}{\text{Na48 Ca33 Mg17}}$

Анализ выполнен В.К. Марынова (Ин-т вулканологии ДВО РАН).

были подняты теплые обломки пород. Таким образом, в центральной части оз. Ключевое признаков разгрузки терм не обнаружено. В оз. Штубеля наличие донной разгрузки можно считать доказанным.

Водная разгрузка гидротерм. Сложный характер разгрузки гидротерм, когда преобладает скрытая разгрузка в виде вод с разной температурой и переменным химическим составом, затрудняет определение их дебита и заставляет применять косвенные расчетные методы. Для повышения надежности результатов расчеты сделаны двумя независимыми способами: балансовым и гидрохимическим. Там, где это возможно, предпочтение отдается прямым измерениям. Поскольку при разгрузке гидротермы смешиваются в разных пропорциях с поверхностными водами, все

результаты измерений пересчитаны на расход “горячеводной составляющей” – воды с максимальной для данного объекта температурой и минерализацией.

Подсчет дебита термальных вод, стекающих в озеро Ключевое, сделан по данным прямым полевым измерениям, результаты которых приведены в табл. 4. Расход термальных вод оказался очень большим – 490 л/с. Напомним, что по каталогу термальных вод Камчатки прогнозные ресурсы Ксудачских источников оцениваются всего в 30 л/с.

Величину суммарного поступления терм в озеро Ключевое, с учетом скрытой подводной разгрузки, можно определить по известной формуле смешения:

$$Q_{\text{см}}c = Q_{\text{т}}a + Q_{\text{х}}b, \quad (1)$$

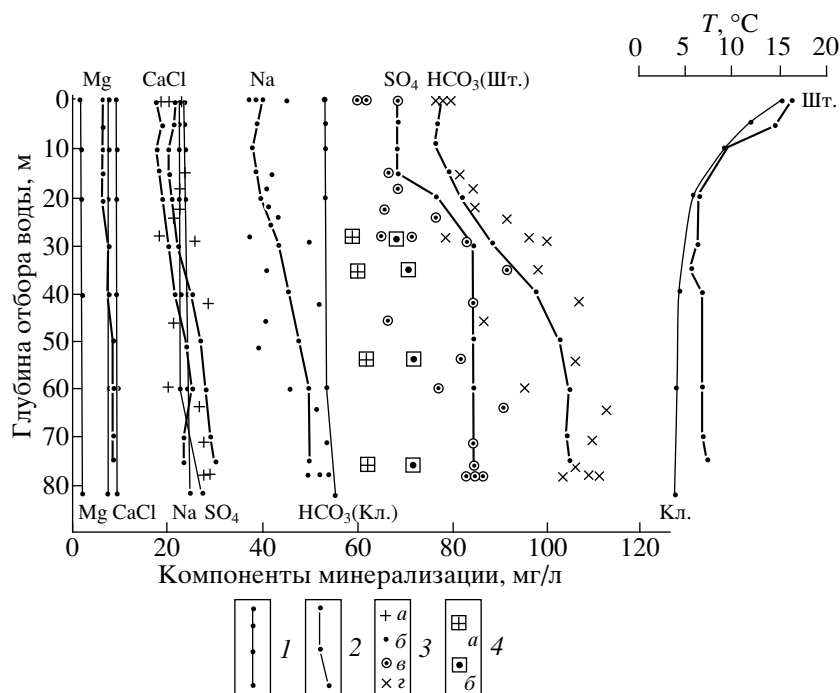


Рис. 6. Вертикальная гидрохимическая и температурная зональность озера Ключевого и Штубеля (август, 1991 г.). Кривые вертикального зондирования по опорным точкам: 1 – т. 21, оз. Ключевого (Кл.); 2 – т. 22, оз. Штубеля (Шт.); 3 – концентрация ионов Cl (a), Na (б), SO₄ (z), HCO₃ (z) по данным зондирования оз. Штубеля в других точках; 4 – аномальные концентрации ионов Cl (a) и Na (б) в придонном слое воды оз. Штубеля (точки 23–26, см. рис. 3, табл. 3).

где $Q_T, Q_X, Q_{см}$ – расходы термальной, холодной и смешанной воды; a, b, c – концентрация компонента-индикатора (в нашем случае Cl-иона) в термальной, холодной и смешанной воде. Q_X – неиз-

вестную величину притока холодных вод выразим как $Q_X = Q_{см} - Q_T$ и перейдем к формуле:

$$Q_T = Q_{см}(c - b)/(a - b), \quad (2)$$

Таблица 4. Количество термальной воды, стекающей в оз. Ключевое

Участок разгрузки	Характер разгрузки	Диапазоны температур, °C														Σq
		>65		65–60		60–50		50–40		40–30		30–20		20–17		
		$k = 0.30$		$k = 0.28$		$k = 0.25$		$k = 0.20$		$k = 0.16$		$k = 0.12$		$k = 0.08$		
	L	q	L	q	L	q	L	q	L	q	L	q	L	q		
1	A							65	13	120	20	80	10	35	3	46
	B					185	47	30	6	25	4	60	7			64
2	A	35	10	35	10	50	12	55	11	110	18	60	7	35	3	71
	B	110	33	60	17	100	25	45	9	25	4	40	5			93
3	A					50	12	110	22	50	8	65	8	25	2	52
	B					120	30	80	16	15	2	85	10			58
4	A									30	4	350	42			46
$\Sigma 1-4$	A	35	10	35	10	100	24	230	46	310	50	555	67	95	8	215
	B	110	33	60	17	405	102	155	31	65	10	185	22			215
$\Sigma 5-9$	A													750	60	60
$\Sigma 1-9$	A, B		43		27		126		77		60		89		68	490

Примечание. Местоположение участков 1–9 см. на рис. 3. А и В – поверхностный (видимый) и грунтовый сток термальной воды в озеро; расчеты дебита двух составляющих сделаны по кривой изменения температуры воды в закопушках и то же – в зондировках на глубине 1 м, в 1 м от берега, см. рис. 4. Другие параметры: k – модуль линейного стока горячеводной составляющей ($T = 68^\circ\text{C}$) в грунтовом потоке в измеренном диапазоне температур, л/с на один погонный метр; L – протяженность участка вдоль береговой линии озера в измеренном диапазоне температур, м; q – количество горячеводной составляющей ($T = 68^\circ\text{C}$), стекающей в озеро через участок L , где $q = kL$, л/с.

Таблица 5. Вынос тепла гидротермами кальдеры Ксудач

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
Σ 1–9	490	33.3	139.4	100%
оз. Ключевое	560*	38.0	59.0	68.0
оз. Штюбеля	500*	18.0	75.4	32.0
Σ	1000	56.0	234.4	100%

* Гидрохимический метод подсчета дебита, с учетом подводной разгрузки термальных вод в оз. Ключевое и Штюбеля. Дебит, л/с – см. табл. 4.

$Q_{см}$ – это сток (скрытая фильтрация) из оз. Ключевое в оз. Штюбеля. Если согласиться, что величина стока в озера пропорциональна их водосборным площадям (70 и 30%) и это соотношение сохраняется в суммарном стоке из кальдеры через реку Теплая (4.3 м³/с), на долю оз. Ключевое придется 3.1 м³/с ($Q_{см}$). Концентрации Cl-иона в термальной (a), холодной (b) и смешанной (c) воде соответственно составляют: 44, 1.4 и 9.2 мг/л (табл. 1, 3).

Подставив эти величины в формулу (2), получим общий приток термальных вод в оз. Ключевое – $Q_T \sim 560$ л/с. Понятно, что такие расчеты имеют оценочный характер, но полученные разными путями величины близки, и это дает основание утверждать, что на оз. Ключевое разгрузка гидротерм сосредоточена на берегах, а в донной части выходов горячих вод нет или почти нет.

Расход термальных вод, разгружающихся в оз. Штюбеля, рассчитан с учетом следующих предположений. С термальной водой, фильтрующейся вместе с озерной водой из оз. Ключевое, привносится 25 г/с Cl-иона (560 л/с термальной воды с содержанием Cl⁻ ~ 44 мг/л). Река Теплая при расходе 4.3 м³/с и содержании Cl⁻ 21 мг/л (табл. 3) выносит, за вычетом фоновой нагрузки, ~85 г/с Cl⁻. В таком случае, гидротермы Штюбеля поставляют в озеро ~60 г/с Cl⁻. Концентрация хлора в Штюбельских гидротермах ~120 мг/л. Тогда суммарная разгрузка в озеро аналогичных по составу вод ~500 л/с. Дебит береговых источников оценивается в 20–25 л/с, следовательно, основная разгрузка терм происходит в донной части озера.

Вынос тепла (тепловая мощность). По величине разгрузки термальных вод можно сделать оценки конвективного выноса тепла (тепловой

мощности) по отдельным термопроявлениям и по кальдере в целом. Другие механизмы выноса тепла (кондуктивный теплопоток, теплоотдача с нагретых поверхностей) можно не учитывать – их эффект выходит за пределы точности оценок. Результаты оценок приведены в табл. 5. Общая тепловая мощность гидротерм кальдеры ~230 МВт (вынос тепла 56 тыс. ккал/с). Максимальное количество тепла (~50% от общего) выносят термы Горячего пляжа, термы оз. Штюбеля ~35%.

Важной характеристикой гидротермальной системы является удельный вынос тепла (тепловая мощность на единицу площади). Для кальдерного комплекса Ксудач эта величина равна 3.6 Вт/м², что почти на два порядка выше регионального теплового потока (0.08–0.1 Вт/м²). Удельный вынос тепла с площадей кальдерно-кратерных воронок, заполненных озерами Ключевое и Штюбеля ~30 и 37 Вт/м². Удельный вынос в очаге разгрузки гидротерм на Горячем пляже, площадь которого с учетом участков, перекрытых озерной террасой и лавовыми потоками ~138 тыс. м², составляет ~790 Вт/м².

Тепловая мощность гидротерм Ксудача и величины удельного выноса тепла очень близки к аналогичным показателям крупных высокотемпературных гидротермальных систем: Узонской [2], Карымской [1], Академии Наук [1]. По показаниям гидрохимических геотермометров (Na–K, Na–K–Ca) температура на глубине формирования гидротерм Ксудача 160–180°C. По нашему мнению, приведенные выше данные дают основание утверждать, что в недрах кальдеры Ксудач существует мощная высокотемпературная гидротермальная система.

Закключение. Кальдерная гидротермальная система сформировалась как наложенная гидрогеологическая структура в недрах вулкана Ксудач в плейстоцен-голоценовое время. Водовмещающим резервуаром системы служит структурный комплекс плейстоцен-голоценовых кальдер. Транскоровые разломы, с которыми связано развитие вулкана, в течение длительного времени обеспечивают приток в систему глубинного тепла и вещества. Кальдере Ксудач пересекает система разрывных нарушений субмеридионального простирания. Она контролирует линейный ряд эруптивных центров голоценовых кальдер, термовыводящие каналы и очаги разгрузки гидротерм. Установлены два основных очага разгрузки Ксудачской гидротермальной системы: Горячий пляж и кратерное оз. Штюбеля.

На *Горячем пляже* главными термовыводящими каналами служат разломы, рассекающие берега озера, и экзоконтакты экструзии Парящий уступ. По этим каналам гидротермы, температура которых (судя по выходам пара на склонах экструзии) близка к точке кипения, разгружаются

под отложениями озерной террасы и древних лав. Смешиваясь с инфильтрационными водами, они образуют горячий грунтовый поток, направленный к оз. Ключевое.

В кратерном озере Штюбеля термовыводящие трещины образовались в процессе катастрофического извержения конуса Штюбеля в 1907 г. Разгрузка терм в настоящее время идет по трещинам в стенках и на дне кратера, на 1/3 заполненного озером. Основная разгрузка термальной воды происходит в донной части озера. Источники на берегу озера расположены на участке, где взрывом частично разрушена дацитовая экструзия. Судя по химическому составу терм, в кратере Штюбеля вскрыты более глубокие горизонты гидротермальной системы.

Геолого-структурные позиции, химический состав и очень высокая тепловая мощность гидротерм Ксудача дают основание полагать, что они являются производными высокотемпературных глубинных терм, аналогичных кипящим источникам кальдеры Карымского озера. В недрах кальдеры Ксудач формируются перегретые хлоридно-натриевые воды, обогащенные CO_2 и другими минеральными компонентами, характерными для высокотемпературных гидротерм: SiO_2 , В, Li, As. Глубинные термы преобразуются по пути к поверхности при смене P - T -условий и смещении с инфильтрационными водами. В конечном итоге вся термальная вода попадает в озера, и в составе озерных вод сбрасывается рекой Теплая за пределы кальдеры.

Из-за смещения перегретых глубинных вод с холодными инфильтрационными водами поверхностная разгрузка Ксудачской системы осуществляется, в основном, низкотемпературными термами. Водами с $T > 50^\circ\text{C}$ выносятся всего 25% тепла. Однако по тепловой мощности (230 МВт) и масштабу выноса минеральных компонентов Ксудачская гидротермальная система сопоставима с такими крупнейшими гидротермальными системами, как Узонская (270 МВт), Академии Наук (130 МВт).

В процессе работы авторы обсуждали рукопись и отдельные ее части с Т.П. Кирсановой и

О.Б. Селянгиным, особую помощь при написании статьи оказал Е.А. Вакин. Всем перечисленным коллегам авторы искренне признательны. Авторы благодарят сотрудников КамчатНИРО А.С. Николаева, С.Н. Сиякова и С.И. Куренкова за предоставленные материалы по эхолотированию кальдерных озер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканонология и сейсмология. 1998. № 2. С. 3–27.
2. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. 284 с.
3. Дитмар К.Н. Поездка и пребывание на Камчатке в 1851–55 гг. Исторический очерк по путевым дневникам. Пер. с нем. СПб., 1901. 156 с. с картами.
4. Дубик Ю.М., Меньшиков И.А. Газогидротермальная деятельность кальдеры Ксудач // Бюл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 40–43.
5. Келль Н.Г. Карта вулканов Камчатки / Объяснительный текст с табл., чертежами, снимками и карта / на двух листах / М 1 : 750000. Л.: Изд. Русского географического общества, 1928. 75 с.
6. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканонология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 28–53.
7. Пийн Б.И. Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки // Тр. Камчатской вулканол. станции. 1947. Вып. 3. С. 89–134.
8. Разина А.А., Селянгин О.Б. Роль экструзий в локализации внутрикальдерных термоаномалий: пассивные флюидопроводники // Вулканизм и связанные с ним процессы. Вып. 3. Тез. докл. VI. Всес. вулканол. совещания. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 87–88.
9. Селянгин Г.Б. Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканонология и сейсмология. 1987. № 5. С. 16–27.
10. Шеймович В.С. Вулкан Ксудач в августе 1963 г. // Бюл. вулканол. станций. 1966. № 41. С. 25–28.

Hydrotherms of the Ksudach Volcanic Caldera

G. F. Pilipenko*, A. A. Razina*, S. M. Fazlullin**

*Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

**Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

New data are presented bearing on the state of hydrothermal activity in the Ksudach caldera, southern Kamchatka. It is for the first time that all known thermal manifestations are described with detailed maps of chief among these. The discharge behavior of thermal water is discussed. Information is presented relating to the chemical composition, discharge and heat outflux for groups of springs, lakes, and for the caldera as a whole. An analysis of the new data suggests a powerful hot hydrothermal system to exist beneath the Ksudach caldera volcano.