

УДК 551.432.7 + 551.435.38 + 551.234 (–925.18)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(153-164)

**Д.Н. КОЗЛОВ\*, Е.В. ЛЕБЕДЕВА\*\*, Р.В. ЖАРКОВ\***

\*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,  
693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, Россия, kozlovdn@bk.ru, rafael\_zharkov@mail.ru

\*\*Институт географии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, Ekaterina.lebedeva@gmail.com

### **СТРОЕНИЕ КОТЛОВИН ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОЗЕР КЛЮЧЕВОГО И ШТЮБЕЛЯ (КАЛЬДЕРА КСУДАЧ, КАМЧАТКА)**

*Получены новые сведения об активном геолого-геоморфологическом объекте — кальдерном комплексе Ксудач, основанные на результатах геоморфологической и повторной батиметрической и тепловизионной съемки, проведенной с перерывом в 25 лет. Впервые составлена геоморфологическая карта побережий озер и построены детальные батиметрические схемы их котловин. Выделено четыре морфогенетических типа берегов при общем доминировании на побережье абразионных процессов (аккумуляция преобладает лишь в приустьевых частях рек). В оз. Штюбеля инструментально зафиксирован подводный экструзивный купол высотой около 40 м с диаметром основания около 300 м и с обширными подводными газогидротермальными выходами. Морфологическое выражение экструзии в рельефе дна озера, вероятно, произошло после промерных работ 1991 г., при этом анализ современной газогидротермальной деятельности в кальдере Ксудач показывает относительную стабильность поствулканических процессов, проявляющихся в виде выходов газогидротерм как в пределах озерных котловин, так и на их берегах. Глубина озер Ключевого и Штюбеля за прошедшие 25 лет уменьшилась на 3 м, при этом их линейные и площадные характеристики практически не изменились. Постепенное уменьшение максимальных глубин может быть обусловлено перманентным поступлением обломочного материала (как выносимого реками, так и абразионного) в глубоководную часть озер и нивелированием неровностей их днищ. Глубина кратерной части оз. Штюбеля могла уменьшиться и в связи с поднятием участков дна при формировании экструзивных куполов.*

Ключевые слова: вулкан, кальдера, озеро, морфология, береговые процессы, газогидротермы.

**D.N. KOZLOV\*, E.V. LEBEDEVA\*\*, R.V. ZHARKOV\***

\*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,  
693022, Yuzhno-Sakhalinsk, ul. Nauki, 1b, Russia, kozlovdn@bk.ru, rafael\_zharkov@mail.ru

\*\*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,  
119017, Moscow, Staromonetnyi per., 29, Russia, Ekaterina.lebedeva@gmail.com

### **STRUCTURE OF VOLCANIC LAKE KLYUCHEVOE AND LAKE STUBEL BASINS (KSUDACH CALDERA, KAMCHATKA)**

*New evidence for an active geological and geomorphological object, the Ksudach caldera complex, has been obtained: geomorphological and repeated bathymetric and thermal imaging surveys were conducted with a break of 25 years. For the first time, a geomorphological map of the coasts of the lakes was compiled, and detailed bathymetric schematics of their basins were drawn. Four morphogenetic types of coasts are identified, with a general predominance of abrasion processes (accumulation is dominant only in the mouths of the rivers). In Lake Stubel, an underwater extrusive dome was recorded instrumentally, about 40 m high and about 300 m in diameter of its base, with extensive underwater gas-hydrothermal vents. Most likely the morphological configuration of the extrusion in the relief of the bottom of the lake occurred after the surveys of 1991, and the analysis of modern gas-hydrothermal activity in the Ksudach caldera shows a relative stability of the post-volcanic processes that manifest themselves as gas-hydrothermal vents both within the lake basins and on their shores. The depth of Lake Klyuchevoe and Lake Stubel decreased by 3 m over the last 25 years, while their linear and areal characteristics have remained almost unchanged. A gradual decrease in maximum depths can be caused by permanent input of detrital material to the deep-water part of the lakes, transported by rivers and as well as abrasion, and by planation of their bottoms. The depth of the crater part of Lake Stubel could also decrease due to the rise of the bottom areas during the formation of the extrusive domes.*

Keywords: volcano, caldera, lake, morphology, coastal processes, gas-hydrotherms.

## ВВЕДЕНИЕ

Озера Ключевое и Штюбеля (рис. 1) расположены в котловинах взрывопрывальных воронок в центральной части кальдерной депрессии Ксудач на южной оконечности Восточного вулканического пояса Камчатки. Несмотря на труднодоступность региона, кальдера и ее озера неоднократно привлекали внимание исследователей. Однако геоморфологические особенности их побережий и детали подводного строения котловин в этих работах затрагивались мало.

Первое литературное упоминание о кальдере Ксудач относится к началу XX в., когда вышел в свет отчет К. Дитмара «Поездки и пребывание в Камчатке в 1851–1855 гг.» [1]. В этой работе кальдера упоминается как горный узел Ксудач, из которого вытекает ручей. К. Дитмар описывает Ксудач как огромный распавшийся кратер, имеющий незначительную высоту. Происхождение названия до сих пор неизвестно, однако существует предположение, что оно образовалось от ительменского слова «ксуде» — «гусь» [2]. В 1910 г., через три года после последнего извержения молодого конуса Штюбеля, в кальдере побывал отряд Н.Г. Келля, запечатлевший на рисунках и фотографиях единое озеро [3].

Полноценными пионерными научными исследованиями комплекса Ксудач можно считать работы патриархов вулканологии Б.И. Пийпа [4], В.И. Влодавца [5] и А.Н. Заварицкого [6], в которых дано достаточно детальное и четкое геологическое и геоморфологическое описание кальдеры, истории ее формирования и современного состояния, а также рассмотрен вопрос о составе и характере распределения продуктов извержения 1907 г. О.Б. Селянгин [7, 8] составил комплексное геологическое

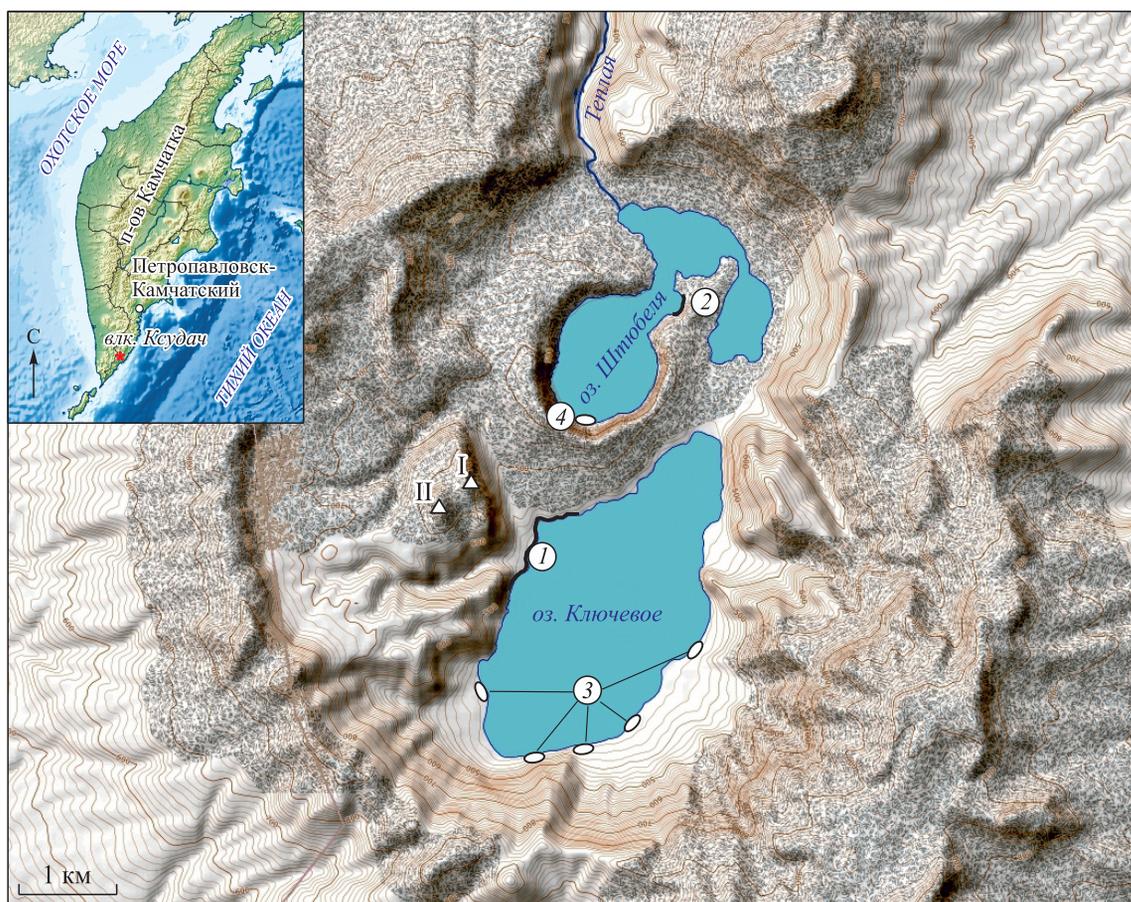


Рис. 1. Кальдера Ксудач и ее гидротермальные проявления.

Участки разгрузки гидротерм. Активные: 1 — Горячий пляж, 2 — в северо-восточной части оз. Штюбеля; в настоящее время не фиксируемые (активные в 1980–1990-е гг., по [13]): 3 — восточный и югобережные, 4 — южный. Экструзивные купола: I — Парящий уступ, II — Парящий гребень.

описание вулкана и создал подробную геологическую карту и схему соотношения разновозрастных кальдер. Среди последующих исследований следует выделить работы И.В. Мелекесцева и О.А. Брайцевой с коллегами, посвященные голоценовой вулканической деятельности Ксудача и анализу сопряженных покровов пирокластического материала [9–11]. Ю.М. Дубик и И.А. Меняйлов [12], а позже Г.Ф. Пилипенко с соавторами [13] детально описали газогидротермальную активность в пределах кальдеры, создали структурную схему участков разгрузки гидротерм, которая содержит также не опубликованные ранее результаты батиметрической съемки, выполненной при помощи аналогового эхолота в 1991 г. А.С. Николаевым, С.Н. Синяковым и С.И. Куренковым из Камчатского НИИ рыбного хозяйства и океанографии (КамчатНИРО).

В июле 2016 г. в рамках экспедиции Института морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН были проведены маршрутное геолого-геоморфологическое обследование побережий озер Ключевого и Штубея, эхолотационная съемка их котловин, а также исследованы газогидротермы озер и термальные площадки экструзий Парящий уступ и Парящий гребень (см. рис. 1). Съемка проводилась с борта маломерного судна при помощи современной высокоточной методики с синхронной спутниковой привязкой по профилю, которая успешно апробируется в ИМГиГ ДВО РАН более 10 лет [14–18]. Профилирование велось с помощью эхолота Lowrance 527 CDF-iGPS на частоте излучателя 200 кГц с дискретным шагом промеров 1 м и с синхронной шагу спутниковой привязкой по профилю. Необходимо отметить, что такие высокоточные работы проведены в кальдере впервые за всю историю наблюдений: среднеквадратическая ошибка составляет 0,2 м, а частота покрытия зеркала озер — 8–12 профилей на квадратный километр. Всего для оз. Ключевого было получено 48, а для оз. Штубея — 57 профилей общей протяженностью более 60 км.

Поиск термальных аномалий в акватории и на побережье озер велся при помощи тепловизора SAT SDS Hotfind-LXS (диапазон измеряемых температур от  $-20$  до  $1000$  °C ( $\pm 2$  °C), угловое поле  $24 \times 18^\circ$ , пространственное разрешение 1,1 мрад, разрешение активной матрицы  $384 \times 288$  точек) и цифрового термометра Digitron-T200KC (термопреобразователь КТХА 01.02Р-Т310, диапазон рабочих температур от  $-200$  до  $1350$  °C,  $\pm 0,1$  °C).

В результате проведенных исследований получены новые данные о морфологии озерных котловин, геоморфологическом строении их побережий и современном характере гидротермальной активности. Необходимо отметить, что озера вулканического происхождения значительно отличаются от иных типов озер как по морфологии, характеру осадконакопления, составу вод, так и по быстрым изменениям уровня, что в первую очередь характерно для активных вулканов, каковым является и кальдерный комплекс Ксудач.

### СТРОЕНИЕ КАЛЬДЕРНОГО КОМПЛЕКСА

Кальдерный комплекс Ксудач состоит из пяти структур позднеплейстоценового (кальдеры I и II) и голоценового (кальдеры III–V) возраста, которые сформировались в результате мощных извержений [10]. Породы, слагающие комплекс, подразделяются на несколько групп: докальдерные образования, посткальдерные экструзии, переотложенные пемзы, шлаковые конусы и лавовые потоки. Фундамент сложен главным образом туфогенными отложениями алнейской серии позднеэоценового возраста и древнечетвертичными образованиями. Общая мощность этих отложений достигает 100 м, залегание слабонаклонное или горизонтальное. Выше вскрывается монотонная толща древнечетвертичных оливиновых базальтов. Пирокластика представлена в основном пемзой, лапиллями и бомбами, а также пеплом и вулканическим песком. В эксплозивных обломках современных извержений встречается большое количество миоценовых интрузивных и туфогенно-осадочных пород. Вся толща пород во многих местах кальдеры прорвана базальтовыми дайками, андезитовыми и андезито-дацитовыми куполами [19, 20]. Сплошность пород первичной постройки вулкана в границах кальдерной депрессии сильно нарушена: комплекс пересекается системой разрывных нарушений субмеридионального простирания, контролирующей линейный ряд эруптивных центров голоценовых кальдер, к которым приурочены современные озера. Линеаменты того же простирания прослеживаются и в их очертаниях. Высказывалось также предположение о возможности заложения здесь вулканического рифта [7].

Согласно [13], заполняющие кальдерную 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. Разломы, пересекающие берега озера и экзоконтакты экструзий, служат и главными термовыводящими каналами.

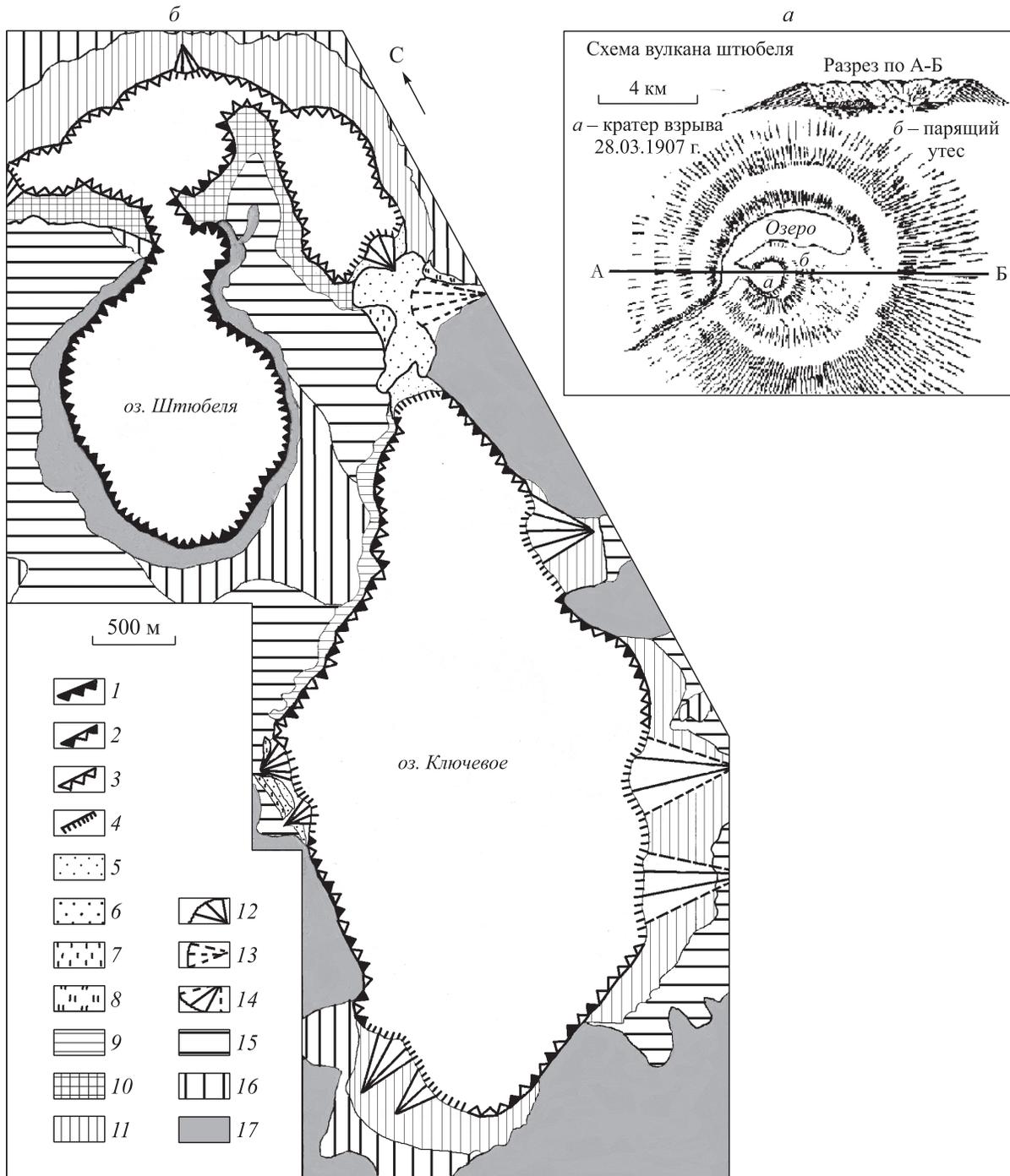


Рис. 2. Кальдера Ксудач в 1910 г. (зарисовка из отчета Н.Г. Келля [3], профиль А–Б рассекает кальдеру с севера на юг) (а) и современное геоморфологическое строение побережий ее озер (б) (составитель Е.В. Лебедева).

Морфогенетические типы берегов: 1 — абразионно-денудационные, 2 — абразионные, 3 — абразионно-аккумулятивные выровненные, 4 — аккумулятивные пляжевые. Озерные террасы, выраженные в масштабе карты с отметками бровки, м: 5 — 3–5, терраса I; 6 — 7–8, терраса II; 7 — 12–15, терраса III; 8 — 25–30, терраса IV; не выраженные в масштабе карты: 9 — комплекс низких террас (I–III), выработанных преимущественно в грубообломочных пирокластических отложениях конуса Штубеля; 10 — комплекс низких террас, выработанных преимущественно в тонких пирокластических отложениях извержения 1907 г. и переработанных склоновыми и пролювиальными процессами; 11 — фрагменты террасы 25–30-метрового уровня, сложенные пирокластическим материалом и переработанные склоновыми и пролювиальными процессами с формированием шлейфов. Конусы выноса:

12 — активно формирующиеся, 13 — отмершие, 14 — ярусные. Склоны: 15 — пологие с преобладанием дефляции и солифлюкции, 16 — средней крутизны с доминированием процессов медленного массового смещения материала (десерпция, дефлюкция, конжелифлюкция) и линейной эрозии, 17 — крутые с преобладанием обвальнo-осыпных процессов.

Водосборная площадь кальдеры Ксудач достигает 64 км<sup>2</sup>, внутрикальдерная речная сеть состоит из 10 водотоков протяженностью 2–4 км и множества более мелких (подробнее см. в [21, 22]). Годовое количество осадков здесь велико (3200 мм), поверхностные и грунтовые воды имеют низкую минерализацию — 11–37 мг/л. Воды оз. Ключевого щелочные с минерализацией около 180 мг/л, их состав постоянен от поверхности до дна. В придонном слое оз. Штюбеля разгружаются термальные воды, обогащенные сульфатами, с минерализацией 400–1000 мг/л, в результате чего прослеживается вертикальная зональность химического состава вод [13].

Озеро Ключевое имеет форму, близкую к эллипсу, вытянутому с юго-запада на северо-восток, его размеры примерно 2 × 4 км; видимого поверхностного стока нет. В оз. Штюбеля выделяются кратерная, северная и восточная части, из его северной оконечности вытекает р. Тёплая (бассейн Тихого океана). По данным топографической съемки 1978 г., на карте м-ба 1:25 000 отметки урезом озера Штюбеля и Ключевого составляют 415 и 416,8 м соответственно. Исследования химического состава вод, проведенные Г.Ф. Пилипенко с соавторами [13], показали, что озера и в настоящее время являются сообщающимися и до 70 % стока р. Тёплой происходит за счет вод, поступающих через межозерную перемычку из оз. Ключевого. Сезонные колебания уровня озера невелики: для Ключевого — до 1 м, а для проточного Штюбеля — около 0,3 м.

Для кратерных (кальдерных) озера активных вулканов характерны быстрые изменения объема чаши, формы и уровня водного зеркала. Установлено, например, что в самом конце позднего плейстоцена–начале голоцена вода заполнила вновь сформированную кальдеру III и частично кальдеру II. По данным И.В. Мелекесцева с соавторами [10], озерные осадки этого времени сохранились до отметок 650 м над ур. моря. Колебания уровня озерного водоема в кальдере вулкана Ксудач повторялись неоднократно, вероятно, при каждом извержении, в том числе и молодого конуса Штюбеля. До формирования этого конуса, начавшегося примерно 1600 л. н., в кальдере V также существовало единое озеро. Позже оно разделилось на два, однако при повышении уровня они вновь объединялись. Последнее извержение конуса произошло 28 марта 1907 г., было выброшено до 2 км<sup>3</sup> пирокластического материала, в кальдере и к северу от нее сформировался покров дацитовых пемз мощностью в первые метры [9], а на вершине конуса образовался кратер, который на севере соединился с оз. Штюбеля.

О значительных и быстрых колебаниях положения зеркала водоема свидетельствуют рисунки и фотографии Н.Г. Келля [3], побывавшего в кальдере в 1910 г. и увидевшего там единое озеро (рис. 2, а), а также наблюдения Б.И. Пийпа, который описал в 1937 г. в кальдере уже два водоема, разделенных седловиной протяженностью около 700 м [4, 23] (т. е. в этот период картина в целом была близка к современной).

Судя по фотографиям 1910 г. [3], подъем уровня озера после извержения 1907 г. составил почти 15 м по сравнению с современным положением. Исследователи [13] связывают его с перегораживанием истока р. Тёплой грубообломочным материалом в результате сейсмообвала и(или) взрывными отложениями. Работы 2016 г. показали, что остатки «плотины» сохранились там и в настоящее время [22]. В результате последующего (после 1910 г.) падения уровня по берегам озера сформировались три преимущественно эрозионные (абразионные) террасы (12–15, 7–8 и 3–5 м). В пределах наиболее крупных конусов выноса по периферии озера можно проследить два уровня, различающихся по высоте на 5–7 м: нижний вложен в центральную часть верхнего (см. рис. 2, б). Такие различия в строении береговых форм рельефа могут быть обусловлены активным поступлением рыхлого материала в пределах конусов, что несколько «смазывало» общую картину формирования террас при падении уровня озера. Таким образом, современная прибрежная зона озера (до +15 м над урезом) около 100 лет назад в течение нескольких лет находилась под воздействием волновых процессов, при снижении уровня водоема в ее пределах сформировались абразионные террасы и многочисленные эрозионные врезы.

### БЕРЕГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Современная береговая линия оз. Ключевого осложнена несколькими мысами и заливами, но в целом характеризуется незначительной извилистостью: коэффициент извилистости — 1,25 (см. таб-

лицу). Аккумулятивные участки составляют примерно две пятых протяженности побережья, развиты они в приустьевых частях рек, где можно видеть небольшие пляжи (шириной 5–15 м), иногда с зачатками лагун, обрамляющих конусы выноса впадающих в озера водотоков. Все конусы имеют правильную полукруглую форму, радиус которой колеблется от 50 до 400 м в зависимости от мощности водотока, выносящего материал. Аккумулятивные пляжевые и абразионные берега, как правило, разделяют участки абразионно-аккумулятивного выровненного побережья. Во время штормов периферия конусов выноса разрушается с формированием уступов высотой до 1,5–2 м.

Большая часть береговой линии оз. Ключевого — южное подножие конуса Штюбеля и выходящие вдоль побережья экстрезивные купола, которые обычно формируют мысы, — это абразионные участки. Их морфология зависит от состава слагающих пород. В местах выхода плотных сливных андезитов (южная оконечность конуса Штюбеля) выработаны классические абразионные ниши высотой 1,5–2 м [22]. Там, где в береговом обрыве выходят вулканисты меньшей плотности (лавобрекчии, туфолавы и пр.), береговой уступ в результате размыва периодически обрушается, и на бенче формируется нагромождение блоков вулканических пород размером до 1–2 м. Для отпрепарированных денудацией экстрезивных куполов, выходящих по берегам озера, характерны мелкополиэдрические (брусчатые) отдельности [23], по которым происходит их разрушение, поэтому абразионные ниши здесь выражены менее четко, чем в лавах.

На побережье оз. Штюбеля доминируют абразионные процессы, аккумулятивные участки непротяженные и приурочены к приустьевым частям водотоков. Конус выноса, расположенный у северной оконечности межозерной перемычки, в устье руч. Седловинного, состоит из двух частей. Более обширная отмершая часть в устье долины руч. Седловинного была привязана к уровню водоема +15 м, она перекрывает лавы межозерной перемычки и в настоящее время задернована и покрыта кустарником (см. рис. 2, б). Последний этап ее активного формирования был связан с выносом пирокластического материала из долины ручья непосредственно после извержения 1907 г. Молодой активно развивающийся конус расположен в современной приустьевой части ручья, впадающего в оз. Штюбеля. При аэровизуальных наблюдениях хорошо видно его подводное продолжение, которое частично выполняет восточную часть озера, имеющего здесь глубину менее 27 м.

Внутренние склоны затопленного кратера конуса Штюбеля достигают крутизны 26,5°. Здесь доминируют активные обвально-осыпные процессы, нижние части осыпей подработаны абразией, поэтому берега классифицированы как абразионно-денудационные. К восточному борту горловины,

**Морфометрические параметры озер Ключевого и Штюбеля**

Параметры	Озеро			
	Ключевое		Штюбеля	
	2016 г.	1991 г., по [13]	2016 г.	1991 г., по [13]
Максимальная глубина, м	93	96	82	85
Средняя глубина, м	60,5	—	33,5	—
Площадь озера, км <sup>2</sup>	5,4	5,4	2,49	2,49
Объем, млн м <sup>3</sup>	327	326,7	83,5	83,5
Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	63*	44	63*	16
Длина береговой линии, км	10,3	—	11,5	—
Длина озера, км	4,15	—	4	—
Максимальная ширина, км	2	—	1,15	—
Средняя ширина, км	1,3	—	0,62	—
Большая ось, км	4,15	—	2,66	—
Малая ось, км	2	—	1,44	—
Коэффициент извилистости береговой линии	1,25	—	2,05	—
Показатель площади	0,0857	—	0,0395	—
Удельный водосбор	11,6	—	25,3	—
Коэффициент емкости	0,65	—	0,40	—
Показатель открытости	0,089	—	0,074	—

Примечание. Прочерк — данные отсутствуют.

\* Площадь бассейна обоих озер.

соединяющей кратер с северной частью озера, приурочены абразионные участки. Побережье оз. Штюбеля в северной и восточной его частях сложено пирокластическим материалом, вынесенным туда водотоками со склонов, где он выпал в виде обильной тефры, мощность которой только при извержении 1907 г. составляла несколько метров. Здесь сформировались абразионно-аккумулятивные выровненные берега. На северном побережье озера прослеживается пологонаклонная аккумулятивная поверхность с отметками от 25–30 м в тыловой части до 3–4 м в приурезовой. Активный вынос рыхлого материала временными водотоками в виде гиперконцентрированных потоков с формированием многочисленных перекрывающих друг друга конусов выноса обусловил слабую выраженность отдельных террасовых уровней. Нижняя часть поверхности с отметками 3–7 м прорезана густой сетью V-образных эрозионных врез, что связано с относительно недавним падением уровня водоема [22].

### МОРФОЛОГИЯ ОЗЕРНЫХ КОТЛОВИН И ПОДВОДНЫЙ РЕЛЬЕФ

Анализ цифровых батиметрических данных в виде профилей позволил впервые описать специфичные морфологические элементы современных озерных котловин, а также построить их батиметрические схемы (рис. 3, 4).

**Озеро Штюбеля** ( $51^{\circ}49,428'$  с. ш.,  $157^{\circ}32,582'$  в. д.). Котловина озера имеет сложное строение и резкие перепады глубин (см. рис. 3, а). Три его части характеризуются следующими параметрами: кратерная —  $1,35 \times 1,07$  км, глубина до 82 м; северная —  $0,65 \times 1,03$  км, глубина до 29 м; восточная —  $0,9 \times 0,55$  км, глубина до 27 м. Длина пролива между кратерной и северной частями озера — 0,3 км, ширина — 0,25 км, глубина достигает 40 м. Пролив между северной и восточной частями имеет протяженность 0,22 км, ширину 0,1 км и глубину до 11 м.

Наиболее глубокая, кратерная часть имеет самое сложное строение. В центре ее нами впервые обнаружена положительная вулканическая форма — предположительно подводный экстрезивный купол с двумя вершинами (западной и восточной), разделенными седловинами (см. рис. 3, б). Длина экстрезии с запада на восток составляет 335 м, с севера на юг — 250 м, ее основание очерчено изобатой 80 м. Площадь основания достигает  $50\,420$  м<sup>2</sup>, периметр — 998 м, а объем экстрезии —  $773\,750$  м<sup>3</sup> ( $0,00077$  км<sup>3</sup>). Относительная высота над дном кратера западной вершины равна 35 м, восточной — 40 м. На вершине и склонах экстрезии наблюдаются обширные подводные газогидротермальные выходы, высота их гидроакустической тени достигает 50–70 м и доходит до поверхности. Очевидно, что здесь находится мощное подводное сольфатарное поле. Помимо этого, в восточном секторе кратерной части озера отчетливо прослеживается крупная экстрезия, резко выделяющаяся в очертаниях подводного склона кратера. Относительная ее высота составляет 50 м, диаметр — около 160 м.

Возможно, что эти экстрезии образовались относительно недавно, между 1991 и 2016 гг., так как на батиметрической карте, составленной по результатам эхолотной съемки 1991 г. сотрудниками КамчатНИРО [13], в кратерной части оз. Штюбеля не отмечено никаких положительных подводных форм. Изобаты этой карты показывают равномерное увеличение глубин в соответствии с формой кратера, представляющего в плане эллипс, вытянутый с юго-запада на северо-восток. По устному сообщению С.М. Фазлулина (2017 г.), в 1991 г. в центре кратерной части отмечались обширные выходы пузырьков газа, однако наличие подводной экстрезии аппаратно никак не фиксировалось.

Кроме этого, в кратерной части озера обнаружен отдельно стоящий подводный конус высотой 6 м, на его вершине наблюдаются небольшая воронка и мощная газогидротермальная струя высотой до 60 м. Хотя конус не выражается в масштабе батиметрической схемы, это очень важный элемент озерной котловины, имеющий подводную газогидротермальную площадку. Подтверждением предположения об экстрезивной природе обнаруженных нами куполов служат косые гидроакустические границы, маркирующие их продолжение под чехлом обломочных и пирокластических отложений кратера.

**Озеро Ключевое** ( $51^{\circ}47,646'$  с. ш.,  $157^{\circ}32,209'$  в. д.). Котловина озера имеет форму эллипса, вытянутого с северо-запада на юго-восток, ее размеры —  $4,15 \times 2$  км, наибольшие отметки глубин приходятся на его юго-западную часть и достигают, по нашим данным, 93 м (см. рис. 4, а). Днище котловины не имеет существенных осложнений, за исключением северо-восточной части, в которой наблюдается углубление в форме желоба, — вероятно, это остаток древней протоки, соединявшей озера. По данным эхолокационной съемки, даже на аккумулятивных участках побережья озера быстро нарастают глубины: угол подводного склона близок к углу естественного откоса. Подводное продолжение конусов выноса выражено очень слабо.

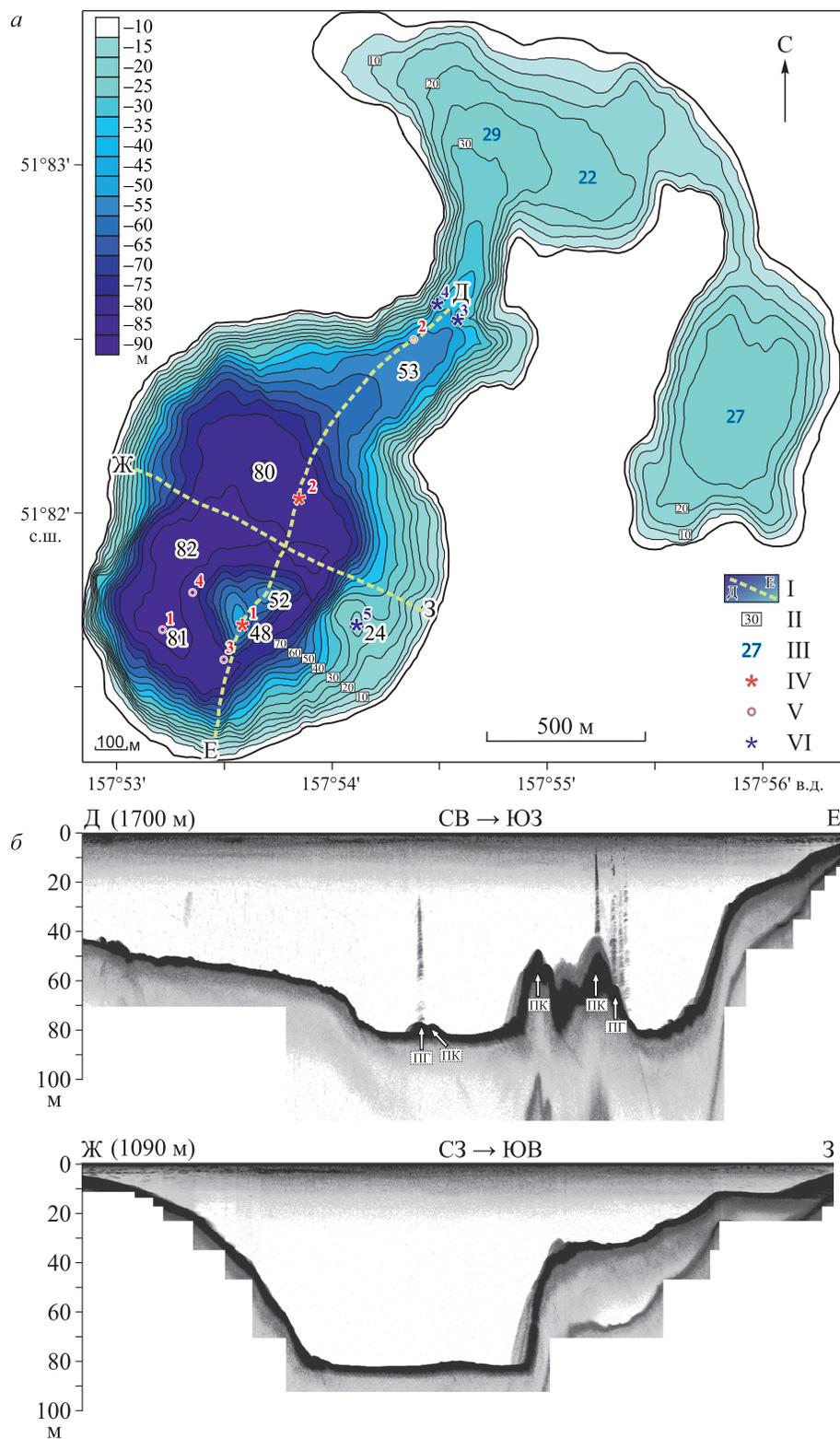
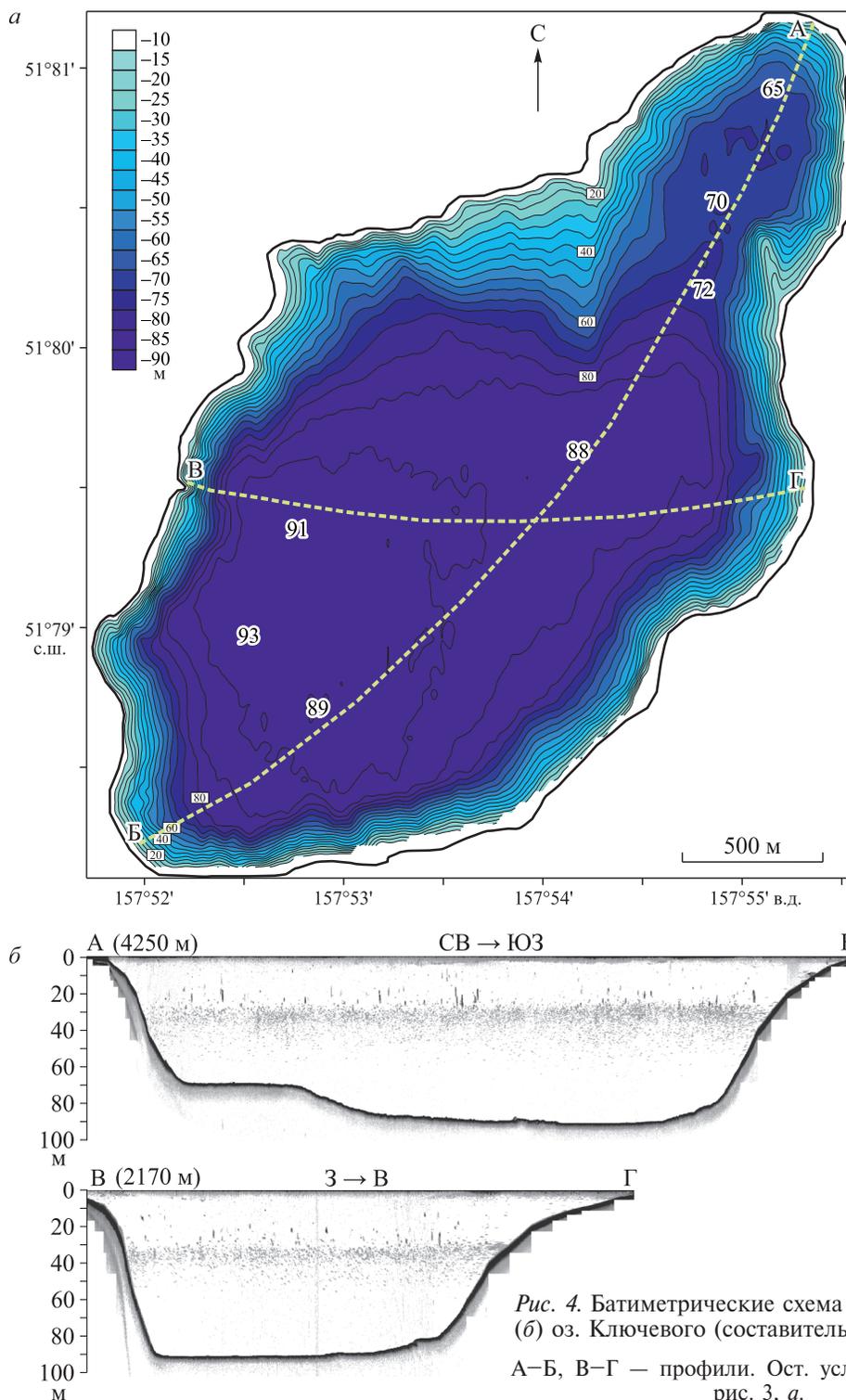


Рис. 3. Батиметрическая схема (а) и профили (б) оз. Штюбеля (составитель Д.Н. Козлов).

I — батиметрические профили (Д—Е, Ж—3), представленные на рис. 3, б; II — изобаты, проведенные через 10 м; III — отметки максимальных глубин в различных частях озера; IV — подводные экструзии с активными газогидротермальными выходами (1 — на глубине 80 м, высотой 40 м, газогидротермы достигают водной поверхности; 2 — на глубине 80 м, высотой 6 м, высота струи до 50 м); V — отдельные подводные газогидротермы (1 — на

глубине 81 м, струя достигает поверхности; 2 — на глубине 50 м, струя высотой около 25 м; 3 — на глубине 80 м, струя достигает поверхности, мощное, протяженностью около 170 м; 4 — на глубине 76 м, мощное, струя достигает поверхности); VI — подводные экструзии без газогидротерм (1 — на глубине 51 м, высотой 14 м; 2 — на глубине 42 м, высотой 36 м; 3 — на подводной части склона кратера, наивысшая точка на глубине 24 м). ПГ — подводные газогидротермы; ПК — подводный купол.



**ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В КАЛЬДЕРЕ КСУДАЧ**

Современная газогидротермальная деятельность, которая свидетельствует об активности комплекса в настоящее время, наблюдается в пределах наиболее молодых голоценовых кальдер комплекса — IV и V. По берегам озер Ключевого и Штюбеля происходит разгрузка термальных вод. Самая крупная термальная аномалия — Горячий пляж (см. рис. 1) на западном берегу оз. Ключевого — связана с комплексом экстрезий Парящий уступ и Парящий гребень. На самих экстрезиях исследователями [12, 13] описаны парящие площадки с температурой до 30–40 °С и слабые струи пара, нагретые до 90 °С. В работах Г.Ф. Пилипенко с соавторами [13, 24] воды термальных источников Горячего пляжа описаны как пресные (минерализация до 0,9 г/л) гидрокарбонатные натриевые с температурой 21–68 °С и рН 6,7–8,4. В составе спонтанных газов гидротерм преобладал азот (84–90 %).

На восточном и южном берегах оз. Ключевого по аэрофотоснимкам 1984–1991 гг. и результатам наземного термометрического зондирования в шпурах глубиной до 1 м этими же исследователями выделены участки с тепловыми аномалиями (см. рис. 1). Температура отложений пляжа и озерной воды в прибрежной полосе в этот период здесь достигала 21–26 °С. Общая разгрузка гидротерм оз. Ключевого оценивается [24] в 560 л/с, при этом отмечается, что основная разгрузка приходится на береговые выходы, а в донной части выходов термальной воды нет.

Ю.М. Дубик и И.А. Меньяйлов [12] описали также газогидротермы на южном берегу оз. Штюбеля, а Г.Ф. Пилипенко с соавторами [13] — и в прибрежной зоне на востоке пролива, между его кратерной и северной частями (см. рис. 1). В последнем случае на расстоянии 1–2 м от берега наблюдались слабые выходы газа, дно вдоль берега на протяжении 100 м было покрыто зелеными термофильными водорослями, отмечалось просачивание термальной воды из-под каменистой осыпи на берегу. При обследовании 1982 и 1991 гг. температура воды достигала здесь 37–38,5 °С, рН 6,1, а минерализация составляла 1 г/л. Химический состав воды кремнистый сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатный натриевый. Среди спонтанных газов преобладал азот (66–74 %), содержание углекислого газа составляло 15–24 %, а кислорода — 8–9 %. Суммарный дебит гидротерм в оз. Штюбеля оценивался в 500 л/с [24], основная разгрузка терм происходила в донной части озера.

Описанные в [13] участки разгрузки термальных вод в южной и юго-восточной частях оз. Ключевого в ходе проведения в 2016 г. тепловизионной съемки и замеров термопарой поверхности пляжных отложений и прибрежных озерных вод не обнаружены. Физико-химические особенности газогидротермальных выходов Горячего пляжа на западном берегу озера не претерпели существенных изменений, максимальная температура гидротерм составила 63–65 °С, рН 6,9. Температура парогазовых выходов экстрезий Парящий уступ и Парящий гребень — 45–65 и 35–58 °С соответственно, что сопоставимо со значениями температуры предыдущих исследований.

Газогидротермы оз. Штюбеля в настоящее время отмечают на дне его кратерной части, на глубине 40–75 м (см. рис. 3), а также в прибрежной зоне в проливе между кратерной и северной частями озера (см. рис. 1). В последнем случае мы не обнаружили термальных выходов непосредственно на восточном берегу, — возможно, они полностью перекрыты крупнообломочными отложениями осыпи, сформировавшейся у подножия дацитовых экстрезий. Со дна озера в прибрежной зоне, как отмечалось и в 1982, и в 1991 гг., поднимаются слабые струйки газов, температура воды в месте выходов газогидротерм достигает 20–23 °С, рН озерной воды 6,2. При заглублении термопары на 5–10 см в песчаные отложения температура составляет 34–44 °С. На южном берегу озера с помощью тепловизионной съемки и замеров термопарой выходы термальных вод не обнаружены.

Таким образом, за период инструментальных наблюдений в кальдере Ксудач существенных изменений газогидротермальной деятельности не наблюдалось.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исследования 2016 г. позволили получить новый материал об активном геолого-геоморфологическом объекте — кальдерном комплексе Ксудач, в частности результаты повторной батиметрической и тепловизионной съемки, проведенной через 25 лет после предыдущих работ. Благодаря цифровому формату эхограмм с синхронной спутниковой привязкой профилей, съемка дала более точную картину подводного рельефа.

Впервые в оз. Штюбеля инструментально зафиксирован подводный экстрезивный купол высотой около 40 м с основанием 335 × 250 м. На его вершине и склонах при помощи эхолота и при визуальном наблюдении установлены обширные подводные газогидротермальные выходы. Данная экстрезия

имеет существенные для кратера размеры, однако она отсутствует на более ранней батиметрической схеме на основе промеров 1991 г. Это может быть обусловлено тем, что непосредственно на этом участке промеры не осуществлялись или эхограмма была некондиционной. Возможно также, что морфологическое выражение экструзии в рельефе дна озера произошло уже после промерных работ 1991 г. Кроме того, в течение прошедших 25 лет могло иметь место и подводное извержение. В кратере зафиксированы и более мелкие положительные формы подводного рельефа.

Анализ современной газогидротермальной деятельности в кальдере Ксудач показывает относительную стабильность поствулканических процессов, проявляющихся в виде выходов газогидротерм как в пределах озерной котловины (оз. Штюбеля), так и на берегу (оз. Ключевое). На экструзивных куполах Парящий уступ и Парящий гребень отмечаются многочисленные слабые парогазовые выходы, каких-либо существенных изменений в парогазовой активности за период инструментальных исследований здесь не наблюдалось.

Однако необходимо отметить, что глубина озер Ключевого и Штюбеля за прошедшие 25 лет уменьшилась на 3 м: с 96 до 93 м и с 85 до 82 м соответственно. Важно, что при этом линейные и площадные характеристики озер практически не изменились. Снижение глубины на такую величину вряд ли может быть обусловлено сезонными колебаниями уровня сообщающейся системы озер Ключевое — Штюбеля или же общим его понижением вследствие, например, углубления русла р. Тёплой. В настоящее время порог стока сформирован прочными лавами, а «плотина», перекрывавшая исток реки после извержения 1907 г., была разрушена гораздо раньше — до 1937 г. [4, 22, 23]. О том, что обусловленное этим падение уровня озерной системы произошло не одно-два десятилетия назад, свидетельствуют и данные анализа возраста растительности на низкой озерной террасе близ Горячего пляжа, имеющей отметки 3 м над современным урезом. Макроскопический анализ спилов скелетных осей ольховника показал [25], что формирование основного массива сообщества ольхи кустарниковой началось здесь в 1950-х гг. (возраст изученных растений преимущественно 45–60 лет), — соответственно, в 1991 г. терраса не могла быть зоной пляжа. Современный пляж имеет отметки менее 1–1,5 м над урезом (с учетом сезонных колебаний), он лишен растительности, единичные кустарники возрастом до 20 лет произрастают только в его тыловой части. Они находятся в угнетенном состоянии: имеются следы повреждений от воздействия льда и выбросов парогазовых струй.

В современной береговой зоне озер аккумуляция рыхлого материала происходит лишь на участках, куда он активно поступает со склонов кальдерного комплекса, преимущественно в приустьевых частях разнопорядковых водотоков, но при волнении и здесь происходит разрушение аккумулятивных форм. В целом на побережье доминирует абразия с выносом материала в глубоководную часть озер. При этом подводное продолжение конусов выноса, по данным промеров, выражено очень слабо, за исключением восточной части оз. Штюбеля. Выносимый реками со склонов кальдер материал максимальное влияние оказал на морфологию современной прибрежной части озер, что привело к хорошо видимому при аэровизуальных наблюдениях частичному заполнению мелководных северной и восточной частей оз. Штюбеля. Относительно размеров кратерной части и котловины оз. Ключевого количество материала кажется не слишком существенным. Однако перманентное поступление обломочного материала, в том числе и абразионного, в глубоководную часть озер и нивелирование неровностей их днищ могли способствовать постепенному уменьшению их максимальных глубин. Глубина кратерной части оз. Штюбеля могла уменьшиться и в связи с поствулканической активностью — поднятием участков дна при формировании экструзивных куполов.

*Работа выполнена в рамках тем госзаданий Института географии РАН (0148–2019–0005, № АААА–А19–119021990091–4) и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (0285–2018–0014, № АААА–А18–118012290124–5), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18–05–00967).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дитмар К. Поездки и пребывание в Камчатке в 1851–1855 гг. Ч. 1: Исторический отчет по путевым дневникам. — СПб.: Типография Император. АН, 1901. — 756 с.
2. Тюшов В.Н. По западному берегу Камчатки. — СПб.: Типография М. Стасюлевича, 1906. — 521 с.
3. Кель Н.Г. Карта вулканов Камчатки: Объяснит. текст с табл., чертежами, снимками и карта (на 2 л.). М-б 1:750 000. — Л.: Изд-во РГО, 1928. — 75 с.

4. Пийп Б.И. О силе извержения вулкана Ксудач в марте 1907 г. // Бюл. вулканол. станций. — 1941. — № 10. — С. 23–29.
5. Влодавец В.И. Вулкан Ксудач // Вулканы Советского Союза. — М.: Географгиз, 1949. — С. 59–61.
6. Заварицкий А.Н. Вулкан Ксудач // Труды лаборатории вулканологии. — 1955. — Вып. 10. — С. 65–68.
7. Селянгин О.Б. Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 5. — С. 16–27.
8. Селянгин О.Б. Вулкан Ксудач // Действующие вулканы Камчатки. — М.: Наука, 1991. — Т. 2. — С. 340–355.
9. Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние 10 тыс. лет // Вулканология и сейсмология. — 1987. — № 4. — С. 28–39.
10. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарёва В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. — 1995. — № 4–5. — С. 28–53.
11. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарёва В.В., Кирьянов В.Ю. Крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке — кальдерообразующее извержение в. Ксудач 1700–1800 <sup>14</sup>С лет назад // Вулканология и сейсмология. — 1995. — № 2. — С. 30–49.
12. Дубик Ю.М., Меньяйлов И.А. Газогидротермальная деятельность кальдеры Ксудач // Бюл. вулканол. станций. — 1971. — № 47. — С. 40–43.
13. Пилипенко Г.Ф., Разина А.А., Фазлуллин С.М. Гидротермы кальдеры вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. — 2001. — № 6. — С. 43–57.
14. Козлов Д.Н., Белоусов А.Б. Современные методы исследований внутрикальдерных озёр активных вулканов (на примере вулкана Головинина, о. Кунашир, Курильские о-ва) // Материалы XIII науч. совещ. географов Сибири и Дальнего Востока. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2007. — Т. 1. — С. 142–144.
15. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Результаты исследования внутрикальдерного озера Бирюзовое на вулкане Заварицкого (о. Симушир, Курильские острова) // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: III Сахалинск. молодежн. научн. школа. — Южно-Сахалинск: Изд-во Ин-та морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2009. — С. 57–62.
16. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные по морфологии внутрикальдерных озёр островов Кунашир и Симушир // Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле. — 2009. — № 2, вып. 14. — С. 159–164.
17. Козлов Д.Н., Рашидов В.А., Коротеев И.Г. Морфология бухты Броутона (о. Симушир, Курильские острова) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле. — 2012. — № 2, вып. 20. — С. 71–77.
18. Козлов Д.Н. Особенности морфологии кратерных озёр Курильских островов: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — СПб.: Изд-во Рос. пед. ун-та, 2013. — 24 с.
19. Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. — 1957. — № 25. — С. 5–95.
20. Шеймович В.С. Вулкан Ксудач в августе 1963 г. // Бюл. вулканол. станций. — 1966. — № 41. — С. 25–28.
21. Лебедева Е.В. Кальдера вулкана Ксудач: современные процессы рельефообразования и особенности строения речной сети // Геоморфология. — 2017. — № 3. — С. 60–75.
22. Лебедева Е.В. Озера кальдерного комплекса Ксудач (Камчатка): береговые процессы и колебание уровня // Геоморфология. — 2017. — № 4. — С. 35–49.
23. Пийп Б.И. Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки // Труды Камчатской вулканол. станции. — 1947. — Вып. 3. — С. 89–134.
24. Пилипенко Г.Ф., Разина А.А. Гидротермы кальдерного комплекса вулкана Ксудач (Камчатка) // Материалы ежегод. конф. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во Ин-та вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2003. — С. 35–41.
25. Копанина А.В., Лебедева Е.В., Власова И.И. Кальдера Ксудач на юге Камчатского полуострова: особенности восстановления растительности после извержения 1907 г. // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2018. — № 6. — С. 57–69.

*Поступила в редакцию 06.04.2018*

*После доработки 06.04.2018*

*Принята к публикации 26.06.2019*