

## КАЛЬДЕРА ВУЛКАНА КСУДАЧ (КАМЧАТКА): СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕЛЬЕФОБРАЗОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ДОЛИННОЙ СЕТИ

*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

Вулкан Ксудач (Камчатка) состоит из пяти полностью или частично вложенных друг в друга кальдер позднплейстоценового (кальдеры I и II) и голоценового (III–V) возраста. Анализ процессов рельефообразования и строения внутрикальдерных речных долин позволяет заключить, что, несмотря на высокую голоценовую вулканическую активность (вулканотектонические обрушения, значительные объемы выброшенного пирокластического материала) верховья многих современных долин заложены еще на склонах кальдер I и II и продолжают функционировать и в настоящее время, являясь верхними звеньями более молодых голоценовых долин кальдер IV–V. Сохранившиеся позднплейстоценовые фрагменты верхних звеньев речной сети продолжали концентрировать сток, в результате чего шло восстановление разрушенных при голоценовых извержениях нижних звеньев речной сети, но уже в зависимости от характера вновь сформированного вулканического рельефа. Рост вулканического конуса Штюбеля внутри кальдеры V оказал значительное влияние на ориентировку и морфологию прилегающих водотоков: в частности, привел к позднеголоценовой перестройке руч. Лагерного, который совершил поворот на 120°. Участок его древней долины сохранился в виде плоскодонной седловины на ЗЮЗ от кратера влк. Штюбеля, которая постепенно разрушается под воздействием эрозии. Большое влияние на речную сеть оказала и эксплозивная деятельность Ксудача: мощные пирокластические потоки неоднократно выполняли долины как внутрикальдерных водотоков, так и сходили по р. Теплой. Последующее врезание долин привело к формированию в них эрозионных и цокольных террас, сложенных пирокластическим материалом.

**Ключевые слова:** долинная сеть, перестройка, геоморфологические процессы, вулканический рельеф, пирокластические отложения.

DOI: 10.7868/S0435428117030063

### Введение

Вулкан Ксудач расположен в южной части Восточного вулканического пояса Камчатки и, по заключению И.В. Мелекесцева с коллегами [1], является одним из наиболее интересных и сложно построенных вулканических массивов на полуострове. Его кальдерообразующие извержения в позднем плейстоцене–голоцене не имеют аналогов по мощности: разновозрастные пеплы вулкана прослеживаются практически по всей территории полуострова. Ксудач довольно хорошо изучен геологами: здесь работал корифей отечественной вулканологии Б.И. Пийп [2] и его коллеги – В.С. Шеймович [3], О.Б. Селянгин [4, 5] и другие; исследования его пирокластических отложений проводили И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, В.В. Пономарева, В.Ю. Кирьянов, Л.Д. Сулержицкий, многочисленные радиоуглеродные датировки которых позволили достаточно точно определить основные этапы формирования вулкана [1, 6–10]; Ю.М. Дубик, И.А. Меняйлов [11], Г.Ф. Пилипенко, А.А. Разина, С.М. Фазлуллин [12] осуществили детальный анализ термальных вод кальдеры. Но и сейчас некоторые вопросы развития этого сложно построенного вулканического комплекса продолжают вызывать споры. Геоморфологические процессы, сопровождающие активное преобразование этого интереснейшего геолого-геоморфологического объекта, и особенности строения долинной сети, к сожалению, долгое время оставались за рамками исследований.

## Строение и формирование вулканического комплекса

Вулкан Ксудач представляет собой усеченный конус диаметром подножия 20–25 км<sup>1</sup>, внутри которого расположены вложенные друг в друга кальдеры плейстоцен-позднеголоценового возраста, останцы внутрикальдерных вулканов, а также конус Штюбеля – центр проявления новейшей вулканической активности. Абс. высоты верхней кромки этого сложно построенного кальдерного комплекса, имеющего вид вложенной в конус чаши с размерами 8 × 10 км, достигают 900–1000 м, а относительные – 500–700 м. Вулканический массив расположен на водоразделе бассейнов рек Тихого океана и Охотского моря, центральную часть кальдеры занимают озера Ключевое и Штюбеля. Из последнего вытекает р. Теплая, впадающая в р. Зап. Ходутка – приток р. Прав. Ходутки, в свою очередь, впадающей в Тихий океан.

Время формирования вулкана оценивалось исследователями по-разному: И.В. Мелекесцев с коллегами [1, 6, 7] писали о позднеплейстоценовом (30–40 тыс.л.н.) возрасте этой структуры, определяя его по соотношению с моренами и экзарационными формами последнего этапа оледенения Камчатки; О.Б. Селянгин [4, 5] считал, что стратовулкан с отметками до 2000 м сформировался здесь на границе раннего и среднего плейстоцена. В настоящее время установлен абс. возраст игнимбритов первого кальдерообразующего извержения [15], что позволяет однозначно говорить о том, что вулканической постройке более 162 тыс. лет.

Характер вулканической активности Ксудача циклично сменялся во времени, и внутри самой ранней кальдерной котловины последовательно возникали положительные (конусы) и отрицательные вулканические формы. Наиболее ярко выраженных этапов кальдерообразования было несколько: два в позднем плейстоцене, когда образовались внешние кальдеры I и II, и три в голоцене. В результате сформировался сложный комплекс из пяти полностью или частично вложенных друг в друга кальдер (рис. 1), которые в периоды относительного вулканического покоя заполнялись озерами, в связи с чем, по крайней мере, голоценовые извержения начинались здесь как фреато-магматические [12]. Время формирования кальдер III–V оценивалось исследователями как 8700–8800, 6000–6100 и 1700–1800 <sup>14</sup>C л.н. или соответственно 9700, 6847–7287 и 1668–1785 кал.л.н. [1, 9, 10, 16]. Совершенствование технологий и накопление фактического материала позволило [17] уточнить калиброванный возраст пеплов извержений, приведших к образованию IV и V кальдер, как 7204 и 1725 л.н.

В более холодных условиях – в конце позднего плейстоцена – полости кальдер I и II служили крупным ледоемом, питавшим протяженные ледники, однако после их таяния здесь также возникло обширное озеро 6–7 км в поперечнике, для отложений которого [7] получена радиоуглеродная дата 8950 ± 200 <sup>14</sup>C л.н. В это время кальдера уже дренировалась р. Теплой (рис. 2), в долине которой [1] была вскрыта морена позднеплейстоценового оледенения, сформировавшаяся на ней маломощная почва, перекрытая отложениями пирокластических потоков (ПП) возраста образования кальдеры III. Отложения ПП представляют собой неспекшиеся слабоуплотненные пемзовые туфы мощностью до 10–15 м, протяженность потоков составляла до 5–7 км. ПП выходили за пределы кальдеры и в СВ ее части (бассейн руч. Седловинного). Тефра этого извержения также обнаружена и в озерных осадках самого конца позднего плейстоцена – начала голоцена. После извержения вода заполнила

<sup>1</sup> В ряде обзорных [13] и научно-популярных работ [14] приводятся иные размеры основания вулкана, однако мы считаем важным опираться на детальные исследования, в том числе и вещественного состава пород комплекса [5, 7, 8 и др.].

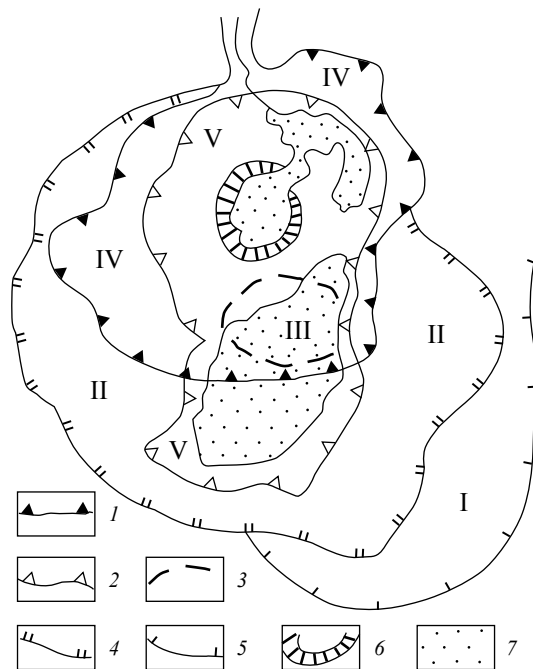


Рис. 1. Кальдерный комплекс вулкана Ксудач: положение разновозрастных кальдер (I–V) вулканического массива (по [4])

Бровка кальдеры: 1 – V, 2 – IV, 3 – примерное положение кальдеры III, 4 – II, 5 – I; 6 – стенки кратера конуса Штюбеля; 7 – современные озера

вновь сформированную кальдеру III и частично кальдеру II, по данным И.В. Мелекесцева с коллегами, озерные осадки этого времени сохранились до отметок 650 м над у.м. Пирокластические потоки формировались и при извержении 7204 кал.л.н.: их длина достигала 10 км, а мощность 4–20 м; они также описаны в долине р. Теплой и на СВ и СЗ бортах кальдеры. Максимальных размеров эти образования достигли в период активности 1725 кал.л.н.: их длина составляла 20 км, а мощность – до 30–50 м. Потоки заполнили все долины на склонах вулкана за исключением южного сектора и выходили за пределы комплекса; в долине р. Теплой зафиксировано четыре их генерации [1, 8].

Около 350–390 г.н.э. [1, 17] в кальдере начал формироваться конус Штюбеля, в результате чего единое внутрикальдерное озеро разделилось на два водоема. Для молодого вулкана установлены наиболее мощные проявления эксплозивной активности примерно в 1000 г. и 1650 г., а также в марте 1907 г. [18]. В результате последнего извержения был сформирован кратер, который на севере соединился с озером и был заполнен его водами [12], при этом высота самого конуса уменьшилась от 700–800 м до 640–650 м. Во время этого извержения по [1, 7, 8, 18] было выброшено до 2 км<sup>3</sup> пирокластики<sup>2</sup>, сформировался обширный покров пемз дацитового состава, перекрывших полуметровые отложения черных шлаков андезито-базальтов<sup>3</sup>; на СЗ кальдеры и вдоль долины р. Теплой общая мощность отложений достигла 4–5 м [5].

<sup>2</sup> В работе [15] приводятся более скромные цифры – 0.8–1.0 км<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Все исследователи вулканического комплекса [1, 5, 8, 18 и др.] отмечают, что характерной чертой эксплозий конуса Штюбеля была смена состава пирокластики от основной до более кислой, т.е. во время каждого извержения формировался слой темной тефры (основного состава) и перекрывающий его слой светлой (кислого состава).

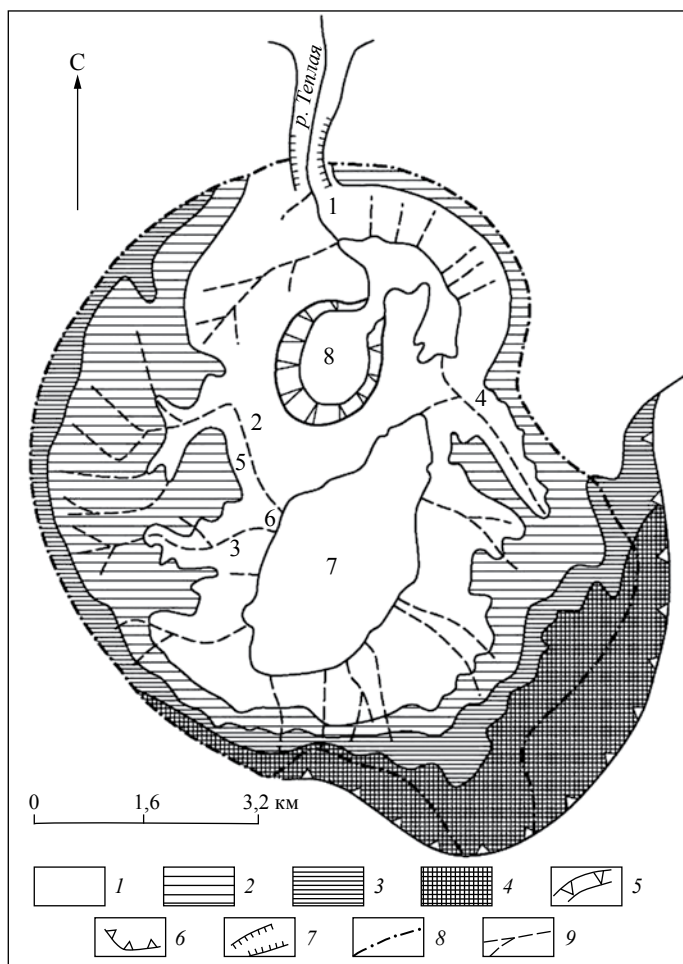


Рис. 2. Ярусы рельефа и основные водотоки кальдерного комплекса влк. Ксудач (по [12])

Внутрикальдерные поверхности с абс. отметками, м: 1 – менее 650, 2–650–800, 3–800–900, 4 – более 900; 5 – кратер конуса Штюбеля; 6 – бровка уступа кальдеры I; 7 – ущелье р. Теплой; 8 – граница области инфильтрационного питания подземных вод кальдеры Ксудач; 9 – основные водотоки.

Цифрами показаны: 1 – р. Теплая; ручьи: 2 – Лагерный, 3 – Южный, 4 – Седловинный; 5 – экструзивный массив Парящий уступ; 6 – Горячий пляж

### Строение рельефа и гидрографической сети

Наиболее высокие абс. отметки – 900–1079 м – имеют пологовыпуклые и округловершинные водораздельные пространства южной и юго-восточной частей кальдеры, представляющие собой фрагменты днища и бортов кальдеры I, перекрытые андезитовыми шлаками и дацитовыми пемзами периода образования кальдеры II [5, 12] (рис. 2). На севере к этому уровню относятся отроги г. Каменистой (1049 м). Следующий ярус водораздельных пространств с отметками 800–900 м опоясывает кальдеру с З, Ю и ЮВ. На западе их слагают эффузивы и пирокластика кальдеры I, а на Ю и ЮВ – более молодые образования вулкана Ксудач II; все они имеют андезито-базальтовый состав и сглаженную округловершинную морфологию. Наиболее широко в кальдере представлены уплощенные водоразделы с отметками 650–800 м над у.м. – фрагменты днища кальдеры II, перекрытые пирокластическим чехлом сложного



*Рис. 3.* Плосковершинные поверхности — фрагменты дна кальдеры II. Пирокластический чехол облекает склоны и водоразделы, в бортах эрозионных врезов видно чередование светлых и темных слоев пирокластики (верховья руч. Лагерного). Здесь и далее фото автора

состава (андезитовые пемзы и игнимбриты, дацитовые пемзы), сформировавшимся в результате образования III–V голоценовых кальдер (по [4, 12]). Они наиболее широко сохранились на западе, в меньшей мере — на юго-востоке кальдеры. В бортах долин и промоин, расчленяющих эти уплощенные и лишенные растительности поверхности на западе комплекса, хорошо видно чередование темной и более светлой пемзы, насчитывающее от 3 до 5 подобных сочетаний слоев (рис. 3).

Водоразделы и склоны с абс. отметками менее 650 м в той или иной мере покрыты кустарниковой или травянистой растительностью, однако ее состав и густота во многом зависят от удаленности от центра последнего извержения — конуса Штюбеля — и от ориентировки оси пеплопада. Известно, что если мощность пирокластики превышает 0.4 м (а в кальдере она нередко достигает 1–4 м), то это приводит к гибели растительного покрова и, как результат, к активному развитию эрозии [19–21]. Но это зависит также от крутизны и экспозиции склона: на крутых поверхностях происходит более быстрое удаление пирокластики, а склоны, ориентированные на север, лучше увлажнены. Оба этих фактора способствуют более быстрому восстановлению растительности.

Нивальные процессы наиболее широко развиты на абс. отметках более 700–800 м, но на склонах северной экспозиции, в распадках и долинах снежники и наледы могут перелетовывать даже на абс. высотах чуть более 415 м. Снежники формируют нивальные ниши, а при их таянии в пирокластическом покрове образуются эрозионные ложбины. От крупных ниш, заполненных снежниками, нередко идет сеть параллельных промоин, которые затем сливаются в одну. Так постепенно нивальные ниши преобразуются в водосборные воронки. Практически во всех долинах в их нижнем течении в конце июля сохраняются наледы мощностью до 2–5 м, иногда они оказываются перекрыты отложениями лахаров, на поверхности которых нередко видны проявления термокарстовых процессов в виде просадочных воронок диаметром до 0.5 м.

На уплощенных участках водоразделов, террасовидных поверхностях и седловинах кальдеры активна дефляция. В результате выноса мелкозема формируется каменная отмостка, а развешивание слоистого пирокластического чехла приводит к возникновению на поверхностях разноцветных узоров, обусловленных чередованием слоев более темной и более светлой пирокластики. На склонах средней крутизны, перекрытых



Рис. 4. Южный склон конуса Штюбеля: делли, переходящие в промоины

рыхлыми отложениями, доминируют процессы медленного массового смещения материалы — десерпция, дефлюкция, на увлажненных участках — солифлюкция. Крутые склоны приурочены к бортам кальдеры или речных долин, там обычно преобладают обвально-осыпные процессы.

Примечательными объектами вулканического комплекса являются многочисленные экструзивные купола, в большинстве своем вскрытые денудацией по периферии озер или в бортах долин. Для этих, как правило, небольших, но выразительных крутосклонных останцов и массивов, сложенных разновозрастными андезитами и дациитами [4, 12], типичны столбчатая и изометричная отдельности. На их склонах доминируют обвально-осыпные процессы, по трещинам нередко формируются кулуары, а у подножия идет накопление шлейфов грубообломочного материала.

Сам молодой вулкан Штюбеля имеет форму правильного усеченного конуса. В верхней части крутизна его склонов достигает  $20^\circ$ , к периферии они выполаживаются. С поверхности встречается разнообразный пирокластический материал: вулканический песок, лапилли, бомбы. Проективное покрытие травянистой растительности не превышает 5–10%. В верхней части южного склона наблюдаются многочисленные пологие безрусловые ложбины, задернованные по понижениям, — делли (рис. 4). Ниже по склону в их днищах появляются промоины, которые иногда заканчиваются небольшим конусом выноса мелкозема, но чаще, сливаясь, трансформируются в более крупные эрозионные врезы, привязанные к оз. Ключевому. Следы наиболее молодых излияний лав сохранились на восточном склоне конуса: небольшие потоки шириной 5–15 м, разделенные плоскодонными понижениями глубиной до 3 м и шириной до 5 м, сформировали серию валов и эмбриональных лавовых долин [22]. Они идут прямо от кратера конуса, многие опираются на седловину, разделяющую озеро. Современной эрозии в них нет, отмечены лишь следы суффозии — вымывание мелкозема (частиц менее 1–2 см). На внутреннем склоне кратера конуса видно чередование горизонтальных слоев пирокластики, до 30–50% объема составляют лавы андезито-базальтового состава; здесь доминируют обвально-осыпные процессы.

Характер процессов на внешних склонах конуса весьма разнообразен и, по-видимому, во многом зависит от состава отложений. Так, на южном склоне в местах выхода тонкой пирокластики встречаются хаотично разбросанные солифлюкционные терраски размером  $0.5 \times 0.7$  м, уступы которых подчеркнуты растительностью — кочками травы. На участках доминирования грубообломочных фракций наблюдаются более крупные солифлюкционно-оползневые террасы размером  $1.5 \times 3.0$  м, нагромождения небольших (высотой 1–1.5 м и диаметром до 2–3 м) холмиков, разделенных задернованными ложбинами, прослеживаются следы смещения вниз по склону блоков пород диаметром до 1 м. Встречаются и небольшие (протяженностью 2–5 и с высотой задней стенки до 1.5–2.5 м) нивальные ниши со стаивающими лишь к концу лета снежниками.

Водосборная площадь всего кальдерного комплекса составляет около 64 км<sup>2</sup> [12]. Внутрикальдерная речная сеть состоит из десяти относительно крупных водотоков 3–4 порядка протяженностью 2–4 км, восемь из которых впадают в оз. Ключевое и два – в оз. Штюбеля. Все они берут начало на внутренних склонах кальдеры, где кроме них существует и множество водотоков 1–2 порядка длиной до 1–2 км. Активный сток в них наблюдается 3–4 месяца, к концу лета почти все водотоки полностью или частично пересыхают.

Озеро Ключевое имеет форму овала с длиной около 4 км при ширине 2 км, глубина его превышает 90 м; видимого поверхностного стока нет. Озеро Штюбеля по форме напоминает трилистник: выделяются кратерная (внутри конуса Штюбеля), северная и восточная (или кутовая, прислоненная к межозерной перемычке) части, соединенные проливами. Кратерная часть имеет глубину более 80 м, а восточная и северная гораздо мельче – менее 30 м. Поверхностный сток в это озеро очень мал, очевидно, что вода поступает в него подземным путем – за счет фильтрации из оз. Ключевое [12]. По берегам озер происходит разгрузка термальных вод. Самая крупная термальная аномалия – Горячий пляж – находится на западном берегу оз. Ключевое. На побережье видны следы колебания уровня озер – прослеживаются фрагменты террас с отметками 4–5, 7–8, 12–15 и 25–30 м. Аккумулятивные участки побережья развиты в основном в приустьевых частях рек и представляют собой обширные конусы выноса, нередко врезанные друг в друга. Абразионные – приурочены преимущественно к южному берегу оз. Ключевого, южному склону конуса Штюбеля и к его кратеру, а также к экстрезивным куполам.

### Морфология ключевых долин

*Р. Теплая*, несомненно, играет особую роль в преобразовании рельефа вулканического комплекса. Она дренирует кальдерные озера, во многом определяя их современный уровень, выносит пирокластический материал за пределы вулканического комплекса, в позднем плейстоцене по ней спускался выводной ледник. Ее длина в настоящее время составляет около 14 км, однако на более ранних этапах развития она не превышала 11 км. Такое изменение обусловлено тем, что выйдя за пределы кальдеры, река сформировала у подножия вулканического комплекса обширный конус выноса, и в настоящее время ее основное русло огибает его с востока, меняя северное направление течения на СВ и впадает в р. Зап. Ходутка почти на 3 км ниже по течению от старого устья. Однако на продолжении основного, меридионально ориентированного участка долины четко прослеживаются ложбины старых русел. Падение реки выше конуса выноса составляет до 23 м на км, течение быстрое – около 1 м/с. В месте истока ширина русла достигает 10–12 м при глубине до 0.6–1.0 м.

Очевидно, что в периоды начала извержений (фреато-магматические фазы) по долине сходили катастрофические паводки, а сразу после эксплозивных проявлений – мощные лахары, обусловленные обильным выпадением тефры. В частности, для таковых, синхронных второму извержению конуса Штюбеля и была получена дата  $300 \pm 60$  <sup>14</sup>C л.н. [7]. По устному сообщению В.В. Пономаревой, наиболее мощные гиперконцентрированные потоки доходили до тихоокеанского побережья, т.к. в разрезах торфяников террас в приустьевой части р. Прав. Ходутка ею были описаны прослой ксудачской пемзы. Однако очевидно, что большая часть переотложенной пирокластики аккумулировалась в приустьевой части р. Теплой у подножия внешнего склона кальдеры.

Формированию катастрофических паводков и селей способствовало и периодическое перегораживание долины реки в районе ее истока как взрывными отложениями, так и в результате сейсмообвалов, что вызывало временный подъем уровня озер. Следы плотины можно наблюдать близ истока реки и в настоящее время. Поперечный профиль долины в этом месте имеет сложное строение: в русле отмечены выходы

лав среднего и основного состава, по правому борту — вал высотой 4–6 м над урезом из блоков эффузивов размером в поперечнике до 4 м — фрагменты бывшей плотины, перекрывавшей русло. За валом — старичное понижение, высота днища которого около 3 м над современным урезом, далее прослеживаются 7 и 12–15-метровые террасы, выработанные в наклонно-слоистой черно-коричневой пирокластике. На левом борту сохранился останец 30-метровой террасовидной поверхности, который река огибает, делая петлю. В цоколе останца до высоты около 4–5 м над урезом выходят серые лавы, выше перекрытые палево-серой наклонно-слоистой пирокластикой, в которой на высоте 12–15 м над руслом прослеживается врез, выполненный тонкослоистыми темно-серыми отложениями, перекрытыми грубообломочным пирокластическим материалом мощностью 3–5 м. Сверху эта толща покрыта горизонтально-слоистым чехлом пирокластики различного состава от палево-серого до желтовато-розового цвета. Таким образом, строение долины р. Теплой на этом участке отражает этапы развития гидросети кальдеры Ксудач и ее поэтапное врезание, вызывавшее падение уровня озер и, соответственно, врезание привязанных к ним водотоков. Далее вниз по течению долина реки прямолинейная, поперечный профиль U-образный, преимущественно по левому борту прослеживаются фрагменты 25–30-метрового уровня, русло прижато к правому борту.

Среди относительно крупных внутрикальдерных водотоков стоит подробнее остановиться на особенностях морфологии долин ручьев Седловинный, Лагерный и Южный (см. рис. 1), строение которых позволяет лучше понять особенности развития рельефа внутрикальдерного пространства.

На бортах ряда долин прослеживаются террасовидные поверхности, сложенные пирокластическим материалом, некогда заполнившим долины и “выплеснувшимся” по ним за пределы кальдеры. Наиболее хорошо это можно проследить на примере *руч. Седловинного* (4 порядок), который уже упоминался выше. В пределах долины ручья, имеющей преимущественно СЗ ориентировку, могут быть выделены 3 участка. Приустьевой (протяженностью около 1 км) находится в пределах кальдеры V и морфологически представляет собой протоку обширного конуса выноса, опирающегося на межозерную перемычку. Границы кальдер IV и V здесь сближены и приурочены к уступу горного обрамления этой перемычки. Среднее течение долины (на расстоянии от 1 до 3 км от устья) находится в пределах кальдеры II, на этом участке долина приобретает U-образный поперечный профиль. Выше по течению она делает резкий зигзагообразный изгиб, к которому приурочено и увеличение уклона русла — оно становится здесь порожисто-водопадным. Данный изгиб соответствует границе кальдер I и II, выше него (в пределах кальдеры I) долина также имеет СЗ ориентировку, но V-образный поперечный профиль, и расположен этот участок со смещением на 300–400 м к северу относительно среднего течения долины.

Долина руч. Седловинного периодически выполнялась отложениями пирокластических потоков частично либо целиком, в последнем случае потоки “выплескивались” за пределы кальдеры, о чем свидетельствуют исследования [1, 8]. При последующих врезаниях водотока в его среднем течении формировались террасовидные поверхности. В настоящее время прослеживаются следы четырех таких разновысотных уровней выполнения (рис. 5), лучше всего морфологически выражены отложения самого низкого и, видимо, последнего уровня с отметками в приустьевой части реки около 30 м над урезом. В нижней части разреза это горизонтально-тонкослоистые вулканические пески с включением обломков темных туфов основного состава, видимая мощность от 5 до 15 м (отложения пирокластических волн). Выше залегает несортированная грубослоистая грубообломочная толща светлой пемзы — отложения пирокластического потока. Общая мощность пирокластики превышает 30 м. Вверх по долине относительная высота уровня выполнения постепенно снижается, многочисленными промоинами его поверхность разбита на отдельные фрагменты протяженностью первые десятки метров. Постепенно некоторые из них превращаются в эрозионные останцы



Рис. 5. Террасовидные поверхности (показаны пунктиром), сложенные отложениями пирокластических потоков, — следы выполнения долины руч. Седловинного

диаметром 3–5 м, которые при дальнейшем размыве основания падают вниз по склону в русло ручья, где происходит их полное разрушение.

В среднем течении долины прослеживается селевый вал шириной 5–10 м, в результате чего ее днище становится выпуклым. Сложен вал грубообломочным материалом преимущественно андезито-базальтового состава, преобладающий размер глыб 1–2 м, но встречаются и 2–3 м, окатанность 1–2 класс. Промоины, прорезающие пирокластические отложения на бортах, выносят в долину большое количество светлой пемзы, формируя из нее в прибрежных частях небольшие конусы выноса. Однако в днище пемзового материала мало, видимо, из-за его быстрого разрушения и выноса в озеро. Высота межозерной перемычки составляет около 7–8 м над уровнем оз. Ключевого, глубина вреза в нее проток руч. Седловинного около 3 м. Основное русло ручья впадает в восточную часть оз. Штюбеля, формируя в его акватории еще один конус выноса, но в паводки функционирует и вторая протока, впадающая в оз. Ключевое.

Фрагменты аналогичных отложений ПП встречены нами и на бортах руч. Южного (3 порядок), конус выноса которого ограничивает с юга Горячий пляж. В пределах бассейна ручья могут быть выделены два участка: верхний, лишенный растительности, с широкими корытообразными долинами, расположенными в пределах кальдеры II, и нижний, густо залесенный V-образный врез протяженностью около 2.7 км, приуроченный к кальдере IV. Фрагменты отложений пирокластических потоков были изучены нами в пределах нижнего течения ручья, но из-за залесенности долины они не прослеживаются здесь столь четко; к тому же они перекрыты отложениями пирокластического чехла извержения 1907 г. В нижнем течении долина руч. Южного узкая — 8–10 м, густо поросла ольховым стлаником, в устье сформирован конус выноса около 150 м в ширину и 80–90 м в длину. В приустьевой части по обоим бортам прослеживаются террасы высотой 3–4 и 7–8 м. Русло порожиисто-водопадное шириной 3–5 м, в нем преобладает грубообломочный материал, встречаются глыбы размером до 2–3 м преимущественно андезито-базальтового состава. Сохранились следы мощных весенних паводков — со стволов стланика содрана кора, а в ветвях отмечен окатанный материал андезито-базальтов размером до 0.2 м на высоте 1–1.5 м над урезом. Вдоль русла прослеживается селевый вал шириной 3–5 м и высотой 2–4 м, сложенный грубообломочным материалом: валунами и глыбами с примесью гальки 1–2 класса окатанности. Среди мелкой гальки встречается светлая пемза. Выше по течению она

начинает доминировать, а сам ольшаник занесен пемзовым материалом до высоты 1–1.5 м. Под пемзовым чехлом прослеживается наледь: на нем отчетливо видны просядочные воронки глубиной до 0.3 м и диаметром 0.5–0.7 м. Такое обилие пемзы обусловлено тем, что из первого левого притока ручья идет вынос этого материала с формированием конуса выноса шириной до 70–100 м и высотой над урезом от 3 до 10 м, который перекрывает селевый вал и отжимает русло руч. Южного к правому борту. Конус прорезан промоинами шириной до 1 м и глубиной до 1–1.5 м, помимо пемзы в его строении принимает участие серо-желтый слабосцементированный и легко разрушающийся материал пирокластических потоков. Конус выноса имеет крутое падение – до 15–20°, выше него ширина русла притока составляет 1–2 м, а глубина вреза достигает 30 м и более. Здесь в конце июля сохранилась наледь с подледным туннелем диаметром около 1 м. Приток размывает и переоткладывает отложения пирокластического потока (или потоков?) мощностью до 50–70 м, выполнявшего долину руч. Южного, а также пемзовый пирокластический чехол последнего извержения конуса Штюбеля 1907 г., который залегает несогласно на отложениях ПП и плащом перекрывает склоны долины. Чехол этот имеет типичное двучленное строение: снизу залегает метровый слой черного шлака основного состава с размером отдельностей 1–2 см, выше – слой розовато-палевой пемзы кислого состава мощностью 0.6–0.8 м, средний размер частиц которой уменьшается снизу вверх от 2–5 до 1–3 см.

*Руч. Лагерный* (4 порядок) берет свое начало на западном склоне кальдеры и течет на север, но потом делает резкий поворот на ЮВ и впадает в оз. Ключевое у Горячего пляжа. Это один из наиболее протяженных внутрикальдерных водотоков, его верхнее течение представляет собой хорошо разработанную корытообразную долину, приуроченную к кальдере II. До формирования конуса Штюбеля, этот ручей тек на север, в процессе роста молодого вулканического конуса русло реки оказалось отжато к ЮВ. В результате перелива или эрозионного перехвата произошла перестройка с формированием крутого изгиба долины. Нижнее течение современного руч. Лагерного в настоящее время приурочено к днищу кальдеры V и представляет собой каньонообразный врез глубиной до 15–20 м, в приустьевой части – до 10 м с падением 7–10°. В результате дальнейшего роста конуса Штюбеля происходило постепенное смещение водотока к подножию экструзивного массива Парящий уступ. В днище вреза прослеживаются 4 ступени высотой от 1 до 2 м, формирование которых, с одной стороны, обусловлено регрессивной эрозией, связанной с падением уровня озерного бассейна, а с другой – приурочено к выходам лав конуса Штюбеля андезито-базальтового состава. Ширина днища в среднем составляет 30–40 м, на участках уступов оно сужается до 3–7 м, а в приустьевой части постепенно расширяется до 70–100 м, заканчиваясь обширным многорукавным конусом выноса длиной около 400 м. В русле ручья доминирует отмостка из пемзы среднего и кислого состава, но со стороны Парящего уступа в долину поступают глыбы андезито-базальтов размером до 3 м. В нижнем течении прослеживаются фрагменты двух локальных террасовых уровней высотой 0.5 и 1.2 м, сложенных плохо сортированными неясно горизонтально-слоистыми оглиненными песками с гравием и со значительным включением пемзы, очевидно, сформированные в результате схода гиперконцентрированных потоков, перенасыщенных пирокластическим материалом.

Отчлененная нижняя часть долины р. пра-Лагерного в настоящее время представляет собой протяженную корытообразную седловину, отделяющую конус Штюбеля от западного склона кальдеры. Судя по разрезу, вскрываемому в 25–30-метровом борту современного вреза ручья в месте его поворота и, соответственно, пересечения этой части долины, она выполнена плохо сортированными аллювиально-пролювиальными и лахаровыми отложениями, перекрытыми переслаивающимися горизонтами светлой (4 горизонта) и темной (3) пирокластике, соответствующими членам извержениям: как современного конуса Штюбеля (1907 г., приблизительно 1650 и 1000 гг.), так и кальдерообразующему – около 290 г. (рис. 6). Это свидетельствует



*Рис. 6. Среднее течение руч. Лагерного — современный врез, прорезающий отложения брошенной долины (справа). Стрелки: тонкая — направление современного течения ручья, жирная — древнего (до формирования конуса Штюбеля)*

о том, что данный фрагмент долины, видимо, сохранял свою северную ориентировку и продолжал функционировать во время существования кальдеры IV. В настоящее время в седловину врезаны водотоки, берущие начало на западном склоне кальдерного комплекса Ксудач. Близ истока р. Теплой ими сформирован обширный конус выноса с отметками от 7–8 м до 3–4 м по периферии.

### **Особенности развития речных долин кальдерного комплекса**

Судя по активности голоценовой вулканической деятельности в пределах кальдеры Ксудач, свидетельства которой мы находим в материалах геологических исследований [1, 4, 5, 7, 8, 12 и др.] — это и вулкано-тектонические просадки и обрушения, значительные объемы выброшенного и осажденного пирокластического материала, речная сеть кальдеры должна быть чрезвычайно молодой. Однако анализ строения речных долин кальдеры позволяет заключить, что верховья многих современных долин, по-видимому, имеют позднеплейстоценовый возраст. Судя по морфологии и ориентировке этих участков, они заложились еще на склонах кальдер I и II и продолжают функционировать и по настоящее время, являясь верхними звеньями более молодых голоценовых долин, сформировавшихся в кальдерах IV–V (кальдера III в настоящее время морфологически практически не выражена). Об этом свидетельствуют изменения морфологии и ориентировки фрагментов долин при переходе из зоны одной кальдеры к другой — таковы, например, долины руч. Лагерного, Седловинного, Южного. Все они состоят из звеньев, формирование которых происходило в пределах разновозрастных кальдер. Таким образом, мы можем заключить, что, несмотря на значительное влияние вулканической активности, приводившей к существенному переформированию рельефа кальдерного комплекса, внутрикальдерная речная сеть является достаточно устойчивым образованием. Вероятно, это обусловлено тем, что голоценовые кальдеры IV и V сформировались внутри более крупных плейстоценовых кальдер I и II. Сохранившиеся позднеплейстоценовые фрагменты верхних звеньев речной сети продолжали концентрировать сток, в результате чего шло восстановление разрушенных при извержениях нижних их звеньев, но уже в зависимости

от характера вновь сформированного вулканического рельефа — новой морфологии кальдерного комплекса.

Рост молодого вулканического конуса внутри кальдеры V оказал значительное влияние на ориентировку и морфологию прилегающих водотоков: в частности, руч. Лагерный совершил поворот практически на 120°. Участок его древней долины оказался приподнят и сейчас представляет собой плоскодонную седловину на ЗЮЗ от кратера влк. Штюбеля, которая постепенно разрушается под воздействием эрозии как со стороны нового русла руч. Лагерного, так и со стороны водотоков СЗ склона кальдеры, когда-то впадавших в его старое русло.

Помимо вулcano-тектонических явлений большое влияние на речную сеть оказала эксплозивная деятельность Ксудача — выбросы значительного количества пирокластического материала. Мощные пирокластические потоки неоднократно выполняли долины как внутрикальдерных водотоков, так и сходили по р. Теплой. Последующее врезание рек привело к формированию в долинах эрозионных и цокольных террас, сложенных пирокластическим материалом. Обильное выпадение тефры также обусловило гибель растительного покрова на значительных участках и, как следствие, активное развитие эрозионных процессов на внутренних склонах кальдеры. Постепенный снос тонкой пирокластики в долины вызывает регулярный сход гиперконцентрированных потоков, перегруженных пемзовым материалом, с формированием мощных конусов выноса в устьях и островов плавающей пемзы в пределах акватории озер. В результате большинство рек кальдеры (например, руч. Лагерный и водотоки ее СЗ склона) функционируют лишь часть года (3–4 месяца), в остальное время представляя собой типичные сухие реки, днища долин которых заполнены пирокластикой.

В нижних частях рек фиксируются следы нескольких этапов регрессивной эрозии, что свидетельствует о постепенном снижении уровня озер, вдоль берегов которых отмечены также комплексы террас. В настоящее время продолжается и формирование свежих врезов по периферии конуса Штюбеля и в истоках р. Теплой. При врезании водотоки наряду с пирокластическим материалом размывали и плотные эффузивы. В ряде долин к выходам лав приурочены водопады и уступы в русле (например, нижнее течение руч. Лагерного). Голоценовые излияния лав конуса Штюбеля сформировали перемычку между озерами Ключевое и Штюбеля, а также серию эмбриональных лавовых долин на склонах самого вулкана. В днищах многих водотоков в настоящее время мы можем проследить типичные селевые валы, сложенные преимущественно эффузивным материалом, источником которого являются как позднплейстоценовые морены, так и обвально-осыпные отложения подножий экстрезивных куполов.

Чрезвычайно быстрые (в геологическом смысле) процессы колебания уровня озерных водоемов в пределах кальдеры неоднократно повторялись — вероятно, при каждом извержении. Это также не могло не сказаться на особенностях развития внутрикальдерной речной сети. Разноуровневые эрозионные поверхности, высотные отметки которых в целом совпадают с высотами основных озерных террас кальдеры, фиксируются и в приустьевой части р. Теплой, которая является регулятором стока. Однако вопросы образования, морфологии и функционирования внутрикальдерных озер нуждаются в более подробном рассмотрении, что не представляется возможным в формате этой статьи.

### **Заключение**

Комплекс вулкана Ксудач — благодатный полигон для геоморфологических исследований, т.к. он достаточно хорошо изучен геологически, для него получено большое количество датировок абс. возраста как рыхлых отложений, так и лав и игнимбритов, что дает возможность определить время образования кальдер, последовательность их возникновения и положение друг относительно друга. Подводя итог проведенному анализу строения долинной сети кальдеры Ксудач, хотелось бы понять: насколько полученные выше выводы о сохранности фрагментов древних долин могут быть

актуальны для других кальдерных комплексов? С одной стороны, вполне вероятно, что близкая картина может наблюдаться и в других крупных и сложно устроенных кальдерных депрессиях, площадь которых иногда в десятки раз превышает рассматриваемую кальдеру и достигает 4500 км<sup>2</sup> [23–25]. Необходимыми условиями, при которых подобная ситуация возможна, на наш взгляд, являются следующие: во-первых, смещение центров извержения и уменьшение площади и абс. высот молодых кальдер, что позволяет сохраниться значительным фрагментам днищ древних кальдер в виде участков суши, расположенных гипсометрически выше более молодых; во-вторых, наличие достаточно продолжительного (несколько тыс. лет) временного интервала между кальдерообразующими извержениями, что дает возможность восстановиться частично уничтоженной долинной сети. Третьим важным фактором является преобладание среди продуктов извержений рыхлого пирокластического материала, т.к. доминирование более прочных пемз и игнимбритов, а тем более лав, заполняющих речные долины и формирующих обширные плато, практически исключает возможность “реанимации” погребенных речных долин, чаще приводя к полному перезаложению речной сети. Разумеется, однозначное решение данного вопроса требует проведения дальнейших детальных исследований в пределах крупных кальдер.

**Автор выражает глубокую благодарность** коллегам-вулканологам из ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск) – Л.М. Богомолу, И.И. Власовой, А.В. Дегтереву, Д.Н. Козлову, А.В. Копаниной, И.Г. Коротееву, А.В. Рыбину, М.В. Чибисовой, – участникам полевых работ 2016 г., без которых были бы невозможны маршрутные исследования в пределах кальдеры Ксудач, а также российско-белорусскому проекту “Мониторинг-СГ-1.3.1.2” “Создание базы данных предметно-специфических признаков и спектральных характеристик, полученных на наземных контрольно-калибровочных полигонах и в сейсмически и вулканически активных зонах, на основе полевых измерений спектральным аппаратно-программным комплексом”, в рамках которого была проведена заброска и аэровизуальные наблюдения, и лично В.Б. Малышеву и Г.В. Коровину. Отдельная благодарность сотрудникам ИВИС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) В.В. Пономаревой и В.Н. Двигало, проводившим работы в кальдере в 1980–1990-е гг., – за консультации и возможность ознакомления с ранее полученными материалами, в т.ч. результатами фотограмметрических работ. Исследования были осуществлены благодаря финансовой поддержке г.н.с.д.г.н. ИГ РАН Э.А. Лихачёвой.

Работа выполнена в рамках темы Госзадания “Экзогенный (включая антропогенный) морфолитогенез в разных природных условиях”. Рег. № 01201352491 (0148–2014–0016).

**Acknowledgements.** The author expresses his deep gratitude to the colleagues-volcanologists from IMGG FEB RAS (Yuzhno-Sakhalinsk) – L.M. Bogomolov, I.I. Vlasova, A.V. Degterev, D.N. Kozlov, A.V. Kopanina, I.G. Koroteyev, A.V. Rybin, M.V. Chibisova – participants of expedition to the caldera Ksudach in 2016, without which it would not be possible these studies, as well as Russian-Belarusian project “Monitoring-SG-1.3.1.2” “Creating a database of subject-specific and spectral characteristics received on the ground control and calibration ranges in seismic and volcanic activity zones, based on field measurements of spectral hardware-software system”, under which was carried aero visual researches, and personally to V.B. Malyshev and G.V. Korovin. Special thanks to V.V. Ponomareva and V.N. Dvigalo from IVS FED RAS (Petropavlovsk-Kamchatsky), who have made their researches in the caldera in 1980–1990-ies, for their advices and the opportunity to get acquainted with some of their materials, including results of photogrammetric work. Studies have been carried out thanks to the financial support of the Chief Researcher of IG RAS, Dr. E.A. Likhacheva.

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. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические кальдерообразующие извержения вулкана Ксудач в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 28–53.
2. Пийп Б.И. Маршрутные геологические наблюдения на юге Камчатки // Тр. Камчатской вулканологической 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. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 340–355.
6. Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
7. Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние 10 тыс. лет // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 28–39.
8. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Курьянов В.Ю. Крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке – кальдерообразующее извержение в Ксудач 1700–1800 <sup>14</sup>C-лет назад // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 30–49.
9. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V. Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD240, 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. Дубик Ю.М., Меньяйлов 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. Апродов В.А. Вулканы. М.: Мысль, 1982. 367 с.
14. Нечаев А.М. Камчатка – царство вулканов. М.: Логата, Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2008. 200 с.
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. Pinegina T.K., Bourgeois J., Kravchunovskaya E.A., Lander A.V., Arcos M.E., Padoja K., and MacInnes B.T. A nexus of plate interaction: vertical deformation of Holocene wave-built terraces on the Kamchatsky Peninsula (Kamchatka, Russia) // Geol. Soc. Am. Bul. 2013. Vol. 125 (9–10). P. 1554–1568.
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) // Quat. Sci. Rev. 2017. Vol. 157. P. 14–28.
18. 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.
19. Гришин С.Ю. Сукцессии подгольцовой растительности на лавовых потоках Толбачинского дола // Ботанич. журнал. 1992. Т. 77. № 1. С. 92–100.
20. Гришин С.Ю. Крупнейшие вулканические извержения XX столетия на Камчатке и Курильских островах и их влияние на растительность // Изв. РГО. 2003. Т. 135. Вып. 3. С. 19–28.
21. 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.
22. Лебедева Е.В. Влияние лавовых потоков на строение долин и развитие речной сети // Геоморфология. 2016. № 3. С. 78–91.
23. Луцкицкий И.В. Основы палеовулканологии. М.: Наука, 1971. Т. 1. Современные вулканы. 480 с.
24. Spera J.S. and Crisp J.A. Eruption volume, periodicity and caldera area: relationships and inferences on development of compositional zonation in silicic magma chambers // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1981. Vol. 11. P. 169–187.

## CALDERA KSUDACH (KAMCHATKA): MODERN PROCESSES OF RELIEF FORMING AND MAIN FEATURES OF THE VALLEY NETWORK STRUCTURE

E.V. LEBEDEVA

*Institute of geography, RAS, Moscow, Russia*

*e-mail: Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

### Summary

Ksudach volcano (Kamchatka) consists of 5 completely or partially nested calderas Late Pleistocene (calderas I and II) and Holocene (III–V) age. Analysis of the processes of relief forming and structure of intracaldera river valleys leads to the conclusion that, despite the high Holocene volcanic activity of Ksudach (volcano-tectonic collapse, significant amounts of ejected pyroclastic material) the upper reaches of many of modern valleys were formed on the slopes of calderas I and II. And nowadays they are still function as the upper parts of the younger Holocene valleys of calderas IV and V. These fragments of upper parts of the Late Pleistocene river network surviving after Holocene caldera forming explosions continued to concentrate runoff and as a result the lower parts of the river network, destroyed during eruptions, begun to restore, but depending on the newly formed volcanic relief. The growth of the Shtyubel cone within the caldera V also had a significant influence on the orientation and morphology of adjacent valleys: in particular, it has led to Lagernyi creek alteration, which made a turn for 120° during the Late Holocene. The fragment of its ancient valley preserved in the form of a flat-bottomed saddle on the WSW of the vlc. Shtyubel and now it's gradually degraded by erosion. Explosive activity of Ksudach vlc. (including Shtyubel cone) had great influence on the intracaldera river systems: powerful pyroclastic flows repeatedly filled up their valleys and came down along the river Teplaya. Subsequent incision of valleys led to the formation in them of erosion terraces composed by pyroclastic deposits.

**Keywords:** valley, river network alteration, geomorphic processes, volcanic relief, pyroclastic deposits.

### REFERENCES

1. 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.)
2. Piip B.I. 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. *Bul. 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. (in Russ.)
6. Melekestsev I.V. *Vulkanizm and reliefobrazovanie* (Volcanism and Relief Formation). Moscow: Nauka (Publ.), 1980. 212 p. (in Russ.)
7. Melekestsev I.V., Sulerzhitsky L.D. Ksudach volcano during last 10000 yr. *Volcanol. Seismol.* 1987. No. 4. P. 28–39. (in Russ.)
8. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V.Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about 1700–1800 <sup>14</sup>C-yr. BP – the greatest explosive event of our era in Kamchatka. *Volcanol. Seismol.* 1995. No. 2. P. 30–49. (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. AD240, 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., Menyailov I.A. Gas-hydrothermal activities of Ksudach caldera. *Bull. Volcanol. Station.* 1971. No. 47. P. 40–43. (in Russ.)
12. Pilipenko G.F., Razin A.A., Fazlullin S.M. Hydroterms of Ksudach caldera. *Volcanol. Seismol.* 2001. No. 6. P. 43–57. (in Russ.)
13. Aprudov V.A. *Vulkany* (Volcanoes). Moscow: Mysl' (Publ.), 1982. 367 p. (in Russ.)
14. Nechayev A.M. *Kamchatka – tsarstvo vulkanov* (Volcanoes kingdom – Kamchatka). Moscow: Loga-ta (Publ.), Petropavlovsk-Kamchatsky: Novaya kniga (Publ.), 2008. 200 p. (in Russian and English)
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. Pinegina T.K., Bourgeois J., Kravchunovskaya E.A., Lander A.V., Arcos M.E., Pedoja K., and Mac-Innes B.T. A nexus of plate interaction: vertical deformation of Holocene wave-built terraces on the Kamchatsky Peninsula (Kamchatka, Russia). *Geol. Soc. Am. Bull.* 2013. Vol. 125 (9–10). P. 1554–1568.
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. 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.
19. Grishin S.Yu. Successions subgolets vegetation on lava flows Tolbachik dale. *Botanichesky Journ.* 1992. T. 77. No. 1. P. 92–100. (in Russ.)
20. Grishin S.Yu. The largest volcanic eruption of the twentieth century, in Kamchatka and the Kuril Islands, and their impact on vegetation. *Izvestiya RGO.* 2003. Vol. 135. Iss. 3. P. 19–28. (in Russ.)
21. 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.)
22. 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.)
23. Luchitskii I.V. *Osnovy paleovulkanologii* (Fundamental paleovolcanology). M.: Nauka (Publ.), 1971. Vol. 1. Modern volcanoes. 480 p. (in Russ.)
24. Spera J.S. and Crisp J.A. Eruption volume, periodicity and caldera area: relationships and inferences on development of compositional zonation in silicic magma chambers. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1981. Vol. 11. P. 169–187.
25. Slezin Yu.B. Mechanism of magma chambers depletion in the formation of calderas // *Volcanol. Seismol.* 1987. No. 5. P. 3–15. (in Russ.)

Received 09.01.2017

Accepted 14.03.2017