

**ОЗЕРА КАЛЬДЕРНОГО КОМПЛЕКСА КСУДАЧ (КАМЧАТКА):
БЕРЕГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ**

*Институт географии РАН, Москва, Россия
e-mail: Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

Для позднелейстоцен-голоценовой истории развития озер кальдерного комплекса характерны значительные колебания уровня, которые неоднократно повторялись – вероятно, при каждом извержении. Это вызывало формирование озерных террас, а также влияло на характер развития внутрикальдерной речной сети. Поступавшие на поверхность значительные объемы вулканического материала впоследствии подвергались размыву с формированием седей и образованием конусов выноса в акватории озер. Исследования 2016 г. показали, что на берегах озер Ключевое и Штюбеля в настоящее время доминируют абразионные процессы, аккумуляция наблюдается лишь в приустьевых частях рек, где идет активный вынос материала со склонов кальдеры. На берегах озер достаточно четко прослеживаются четыре террасовых уровня, сложенных преимущественно пирокластическим материалом и по сути являющихся эрозионными или цокольными. Нижние террасы (3–5, 7–8 и 12–15 м) часто сопрягаются с обширными конусами выноса и на этих участках могут быть аккумулятивными. Их формирование произошло после извержения молодого конуса Штюбеля в 1907 г. и, вероятно, было обусловлено перегораживанием истока р. Теплой взрывными отложениями и последующим ее поэтапным врезанием. Формирование террасового уровня высотой 25–30 м, который фиксируется в прибортовых частях самой молодой кальдеры V, видимо, обусловлено накоплением и последующим переотложением пирокластических толщ более ранних извержений конуса Штюбеля (после кальдерообразующего извержения 1725 л.н.). Наличие хорошо выраженных абразионных ниш в плотных андезитах близ современного уреза оз. Ключевого позволяет заключить о достаточно длительном положении его уровня на таких отметках с незначительными (до 1 м) колебаниями. Наличие сцементированных прибрежно-озерных отложений характерного облика на отметках +1 м выше современного уреза озер в долинах ряда водотоков свидетельствует о том, что между формированием третьей и четвертой террас – в период, который, видимо, отличался более высокой, чем современная, гидротермальной активностью, внутрикальдерный водоем определенное время имел уровень, лишь немногим превышавший нынешний.

Ключевые слова: терраса, конус выноса, абразия, аккумуляция, пирокластические отложения.

Поступила в редакцию 21.02.2017

Принята к печати 20.06.2017

DOI: 10.7868/S0435428117040046

**CALDERA KSUDACH' LAKES (KAMCHATKA): COASTAL PROCESSES
AND THE LEVEL FLUCTUATION**

E.V. LEBEDEVA

*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia
e-mail: Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

S u m m a r y

The Late Pleistocene-Holocene history of the caldera complex is characterized by large fluctuations of the lakes' level, which were repeated probability at each eruption. This led to the formation of lake terraces, as well as the effect on the character of the development of intracaldera river network. Large amounts of volcanic material supplied on the calderas slopes are subsequently subjected to erosion with the formation of lahars and debris fans in the lakes area. Our research in 2016 showed that abrasion is the dominated process on the shores of Klyuchevoye and Shtyubel lakes, accumulation prevails only near river mouths where there is an active removal of debris from the caldera slopes. Four levels of terraces can be traced on the shores of the lakes, as a rule, they are erosion. Three lower terraces (3–5, 7–8, 12–15 m above lakes level) are usually correlated with extensive proluvial fans and at these places they may be accumulative. Formation of these levels occurred after the eruption of the young Shtyubel cone in 1907. Probably it was caused by partitioning

of the Teplaya river source by explosive deposits and its subsequent gradual incision. Formation of the terrace level of 25–30 m height, which is fixed near edges of the youngest caldera, probably due to the accumulation and subsequent redeposition of pyroclastic of another Shtyubel cone explosion after last caldera eruption 1725 years BP. The presence of well-defined abrasion niches in strong andesites near the modern lake Klyuchevoye level shows that the level was stable for enough long time with fluctuations up to 1 m. The cemented well-sorted coastal sediments were found at the level of +1 m above the present shoreline of lakes in the valleys of some intracaldera streams. They were accumulated in the period between the formation of 4 and 3 terrace levels when hydrothermal activity in the lakes was higher than at present.

Keywords: terrace, alluvial fan, abrasion, accumulation, pyroclastic deposits.

Received 21.02.2017

Accepted 20.06.2017

Введение

Расположенная на юге Камчатки кальдерная депрессия вулкана Ксудач, сформированная в результате 5 кальдерообразующих извержений на протяжении второй половины плейстоцена и голоцена, является одним из интереснейших вулканических объектов региона. Хорошо изучено ее геологическое строение, состав и время формирования основных толщ пирокластических отложений, как выполняющих кальдеру, так и распространяющихся по ее периферии, получено несколько десятков датировок абс. возраста рыхлых отложений по данным радиоуглеродного анализа, что позволило детально восстановить историю голоценовой активности вулкана [1–10 и др.]. Озера кальдеры изучали Ю.М. Дубик и И.А. Меняйлов [11], занимавшиеся газогидротермальной активностью вулкана, а также Г.Ф. Пилипенко, А.А. Разина, С.М. Фазлуллин [12], работы которых были направлены на анализ гидрогеологии, геотермики и гидрохимии водоемов, а также на эхолотирование озерных ванн. Но с точки зрения процессов рельефообразования кальдера по-прежнему исследована слабо. Строение и формирование ее долинной сети были рассмотрены нами ранее [13], но без изучения колебания их уровня и особенностей береговых процессов эта картина явно будет неполной. В данной работе, основанной как на материалах перечисленных выше исследований, так и на собственных полевых наблюдениях, мы и хотели остановиться на анализе строения береговой зоны озер.

Озера Ключевое и Штюбеля (рис. 1) расположены в центральной части кальдерной депрессии. Ключевое по форме близко к эллипсу, вытянуто с ЮЗ на СВ, видимого поверхностного стока не имеет. Его размеры по данным [12], с которыми в целом совпадают результаты эхолотирования, проведенного в 2016 г. Д.Н. Козловым (ИМГиГ, устное сообщение) составляют примерно 4×2 км, площадь – 5.4 км^2 , а глубина – несколько более 90 м. Озеро Штюбеля имеет сложную форму: выделяются кратерная, восточная (или кутовая), а также северная часть, из которой вытекает р. Теплая (бассейн Тихого океана). Суммарная площадь озера достигает 2.49 км^2 , глубина кратерной части превышает 80 м, а других – приближается к 30 м. Высота уреза озер колеблется около 415 м над у.м.¹

Водосборная площадь кальдеры около 64 км^2 , внутрикальдерная речная сеть состоит из 10 водотоков протяженностью 2–4 км и более и множества мелких – длиной 1–2 км, активный сток в них наблюдается преимущественно в теплое время года. Годовое количество атмосферных осадков в пределах кальдеры составляет 3200 мм/год, на испарение и транспирацию уходит около 280 мм/год, а расход р. Теплой даже в межень равен $4.3 \text{ м}^3/\text{с}$ [12]. Поверхностный сток в оз. Штюбеля очень мал: площадь его водосбора всего 16 км^2 и в него выпадают лишь два относительно крупных водотока, что, естественно, не может обеспечить подобный расход вытекающей из него реки.

По берегам озер происходит разгрузка термальных вод, но их объемы в целом не велики и сказываются на температурном режиме лишь непосредственно прилегающих

¹ Абс. отметки зеркала озера по данным разных исследователей несколько отличаются.

участков. Зимой озера замерзают, и лед на некоторых участках побережья может сохраняться до августа. Самая крупная термальная аномалия (до 60–70°) – Горячий пляж на западном берегу оз. Ключевое – связана с комплексом экструзивных куполов Парящий уступ и Парящий гребень [5]. Главными термоводящими каналами служат разломы, пересекающие берега озера и экзоконтакты экструзий. По данным [12], поверхностные и грунтовые воды кальдеры имеют низкую минерализацию – всего 11–37 мг/л. Воды озера 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 до 400–1000 мг/л, в результате чего прослеживается вертикальная зональность химического состава вод.

Согласно типизации вулканических озер [14], рассматриваемые водоемы в настоящее время могут быть отнесены скорее к озерам с низкой физико-химической активностью.

Различие химического состава озерных вод позволило [12] решить проблему формирования стока р. Теплой: было установлено, что до 70% его объема, т.е. примерно 3.1 м³/с, приходится на долю оз. Ключевого, что может быть обеспечено только при наличии скрытой фильтрации из него в оз. Штюбеля. Перемычка, в настоящее время разделяющая их, в основе образована лавовыми потоками андезито-базальтового состава, которые начали формироваться еще на ранней стадии развития конуса Штюбеля – до его первого извержения [15] и протяженность которых достигала 2 км [8]. Так как они характеризуются значительной проницаемостью благодаря наличию внутрилавовых и подлавовых пустот [16], то это объясняет возможность достаточно активного дренажа из оз. Ключевого. Таким образом, озера представляют собой единую сообщающуюся систему.



Рис. 1. Кальдерный комплекс вулкана Ксудач (фрагмент топографической карты)

Основные водотоки, рассматриваемые в статье: 1 – р. Теплая, 2 – руч. Лагерный, 3 – руч. Южный, 4 – руч. Седловинный; 5 – экструзивный массив Парящий уступ; 6 – Горячий пляж

Строение берегов озер

Вдоль побережья оз. Ключевого аккумулятивные участки развиты в основном в приустьевых частях рек, а абразионные приурочены преимущественно к конусу Штюбеля и экструзивным куполам (рис. 2). Одним из крупных аккумулятивных участков

А



Б



Рис. 2. А – оз. Ключевое: на заднем плане конус Штюбеля, справа – экструзия Замок (абразионные участки побережья). На переднем плане – сложенный пемзой пляж и плавающие “островки” пемзы (обведены). Б – Кратерная часть оз. Штюбеля (абразионное побережье), на заднем плане – его северная часть (преимущественно аккумулятивные берега). Здесь и далее фото автора

полукруглой формы радиусом до 400 м с уклоном $5-7^\circ$ (рис. 3А). Они сложены песчано-суглинистым материалом, хорошо окатанной мелкой светлой пемзой, а также валунами и галькой преимущественно андезито-базальтового состава 1–2 класса окатанности размером 0.2–0.3 м; в их пределах прослеживается множество русел, врезанных на глубину до 0.5 м.

Вдоль побережья протянулась низкая (I) терраса, которая имеет слабый уклон в сторону озера ($2-5^\circ$), высота ее обрыва к пляжу достигает 3–5 м. Вверх по долинам ручьев ее уровень постепенно повышается и через уступ крутизной около 20° она переходит во II террасу высотой 7–8 м над современным урезом оз. Ключевого. Строение террас можно проследить в приустьевой части левого борта долины руч. Южного. Они сложены плохо окатанной галькой эффузивов (1–2 кл.) с включением редких валунов диаметром до 0.4 м, а также хорошо окатанной мелкой гальки светлой пемзы; доля заполнителя достигает 40%, он представлен плохо отмытым разнозернистым песком с включением гравия. В целом,

является Горячий пляж длиной около 1 км, который находится на западном берегу озера. Его ширина достигает 20 м, сложен он песком вулканических пород черно-серого цвета и белой пемзой. Уклон пляжа в сторону озера составляет $3-4^\circ$, общий перепад высот – около 1 м. Вдоль уреза прослеживается подобие бара высотой 0.2–0.3 м и шириной 2–3 м, отделяющего небольшую лагуну. Выходы термальных вод отмечены как в лагуне, так и в приустьевой части озера до глубины 0.2–0.3 м. По данным [12], сезонные колебания уровня озер кальдеры не превышают 0.3 м, однако, по нашим наблюдениям в июле 2016 г., лагуна обсохла и уровень озера упал на 0.3 м только за 10 дней без дождя, что свидетельствует о большей вариабельности, по крайней мере, уровня оз. Ключевого.

С севера и юга Горячий пляж ограничен распадками ручьев Лагерный и Южный, образованными в акватории озера конусы выноса (КВ) симметричной

материал по составу аналогичен современному аллювию ручья. На высоте примерно 1.3–1.5 м над урезом последнего в описанной толще прослеживается горизонт плотного тонкого суглинка серо-коричневого цвета, подстилаемый хорошо окатанной пемзой (диаметр около 1 см) и крупнозернистым песком. Мощность горизонта не превышает 10 см, верхняя граница неровная, волнистая (следы размыва?), вдоль нижней – наблюдается ожелезнение. Этот горизонт имеет слабый уклон в сторону озера и прослеживается как в толще I-й (высотой 3–5 м), так и II-й (7–8 м) террас, правда, по направлению от озера в сторону борта кальдеры его состав несколько огрубляется – появляется примесь разнозернистого песка и дресвы. Наличие этого единого горизонта позволяет заключить, что низкая терраса на этом участке является не аккумулятивной, а эрозивной (абразионной) или цокольной – т.е. сформировалась в результате размыва конуса выноса ручья при опускании уровня водоёма.

В ЮВ части озера аккумулятивный участок протяженностью около 2 км сформирован серией слившихся конусов выноса с отметками от 25–30 м в тыловой части до 3–4 м в приурезовой. У наиболее крупных из них в центральной части прослеживается врезанный – сниженный примерно на 5–7 м – уровень, формирование которого очевидно произошло также после падения абс. отметок зеркала водоёма (рис. 3Б). Во время штормов периферия КВ разрушается с формированием уступа высотой до 1.5–2.0 м, в котором вскрывается перемытая тефра. По данным эхолотирования 2016 г. (устное сообщение Д.Н. Козлова) даже на аккумулятивных участках побережья оз. Ключевого быстро нарастают глубины – угол подводного склона близок углу естественного откоса.

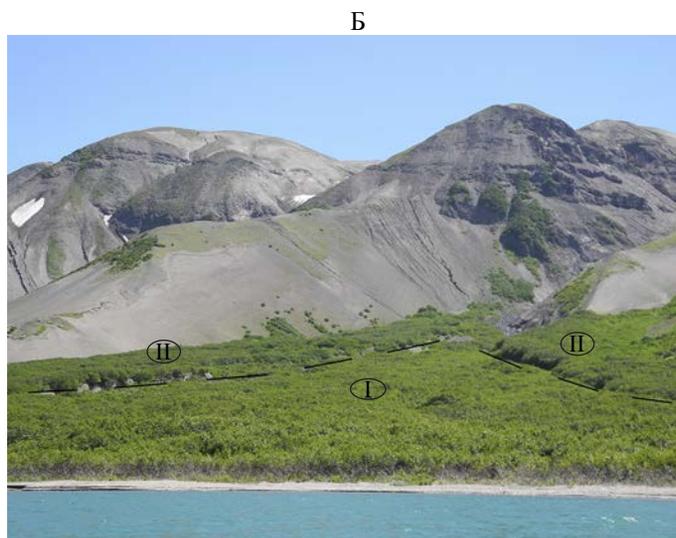
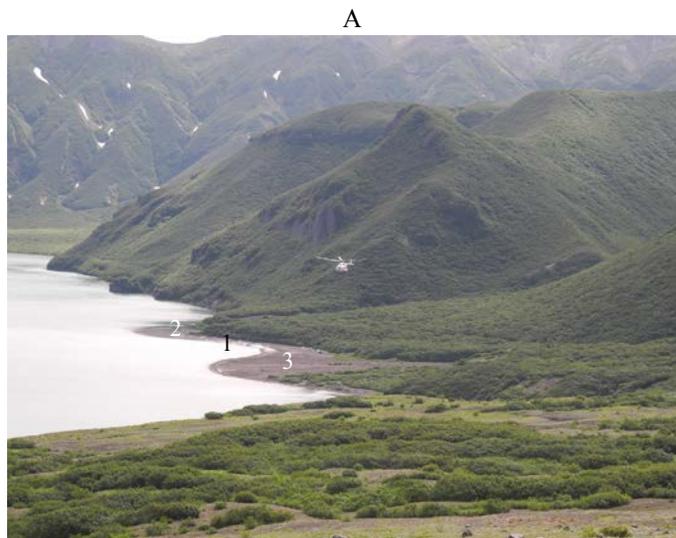


Рис. 3. Конусы выноса на берегах оз. Ключевого
 А – Горячий пляж (1) и конусы выноса ручьев Южного (2) и Лагерного (3), Б – Юго-западный участок побережья – два уровня конуса выноса

Абразионные участки приурочены к конусу Штюбеля и экструзивным массивам на З, В и Ю берегах озера. Их морфология во многом зависит от состава вулканических пород, формирующих абразионные уступы. Фронтальная часть лавового потока конуса Штюбеля севернее руч. Лагерного образует береговой обрыв высотой 3–7 м и протяженностью до 100 м. Южный его участок длиной около 50 м представляет собой отвесную стенку, сложенную сливными андезитами, в которой выработана классическая абразионная ниша высотой 1.5–2.0 м (рис. 4). Севернее в береговом обрыве выходят вулканиты меньшей плотности (лавобрекчии, туфолавы и пр.), и хорошо выраженные абразионные ниши там не формируются, но береговой уступ в результате размыва периодически обрушается, о чем свидетельствует нагромождение на бенче блоков вулканических пород размером до 1–2 м.

Отпрепарированные денудацией экструзивные тела, выходящие по берегам озера, обычно формируют мысы, где также доминируют абразионные процессы. Однако, благодаря структуре этих образований, для которых часто характерны изометричные – мелкополиэдрические (брусчатые) отдельности [2] размером 0.2–0.3 м и более, по которым идет разрушение массивов, абразионные ниши здесь выражены менее четко, чем в лавах. Кроме того, активные обвально-осыпные процессы на склонах экструзивных куполов нередко приводят к накоплению у их подножий шлейфов грубо-обломочного материала.



Рис. 4. Абразионная ниша в андезитах у южного подножия конуса Штюбеля

В приурезовой части ЮЗ склона конуса Штюбеля наряду с абразией идет активная попятная эрозия впадающих в озеро водотоков. Глубина свежих врезов здесь от 3 до 8 м, поперечный профиль их V-образный и каньонообразный при ширине днища 1–3 м, русла узкие, ступенчато-водопадные. Интересно, что во вновь сформированной (по-видимому, в последний этап кальдерообразования – после формирования кальдеры V – около 1725 л.н. [17]) приустьевой части руч. Лагерного [13] в русле (на расстоянии до 1.5 км от устья) прослеживаются четыре хорошо выраженных уступа высотой от 1 до 2 м, формирование которых также обусловлено регрессивной эрозией, связанной с падением уровня озерного бассейна. Стоит отметить, что подобных четких уступов в руслах других водотоков мы не наблюдали, что

может быть обусловлено тем, что здесь они подчеркнуты выходами более плотных лав андезито-базальтового состава.

На южном склоне конуса Штюбеля прослеживается три террасовых уровня с отметками бровки: 3–5, 7–8 и 12–15 м. Поверхности террас слабо наклонены в сторону озера, ширина их колеблется в среднем от 4–6 до 10 м, на некоторых участках нижняя терраса частично разрушена в результате абразии и ее ширина не превышает 1–2 м либо она вовсе отсутствует (рис. 5). На поверхности террас – высыпки вулканического материала размерностью от гравия до глыб.



Рис. 5. Уступы озерных террас на южном склоне конуса Штюбеля (оз. Ключевое)

Берега оз. *Штюбеля* (рис. 2Б) в северной и восточной его частях сложены пирокластическим материалом, вынесенным туда водотоками со склонов, где он выпал в виде обильной тефры, мощность которой только при извержении 1907 г. составляла там по [6] 3 м, а по [5] – достигала 4–5 м. В итоге на северном берегу озера сформировалась пологонаклонная аккумулятивная поверхность с отметками от 25–30 м в тыловой части до 3–4 м в приустьевой. 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 врезов, что также очевидно связано с относительно недавним падением уровня водоема.

Близ истока р. Теплой водотоки, берущие начало на 3 и С3 склоне кальдеры сформировали обширный конус выноса высотой от 3–4 до 7–8 м над урезом. С ним сопряжены озерные террасы с отметками бровки 3.5–4 и 7 м, сложенные слабо сортированной пирокластикой, протягивающиеся и у подножия северного склона конуса Штюбеля. Эти уровни также испещрены свежими врезам.

В восточную часть оз. Штюбеля руч. Седловинный выносит большое количество тонкого материала в результате размыва отложений пирокластических потоков, выполнявших его долину. Здесь им сформирован конус выноса в форме правильной полукругности. Вдоль восточного берега этой части озера от устья руч. Седловинного к северу прослеживается 25–30-метровый аккумулятивный уровень, сформированный грубослоистым пирокластическим материалом – преимущественно обломками пемзы размером 0.1–0.2 м с включением редких глыб андезито-базальтов. Эрозионный останец, сложенный разнообразной пирокластикой, с аналогичными высотными отметками находится и на левом борту р. Теплой близ ее истока [13].

Абразионные участки побережья приурочены к затопленному кратеру конуса Штюбеля и восточному борту горловины, соединяющей его с северной частью озера, где выходит дацитовая экструзия. На внутренних склонах кратера доминируют активные обвально-осыпные процессы, однако, в нижней их части тела осыпей подрезаны: здесь сформирован вертикальный уступ высотой около 1 м, ниже последнего на глубине около 35 м (относительно уровня озера конца июля 2016 г.) выработана небольшая терраска шириной до 1 м. Это также свидетельствует о сезонных колебаниях уровня озера, в процессе которых происходит подработка края активно формирующихся осыпей.

Особенности развития гидрографической системы кальдеры Ксудач

Материалы ранее проводившихся исследований [8, 12 и др.] свидетельствуют, что в периоды относительного вулканического покоя кальдеры влк. Ксудач заполнялись озерами, в связи с чем все голоценовые извержения начинались здесь как фреато-магматические. В более холодных условиях — в конце позднего плейстоцена — полости кальдер I и II служили ледоёмом, питавшим протяженные ледники, однако после их таяния здесь по [6] также образовалось обширное озеро до 6–7 км в поперечнике, которое уже дренировалось р. Теплой. После извержения 8700–8800¹⁴С л.н. озеро распространялось на кальдеры II и III, озерные осадки этого времени по [8] встречаются вплоть до отметок 650 м над у.м., т.е. уровень водоема превышал современный более чем на 235 м и занимал он более половины площади всего кальдерного комплекса. О размерах и уровнях более поздних озер информации в литературных источниках нет.

Вопрос усложняется и тем, что слабая устойчивость пемзового материала как к выветриванию, так и к окатыванию не всегда позволяет однозначно отличать маломощные озерные отложения от пирокластики, переотложенной временными водотоками или смешанной в результате склоновых процессов. Однако в приустьевых частях руч. Лагерный, Южный и в долинах левых притоков р. Теплой у ее истока на уровне близ современного уреза вскрываются отложения, которые хорошо визуальными отличимы от слабо переработанных и плохо сортированных отложений конусов выноса. Это горизонтально-слоистые песчано-мелкогравийные осадки темно-серого до зеленовато-бурого цвета хорошей окатанности (2–3 кл.); местами прослой мелкозернистого супесчано-суглинистого и песчаного материала сцементированы. Видимая мощность отложений составляет до 1 м, вверх по долинам они выклиниваются. Слоистость по механическому составу, хорошая окатанность материала свидетельствуют об их значительной водной переработке и накоплении, вероятно, в прибрежно-озерных условиях, причем уровень водоема был близок современному или чуть выше него. Цементация горизонта может быть связана с формированием осадков на геохимическом барьере — при контакте пресной речной воды с несколько более минерализованной озерной. Однако, по данным [12], в настоящее время термальные воды кальдеры Ксудач не отлагают минеральных осадков и не цементируют вмещающие породы в местах выхода. Возможно также, что повышение минерализации было связано с этапом более интенсивного поступления термальных вод и с более концентрированным содержанием в них различных химических веществ, что могло быть обусловлено каким-то из этапов вулканической активности. Но данных по возрастной привязке этих осадков нет.

Существующие в настоящее время в кальдере озера Ключевое и Штюбеля являются реликтами водоема, заполнявшего голоценовую кальдеру V до формирования в ней молодого вулканического конуса Штюбеля. Одновременно с ростом конуса, который начался по уточненным данным [17] примерно 1650 л.н., и мощными проявлениями его активности около 1000 и 1650 гг. происходили изменения береговой линии и площади озера [12]. Процесс трансформации затронул преимущественно северную часть водоема, превратившуюся в узкую протоку между новым конусом и восточным бортом кальдеры, при этом южная часть в основном сохранила свои очертания. Извержение конуса Штюбеля 1907 г. сформировало новый кратер, северная часть которого соединилась с озером и была заполнена водой, в результате чего уровень озерной системы опустился на несколько метров и возникли два водоема — Ключевое и Штюбеля, разделенные перемычкой. По заключению Г.Ф. Пилипенко с соавторами [12], практически сразу же взрывные отложения перекрыли исток р. Теплой и уровень озер начал подниматься вновь. Об этом свидетельствуют и материалы полевых наблюдений Н.Г. Келля и С.А. Конради, которые описали, сфотографировали и зарисовали в марте 1910 г. в кальдере единое озеро [1]. Но в 1937 г. по данным Б.И. Пийпа [2] существовало уже два водоема, разделенных перемычкой шириной около 700 м — т.е. ситуация была близка современной. В настоящее время высота перемычки над урезом

озер составляет 7–8 м. По мнению [3, 11], постепенное снижение уровня озера зафиксировано двумя уровнями террас с отметками 7 и 3 м.

Проведенные исследования 2016 г. позволяют заключить, что в настоящее время на берегах озер Ключевое и Штюбеля достаточно четко прослеживается серия из четырех уровней – 3–5, 7–8, 12–15 и 25–30 м над урезом, выработанных преимущественно в рыхлых пирокластических отложениях. Две нижних террасы часто сопрягаются с обширными конусами выноса и на участках активного поступления со склонов кальдеры пирокластического материала, переработанного водотоками, они могут быть сложены аллювиально-пролювиальными отложениями. Третий уровень высотой 12–15 м прослеживается фрагментарно; на южном склоне конуса Штюбеля, где он морфологически выражен наиболее четко, он является абразионным.

Для отложений конуса выноса на уровне I террасы (4–4.5 м) близ Горячего пляжа² [6] была получена радиоуглеродная дата 210 ± 30 ¹⁴C л., а возраст осадков фрагмента III террасы, сложенного аллювиально-пролювиальными отложениями, на отметке 7 м над уровнем оз. Ключевого определен как 540 ± 100 ¹⁴C л. В то же время, результаты изложенных выше наших наблюдений в устье руч. Южного показывают, что I озерная терраса там, например, является эрозионной или цокольной и выработана в более древних отложениях конуса выноса ручья. На южном склоне конуса Штюбеля, где четко видны 3 низкие террасы, они также эрозионные, причем нижний уровень (3–4 м) здесь редуцирован, а местами и просто уничтожен в результате абразии.

Четвертый – 25–30-метровый уровень – прослеживается по периферии кальдеры V (соответственно по северному и восточному берегам северной и восточной частей оз. Штюбеля и южному и ЮВ побережьям оз. Ключевого) в виде фрагментов террасовидных поверхностей, сложенных пирокластикой, практически не затронутой флювиальными процессами – например, в истоке р. Теплой и в устье руч. Седловинного, а также сформирован тыловыми частями слившихся конусов выноса. Скорее всего, он образовался в результате накопления, а на отдельных участках и последующего перемещения пирокластического материала. Это отложения мощных пирокластических потоков, выполнявших долины по периферии сформированной 1725 л.н. кальдеры и ее саму, а также тефра извержений конуса Штюбеля, мощность которой достигала нескольких метров [7, 8, 17 и др.]. На многих участках по бортам кальдеры осадки впоследствии были смещены гравитационными процессами и временными водотоками с формированием шлейфов и конусов выноса.

Наличие многочисленных свежих врезов в аккумулятивных толщах по берегам оз. Штюбеля, а также по периферии вулканического конуса, сложенного более прочными породами, эрозионные уступы в долине приустьевого участка руч. Лагерного, двухуровневое строение крупных конусов выноса на ЮВ оз. Ключевого – все это свидетельствует о снижении уровня озер в недавнем прошлом – после 1910 г.

Важную роль в развитии гидрографической системы кальдеры играла и играет р. Теплая, которая дренирует озеро и, соответственно, определяет положение местного базиса эрозии. По ней же происходил периодический сход лахаров и гиперконцентрированных потоков и вынос пирокластического материала за пределы кальдеры. В частности, в ее долине продатированы отложения вулканических селей, синхронные второму извержению конуса Штюбеля – 300 ± 60 ¹⁴C л.н. [6]. Эти же исследователи считают, что формирование 14–15 м озерной террасы оз. Ключевого произошло в результате сейсмостектонического обвала, подпрудившего р. Теплую в месте истока; о подобном явлении после извержения 1907 г. пишут и [12]. Действительно, периоды вулканической активности часто сопровождаются сейсмодислокациями, причем последние нередко приурочены именно к бортам речных долин, как, например, это описано в долине р. Быстрой-Эссовской [18]. Кроме того, в районе истока р. Теплой имеется нагромождение крупных глыб эффузивов в виде вала высотой до 5–6 м (рис. 6),

²Устное сообщение И.В. Мелекесцева. К сожалению, более точную привязку точек отбора проб в настоящее время восстановить не представляется возможным.

а также река тут делает крутой изгиб, как если бы она огибала какое-то существенное препятствие. Здесь же на ее борту фиксируются и четыре эрозионных уровня с отметками, соответствующими уровням озерных террас, а именно — около 3, 7–8, 12–15 и 25–30 м над урезом реки [13].

Возможные причины колебания уровня озер

По оценке Д.Н. Козлова [19], формирование кратерных и кальдерных озер происходит под влиянием вулканических и поствулканических процессов, климатических условий и степени развития гидросети кальдеры. На наш взгляд, во многих случаях важны характер и скорость геоморфологических процессов — эрозии и абразии, а в некоторых случаях и дефляции, т.е. в целом темпы денудации в их бассейне.

Колебания уровня достаточно типичны для вулканических озер. Так, по данным Т.С. Краевой с коллегами [20], контуры озерных водоемов в кальдере Опала и кальдерных депрессиях Узон-Гейзерной и Семячинской значительно изменялись на протяжении среднего плейстоцена — голоцена. Наблюдения [21] показали, что после извержения 1957 г. уровень оз. Бирюзового (кальдера Заварицкого, о-в Симушир) за два года понизился на 8–10 м, а затем к 2007 г. [19] вновь повысился на 10–12 м. Таким образом, скорость колебаний уровня внутрикальдерного водоема может быть достаточно высокой, одновременно с этим меняется и его форма. Причиной подобных явлений служит как характер извержения, интенсивность постэруптивных процессов в пределах котловин, появление в озерах новых воронок и куполов, так и скорость их заполнения обломочным материалом. Наиболее подвержены колебаниям бессточные вулканические озера, для сточных важным фактором служит положение порога стока [22].

Очевидно, что колебания уровня озер в кальдере Ксудач были неоднократными и достаточно быстрыми даже на протяжении последних 1725 лет — после возникновения кальдеры V. За этот период произошли, по крайней мере, три извержения молодого конуса Штюбеля, сопровождавшиеся как выбросом большого количества пироклаستيкулы, так и излиянием лав, что, несомненно, вызывало изменение морфологии и уровня озер. Эксплозивная деятельность Ксудача привела к значительной аккумуляции пирокластического материала на внутренних склонах кальдеры. По данным [6], за 9 тыс. лет в кальдере I накопилось 140–150 м отложений, а за тот же срок в кальдере II — 100 м. Соответственно, средняя скорость осадконакопления составила там 16 и 11 м за 1000 лет. Мощные пирокластические потоки (ПП) неоднократно выполняли долины внутрикальдерных водотоков: так, при извержении 290 г. н. э., приведшем к образованию кальдеры V, длина ПП достигала 20 км, а объем их отложений — 4 км³, всего же было выброшено до 19 км³ вулканического материала. Постепенный размыв пирокластики в долинах и на склонах вызывал регулярный сход селей и гиперконцентрированных потоков, и формирование мощных конусов выноса в устьях водотоков и островов плавающей пемзы в акватории озер [23]. Так пирокластический материал постепенно заполнял и продолжает заполнять котловины последних.

Кроме этого колебания положения водного зеркала могли быть связаны также: 1) с изменением уровня поверхности участка кальдеры, непосредственно прилегающего к конусу (т.е. территории, занятой озерами), до (как правило, поднятие) и после извержения (обычно проседание); 2) с “выбросом” части объема воды во время извержения или «выплеском» ее за пределы кальдеры во время схода мощных лахаров по долине р. Теплой; 3) с изменением высоты порога стока: как его повышением (перекрытие устья р. Теплой в результате сейсмообвала или выброса грубообломочных взрывных отложений), так и понижением (врезание реки).

В нашем случае наличие четырех эрозионных уровней в истоке р. Теплой с отметками, близкими к уровням озерных террас, позволяет допустить, что все описанные выше озерные террасовые уровни могли сформироваться и при поэтапном врезании

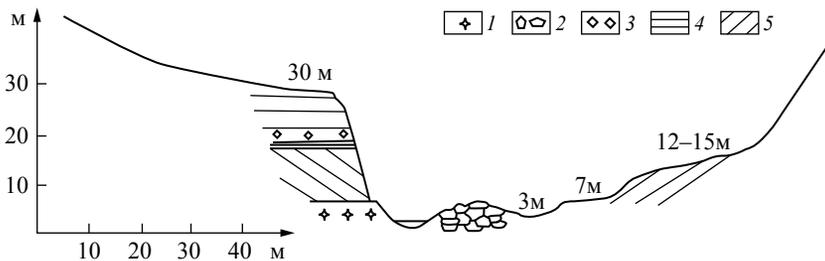


Рис. 6. Поперечный профиль долины р. Теплой в 500 м ниже ее истока
 Эффузивы: 1 – в коренном залегании, 2 – глыбы размером 3–4 м; пирокластика: 3 – преимущественно грубообломочная, 4 – горизонтально-слоистая, 5 – наклонно-слоистая

этой реки. Но что явилось причиной врезания? Изучение аллювиальных террас рек Камчатки, расположенных как севернее (бассейны рр. Камчатка, Авача, Жупанова), так и южнее района исследований (бассейн р. Озерной) [24], показало, что повсеместно осадки первых надпойменных террас, имеющих там высоту от 2 до 4 м над урезом, накапливались до последнего кальдерообразующего извержения Ксудача, произошедшего около 290 г. н. э. [17], после чего произошло врезание рек, обусловленное общим тектоническим поднятием территории, которое оценивается в 1–3 м. Однако, если принять во внимание эти данные, то все равно они могут помочь нам объяснить время образования и происхождение лишь нижнего эрозионного уровня в устье р. Теплой, который может быть связан с этим этапом регионального врезания.

При этом на склонах самого молодого вулканического конуса четко прослеживаются три террасы – 3–5, 7–8, 12–15 м, которые, очевидно, сформировались недавно – после последнего извержения конуса Штюбеля в 1907 г., т.к. в противном случае они были бы перекрыты пирокластическими осадками, мощность последних в непосредственной близости от центра извержения по [5, 6] составляла от 3 до 5 м, а общий объем по оценкам [7, 15, 25] до 1–2 км³. Уровень 25–30 м, напротив, фиксируется только в прибортовых частях кальдеры V и является более древним, вероятно, его формирование обусловлено накоплением пирокластических отложений после кальдерообразующего извержения вулкана Ксудач 1725 л. н.

Из всего вышеизложенного следует, что подъем уровня озера после извержения 1907 г. достигал 15 м, и в результате его достаточно быстрого поэтапного снижения сформировались три террасовых уровня, произошло врезание приустьевых частей долин и временных водотоков по периферии конуса Штюбеля, а также образование нижнего уровня наиболее крупных конусов выноса. Фотографии 1910 г., приведенные в отчете Н.Г. Келля [1], подтверждают столь высокое положение уровня озерного бассейна: на них видно, что затоплена большая часть мыса, разделяющего северную и восточную части озера Штюбеля, – вплоть до самого его перегиба, находящегося на отметках около 15 м над современным урезом.

Террасовый уровень (12–15 м), видимо, соответствовал положению озера на начальном этапе – сразу после извержения, когда плотина, перегородившая исток р. Теплой, только сформировалась из глыб взрывных/сеймотектонических отложений с тампонирующим более тонкой пирокластикой. Постепенно более мелкий материал был вынесен и сток реки стал осуществляться через щели между глыбами, одновременно происходил размыв пирокластических отложений по правому борту долины (см. рис. 6), уровень водоема снижался. Дальнейшее разрушение плотины могло происходить поэтапно – при катастрофических паводках, вызванных

обильными дождями³, скачкообразное снижение уровня привело к формированию низких террас. В настоящее время высота сохранившегося фрагмента плотины не превышает 5–6 м.

Заключение

1. В современной береговой зоне озер Ключевое и Штюбеля аккумуляция рыхлого материала идет лишь на участках, где он активно поступает со склонов кальдеры — 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. На берегах озер прослеживается серия из четырех террасовых уровней с отметками 3–5, 7–8, 12–15 и 25–30 м над урезом.

2. Аккумулятивные фрагменты террас низких уровней (I–II) расположены лишь в приустьевых частях водотоков, где они сопрягаются с конусами выноса и фактически являются их частями. И то не всюду — нередко они “вырезаны” в толщах более древних осадков, что, например, наблюдается в устье руч. Южного. При дефиците рыхлого материала (на южных склонах конуса Штюбеля и др.) — формировались эрозионные уровни. То же можно сказать и относительно III террасы (12–15 м). Формирование этих террас произошло после извержения 1907 г. и было обусловлено переграживанием истока р. Теплой в результате сейсмообвала и/или взрывными отложениями и последующим поэтапным ее врезанием, следы которого фиксируются в виде трех ступеней на правом борту долины реки. Усиление эрозии, приводившее к постепенному разрушению плотины, скорее всего было связано с катастрофическими паводками в годы с высокой водностью.

3. Формирование верхнего (4) террасового уровня (25–30 м), который фиксируется в прибортовых частях кальдеры V, связано, видимо, с накоплением и частичным переотложением пирокластических осадков более ранних этапов активности конуса Штюбеля — после кальдерообразующего извержения вулкана Ксудач 1725 л. н.

4. Быстрые колебания уровня озерного водоема в кальдере вулкана Ксудач повторялись неоднократно — вероятно, при каждом извержении, в том числе и конуса Штюбеля. Эти колебания вызывали формирование озерных террас, а также не могли не сказаться на особенностях развития внутрикальдерной речной сети — они обусловили периодическое врезание речных долин и формирование ярусных конусов выноса. Каждое последующее извержение полностью “стирало” или частично “маскировало” следы береговых процессов предыдущей стадии существования озерного бассейна.

5. Наличие хорошо выраженных абразионных ниш в плотных сливных андезитах близ современного уреза свидетельствует о достаточно длительном положении уровня оз. Ключевого на таких отметках с незначительными (до 1 м) колебаниями. Возможно, это обусловлено и периодическим совпадением уровня водоемов в пределах кальдеры V в различные временные интервалы. Об этом свидетельствует и наличие сцементированных прибрежно-озерных отложений характерного облика на отметках до +1 м выше современного уреза водоемов в приустьевых частях долин ряда водотоков. Очевидно, что они накопились в какой-то из этапов, отличавшийся высокой гидротермальной активностью, и в этот период (после формирования кальдеры V, но до извержения 1907 г.) внутрикальдерный водоем определенное время имел уровень, лишь немногим превышавший современный. К сожалению, не все из рассмотренных

³ В Петропавловске-Камчатском зафиксировано [26] выпадение до 130–181 мм осадков в сутки и 486 мм за месяц, в районе кальдеры метеонаблюдения не проводились, однако среднее годовое количество осадков здесь по крайней мере в два раза больше, что позволяет говорить о высокой вероятности весьма обильных дождей.

отложенных в прибрежной зоне озер кальдеры к настоящему времени датированы, соответственно, положение береговой линии до извержения 1907 г. и характер береговых процессов в периоды голоценовых извержений конуса Штюбеля пока не могут быть до конца реконструированы, но это задачи дальнейших исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность российско-белорусскому проекту “Мониторинг-СГ-1.3.1.2”, в рамках которого была проведена заброска в кальдеру Ксудач, а также всем коллегам из ИМГиГ ДВО РАН – участникам экспедиционных работ 2016 г. Особая благодарность Д.Н. Козлову за организацию маршрута по периферии озер и информацию по результатам промеров, В.Н. Двигало за возможность ознакомления с материалами фотограмметрических работ, а также И.В. Мелекестеву за ценные замечания в ходе подготовки работы. Работа выполнена в рамках темы Госзадания “Экзогенный (включая антропогенный) морфолитолиз в разных природных условиях”. Рег. № 01201352491 (0148–2014–0016).

Acknowledgments. The author would like to thank the Russian-Belarusian project “Monitoring-SG-1.3.1.2” as well as all colleagues from IMGG FEB RAS – participants of expeditions 2016 without which it would not be possible these studies. Special thanks to D.N. Kozlov for organizing boat trips and information on the results of the lakes measurements, V.N. Dvigalo for the opportunity to get acquainted with the materials of photogrammetric works, and also to I.V. Melekestsev for his valuable comments during the preparation of the work. The paper was accomplished under the “Exogenous (including anthropogenic) morpholithogenesis in different environmental conditions” topic provided by the governmental regulated standard No. 01201352491 (0148–2014–0016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кель Н.Г.* Карта вулканов Камчатки. Объяснительный текст с табл., чертежами, снимками и карта (на 2-х листах). М-6 750000. Л.: Изд-во РГО, 1928. 89 с.
2. *Пийн Б.И.* Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки // Тр. Камчатской вулканол. станции. 1947. Вып. 3. С. 89–134.
3. *Шеймович В.С.* Вулкан Ксудач в августе 1963 г. // Бюл. вулканол. станций. 1966. № 41. С. 25–28.
4. *Селянгин О.Б.* Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 16–27.
5. *Селянгин О.Б.* Вулкан Ксудач. *Действующие вулканы Камчатки* /Под ред. Федотова С.А., Масуренкова Ю.П. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 340–355.
6. *Мелекестев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние 10 тыс. лет // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 28–39.
7. *Брайцева О.А., Мелекестев И.В., Пономарева В.В., Кирьянов В.Ю.* Крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке – кальдерообразующее извержение в Ксудач 1700–1800¹⁴С-лет назад // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 30–49.
8. *Мелекестев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д.* Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 28–53.
9. *Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V.Yu.* The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD 240, the greatest explosive event of our era in Kamchatka // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1996. Vol. 70 (1–2). P. 49–66.
10. *Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulzerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., and Bailey J.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quat. Res. 1997. Vol. 47. P. 125–139.
11. *Дубик Ю.М., Меньялов И.А.* Газогидротермальная деятельность кальдеры Ксудач // Бюл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 40–43.
12. *Пилипенко Г.Ф., Разина А.А., Фазлуллин С.М.* Гидротермы кальдеры вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 43–57.
13. *Лебедева Е.В.* Кальдера вулкана Ксудач: современные процессы рельефообразования и особенности строения речной сети // Геоморфология. 2017. № 3. С. 60–75. DOI: 10.7868/S0435428117030063.

14. *Pasternack G.V. and Varecamp J.C.* Volcanic lakes systematic. I. Physical constraints // *Bulletin of volcanology*. 1997. Vol. 58. P. 528–538.
15. *Bindeman I.T., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., and Chen C.H.* Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar-Ar, U-Pb ages and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. Vol. 189. No. 1–2. P. 57–80.
16. *Лебедева Е.В.* Влияние лавовых потоков на строение долин и развитие речной сети // *Геоморфология*. 2016. № 3. С. 78–91. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-3-78-91
17. *Pendea I.F., Ponomareva V.V., Bourgeois J., Zubrow E.B., Portnyagin M.V., Ponkratova I., Harmsen H., and Korosec G.* Late Glacial to Holocene paleoenvironmental change on the northwestern Pacific seaboard, Kamchatka Peninsula (Russia) // *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 157. P. 14–28.
18. *Пинегина Т.К.* Голоценовые сейсмостектонические обвалы в долине реки Быстрой-Эссовской (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 2001. № 3. С. 39–44.
19. *Козлов Д.Н.* Кратерные озера Курильских островов. Ю-Сахалинск: ИМГиГ, 2015. 112 с.
20. *Краевая Т.С., Брайцева О.А., Шеймович В.С., Егорова И.А., Лукикина Е.Г.* Отложения четвертичных кальдер Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 1979. № 4. С. 3–11.
21. *Зеленов К.К., Канакина М.А.* Бирюзовое озеро (кальдера Заварицкого) и изменение химизма его вод в результате извержения 1957 г. // *Бюл. вулканол. станций*. 1962. № 32. С. 33–34.
22. *Корсунская Г.В.* Курильская островная дуга. М.: Гос. Изд-во геогр. лит-ры, 1958. 224 с.
23. *Лебедева Е.В.* Влияние выбросов пирокластического материала на морфологию долин и развитие речной сети (на примере Северной группы вулканов, Камчатка) // *Геоморфология*. 2016. № 4. С. 59–69. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-4-59-69.
24. *Мелекестев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Пинегина Т.К., Дирксен О.В.* 0–650 г. – этап сильнейшего природного катастрофизма нашей эры на Камчатке // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 6. С. 3–23.
25. *Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., and Chen C.H.* Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1999. Vol. 91. P. 23–42.
26. <http://www.oceantravels.ru>

REFERENCES

1. Kell' N.G. *Karta vulkanov Kamchatki* (Map of the volcanoes of Kamchatka). Scale 750 000. L.: RGO (Publ.), 1928. 89 p.
2. Piip B.I. Itinerary geological observations in the South of Kamchatka. *Proceed. Kamchatsk. Volcanol. Station*. 1947. Iss. 3. P. 89–134. (in Russ.)
3. Sheimovich V.S. Ksudach volcano during august of 1963. *Bull. Volcanol. Station*. 1966. No. 41. P. 25–28. (in Russ.)
4. Selyangin O.B. Geologic structure and evolution of the calderas of Ksudach volcano. *Volcanol. Seismol.* 1987. No. 5. P. 16–27. (in Russ.)
5. Selyangin O.B. Ksudach volcano. In: Fedotov S.A., Masurenkov Yu.P. Eds. *Deistvuyushchiye vulkany Kamchatki* (Active Volcanoes of Kamchatka). Moscow: Nauka (Publ.), 1991. P. 337–353.
6. Melekestsev I.V. and Sulerzhitsky L.D. Ksudach volcano during last 10 000 yr. *Volcanol. Seismol.* 1987. No. 4. P. 28–39. (in Russ.)
7. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V.Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about 1700–1800¹⁴C-yr. BP – the greatest explosive event of our era in Kamchatka. *Volcanol. Seismol.* 1995. No. 2. P. 30–49. (in Russ.)
8. Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V., and Sulerzhitsky L.D. Catastrophic caldera-forming eruptions from Ksudach volcano during the Holocene. *Volcanol. Seismol.* 1995. No. 4–5. P. 28–53. (in Russ.)
9. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V.Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD 240, the greatest explosive event of our era in Kamchatka. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1996. Vol. 70 (1–2). P. 49–66.
10. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., and Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia. *Quat. Res.* 1997. Vol. 47. P. 125–139.
11. Dubik Yu.M. and Menyailov I.A. Gas-hydrothermal activities of Ksudach caldera. *Bull. Volcanol. Station*. 1971. No. 47. P. 40–43. (in Russ.)
12. Pilipenko G.F., Razina A.A., and Fazlullin S.M. Hydroterms of Ksudach caldera. *Volcanol. Seismol.* 2001. No. 6. P. 43–57. (in Russ.)

13. Lebedeva E.V. Caldera Ksudach: modern processes of relief forming and main features of the valley network structure. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 3. P. 60–75. (in Russ.). DOI: 10.7868/S0435428117030063.
14. Pasternack G.V. and Varecamp J.C. Volcanic lakes systematic. I. Physical constraints. *Bulletin of volcanology*. 1997. Vol. 58. P. 528–538.
15. Bindeman I.T., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., and Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar-Ar, U-Pb ages and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. Vol. 189. No. 1–2. P. 57–80.
16. Lebedeva E.V. Impact of the lava flows on the structure of valleys and development of the river network. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 3. P. 78–91. (in Russ.). DOI: 10.15356/0435-4281-2016-3-78-91.
17. Pendea I.F., Ponomareva V.V., Bourgeois J., Zubrow E.B., Portnyagin M.V., Ponkratova I., Harmssen H., and Korosec G. Late Glacial to Holocene paleoenvironmental change on the northwestern Pacific seaboard, Kamchatka Peninsula (Russia). *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 157. P. 14–28.
18. Pinegina T.K. Holocene seismotectonic landslides in the Bystraya-Esso river valley, Kamchatka. *Volcanol. Seismol.* 2001. No. 3. P. 39–44. (in Russ.)
19. Kozlov D.N. *Kraternyye ozera Kuril'skikh ostrovov* (Crater lakes of the Kuril Islands). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG, 2015. 112 p. (in Russ.)
20. Krayevaya T.S., Braitseva O.A., Sheimovich V.S., Yegorova I.A., and Lupikina Ye.G. Deposits of quaternary calderas of Kamchatka. *Volcanol. Seismol.* 1979. No. 4. P. 3–11. (in Russ.)
21. Zelenov K.K. and Kanakina M.A. Biryuzovoye lake (caldera Zavaritskii) and changes in the chemistry of its waters as a result of the 1957 yr. eruption. *Bull. Volcanol. Station*. 1962. No. 32. P. 33–34 (in Russ.)
22. Korsunskaya G.V. *Kuril'skaya ostrovnaya duga* (Kuril island arc). M.: Gos. Izd-vo Geogr. Lit-ry (Publ.), 1958. 224 p. (in Russ.)
23. Lebedeva E.V. Influence of pyroclastic emission on valley morphology and river network development: the case study of the Northern group volcanoes, Kamchatka. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 4. P. 56–69. (in Russ.). DOI: 10.15356/0435-4281-2016-4-56-69.
24. Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Bazanova L.I., Pinegina T.K., and Dirksen O.V. 0–650 A.D.: a phase of great natural catastrophism during our era in Kamchatka. *Volcanol. Seismol.* 2003. No. 6. P. 3–23. (in Russ.)
25. Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., and Chen C.H. Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1999. Vol. 91. P. 23–42.
26. <http://www.oceantravels.ru>