

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 58.05:551.432.7 (571.66)

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ 1907 г. КАЛЬДЕРЫ КСУДАЧ НА ЮГЕ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2018 г. А. В. Копанина^{1,*}, Е. В. Лебедева^{2,**}, И. И. Власова¹

¹ Институт морской геологии и геофизики, Южно-Сахалинск, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: anna_kopanina@mail.ru

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

Поступила в редакцию 23.10.2017 г.

Принята в печать 27.07.2018 г.

Флора и растительность труднодоступного кальдерного комплекса Ксудач (Камчатка) впервые были изучены С.Ю. Гришиным с коллегами в начале 90-х годов XX в. Спустя 25 лет проведены комплексные маршрутные исследования, дополненные дешифрированием аэрофотоснимков. Установлено, что формирование растительного покрова внутри кальдеры через 109 лет после катастрофического извержения конуса Штюбеля в марте 1907 г. проходит крайне неравномерно. Наиболее медленно восстановление идет на территориях, где максимален слой выпавшей тефры, продолжается активное перемещение пирокластического чехла под воздействием рельефообразующих процессов — эрозии, дефляции, лахарообразования, оплывания, осыпания и др., отмечается дефицит влаги и отсутствуют близлежащие источники зачатков растений. Эти факторы наиболее широко представлены в западной части кальдеры, где до сих пор проходит начальная стадия первичной сукцессии: эта территория занята пемзовой пустыней, слабо заселенной пионерными видами растений и некоторыми кустарничками. На остальных участках внутренней части кальдеры Ксудач и на склонах конуса Штюбеля проходят активные демулационные процессы, которые маркируют продолжительную стадию первичной сукцессии по формированию растительного покрова, сложенного различными вариантами комплексных ксеромезофитных травяно-кустарничковых лугов и горно-тундровых сообществ с участием кустарниковых форм *Alnus fruticosa* и, в меньшей степени, *Betula ermanii*. В этих процессах *Pinus pumila* заметной роли не играет.

Ключевые слова: горно-тундровые сообщества, пионерные виды, пемзовая пустыня, пирокластические отложения, рельеф, геоморфологические процессы

DOI: 10.1134/S2587556618060092

Введение. Кальдерный комплекс Ксудач Южно-Камчатской вулканической зоны (рис. 1) является одним из самых крупных и сложно устроенных вулканических центров полуострова со своеобразной и длительной историей развития. Постройка вулкана Ксудач в настоящее время представляет собой пологий, значительно эродированный щитообразный конус с эллипсовидным основанием размером 18 × 22 км, ориентированным длинной осью на СЗ. Вершинная часть его осложнена комплексом из пяти разновозрастных (плейстоцен-голоценовых) кальдер с останцами внутрикальдерных вулканов и молодым конусом Штюбеля, являющимся центром проявления современной вулканической активности. Внутренняя часть кальдеры имеет размеры примерно 8 × 10 км, в ее восточной половине расположены озера Ключевое и Штюбеля, а западная представлена преимущественно плоскими водо-

разделами с отметками 650–800 м, расчлененными долинами водотоков 2–4 порядка. Вулкан Штюбеля, разделяющий озера, имеет форму правильного усеченного конуса около 3 км в диаметре, его абс. высота составляет 650 м над ур.м., а относительная — около 240 м над уровнем озер. В верхней части крутизна его склонов достигает 20°, к периферии они выполаживаются. Абсолютная высота сохранившегося гребня материнской постройки кальдерного комплекса почти на всем его протяжении составляет 900–1000 м, и лишь отдельные вершины на севере и на юге немногие превышают 1000 м [23].

Самая молодая кальдера комплекса — пятая (V), в ней и расположены озера; она образовалась в результате гигантского по масштабам извержения влк. Ксудач около 1725 кал.л.н. [2, 18]. Примерно в 350–390 г. н.э. [26] в ее северной части

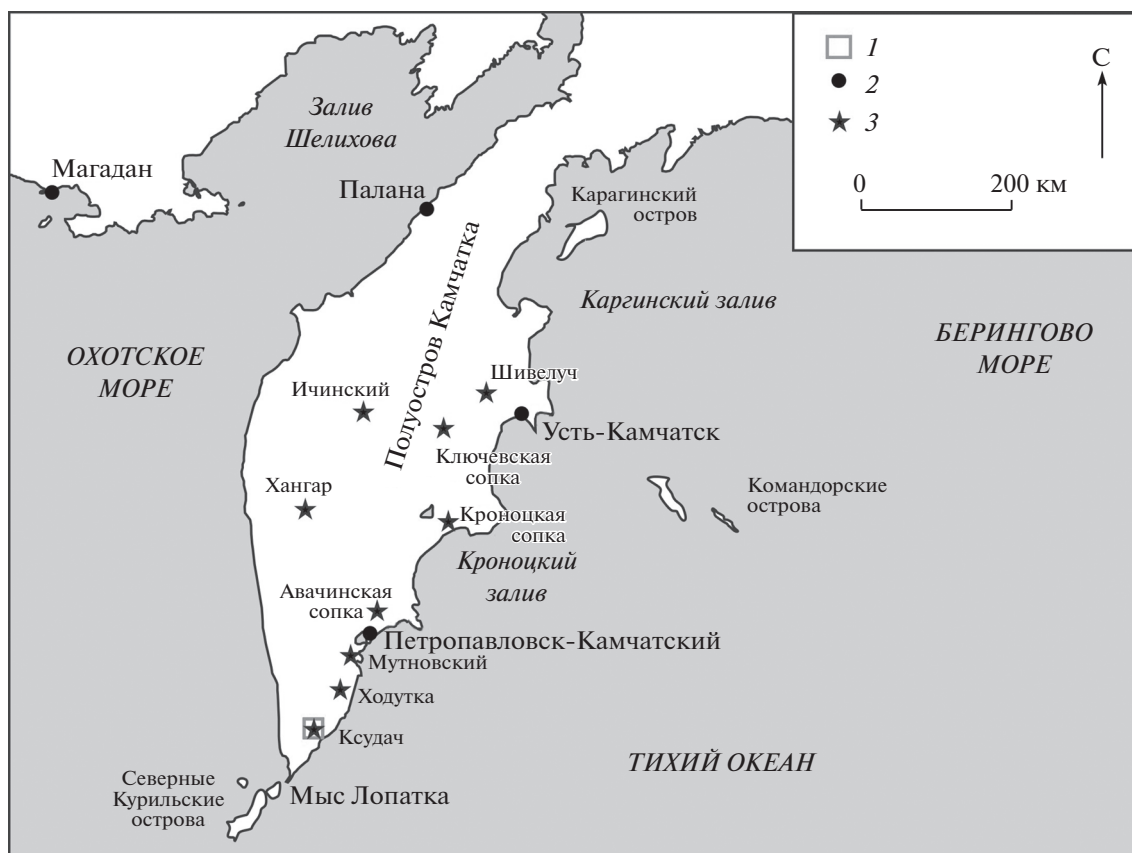


Рис. 1. Карта-схема полуострова Камчатка. 1 — район полевых работ, 2 — населенные пункты, 3 — вулканы.

начал формироваться новый вулкан — конус Штюбеля, для которого установлены проявления эксплозивной активности примерно в 1000 и в 1650 г. [27]. Последнее извержение произошло 28 марта 1907 г., его последствия стали детально изучаться десятилетия спустя [8, 18, 21 и мн. др.]. При этом извержении было выброшено до 2 км³ пирокластического материала, в результате в кальдере и, преимущественно, к северу от нее сформировался обширный покров дацитовых пемз мощностью в первые метры [19], а на вершине конуса образовался кратер, который на севере соединился с оз. Штюбеля.

Удаленность и труднодоступность этого интереснейшего природного объекта обусловили тот факт, что первые и единственные детальные исследования флоры и растительности бассейна р. Теплой и внутренней части кальдерного комплекса были проведены лишь в 1991 и 1994 г. С.Ю. Гришиным и соавт. [5, 6]. Спустя 25 лет сотрудникам ИМГиГ ДВО РАН и ИГ РАН, благодаря сотрудничеству с Роскосмосом, удалось провести работы на вулкане Ксудач. Летом 2016 г. были выполнены комплексные маршрутные исследования на территории кальдеры, впоследствии до-

полненные дешифрированием космических снимков.

По реконструкции С.Ю. Гришина и соавт. [5, 6], до извержения 1907 г. днище кальдеры (отметки около 410 м) было покрыто зарослями ольховника, а ее борта (начиная с 700–800 м) заняты горными тундрами. Ненарушенная структура высотной поясности сохранилась лишь на внешнем южном макросклоне кальдеры, где до 400 м над ур. м. распространены каменноберезовые леса, а выше произрастают ольховые стланики (до 700–800 м), далее узкий экотон занимают пояс горных тундр и нивальная растительность. Было установлено, что в результате извержения 1907 г. растительность погибла на площади более 600 км², а ее повреждение произошло на территории втрое больше. Внутри кальдеры она уцелела лишь в ее южной части — на склонах, обращенных к оз. Ключевому. Основными факторами ее поражения стали механическое повреждение падающей гравийно-глыбовой пирокластикой и погребение под толщей слабоуплотненных пемзовых туфов, мощность которой в пределах кальдеры V составила от 0.3 до 4–5 м [4, 7, 19, 24]. Практически вся внутренняя часть кальдеры превратилась в вулканическую пустыню [5, 6]. На этих ювенильных материалах

пеплово-шлаковых отложений инициировалось начало новой фазы почвообразования и первичной сукцессии растительности [16, 17, 25], и спустя 84 года в понижениях рельефа и на защищенных участках (у камней) уже был отмечен сомкнутый лишайниковый покров с единичным подростом березы *Betula platyphylla* [5].

С.Ю. Гришиным и соавт. [6] был восстановлен ход сукцессионных процессов в кальдере Ксудач и выделены 6 стадий первичной сукцессии на территориях вулканической пустыни: 1) пионерные виды сосудистых растений и мохообразные в первые годы (*Pennellianthus frutescens*, *Poa malacantha*, *Stellaria eschscholtziana*, *Saxifraga merkii*, *Polypodium juniperinum* и др.); 2) лишайниковый ковер в первые десятилетия; 3) на фоне сомкнутого лишайникового ковра появление куртин *Alnus fruticosa* и *Pinus pumila*, *Empetrum nigrum*, *Salix arctica* и *Lerchenfeldia flexuosa* и др. в первые столетия; 4) ксеромезофитные травяно-кустарничковые луга с участием кустарников; 5) внедрение в состав лугов деревьев (*Betula platyphylla*, *Betula ertmanii*), увеличение размеров и продолжительности жизни деревьев, смыкание древесного яруса; 6) развитие структуры и состава климаксовых лесных сообществ. Длительность первичной сукцессии в вулканической пустыне кальдеры может занять до 1500–2000 лет. Вторичная сукцессия, протекающая на территориях с частично нарушенным растительным покровом (менее 30 см тефры), составит 100–200 лет.

Настоящая работа представляет результаты полевого обследования внутренней территории кальдеры V вулкана Ксудач, проведенного в 2016 г. — через 109 лет после извержения 1907 г. и через 25 лет после описания растительности в кальдере С.Ю. Гришиным и соавт. Собранный материал позволил охарактеризовать ход сукцессионных процессов не только в зависимости от мощности сформировавшегося в результате извержения пирокластического чехла, но и от характера рельефа и идущих геоморфологических процессов, оценить напряженность экотопических условий в кальдере и роль отдельных жизненных форм древесных растений в восстановительных процессах.

Методика работы. В ходе маршрутного обследования внутренних склонов кальдеры V были выполнены геоморфологические наблюдения, сопряженные с геоботаническими и дополненные позднее дешифрированием аэрофотоснимков высокого разрешения. Геоботанические описания растительных сообществ и растительных группировок, в том числе с участием древесных растений, проводились по стандартным методикам [9]. Характеристики жизненных форм растений выполнены с учетом работы [1]. Образцы древесных растений для структурного анализа

были взяты от трех особей с каждого пункта. Образцы древесных растений (спилов и гербарий побегов) хранятся в биологической коллекции ИМГиГ ДВО РАН. Макроскопический анализ стволиков и скелетных осей древесных растений был выполнен в лаборатории экологии растений и геоэкологии ИМГиГ ДВО РАН на световых микроскопах МСП-1, вар. 23 (ЛОМО, Россия) и AxioScope A1 (Carl Zeiss, Германия) с использованием соответствующего программного обеспечения. Тонкие поперечные срезы скелетных осей древесных растений выполнены на санном микротоме Thermo Scientific Sliding Microtome Microm HM 430 с замораживающим устройством KS 34 (Microm International GmbH, Германия).

Результаты исследований и их обсуждение. В 1991 г., по данным группы С.Ю. Гришина [6], вулканическая пустыня с сомкнутым лишайниковым покровом (3-я стадия первичной сукцессии) была представлена на склонах конуса Штюбеля, в СЗ внутреннем секторе кальдеры и на внутренних склонах северной части кальдеры. В средней части южного склона вулкана растительность отмечалась лишь в ложбинах временных водотоков. Там преобладали *Anaphalis margaritacea* (L.) A. Gray, *Oxytropis exserta* Jurtz., *Salix arctica*. Ольховник присутствовал и в виде небольших куртин (возрастом около 25 лет). Территория к западу от конуса Штюбеля зарастала менее интенсивно — за счет *Anaphalis margaritacea* по днищам временных водотоков. В СЗ части кальдеры — к западу от истока р. Теплой, дренирующей оз. Штюбеля, к 1991 г. сформировались заросли ольховника высотой до 3 м и возрастом до 21 года, с участием *Rhododendron camtschaticum*, *Empetrum nigrum* и *Betula ertmanii* в возрасте 15–25 лет. В южном секторе кальдеры на склонах, обращенных к оз. Ключевому, развивались различные варианты ольховников. “Эффективное заселение” внутренней поверхности кальдеры началось в 60-х годах XX в.

Исследования 2016 г. показали, что общий план распространения растительности в кальдере спустя 25 лет в целом изменился незначительно. При этом зарастание пирокластического чехла (рис. 2) происходит достаточно активно, а отдельные экотопы, характеризующиеся наиболее благоприятным сочетанием экологических условий, оказались занятыми уже сложившимися растительными сообществами. В настоящее время водоразделы и склоны кальдеры с абс. отметками менее 650 м в той или иной мере покрыты растительностью, однако ее состав и проективное покрытие во многом зависят от удаленности от центра последнего извержения и оси пеплопада, а соответственно, мощности пирокластического чехла (рис. 3). Необходимо отметить, что, в целом, восстановление растительности в кальдере проходит крайне неравномерно и во многом за-

висит от экспозиции склонов и их крутизны, абс. высоты и характера микрорельефа, которые, прежде всего, определяют микроклиматические условия местообитания, в том числе влагообеспеченность, а также подвижность субстрата, его механические и физико-химические свойства. Наиболее активно развитие растительного покрова проходит на Ю, ЮВ, В склонах конуса Штюбеля, в районе истока р. Теплой на севере кальдеры.

Рельеф внутренней части кальдеры был детально описан нами ранее [14], остановимся подробнее на характеристике ключевых участков, где проводились геоботанические описания. Южный склон конуса Штюбеля сложен с поверхности разнообразным пирокластическим материалом: здесь встречается вулканический песок, лапилли, бомбы размером до 1 м. В верхней части склона наблюдаются многочисленные радиально ориентированные пологие безрусловые ложбины, задернованные по понижениям, — делли, расстояние между которыми иногда достигает всего двух метров. Вниз по склону оно постепенно увеличивается до 10–20 м. Здесь в днищах многих ложбин появляются промоины, которые, иногда заканчиваясь небольшим конусом выноса мелкозема, но чаще, сливаясь, они трансформируются в более крупные эрозионные врезы, разделенные водораздельными участками шириной уже от 50 до 90 м. Сложная система эрозионных ложбин, то объединяющихся, то разветвляющихся, в целом, ориентирована на ЮЮВ и привязана к оз. Ключевому. Падение его уровня после 1910 г. почти на 15 м [15] привело к значительному углублению их врезов в приустьевых частях и преобразованию U-образных ложбин на этих участках в глубокие V-образные промоины. На фотографиях (рис. 4) и снимках Google Earth (август 2016 г.) хорошо видно, что участки восстановления древесной растительности тесно связаны с этой системой ложбин, причем пояс приуроченных к ним наиболее густых зарослей ольховника расположен на расстоянии от 200 до 500 м от кромки кратера, т.е. на абс. отметках 450–520 м. Ниже этого уровня древесная растительность появляется и на водораздельных участках.

На Ю, ЮВ, В, СВ и С склонах конуса Штюбеля, обращенных к озерам Ключевое и Штюбеля, а также у подножия экструзивного массива Парящий уступ в настоящее время распространены различные типы разнотравных ксеромезофитных лугов с участием кустарничков и кустарников, разнообразные варианты горно-тундровых группировок, которые развиваются на лишайниковом ковре с участием мхов. В составе лугов доминируют: *Oxytropis exserta*, *Aruncus dioicus*, *Artemisia glomerata* Ledeb., *Chamerion angustifolium* (L.) Holub, *Solidago spiraeifolia* Fisch. ex Herd., *Agrostis kudoi* Honda, *Antennaria dioica* (L.) Gaertn., *Anaphalis margaritacea*, *Lerchenfeldia flexuosa*, *Poa malacantha*,

Carex koraginensis Meinsh. Горно-тундровые растительные сообщества также довольно разнообразны: ивово-рододендрово-остролодочниковые, филлодоцево-остролодочниковые, анафалесово-рододендровые и др. (табл. 1). Между лугами и горными тундрами отмечаются переходные варианты. Проективное покрытие в растительных сообществах на средних высотах (450–520 м над ур.м.) по Ю, ЮВ, В склонам конуса Штюбеля составляет в 40–60%, но на отдельных участках не превышает 5–10%. В понижениях рельефа закрепляются уже достаточно крупные кустарники *Sorbus sambucifolia*, *Alnus fruticosa* и небольшие многоствольные деревья *Betula ermanii* и *Salix udensis*. При этом присутствие березы в виде отдельных кустов не отмечается выше отметок 520–550 м над ур.м., а ольховника — выше 450–500 м над ур.м. Согласно В.Ю. Нешатаевой [20], для Южной Камчатки на верхней границе пояса стлаников (750–900 м над ур.м.) характерно широкое распространение комплексных сообществ. Довольно часто сочетаются ольховники с рододендрово-голубичными, шикшево-голубичными и др. горно-тундровыми группировками. Эта ситуация наблюдается на склонах конуса Штюбеля, при этом абс. высоты этой зоны здесь еще меньше.

На Ю, ЮВ, В, СВ и С склонах конуса Штюбеля от их подножия у побережья озер (410–415 м над ур.м.) и до его вершины наблюдается следующее вертикальное распределение растительности: заросли ольховника высотой 1.5–2.2 м, которые постепенно становятся более низкорослыми и редееют уже на отметках 450–470 м над ур.м., далее вверх по склонам они поднимаются только отдельными узкими языками по ложбинам. Их сменяют разнотравные луговые группировки на лишайниковом ковре с участием стелящихся куртин *Salix arctica* и *Rhododendron camtschaticum* при лишь единичном участии ольховника (см. таблицу). Выше располагается сравнительно широкая полоса комплексных горно-тундровых группировок с участием кустарников. На отметках 520–600 м над ур.м. представлены несомкнутые горно-тундровые группировки с участием дерновинных злаков, которые на пределе 650–670 м над ур.м. переходят в единичные дерновины и малые куртины пионерных видов, с заметным участием петрофильных лишайников. Таким образом, в настоящее время внешние склоны конуса Штюбеля указанных экспозиций полностью покрыты растительностью до вершины вулкана (см. рис. 2). Крутые внутренние склоны кратера — с активным развитием гравитационных процессов — растительности практически лишены. Там изредка встречаются только пионерные виды травянистых многолетников: *Oxytropis exserta*, *Pennellianthus frutescens*, *Minuartia macrocarpa*, *Artemisia glomerata*.

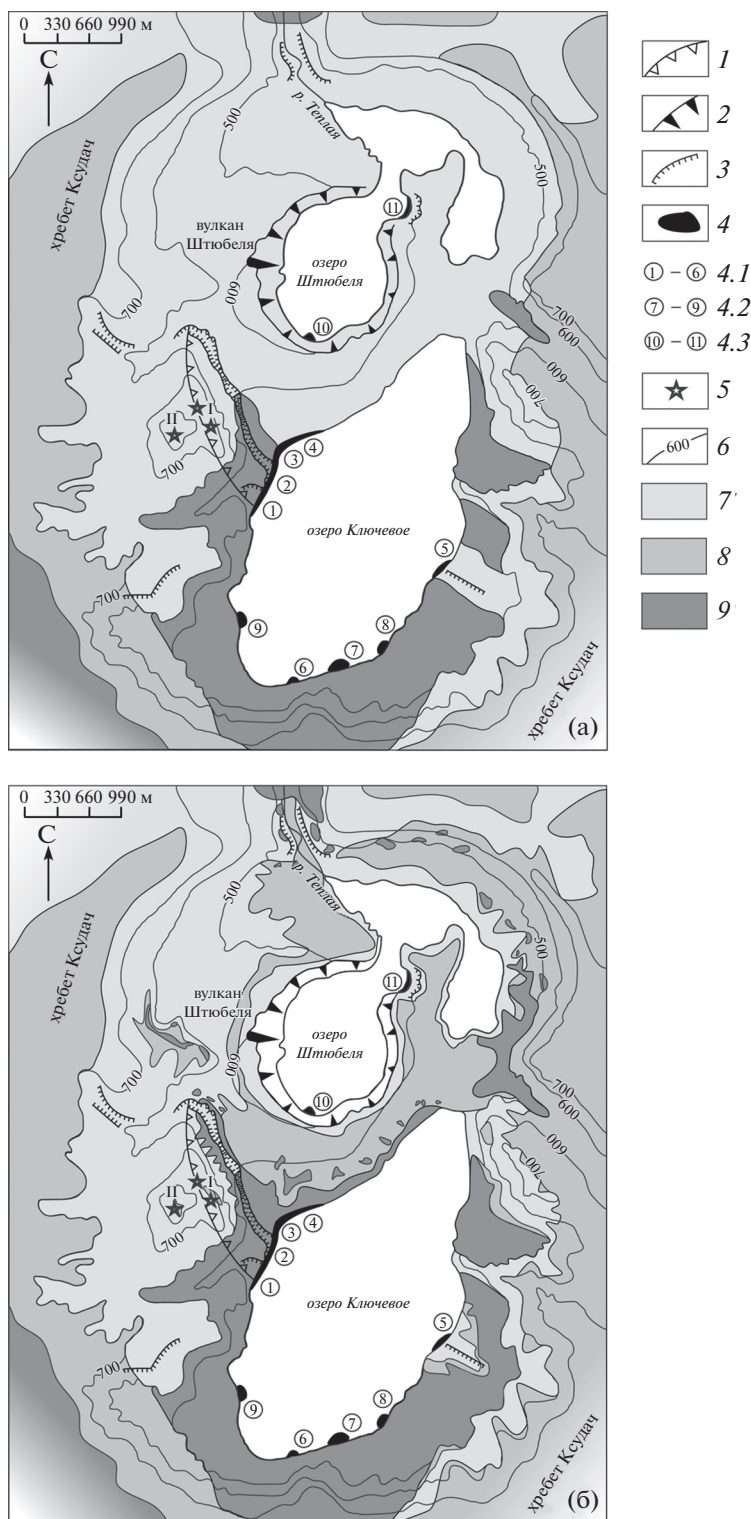


Рис. 2. Схемы растительности кальдеры Ксудач: а – по состоянию на 1994–1997 гг. (по [6, 22]); б – по состоянию на 2016 г. по материалам собственных обследований. 1 – фрагмент бровки бортового уступа одной из голоценовых кальдер; 2 – кратерные стенки оз. Штюбеля; 3 – обрывы (тектонические, эрозионные); 4 – участки разгрузки термальных вод; 5 – выходы паровых струй; 6 – изогипсы, м; 7 – пемзовые пустыни с лишайниковым покровом; 8 – пемзовые пустыни с несомкнутым покровом из горно-тундровых растений; 9 – заросли ольховника. I и II – термальные площадки экструзий Парящий уступ и Парящий гребень. Цифры в кружках – номера участков разгрузки гидротерм (1–3 – Горячий пляж; 4 – Каменистый; 5 – Восточный; 6–9 – Южнобережные; 10, 11 – оз. Штюбеля).

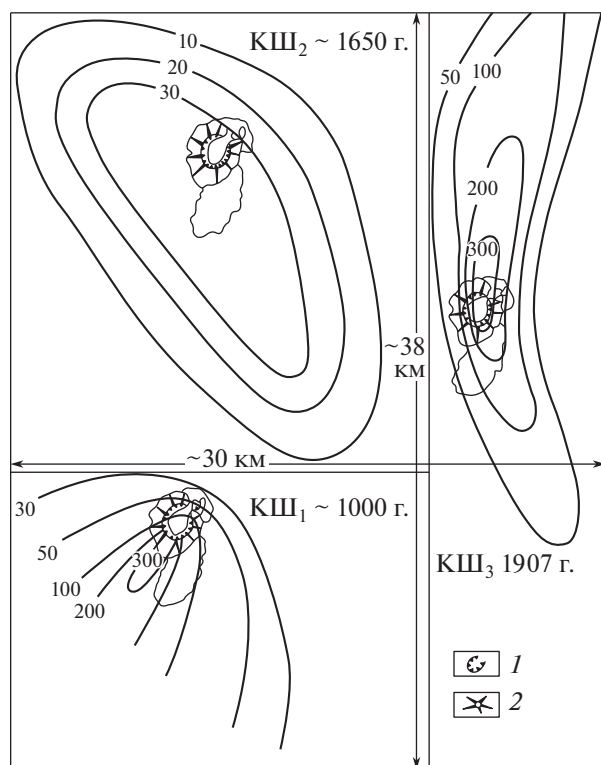


Рис. 3. Изопахиты (в см) извержений конуса Штюбеля (по [19] с уточнениями по [27] и некоторыми упрощениями). 1 – кратер конуса Штюбеля, 2 – конус Штюбеля. КШ₃ 1907 г. – индекс и год извержения. Тонкой линией показаны границы современных озер Ключевое и Штюбеля.

На 3 и СЗ склонах конуса Штюбеля картина иная. Здесь отмечаются зачаточные ложбины, ориентированные на С – в сторону седловины, отделяющей конус от СЗ склона кальдеры. На

уплощенных участках водоразделов, террасовидных поверхностях и в седловине активна дефляция. Пирокластический чехол здесь покрыт изреженной растительностью, представленной несомкнутыми горно-тундровыми группировками, с заметным представителем пионерных видов и некоторых кустарничков (*Pennellianthus frutescens*, *Artemisia glomerata*, *Minuartia macrocarpa*, *Oxytropis exserta*, *Salix arctica*, *Saxifraga merkii* и др.).

Большая территория внутренней СЗ части кальдеры, покрытая подвижным пирокластическим чехлом, заселена сосудистыми растениями незначительно, с заметным участием пионерных видов. Здесь встречаются отдельные куртины травянистых многолетников и кустарничков: *Salix arctica*, *Rhododendron camtschaticum*, *Pennellianthus frutescens*, *Minuartia macrocarpa*, *Oxytropis revoluta*, *Stellaria eschscholtziana*, *Saxifraga merkii*, *Artemisia glomerata*. Проективное покрытие колеблется от 1–3 до 10–15%. Кустарнички образуют изолированные куртины площадью до 1–2 м² и высотой до 10–20 см. Скелетные оси кустарничков стелятся по поверхности субстрата, а их основания и корневые системы заглублены в субстрат на 35–40 см (рис. 5).

Исследования Н.М. Воронковой и соавт. [3] в условиях вулканических пустынь, образованных рыхлым изверженным материалом, показали, что древесные растения среди пионерных видов составляют незначительную долю (24%) и представлены всходами или молодыми особями. Наши данные макроскопического структурного анализа древесных растений, поселяющихся в пемзовой пустыне кальдеры, позволяют предположить, что их роль в восстановительных процессах близка к пионерным видам в тех случаях,



Рис. 4. Неравномерное восстановление растительности в кальдере Ксудач: вид с ЮЮЗ на конус Штюбеля с сетью эрозионных ложбин, подчеркнутых зарослями кустарников (здесь и далее фото А.В. Копаниной).

Таблица 1. Сведения о ключевых пунктах полевых исследований в кальдере Ксудач

Пункты маршрутных описаний и их координаты	Высота над ур.м.*, м	Краткая характеристика растительности	Ключевые виды древесных растений	Возраст по данным макроскопического анализа, лет
Южный склон конуса Штюбеля, прикратерная часть Е 157°52.783 N 51°81.403	648–665	Несомкнутые травянистые группировки с участием кустарничковых ив. Проективное покрытие 3–10%	<i>Salix arctica</i>	22–27
Южный склон конуса Штюбеля Е 157°52.945 N 51°80.907	517	Ивово-рододендрово-филлодоцево-остролодочниковое сообщество. Проективное покрытие 40–50%	<i>Betula ermanii</i> , <i>Rhododendron camtschaticum</i> , <i>Salix arctica</i> , <i>Spiraea beauverdiana</i> , <i>Phyllodoce aleutica</i>	22–30 — 17–20 25–27
Южный склон конуса Штюбеля Е 157°54.942 N 51°81.749	457	Ивово-рододендрово-остролодочниковое сообщество. Проективное покрытие 60%	<i>Sorbus sambucifolia</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Rhododendron aureum</i>	20–22 22–34 — 15–20
Западная часть кальдеры, скала Парящий гребень Е 157°80.504 N 51°51.132	812	На глыбах андезито-базальта накипные лишайники и мхи. Отдельные куртины кустарничков и трав	<i>Pinus pumila</i>	—
Западная часть кальдеры, скала Парящий уступ Е 157°51.509 N 51°80.772	775	У выходов фумарол — зеленые мхи, печеночники и накипные лишайники, травы и кустарники	<i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>Rhododendron camtschaticum</i> , <i>Loiseleuria procumbens</i>	— 15–17 —
Поверхность конуса выноса, близ истока р. Теплой, северная часть кальдеры Е 157°53.615 N 51°83.556	424	Филлодоцеево-остролодочниковое сообщество. Проективное покрытие 50%	<i>Phyllodoce caerulea</i> , <i>Spiraea beauverdiana</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i>	— 23–25 —
Западный берег оз. Ключевое, Горячий пляж. Е 157°52.434 N 51°80.059	429	Ольховник вейниковый на I-й озерной террасе. Проективное покрытие 60–70%	<i>Alnus fruticosa</i>	45–60
Западный берег оз. Ключевое, Горячий пляж. Е 157°52.434 N 51°80.059	425	Отдельные кусты ольховника вблизи термальных выходов (тыловая часть пляжа)	<i>Alnus fruticosa</i>	15–17

* Погрешность определения абс. высоты до 10 м.

когда длительность начальных стадий первичной сукцессии значительна. В этих стрессовых условиях кустарники и кустарнички (*Salix arctica*, *Rhododendron camtschaticum*, *Empetrum nigrum*) формируют низкорослые биоморфы, близкие по своим структурно-функциональным особенностям с пионерными травянистыми многолетниками. Для них характерны: низкорослость, стелящиеся

по субстрату или заглубленные в него скелетные оси, высокая степень ветвления и частая смена отдельных надземных побеговых систем (их усыхание и отмирание).

Внутренняя западная часть кальдеры остается наименее заселенной растительностью. В покрытые пирокластикой водоразделы и склоны тут врезаны долины водотоков и многочисленные



Рис. 5. Куртина *Salix arctica* на пемзовых отложениях вулканической пустыни в СЗ части кальдеры Ксудач.

промоины, в бортах которых хорошо видно чередование темной и более светлой пирокластики, насчитывающее от 3 до 5 подобных сочетаний слоев. Хотя мощность тефры последнего извержения здесь относительно невелика и, по данным [19], колеблется от 0.3 м до 1 м, но во время предыдущего извержения 1650 г., по заключению этих же исследователей, ось пеплопада была ориентирована как раз в СЗ–ЮВ направлении и мощность сформированного тогда пирокластического чехла могла составлять первые метры (см. рис. 3). Близкая картина наблюдается и на ЮВ склоне кальдеры Ксудач, где этими же исследователями была вскрыта 4–5-метровая толща пирокластики данного извержения. Вполне вероятно, что растительность, погибшая на этом участке в 1650 г., так и не успела полностью восстановиться к 1907 г. Кроме того, склоны западного сектора конуса Штюбеля удалены от озер, что приводит к некоторому уменьшению влажности воздуха и, видимо, является дополнительным стрессовым фактором. Отсутствие или слабое развитие растительного покрова здесь приводит к повсеместному развитию эрозии и дефляции. Активизация эрозионных процессов в седловине, отделяющей конус Штюбеля от СЗ склона кальдеры V, обусловлена поднятием этой территории в результате роста молодого вулкана, что привело к перестройке руч. Лагерного [14].

Ключевым фактором, определяющим возможность и интенсивность заселения вулканической пемзовой пустыни, является расстояние до источника диаспор. Учитывая обширные площади пемзовой пустыни западной части кальдеры, принос диаспор туда крайне затруднен.

Проанализируем геоморфологическую ситуацию и на других участках, где восстановление

растительности идет наиболее медленно. После отложения пирокластического чехла происходит перераспределение тефры под воздействием геоморфологических процессов и соответственно формируются различные почвенно-гидрологические условия, от которых впоследствии зависит скорость восстановления растительности. Наиболее важными факторами являются расчленение исходного рельефа — наличие долин различной глубины и морфологии, экспозиция склонов, их крутизна, абс. и относительные высоты территории. От экспозиции склонов зависит как мощность исходного снежного покрова (если извержение происходило в зимне-весенний период, как это было в 1907 г.), который может защитить растительность от пирокластики, в том числе горчей, так и увлажнение, а следовательно, и спектр процессов, под воздействием которых происходит смещение тефры (будь то солифлюкция и оплывание или десерпция и формирование осовов). Кроме того, на увлажненных склонах восстановление растительности происходит быстрее, так как одним из негативных свойств пирокластического чехла является его слабая способность удерживать влагу.

Экспозиция склона определяет также подверженность пирокластического чехла воздействию доминирующих на территории южных (27%) и СЗ (18%) ветров. Эоловые процессы активны и на выровненных участках. Дефляция интенсивно разрушает пирокластический чехол: в результате выноса мелкозема формируется каменная отсыпка, а развевание слоистого пирокластического чехла извержения 1907 г. приводит к возникновению на поверхностях разноцветных узоров, обусловленных чередованием слоев более темной и более светлой тефры. Это свидетельствует о том, что на таких участках в результате

дефляции удалено не менее полуметра пирокластического материала. Напротив, в условиях ветровой тени может идти накопление пирокластики и формирование дюн различных размеров. Регулярное перемещение материала — “дюнный эффект” — затрудняет закрепление растений в субстрате, приводит к повреждению древесных растений (срыв коры, слом скелетных ветвей) и к их выкорчевыванию вместе с дерновинами травянистых многолетников.

Крутизна склонов определяет скорость последующего смещения пирокластического материала. Так, по наблюдениям А.В. Копаниной на Курильских островах (влк. Кудрявый, Сноу, Чиринкотан и др.) на крутых склонах (более 30°) идет достаточно быстрое удаление пирокластического чехла под воздействием гравитационных процессов (обваливание, осыпание, оползание и др.) и исходная растительность часто сохраняется, не успев пострадать от эксплозии. На склонах средней крутизны, перекрытых рыхлыми отложениями, доминируют процессы медленного массового смещения материала — десерпция, дефлюкция, на увлажненных участках — солифлюкция. Постепенно мощность слоя пирокластики в верхних частях склонов уменьшается, а у их подножий увеличивается.

Абсолютные отметки рельефа определяют как тип исходной растительности, так и активность ее возобновления: в пограничных с нивальным поясом условиях восстановление затруднено. В кальдере Ксудач нивация наиболее широко развита на абс. отметках более 700–800 м, но на склонах северной экспозиции, в распадках и долинах снежники и наледи могут перелетовывать даже на абс. высотах чуть более 415 м. Практически во всех долинах в их нижнем течении в конце июля сохраняются наледи мощностью до 2–5 м, иногда они оказываются перекрыты отложениями лахоров, на поверхности которых нередко видны проявления термокарстовых процессов в виде просадочных воронок диаметром до 0.5 м.

Благоприятным фактором для восстановления растительности является повышенное увлажнение в пределах днищ долин, ложбин и промоин (рис. 4). Кроме того, благодаря развитию эрозийных процессов после извержения погребенные почвенные горизонты здесь оказываются гораздо ближе к поверхности и становятся более доступны растениям. Поэтому долины рассматриваются как некие рефугиумы, где растительность может сохраняться во время подобных вулканических катастроф. Это действительно возможно, если извержение не сопровождается сходом пирокластических потоков, как, например, это было при кальдерообразующем извержении 290 г. н.э. В подобном случае растительность в долинах вы-

горает и/или погребается под мощным слоем пирокластики в первую очередь [13].

На побережьях озер, вероятно, из-за повышенного увлажнения восстановление растительности проходит более интенсивно. Однако, здесь характерны частые и значительные колебания уровня [11], и кальдера Ксудач не является исключением. При извержении 1907 г. в результате сейсмообвала и/или взрывными отложениями исток р. Теплой был перегороден, и в течение нескольких лет (по крайней мере, по 1910 г. включительно) уровень системы озер был почти на 15 м выше современного — существовал единый водоем [10, 15, 22]. В результате древесная растительность побережий озер имеет относительно молодой возраст. Отдельные кусты ольховника произрастают на берегу озера в тыловой части пляжа. На озерных террасах в районе Горячего пляжа (высоты над урезом 3–5, 7–8 и 12–15 м) сформирован ольховник высокотравно-вейниковый. *Alnus fruticosa* представлен стелящимся одно- или многоствольным деревом (до 4–5 м высотой). Макроскопический анализ спилов скелетных осей ольховника показал (см. таблицу), что формирование основного массива сообщества *Alnus fruticosa* началось здесь, вероятно, в 1950-х годах, а заселение тыловой зоны современного пляжа — около 20 лет назад. На этих берегах оз. Ключевого, а также на значительной части ЮЗ, Ю внутренних склонов кальдеры Ксудач, в настоящее время произрастают разнообразные варианты ольховников — высокотравно-вейниковые (самый распространенный), высокотравные и вейниково-папоротниковые (кочедыжниковые).

На северном внутреннем склоне кальдеры, обращенном к оз. Штюбеля, восстановление растительности, напротив, идет весьма слабо. Но ситуация тут несколько иная. Во-первых, мощность пирокластики последнего извержения здесь максимальна (см. рис. 3) и превышает 2–3 м. Анализ аэрофотоснимков позволяет заключить, что на этом склоне идет активное смещение пирокластики селями и в результате сплывов. В итоге верхние части склона здесь подвергаются активной комплексной денудации, а низкие озерные террасы оказались перекрыты пирокластикой, смещенной склоновыми и пролювиальными процессами, т.е. сформировалось подобие террасоувала. В таких условиях демулационные процессы идут крайне сложно и медленно.

В настоящее время в кальдере вулкана Ксудач отмечены локальные термопроявления в виде парогазовых выбросов на побережье оз. Ключевого [22] и скальных фумарол на Парящем уступе (см. таблицу). Отдельные кусты ольховника в тыловой части Горячего пляжа, вероятно, подвергаются регулярным воздействиям горячего пара, причем как надземные побеги, так и корневые системы.

В результате происходит усыхание части побегов и позднее формирование ассимиляционного аппарата (спустя 1–1.5 месяца). Вблизи термогазовых выходов на Парящем уступе на высоте 775 м над ур.м. под влиянием повышенной температуры и влагообеспеченности сформирована специфическая группировка растений с участием влаголюбивых видов сосудистых растений, зеленых мхов, печеночников, а также лишайников. Вокруг парогазовых выходов на очень ограниченном участке в расщелинах скал сформирован плотный растительный покров. Заметное участие из сосудистых растений принимают: *Thelypteris thelypteroides*, *Pennellianthus frutescens*, *Vaccinium uliginosum*, *Rhododendron camtschaticum* и *Loiseleuria procumbens*. Кустарнички произрастают в виде плотных куртин (высотой 5–7 см), основные скелетные побеги которых погружены в почву в расщелины каменистых уступов скалы. Куртины кустарничков содержат 3–5% отмерших побегов из-за обморожений в зимний период и ожогов от парогазовых выбросов фумарол. На экстрезии Парящий гребень (812 м) действующие термопроявления не выявлены. В расщелинах среди андезито-базальтовых глыб встречаются лишайники, мхи, травянистые многолетники (*Campanula chamissonis*, *Pennellianthus frutescens*), кустарнички (*Rhododendron camtschaticum*) и кустарники (*Pinus pumila*). Термофильных черт растительности экстрезии нами не отмечено. Следует отметить, что участие *Pinus pumila* в восстановительных процессах в кальдере Ксудач крайне слабое. Единично встречаются угнетенные кустарничковые формы с высоким содержанием отмерших побегов.

Заключение. Таким образом, после катастрофического извержения конуса Штубеля в марте 1907 г. формирование растительного покрова внутри кальдеры Ксудач на юге Камчатского полуострова проходит крайне неравномерно.

Наиболее медленно восстановление идет на участках, где максимален слой выпавшей пирокластики, продолжается активное перемещение пирокластического чехла под воздействием рельефообразующих процессов — эрозии, дефляции, лахарообразования, оплывания, осыпания и др., отмечается дефицит влаги (минимально увлажнение), отсутствуют близлежащие источники диаспор растений.

Западная часть кальдеры, представленная пемзовой пустыней, является наименее заселенной растительностью территорией при относительно небольшой мощности чехла пирокластики (0.3–1.0 м), здесь отмечается весь комплекс отягчающих условий (активные процессы рельефообразования, минимально увлажнение и нет поблизости источника диаспор). Опираясь на классификацию сукцессионных стадий, разрабо-

танную С.Ю. Гришиным и соавт. [6] для бассейна р. Теплой и кальдеры Ксудач, мы полагаем, что здесь до сих пор проходит начальная стадия первичной сукцессии и образование сплошного лишайникового покрова не происходит, а участие пионерных видов и некоторых кустарничков значительно. Вероятно, что к 1907 г. растительность еще не восстановилась после предыдущего извержения 1650 г., при котором мощность пирокластического материала здесь была гораздо больше. Полагаем, что начальные стадии первичной сукцессии в этой части кальдеры гораздо более продолжительны, чем предполагалось исследователями ранее.

Участие в зарастании пемзовой пустыни принимают кустарники и кустарнички (*Salix arctica*, *Rhododendron camtschaticum*, *Empetrum nigrum*), сходные по своим структурно-функциональным особенностям с пионерными травянистыми многолетниками. Биоморфологические адаптивные особенности этих видов следующие: низкорослость, высокая степень ветвления, приводящая к формированию плотных куртин и компенсирующая усыхание отдельных побеговых систем, стелящиеся по субстрату и заглубленные в субстрат скелетные оси, что позволяет растениям повышать сохранность пула почек возобновления в более постоянной по физическим факторам подземной среде.

На остальных территориях внутренней части кальдеры Ксудач и на склонах конуса Штубеля проходят активные демутиационные процессы, которые маркируют продолжительную стадию первичной сукцессии, сложенную различными вариантами ксеромезофитных лугов и горно-тундровых кустарничковых сообществ с включением *Alnus fruticosa* и, в меньшей степени, *Betula ermanii*. В этих процессах *Pinus pumila* заметной роли не играет.

Благодарности. Авторы признательны участникам экспедиции 2016 г. — Г.В. Коровину и А.Н. Королеву (НИИ космических систем им. А.А. Максимова, Роскосмос), а также директору и сотрудникам ИМГиГ ДВО РАН Л.М. Богомолу, А.В. Рыбину и А.В. Дегтереву, благодаря которым это исследование стало возможным. Особая благодарность М.В. Чибисовой и И.Г. Коротееву за конструктивное обсуждение результатов работы, И.М. Климанцову — за помощь при проведении полевых маршрутов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-04-04774 и № 18-05-00967) и в рамках государственного контракта с НИИ космических систем им. А.А. Максимова по программе “Мониторинг-СГ”, а также по темам госзаданий ИГ РАН и ИМГиГ ДВО РАН.

Acknowledgments. The authors are grateful to participants of 2016 expedition (G.V. Korovin and

A.N. Korolev, Maksimov Research Institute of Space Systems, Roskosmos) and to the director and staff of the IMGG FEB RAS (L.M. Bogomolov, A.V. Rybin and A.V. Degterev), without whom this study would not be possible. Special thanks to M.V. Chibisova and I.G. Koroteev for a constructive discussion of the results of the work, I.M. Klimantsov – for help with conducting field trips. This work was supported by the RFBR (projects no. 15-04-04774 and 18-05-00967) and within the framework of the state contract with the Space Systems Research Institute (Roskosmos) under the “Monitoring-SG” program, as well as Scientific Research Plan of the IG RAS and IMGG FEB RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безделев А.Б., Безделева Т.А. Жизненные формы семенных растений Российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2006. 296 с.
2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Кирьянов В.Ю. Крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке – кальдерообразующее извержение в Ксудач 1700–1800 14С-лет назад // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 30–49.
3. Воронкова Н.М., Верхолат В.П., Холина А.Б. Биологические особенности растений на начальных этапах зарастания рыхлых материалов вулканических извержений // Изв. РАН. Сер. биол. 2011. № 3. С. 289–294.
4. Гришин С.Ю. Сукцессии подгольцовой растительности на лавовых потоках Толбачинского дола // Бот. журн. 1992. Т. 77. № 1. С. 92–100.
5. Гришин С.Ю., Крестов П.В., Верхолат В.П., Левус А.П. Влияние катастрофического извержения вулкана Ксудач (Камчатка, 1907 г.) на лесную растительность // Комаровские чтения. 1997. Вып. XLIII. С. 201–244.
6. Гришин С.Ю., Крестов П.В., Якубов В.В., дел Морал Р. О восстановлении растительности в районе катастрофического извержения вулкана Ксудач (Камчатка) // Бот. журн. 1997. Т. 82. № 6. С. 92–103.
7. 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.
8. Дубик Ю.М., Меньялов И.А. Газогидротермальная деятельность кальдеры Ксудач // Бюл. вулканологических станций. 1971. № 47. С. 40–43.
9. Ипатов В.С., Мушин Д.М. Описание фитоценоза. Методические рекомендации: Уч.-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. 71 с.
10. Кель Н.Г. Карта вулканов Камчатки. Объяснит. текст с табл., чертежами, снимками и карта (на 2-х листах). М-б 750 000. Л.: Изд-во РГО, 1928. 89 с.
11. Козлов Д.Н. Кратерные озера Курильских островов. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 112 с.
12. 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
13. 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: 10.15356/0435-4281-2016-4-56-69
14. Лебедева Е.В. Кальдера вулкана Ксудач: современные процессы рельефообразования и особенности строения речной сети // Геоморфология. 2017. № 3. С. 60–75. DOI: 10.7868/S0435428117030063
15. Лебедева Е.В. Озера кальдерного комплекса Ксудач (Камчатка): береговые процессы и колебание уровня // Геоморфология. 2017. № 4. С. 34–48.
16. Манько Ю.И. Вулканизм и динамика растительности // Бот. журн. 1980. Т. 65. № 4. С. 457–469.
17. Манько Ю.И., Сидельников А.Н. Влияние вулканизма на растительность. Владивосток: Дальнаука, 1989. 161 с.
18. 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.
19. Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние 10 тыс. лет // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 28–39.
20. Нешатаева В.Ю. Растительность полуострова Камчатка. М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2009. 537 с.
21. Пийп Б.И. О силе извержения вулкана Ксудач в марте 1907 г. // Бюл. вулканологических станций. 1941. № 10. С. 23–29.
22. Пилипенко Г.Ф., Разина А.А., Фазлуллин С.М. Гидротермы кальдеры вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 43–57.
23. Селянгин О.Б. Геологическое строение и эволюция кальдерного комплекса вулкана Ксудач // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 16–27.
24. Селянгин О.Б. Вулкан Ксудач. Действующие вулканы Камчатки / под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 337–353.
25. Сидельников А.Н. Влияние аэральной пирокластики на растительность вулканических районов Советского Дальнего Востока // Комаровские чтения. 1987. Вып. XXXIV. С. 44–56.
26. Pendea I.F., Ponomareva V.V., Bourgeois J., Zubrow E.B., Portnyagin M.V., Ponkratova I., Harmsen H., Korosec G. Late Glacial to Holocene paleoenvironmental change on the northwestern Pacific seaboard, Kamchatka Peninsula (Russia) // Quat. Science Rev. 2017. V. 157. P. 14–28.
27. Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekstev I.V., Chen C.H. Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1999. V. 91. P. 23–42.

Features of Vegetation Restoration after the Eruption of 1907 Ksudach Caldera in the South of the Kamchatka Peninsula

A. V. Kopanina^{1,*}, E. V. Lebedeva^{2,**}, and I. I. Vlasova¹

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: anna_kopanina@mail.ru

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

Received October 23, 2017

Accepted July 27, 2018

The flora and vegetation of the hard-to-reach Ksudach caldera complex (Kamchatka) was first studied by S.Yu. Grishin with colleagues in the early 90s of the 20th century. After 25 years, complex routing studies were completed, supplemented by interpretation of aerial photographs. It was established that the formation of vegetation within the caldera Ksudach (Kamchatka) after 109 years after the catastrophic eruption of the Shtubel cone in March 1907 is extremely uneven. The slowest recovery is in the territories where the layer of fallen tephra is maximal, the active movement of the pyroclastic cover continues under the influence of relief-forming processes – erosion, deflation, lahars and landslides and landslips forming, etc., there is a moisture deficit and there are no nearby sources of primordia plant. One of these sites is the western part of the caldera, represented by pumice desert, sparsely populated pioneer plant species and some shrubs, which still passes the initial stage of primary succession. In the rest of the inner part of the caldera Ksudach and slopes of the Shtubel cone tested active demutational processes that mark continuous step primary succession to form vegetation folded various embodiments of integrated meadow and mountain-tundra shrub communities with inclusion bush forms *Alnus fruticosa* and, to a lesser extent, *Betula ermanii*. In these processes *Pinus pumila* does not play a significant role.

Keywords: mountain-tundra communities, pioneer species, pumice desert, pyroclastic deposits, relief, geomorphological processes.

REFERENCES

1. Bezdelev A.B., Bezdeleva T.A. *Zhiznennye formy semennyykh rastenii Rossiiskogo Dal'nego Vostoka* [Life Forms of Seed Plants of the Russian Far East]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2006. 296 p.
2. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V.Yu. The greatest explosive event of our era in Kamchatka – the caldera-forming eruption of Ksudach volcano about 1700–1800 ¹⁴C years BP. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 1995, no. 2, pp. 30–49. (In Russ.).
3. Voronkova N.M., Verkholat V.P., Kholina A.B. Biological features of plants at the initial stages of growing on friable materials of volcanic eruptions. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Biol.*, 2011, no. 3, pp. 289–294. (In Russ.).
4. Grishin S.Yu. Successions of subgolets vegetation on the lava flows of the Tolbachinsky Dole. *Botanicheskii Zhurnal*, 1992, vol. 77, no. 1, pp. 92–100. (In Russ.).
5. Grishin S.Yu., Krestov P.V., Verkholat V.P., Levus A.P. The impact of the catastrophic eruption of the volcano Ksudach (Kamchatka, 1907) on forest vegetation. In *Komarovskie chteniya* [Komarov's Readings]. 1997, vol. 43, pp. 201–244. (In Russ.).
6. Grishin S.Yu., Krestov P.V., Yakubov V.V., del Moral R. On the restoration of vegetation in the area of the catastrophic eruption of the volcano Ksudach (Kamchatka). *Botanicheskii Zhurnal*, 1997, vol. 82, no. 6, pp. 92–103. (In Russ.).
7. Grishin S.Yu. The largest volcanic eruption of the twentieth century in Kamchatka and the Kuril Islands and their impact on vegetation. *Izv. RGO*, 2003, vol. 135, no. 3, pp. 19–28. (In Russ.).
8. Dubik Yu.M., Menyailov I.A. Gas-hydrothermal activities of Ksudach caldera. *Bull. Vulkanologicheskikh Stantsii*, 1971, no. 47, pp. 40–43. (In Russ.).
9. Ipatov V.S., Mirin D.M. *Opisanie fitotsenoza. Metodicheskie rekomendatsii: Uch.-metod. posobie* [Description of Phytocenosis. Methodical Recommendations: the Guidelines]. St. Petersburg: SPb GU Publ, 2008. 71 p.
10. Kell' N.G. *Karta vulkanov Kamchatki. Ob'yasnit. tekst s tabl., chertezhami, snimkami i karta* [Map of the Volcanoes of Kamchatka. Explanatory Text with Tables, Drawings, Pictures and Map]. Scale 1:750,000. Leningrad: RGO Publ., 1928. 89 p.
11. Kozlov D.N. *Kraternye ozera Kuril'skikh ostrovov* [Crater Lakes of the Kuril Islands]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGaG FEB RAS Publ., 2015. 112 p.
12. Lebedeva E.V. The influence of the lava flows on the structure of the valleys and the development of the river network. *Geomorfologiya*, 2016, no. 3, pp. 78–91. (In Russ.).
13. Lebedeva E.V. Influence of pyroclastic material release on the morphology of valleys and development of the river network (on the example of the Northern group of volcanoes, Kamchatka). *Geomorfologiya*, 2016, no. 4, pp. 56–69. (In Russ.).
14. Lebedeva E.V. Caldera of the volcano Ksudach: modern relief formation processes and features of the river network structure. *Geomorfologiya*, 2017, no. 3, pp. 60–75. (In Russ.).

15. Lebedeva E.V. Lakes of the Ksudach caldera complex (Kamchatka): coastal processes and the level fluctuation. *Geomorfologiya*, 2017, no. 4, pp. 34–48. (In Russ.).
16. Man'ko Yu.I. Volcanism and dynamics of vegetation. *Botanicheskii Zhurnal*, 1980, vol. 65, no. 4, pp. 457–469. (In Russ.).
17. Man'ko Yu.I., Sidel'nikov A.N. *Vliyanie vulkanizma na rastitel'nost'* [Impact of Volcanism on Vegetation]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 1989. 161 p.
18. Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V., and Sulerzhitskii L.D. Catastrophic caldera-forming eruptions of Ksudach volcano during the Holocene. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 1995, no. 4–5, pp. 28–53. (In Russ.).
19. Melekestsev I.V., Sulerzhitskii L.D. Ksudach volcano for the last 10 thousand years. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 1987, no. 4, pp. 28–39. (In Russ.).
20. Neshataeva V.Yu. *Rastitel'nost' poluostrova Kamchatka* [Vegetation of the Kamchatka Peninsula]. Moscow: Tovarishestvo Nauchn. Izdaniy KMK Publ., 2009. 537 p.
21. Piip B.I. On the strength of the eruption of the volcano Ksudach in March 1907. *Bull. Vulkanologicheskikh Stantsii*, 1941, no. 10, pp. 23–29. (In Russ.).
22. Pilipenko G.F., Razina A.A., Fazlullin S.M. Hydrotherms of Ksudach caldera. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 2001, no. 6, pp. 43–57. (In Russ.).
23. Selyangin O.B. Geologic structure and evolution of the calderas of Ksudach volcano. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 1987, no. 5, pp. 16–27. (In Russ.).
24. Selyangin O.B. Vulkan Ksudach. In *Deistvuyushchie vulkany Kamchatki* [Active Volcanoes of Kamchatka]. Fedotov S.A., Masurenkov Yu.P., Eds. Moscow: Nauka Publ., 1991, pp. 337–353.
25. Sidel'nikov A.N. The influence of air pyroclastics on the vegetation of the volcanic areas of the Soviet Far East. In *Komarovskie chteniya* [Komarov's Readings]. 1987, vol. 34, pp. 44–56. (In Russ.).
26. 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. Science Rev.*, 2017, vol. 157, pp. 14–28.
27. 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, pp. 23–42.