

- [4] *Викторов А. С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- [5] *Королюк В. С., Портенко Н. И., Скороход А. В. и др.* Справочник по теории вероятности и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
- [6] *Куст Г. С.* О понятии «гомеостаз» почвенного покрова и его применении в практических почвенных исследованиях // Докл. Междунар. науч. конф. «Простр.-врем. организация почв. покрова: теоретич. и прикл. аспекты». СПб., 2007.
- [7] *Лейбман М. О.* Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения ледяных покровов. Автореф. докт. дис. М., 2005. 48 с.
- [8] *Мамай И. И.* Динамика и функционирование ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 2005. 138 с.
- [9] *Николаев В. А.* Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1978. 63 с.

Москва
vic_as@mail.ru
Институт геоэкологии РАН им. Е. М. Сергеева

Поступила в редакцию
24 июля 2013 г.

Изв. РГО. 2013. Т. 145. Вып. 6

© С. Ю. ГРИШИН

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ (КАМЧАТКА) НА РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ

Вулкан Шивелуч — один из самых активных вулканов Камчатки. Крупный, мощный андезитовый вулкан за последние 65 000 лет выносит ежегодно ~ 36 млн т вулканических продуктов, являясь в последние тысячелетия вторым по продуктивности вулканом региона [14]. Сильные, особо крупные и гигантские по объему продукты извержения оказывают мощное, а иногда и катастрофическое воздействие на экосистемы окружающей территории. В значительной степени разрушительное воздействие оказывается на растительный покров — наиболее уязвимый компонент экосистем. В данной статье рассматриваются основные формы воздействия на растительный покров (РП) на примере трех крупнейших извержений, произошедших за последние полвека, а также масштабы поражения и перспективы восстановления растительности. Данные получены в ходе полевых работ, проведенных на вулкане в течение ряда лет, в период 1978—2012 гг. Изучалась растительность южного макросклона вулкана, поскольку именно здесь благодаря строению вулкана происходит наиболее интенсивное воздействие на растительность. Анализ аэрофото- и космодатаснимков разных лет позволил изучить распределение структуры РП и оценить масштабные изменения растительности и ландшафтов, происходящих в результате извержений.

Природные условия. Строение и активность вулкана. Вулканическая постройка массива состоит из двух частей: Старого Шивелуча (Главная вершина, 3335 м) и Молодого Шивелуча (Кратерная вершина, 2763 м) [14]. Старый Шивелуч является остатком огромного стратовулкана, который был раз-

рушен гигантским обвалом около 30 тыс. л. н. После обрушения в образовавшемся кратере диаметром около 7 км началось формирование Молодого Шивелуча. Развитие Молодого Шивелуча сопровождалось сильными эксплозивными извержениями, которых насчитывают более 60 за последние 10 тыс. лет; шесть из них входят в список 23 крупнейших извержений вулканов Камчатки в голоцене [3]. За последние 2000 лет (период, существенный для современного состояния растительности) крупнейшие извержения были отмечены ~1404 и ~965 л. н. (с выбросом более 2 км³ вулканитов) и 265 л. н. (более 1 км³ вулканитов). В 1854 г. произошло сильное извержение Молодого Шивелуча, в ходе которого образовался открытый на юг кратер диаметром 1.5 км. За последующее столетие в кратере выросло несколько экструзивных куполов [15].

Извержение 12 ноября 1964 г. по объему выброшенной ювенильной пирокластики (0.8 км³) относится к сильнейшим историческим эксплозивным извержениям Камчатки. В результате этой катастрофы на южном склоне вулкана образовалась вулканическая пустыня на площади около 100 км². Начиная с 1980 г. в кратере вулкана рос крупный купол. Периодические умеренные извержения (в 1993, 2001, 2004 гг. и др.) сопровождались обрушениями частей купола, пеплопадами, сходом раскаленных лавин и пирокластических потоков [20]. Крупные извержения со сходом пирокластических потоков произошли в 2005 и 2010 гг. Пирокластические потоки представляют собой смесь раскаленного пирокластического материала и газа, с высоким содержанием обломочного материала; потоки скатываются с большой скоростью по понижениям на склонах вулкана, погребая своими отложениями русла, долины и подножия. Потоки часто сопровождают пирокластические волны — газонасыщенные турбулентные потоки с низким содержанием обломочного материала. Массы раскаленных вулканитов имеют температуру в сотни градусов и при большой мощности могут остывать десятилетиями. Пирокластические потоки, воздействуя на ледники и снеговой покров, образуют лахары — вулканогенные сели, которые сходят по долинам водотоков на большие расстояния.

Благодаря структуре постройки вулкана, основной сход раскаленных пирокластических потоков и лахаров ориентирован в направлении южных склонов вулкана. Значительная часть вулканитов устремляется по долинам «сухих» рек: р. Байдарной в юго-западном секторе вулкана, а также р. Кабеку в юго-восточном секторе. Сухие речки (водотоки с переменным питанием, связанным с сезонностью и активностью вулкана) переносят огромную массу рыхлых вулканических отложений и откладывают их в нижней части долин, в области аккумуляции, создавая обширные так называемые континентальные дельты. Их отложения заывают участки леса и поэтому сильно воздействуют на динамику лесной растительности подножий крупных вулканов [13]. Таким образом, долина сухой р. Байдарной — путь выноса и отложений большого количества вулканических материалов, как раскаленных ювенильных (пирокластические потоки), так и холодных переработанных (лахары, отложения сухой речки). Рельеф долины крайне динамичен. Несмотря на серию извержений в период между 1964 и 2005 гг. и вынос по долине р. Байдарной большого объема вулканитов, контуры долины в этот период были стабильны. Таковыми они были и последние столетия, судя по зрелому хвойно-березовому лесу, который рос на террасах долины.

Гигантский массив Шивелуча «запирает» с севера центрально-камчатскую депрессию с ее субконтинентальным климатом. Климатические условия для южного макросклона вулкана могут быть оценены по данным, получен-

ным на единственной в этом районе метеостанции Ключи [19], расположенной на расстоянии 20—40 км от склонов вулкана. Средняя температура июля на станции «Ключи» достигает 14.7°, а января –16.9°, среднегодовое количество осадков — 860 мм. Условия восточного и северного макросклонов, вероятно, заметно отличаются от южного в сторону большей океаничности и низких температур вегетационного периода.

Растительность вулкана. Информация о растительности вулкана крайне ограничена. Фактически имеется лишь одна заметка о поясности растительности на западном макросклоне [4], где, по данным авторов, до высоты 400 м господствуют хвойные леса из лиственницы и ели (последняя встречается до 300 м), а до 800—900 м — каменноберезовые леса, сменяемые выше зарослями ольховника и кедрового стланика. Такая структура поясности вполне характерна для гор центральной части Камчатки. Судя по дистанционным материалам и топокартам, высотные отметки для верхней границы леса не превышают 600 м между р. Байдарной и р. Левая Карина.

Растительность южного и восточного макросклонов существенно искажена вулканизмом. На южном склоне растительность ограничена распространением вулканических отложений извержения 1964 г. (и предыдущих катастроф), которые спускаются здесь в среднем до 550—600 м. О растительности территории, занятой современной вулканической пустыней южного склона Шивелуча, до извержения 1964 г. имеется свидетельство Л. О. Карпачевского и В. Г. Туркова [12], которые летом 1963 г. работали в ее юго-западной части. Они упоминают, что обширный дол Шивелуча был покрыт от 600 до 1400 м шикшево-голубичной тундрой. Это была явно серийная растительность восстановительных смен после катастроф предыдущих столетий. Ельники юго-западного подножия вулкана в 1972 г. изучал Ю. И. Манько [13].

О растительности северного и восточного макросклонов Шивелуча нет никаких литературных данных. Между тем, судя по спутниковым снимкам и топографическим картам, структура ее высотной поясности явно отличается от нормального типа, характерного для части юго-западного склона, что, вероятно, связано с последствиями многочисленных мощных извержений.

По наблюдениям автора данной статьи, растительность юго-западного сектора вулкана представлена хвойным лесом из ели аянской (*Picea ajanensis*) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*), который на высоте около 500 м сменяется березняком из березы каменной (*Betula ermanii*). Последние поднимаются примерно до 650 м (по склонам правобережья р. Байдарной). Выше они сменяются субальпийскими стланиками (ольховым и кедровым), горными лугами и тундрами. Массив елового леса расположен островом на юго-западном склоне вулкана в интервале от 150 до 450 м, в пределах контура размером 8 × 16 км (длинная сторона расположена поперек склона). Долина р. Байдарной пересекает северо-западную окраину этого острова. Лиственничные леса распространены на южном, восточном и западном склонах вулкана. Выше них, как правило, располагаются леса из березы каменной.

Этапы и методы исследований. В 1978 г. была обследована краевая часть юго-западного сектора поля отложений извержения 1964 г. Трансекты с целью исследования первичных сукцессий были заложены в 1995 г. в западной части вулканической пустыни 1964 г., а в 1996 г. — в ее восточной части. Всего на 5 трансектах общей длиной около 10 км автором с коллегами [11] было заложено 75 площадок 20 × 20 м. На них было описано более 1300 субплощадок размером 1 м² каждая. Кроме того, производились дополнительные

описания растительности и флористические исследования. В 2005—2011 гг. изучались последствия крупного извержения 2005 г., когда особо мощный пирокластический поток сошел по руслу р. Байдарной. Поперек потока закладывались трансекты с учетными площадками, на которых изучался состав поселившихся растений-пионеров, их проективное покрытие и высота. Были изучены особенности субстрата потока (мощность, гранулометрический состав, температура и др.) [9, 10]. Обследовался также лес, погибший от воздействия пирокластической волны, для чего трансекты закладывались через полосу пострадавшей растительности [8]. В 2012 г. обследованы верховья р. Кабеку, по которым прошел пирокластический поток 2010 г.

Извержение 1964 г. Извержение 12 ноября 1964 г. было внезапным, коротким (несколько более часа) и произошло в темное время суток, поэтому имеются свидетельства только немногих случайных очевидцев. Последующие исследования восстановили характер извержения, последовательность событий, объем и распределение выброшенных и перемещенных вулканических материалов [1, 2, 6, 14, 17, 18].

В ходе извержения были отложены 3 основных типа вулканических продуктов.

1. Материал постройки вулкана. В результате извержения образовался подковообразный кратер, почти точно повторивший кратер 1854 г. Объем удаленной в ходе извержения постройки превысил 1.15 км^3 . Эти материалы, представленные в основном андезитами, были перемещены, согласно разным гипотезам, либо направленным взрывом [2, 6, 14, 17, 18], либо обрушением постройки, спровоцированным извержением [1]. Площадь, покрытая отложениями постройки вулкана, составила 98 км^2 при мощности 3—15 м, иногда до 50 м. Объем отложений — 1.5 км^3 .

2. Пирокластические потоки покрыли площадь 50 км^2 , образовав западную и восточную ветви. В западной части материал потоков залегает на отложениях обломочной лавины. Потоки сложены обломками пористого ювенильного андезита. Мощность этих отложений 2—5 м, а местами, как в русле р. Байдарной, — до 40 м. Объем отложений — $0.3\text{—}0.5 \text{ км}^3$.

3. Ювенильная грубая тефра, представленная андезитом, выпала в направлении восток—юго-восток. Более тонкие фракции тефры выпали на расстоянии десятков километров от вулкана, вплоть до пос. Усть-Камчатск на восточном побережье Камчатки. Мощность отложений достигает 30 см (возможно и более), объем — 0.3 км^3 .

Отложениями 1964 г. было перекрыто обширное безлесное пространство, на котором до извержения доминировала шикшево-голубичная тундра [12]. Эта тундра сформировалась на отложениях предшествующей обломочной лавины извержения ~ 1430 г. [15]. В результате извержения 1964 г. образовалась вулканическая пустыня, имеющая площадь более 100 км^2 .

Отложения извержения 1964 г. и начало их зарастания. Вулканическая пустыня площадью более 100 км^2 сформирована двумя типами отложений — отложениями обломочной лавины (взрывными отложениями в иной интерпретации) и отложениями пирокластических потоков. Местами последние частично перекрывают первые. Взрывные отложения представлены неоднородным по размерам (глыбы, щебень, агломерат, мелкозем и др.) и составу материалом взорванной постройки вулкана. Этот материал разбросан хаотично, образовав рельеф с перепадом высот от 1—2 до 10—20 м и более. В субальпийском поясе взрывные отложения частично перекрыты маломощным (до

1 м) чехлом тонких пирокластических отложений и перемытыми отложениями извержений Шивелуча 1980 и 1993 гг., так что конусовидные кучи взрывных отложений высотой до 3—5 м чередуются с покровом перемытой пемзы в низинах.

Всего на 1300 площадках (размер площадок — 1×1 м) пяти трансектов в 1995 и 1996 гг. было обнаружено 127 видов растений, включая сосудистые, лишайники и мохообразные. Наиболее распространенный вид на пемзе — лишайник *Stereocaulon vesuvianum*, на взрывных отложениях — мох *Racomitrium canescens*. В целом при переходе от пемзы к взрывным отложениям резко снижается встречаемость деревянистых и отчасти травянистых растений, но увеличивается встречаемость мхов. Среднее число видов на площадке снижается почти на 40 %.

С удалением от начала трансектов, которые начинаются на окраинах пустыни и идут вглубь ее, несколько уменьшается количество видов на площадке. Количество видов существенно зависит и от субстрата: так, оно возрастает с увеличением доли пемзы, с увеличением покрытия каменистого субстрата против доли рыхлого субстрата (тефра, песок). Проективное покрытие растений очень низкое: в среднем 4—5 % на взрывных отложениях, тогда как на пемзе пирокластических потоков — около 20 % [11].

Изучение возрастов древесных растений на трансектах показало, что эффективное закрепление древесных поселенцев в высотной полосе лесного пояса произошло лишь 10—15 лет спустя после возникновения нового субстрата. В 1995 г. пирокластические потоки на юго-западной окраине вулканической пустыни (близ сухой р. Байдарной) довольно интенсивно были заселены древесными растениями, из которых по встречаемости преобладали береза каменная, тополь и ива удская, а по размерам и относительному обилию в ландшафте выделялись кусты ольховника. Последние имели высоту и диаметр кроны 1—1.5 м, диаметр основания ветвей — 5—6 см. Другие древесные растения были заметно меньше (высота 0.2—0.4 м) и угнетены, по-видимому, вследствие ветровой абразии снегом и тефрой. Отдельные кусты ольховника, особенно у нижнего края пустыни, достигали высоты 3 м, диаметр оснований — 7—8 см, возраст — до 20 лет.

Пеплопад 1964 г. По данным вулканологов [6], пеплопад прошел в направлении восток-юго-восток, осевая часть пеплопада располагалась в междуречье сухих рек Кабеку и Ильчинец. Для изучения последствий пеплопада была сделана серия геоботанических описаний вдоль долин рек Бекеш и Кабеку, образовавших профиль по юго-восточному склону Шивелуча, от лесного до субальпийского поясов. В пределах этого профиля снизу вверх происходит увеличение мощности отложенной тефры. Тефра приземлялась уже остывшей [6], но благодаря крупным размерам частиц привела к существенному поражению древесной растительности. Наиболее очевидные изменения в составе и структуре сообществ под действием пеплопада произошли в лесном поясе — в переходе от лиственничного до каменистоберезового леса, в интервале от ~ 300 до ~ 600 м над ур. м. Лесная растительность здесь испытала воздействие аэральной пирокластики в виде лапилли, отложившейся слоем мощностью от 13 до 27 см. Так, на высоте 360 м было отложено 20 см грубого шлака с размером частиц 1—5 см (преобладающий размер — около 2 см). Шлак нанес серьезные механические повреждения древостою, в результате чего большинство лиственниц погибло. На учетной площади размером 0.2 га из 32 стволов, имеющих диаметр на высоте груди более 10 см, выжили лишь

2 дерева. Заложенный профиль демонстрирует ряд по степени разрушения сообществ — от частично нарушенных до сообществ, где произошла полная гибель древостоя. При минимальной мощности отложений (в средней части лесного пояса) погибло до 30—50 % стволов лиственницы, а при максимальной (в верхней части лесного пояса) — все деревья березы каменной. В нарушенных лиственничниках имеется нормальное возобновление лиственницы, поэтому восстановление этих лесов произойдет в течение жизни одного поколения деревьев (около 100—200 лет). В поясе полностью погибшего каменно-березняка к 1996 г. основные позиции захватили ольховник и луговая растительность, вследствие чего процесс полного восстановления коренного древостоя растянется на несколько столетий [11].

Извержение 2005 г. Извержение Шивелуча 27 февраля 2005 г. произошло в течение ~ 6 часов, в темное время суток, при низкой облачности и поэтому не наблюдалось. На космоснимке от 28 февраля 2005 г. сквозь облака виден мощный пепловый шлейф, уносимый на запад на сотни километров. Таким образом, ось пеплопада этого извержения была направлена на запад. Общая площадь территории Камчатки, покрытой пеплом данного извержения, была равна ~ 25 000 км², часть пепла выпала также над Охотским морем [5]. Светлый пепел этого извержения мощностью около 1 см был отмечен автором в 2009 г. на восточном склоне вулкана Алней, в 80 км к западу от вулкана Шивелуч.

В ходе извержения по юго-западному склону вулкана сошел огромный пирокластический поток, один из крупнейших по объему отложений в историческое время в Камчатско-Курильском регионе. Вулканологи оценили объем потока до 0.5 км³, длину — 25 км, площадь отложений — 31.5 км², среднюю мощность — 15 м [5]. Поток (вероятно, это был комплекс напластований из многократно сходящих потоков) несколькими рукавами глубоко (до высоты 180—250 м) внедрился в лесной пояс [22], сформированный здесь хвойными и березовыми лесами. Отложения потока погребли лесную растительность в долине р. Байдарной, резко расширив долину (от 100—200 до 1000—2500 м), а раскаленные пирокластические волны вызвали гибель леса вдоль бортов потока [7, 8].

Пирокластический поток. Через 3 недели после извержения 2005 г. в толще отложений на глубине 15 см была отмечена температура 40—60°, на глубине 170 см — более 400°. Отложения были очень рыхлыми и газонасыщенными [5]. В августе 2005 г. при нашем первом кратком обследовании на поверхности потока местами наблюдались воронки (диаметр 0.5—1 м), из которых выходил пар. Стенки обнажений, возникшие в результате размывания пирокластики летними водотоками, были горячими [7]. На поверхности отложений во многих местах встречались обугленные ветви и обломки древесины. Температура поверхности пирокластики субъективно (на ощупь) воспринималась как соответствующая температуре окружающей среды.

Мощность пирокластических отложений потока неоднородна — от долей метра на шлейфах периферии потока до десятков метров (судя по рельефу) в крупной гряде с пологими склонами. Размеры этой гряды — около 1 × 2 км, она расположена в пределах 300—400 м над ур. моря (пояс хвойного леса). Изучение серии спутниковых снимков, выполненных в период 2005—2012 гг., показало, что в районе данной гряды отчетливо выражена термоаномалия. Наземные измерения температуры поверхности (0—25 см) отложений через 5 и 6 лет после извержения показали, что температура увеличивается с ростом высотных отметок по профилю, пересекающему гряду [10]. Таким об-

разом, с ростом мощности отложений усиливается тепловой поток из глубин к поверхности отложений. Спутниковые снимки показали, что тепло излучает и вся поверхность достаточно мощных отложений пирокластики в долине р. Байдарной, что ясно видно по протаиванию снегового покрова. Мощные отложения остаются высокотемпературными в течение 8 лет после извержения. Тепловое излучение раскаленных толщ упорядочилось в вертикальные каналы, образовавшие на поверхности отложений термальные пятна.

Заселение отложений пирокластического потока 2005 г. В первые годы после извержения высшие растения не заселяли пирокластику. В 2006 и 2007 гг. было отмечено появление древоразрушающих грибов на полупогребенной древесине. Появление сосудистых растений на потоке отмечено в 2008 г. Тогда же были обнаружены миниатюрные кольцевые структуры растительности. Они представляют собой полосы растительности, окаймляющие округлые пятна (поперечник пятен — около 0.5—1.5 м). Было обнаружено, что поверхность этих пятен ощутимо нагрета. Кайма имеет ширину 8—20 см, часто она разорвана или выражена фрагментарно. Растительность ее представляет низкий моховой покров, похожий на корку, изредка с включением единичных небольших сосудистых растений (вегетирующие злаки, всходы *Betula ermanii*). Мох, заселивший тепловые пятна, — *Ceratodon purpureus*; это космополитичный пионерный вид с широкой экологической амплитудой, активно заселяющий нарушенные местообитания.

Появление сосудистых растений на потоке отмечено, как и мхов, в 2008 г. В 2009 г. был проведен учет на 1000-метровом трансекте поперек потока. Помимо грибов на фрагментах древесных обломков были встречены главным образом *Chamaenerion angustifolium*, *Poa malacantha*, *Betula ermanii*. Растения отмечены на 16 % площадок, чаще всего встречался иван-чай (10 % площадок). Пионеры были небольшими по высоте (5—20 см, изредка до 40 см) и создавали малое проективное покрытие (обычно менее 1 % на площадках размером 1 × 1 м). Местами на пирокластике отмечены также *Salix udensis*, *Minuartia macrocarpa*, *Chamaenerion latifolium*, *Calamagrostis* sp., *Artemisia opulenta*, *Stellaria eschscholtziana*. Для сукцессий на безжизненных вулканических отложениях важнейшими препятствиями выступают иссушение и уплотнение поверхностного субстрата, а также отсутствие источников питания. Несмотря на неблагоприятные экотопы открытой ветрам и инсоляции (иссушающим поверхностные горизонты) вулканической пустыни, пионерный мох нашел узкую, но приемлемую для заселения нишу. Другой мох, *Funaria hygrometrica*, заселил ковром пирокластику по опушкам леса, погибшего от воздействия пирокластической волны [7].

Воздействие пирокластических волн. Шквалы раскаленных пирокластических волн вызвали гибель леса вдоль бортов потока: в четко видимой полосе шириной около 200 м располагается погибший лес (хвойный по левому борту долины и в основном березовый — по правому). В субальпийском поясе, по правому борту долины, заросли ольхового стланика уцелели благодаря защите снегового покрова, тогда как березы, возвышавшиеся над пологом стланика, погибли в результате термического воздействия.

Гибель деревьев вдоль бортов долины произошла в результате направленного (сверху вниз, по ходу движения потока) обжигания древесных растений [8]. Это видно по припеченной до черноты коре. Наиболее интенсивное опаливание отмечается до высоты 1.5—3 м, иногда опалины охватывают ствол вкруговую. На высоте 300 м, в поясе хвойного леса, ожог ориентирован под

углом около 45° к направлению движения пирокластического потока, т. е. воздействие шло сверху и сбоку, со стороны потока. Хвоя кедрового стланика в погибшем ельнике не сгорела, но почернела, причем хвоинки были сжаты в плотные «кисточки», ориентированные в одном направлении. Скорость, температура и насыщенность пеплом газовой-песчаной волны, по-видимому, быстро падали с удалением от края леса. Погибшие деревья показывают резкий градиент затухания мощности воздействия палящей волны: живые деревья начинают появляться через 100—150 м от края пирокластического потока. У многих выживших деревьев были повреждены и усохли нижние части крон. Еще через сотню метров располагается живой лес без признаков воздействия пронесшейся рядом огненной стихии. Тепловое и динамическое воздействие коррелирует с мощностью отложений: через 100—200 м (перпендикулярно направлению движения волны) толщина отложений падала от 50—25 до 7—8 см, и в этом интервале мертвый лес сменялся выжившим. Если подстилка в усохшем лесу была перекрыта отложениями из мелкого песка (до супеси), то стволы и ветви деревьев в 2005 г. были обильно покрыты отложениями более тонкой фракции. Возможно, пепел, осевший на кронах, выпал из горячего газовой-пеплового облака, стоявшего над лесом, по которому пронеслась раскаленная волна. Горячий пепел вызвал таяние снега на ветвях и стволах; из-за чего произошли увлажнение, налипание и частичное цементирование пепла.

Деревья, испытавшие воздействие пирокластической волны, погибли, но выглядят почти неповрежденными. Лишь ближе к краю потока и в верхней части долины, где воздействие волны было максимально интенсивным, можно увидеть стволы с обломанными ветвями. Температура раскаленной волны была относительно небольшой (до 250°C), поскольку возгораний хвойных деревьев и кедрового стланика в подлеске не наблюдалось. Помимо недостаточно высокой для возгорания температуры палящей волны, этот факт можно объяснить несколькими причинами: 1) кратковременностью контакта; 2) низкой температурой зимнего леса; 3) снежным покровом, прикрывшим наиболее горючий материал; 4) движением волны сверху вниз; 5) насыщенностью раскаленной волны песчаным материалом, который сбивал пламя при возгораниях. Отдельные деревья, однако, близ края пирокластического потока загорались, причем многие перегорали в своей нижней части. Вероятно, это происходило после погребения основания деревьев раскаленным материалом пирокластического потока либо вследствие мощного теплового излучения потока.

В ходе извержений обычно происходят механическое повреждение растений, химическое отравление, запыление ассимиляционного аппарата. Однако в данном случае среди причин гибели деревьев явно доминировало опаливание стволов и крон высокотемпературным газовой-песчаным шквалом. Растения не выдерживают такого мощного термического воздействия.

Извержение 2010 г. Отложения извержения 28 октября 2010 г. состояли главным образом из материалов пирокластического потока, возникшего вследствие обвала активного купола. Они образовали обширное поле, перекрывшее главным образом комплекс мощных обвально-взрывных и пирокластических отложений 1964 г. вдоль верховьев р. Кабеку. Формировавшийся здесь крайне разреженный РП был детально изучен нами в 1996 г.: он состоял из пионерных мхов, лишайников, мелкого подроста ив, тополя и др. Среднее проективное покрытие растениями учетных площадок не превышало 5 % [11]. Изучение спутниковых снимков показало, что отложения 2010 г. были распределены в трех зонах [23]. Часть вулканитов отложилась в пустынной зоне

транзита (зона I) протяженностью около 9 км в интервале от ~2000 до 800 м над ур. моря, как в слабо врезанных руслах, так и на пологой равнине. Судя по протаиванию снегового покрова, фиксируемому на спутниковых снимках, в течение первой зимы (2010/11 г.) отложения были горячими, но сравнительно быстро, ко второй зиме (2011/12 г.), остыли. Это означает, что они были умеренной мощности (предположительно, не более ~5—10 м). Основная масса отложений 2010 г. сконцентрирована в компактной зоне аккумуляции (зона II) вдоль правого берега р. Кабеку, в пределах $\sim 4 \times 6$ км, в высотном интервале ~ 780 —480 м. Площадь многометровых отложений в зоне аккумуляции ~ 16 —18 км². Судя по высокой температуре отложений, что четко проявляется на зимних снимках 2.5 года спустя после извержения, можно допустить, что средняя мощность отложений составляет не менее 20 м. Часть потоков сошла ниже основной зоны аккумуляции, пройдя около 6 км по долине р. Кабеку и ее притоку до высоты 320 м (зона III).

Первые наблюдения в нижней части зоны III проведены вулканологами спустя несколько дней после извержения [16]. В августе 2012 г. автор кратко обследовал долины р. Кабеку и ее притоков, а также нижнюю часть обширного поля пирокластических отложений, в интервале высот 150—600 м над ур. моря. Пирокластический поток и сопровождавшие их волны вызвали поражение лесной и стланиковой растительности на склонах этих долин. Заращение отложений пирокластического потока еще не началось; более того, в руслах на высоте 420—480 м отмечались участки высокотемпературных отложений.

Объем отложений зоны аккумуляции можно оценить величиной ~ 0.2 км³, а общий объем отложений потока 2010 г. — около 0.25—0.3 км³. Помимо пирокластического потока, был отмечен также пеплопад, который на несколько дней затруднил жизнь пос. Усть-Камчатск, находящегося на расстоянии ~90 км к юго-востоку от вулкана Шивелуч.

Обсуждение. Три мощных и особо мощных извержения радикально и почти мгновенно изменяли экологическую обстановку на площади в десятки квадратных километров на южном макросклоне вулкана Шивелуч. Были нарушены, а на большой площади полностью уничтожены экосистемы, становление которых происходило несколько сотен лет после предыдущих катастроф, произошедших в XV и XVII вв. Погибли вековые леса, горные стланики и луга, высокогорная растительность и несомкнутый РП, формирующийся на ранее извергнутых вулканитах. Основными явлениями, вызвавшими гибель и разрушение РП, были следующие: перекрытие растительности отложениями обвальной лавины, отложениями пирокластических потоков, воздействие пирокластических волн, пеплопадов и лахаров. Отметим, что на андезитовых вулканах отсутствует такой фактор поражения экосистем, как излияния лавовых потоков. Последние в свою очередь очень характерны для районов базальтового вулканизма, особенно таких активнейших вулканов Камчатки и Курилы, как Ключевской, Толбачик, Алаид.

Наиболее масштабное поражение растительности было вызвано извержением 1964 г. Выброс огромного объема материалов постройки вулкана и пирокластических отложений привел к полному уничтожению РП в пределах территории площадью более 100 км².

На территории вулканической пустыни 1964 г. началась первичная сукцессия. Заселение растениями вулканических отложений 1964 г. на вулкане Шивелуч имеет ряд специфических черт и некоторые различия с начальными стадиями сукцессий на других вулканах Камчатки. Шивелуч находится на се-

верной окраине области хвойных лесов центральной Камчатки. Вследствие этого, в сукцессии на Шивелуче участвуют доминанты лесной растительности: лиственница и ель, а также березы — плосколистная и каменная (*Betula platyphylla* и *B. ermanii*). Выявлены существенные различия в составе видов-пионеров в разных частях поля отложений 1964 г. Так, совсем не были отмечены в 1996 г. в восточной части пустыни важнейшие доминанты субальпийского пояса — кедровый и ольховый стланики (*Pinus pumila*, *Alnus fruticosa*). Вероятно, они должны были появиться на более продвинутых этапах сукцессий. В целом, судя по разнообразию флоры, эдафические и климатические условия вулканической пустыни Шивелуча, вероятно, несколько более благоприятны для растений, чем условия на аналогичных отложениях обломочной лавины вулкана Безымянный (Ключевская группа вулканов).

Дальнейшие перспективы сукцессии на обвальных отложениях 1964 г. связаны, вероятно, с постепенным формированием субальпийской лугово-стланиковой переходной растительности через многочисленные серийные группировки, в частности открытые лугово-тундровые, локальные заросли ив, ольховника и др. Этот процесс может занять несколько сотен лет. Субальпийская растительность постепенно будет сменяться лесной — березовыми лесами и лиственничными редколесьями. По аналогии с другими исследованными нами районами Камчатки можно предположить, что эта сукцессия может длиться в целом не менее 1000 лет (при отсутствии новых катастроф).

На значительной территории (~100 км²) произошло существенное поражение растительности под влиянием пеплопада 1964 г. Здесь протекают главным образом вторичная сукцессия и восстановление нарушенной растительности. Горшков и Дубик (1969) указывают [6], что лиственничные и березовые леса погибли на площади 45 км². Однако оценка изменений по спутниковым снимкам 2010 г. и ситуации, отраженной на топокарте (съемка 1948 г.), показала, что эта величина завышена примерно в 2 раза. При этом пострадавшая территория размером 20—25 км² до извержения была занята не только лесами, а также стланиками и комплексной растительностью (из фрагментов редколесий и участков стлаников на общем луговом фоне). Последняя, по-видимому, образовывала своеобразный экотон между уцелевшими лесами и серийными шикшевниками на обвальных отложениях ~1430 г.

Пирокластический поток 2005 г. нанес мощный удар по экосистемам юго-западного подножия вулкана. По размерам и объему отложений этот поток сопоставим с потоками крупнейших вулканических катастроф последних десятилетий — на вулканах Безымянный (1956 г., Камчатка), Шивелуч (1964 г.), Сент-Хеленс (1980 г., США). В результате схода пирокластического потока 2005 г. РП был уничтожен в пределах территории, перекрытой раскаленной пирокластикой; площадь ее около 30 км². Отложениями пирокластического потока и воздействием пирокластических волн извержения 2005 г. были уничтожены: ельники, зарастающие участки вырубок на месте ельников, долинных ольгово-тополевые леса, елово-лиственничные леса с березой каменной, березняки, горные стланиковые заросли (преимущественно из ольхового стланика), отчасти горные и высокогорные луга и тундры. Кроме того, отложениями были перекрыты зоны, почти свободные от растительности: краевая часть вулканической пустыни 1964 г., где в минувшие десятилетия началось интенсивное зарастание [11], и приустьевая динамичная зона долины р. Байдарной (ниже 600 м над ур. моря). Суммарную площадь погребенного леса можно оценить величиной 10—12 км². Существенная часть уничто-

женного леса относится к хвойным лесам (до 8 км²), в основном к ельникам (до 6 км²). Кроме того, лес погиб под воздействием пирокластической волны вдоль бортов новообразованной долины на общей площади около 4 км².

Гибель леса в результате преимущественно термического воздействия — достаточно редкое событие. Такие явления отмечались при извержениях вулканов Сент-Хеленс (США, 1980 г.), Унзен (Япония, 1994 г.), Суффриер (Сент-Винсент, 1997 г.). На Камчатке гибель каменноберезового леса происходила на большой территории в результате воздействия раскаленной волны вулкана Безымянный в 1956 г., двигавшейся с огромной скоростью. Однако усыхание хвойного леса в результате термического воздействия — явление, уникальное для всего Курило-Камчатского региона.

Пирокластический поток 2010 г. перекрыл главным образом отложения гигантского извержения 1964 г. вдоль верховьев р. Кабеку. Здесь был уничтожен находившийся в процессе формирования крайне разреженный РП. Отложения 2010 г. также отчасти перекрыли растительность по левому берегу р. Кабеку: пострадали горные леса, стланики и луга на площади около 1 км², восстанавливающиеся после катастрофы 1964 г.

Таким образом, в результате двух последних мощных извержений вулкана Шивелуч были извергнуты пирокластические потоки объемом около 0.5 и 0.3 км³, перекрывшие суммарно около 55 км² территории в юго-западном и юго-восточном секторах вулкана. В результате этих извержений растительность погибла на площади около 20 км², в том числе леса на площади 12—13 км². Наиболее ценным компонентом этих лесов были ельники в долине р. Байдарной. В новейшей истории Камчатки (с конца XVII в.) это был крупнейший массив темнохвойных лесов, погибших в результате вулканического извержения. Там же, в долине р. Байдарной, произошло уникальное для Курило-Камчатского региона явление гибели хвойных лесов от воздействия пирокластической волны [8]. Восстановление лесной растительности в долине р. Байдарной может произойти в течение 300—400 лет [10]. Горный и высокогорный РП (в том числе разреженный покров вулканических пустынь) находится в зоне периодических воздействий извержений и длительность его восстановления будет зависеть от активности вулкана.

Исследование поддержано грантами РФФИ № 11-05-98604, 13-05-00686.

Список литературы

- [1] Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) — плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4. С. 116—126.
- [2] Богоявленская Г. Е., Брайцева О. А., Мелекесцев И. В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3—26.
- [3] Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Пономарева В. В., Базанова Л. И., Сулержицкий Л. Д. Сильные и катастрофические эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 тыс. лет // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 235—252.
- [4] Васильев Н. Г., Степанова К. Д. Высотная поясность растительности вулкана Шивелуч // Биологические ресурсы суши севера Дальнего Востока. Владивосток, 1971. Т. 1. С. 164—168.

- [5] Гирина О. А., Демянчук Ю. В., Мельников Д. В. и др. Пароксизмальная фаза извержения вулкана молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16—23.
- [6] Горшков Г. С., Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3—37.
- [7] Гришин С. Ю. Поражение растительности в результате крупного извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 2005 г.) // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 45—52.
- [8] Гришин С. Ю. Гибель леса на вулкане Шивелуч под воздействием палящей пирокластической волны (Камчатка, 2005 г.) // Экология. 2009. № 2. С. 158—160.
- [9] Гришин С. Ю. Заселение растениями поверхности горячего пирокластического потока (вулкан Шивелуч, Камчатка) // Экология. 2012. № 2. С. 156—158.
- [10] Гришин С. Ю., Комачкова И. В. Температура отложений мощного пирокластического потока вулкана Шивелуч (2005 г., Камчатка) и начало его зарастания // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2011. Вып. 18, № 2. С. 135—141.
- [11] Гришин С. Ю., Крестов П. В., Верховат В. П., Якубов В. В. Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // Комаровские чтения. Вып. XLVI. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 73—104.
- [12] Карпачевский Л. О., Турков В. Г. К характеристике растительности и почв южного склона вулкана Шивелуч // Биологические науки. 1972. № 8. С. 119—126.
- [13] Манько Ю. И., Сидельников А. Н. Влияние вулканизма на растительность. Владивосток: ДВО РАН, 1989. 161 с.
- [14] Мелекесцев И. В., Вольнец О. Н., Брайцева О. А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 84—105.
- [15] Мелекесцев И. В., Двигало В. Н., Кирсанова Т. П., Пономарева В. В., Певзнер М. М. 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII—XX вв.). Ч. I. 1650—1964 гг. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 3—19; ч. II. 1965—2000 гг.; 2004. № 1. С. 5—24.
- [16] Овсянников А. А., Маневич А. Г. Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2010. Вып. 16, № 2. С. 7—9.
- [17] Певзнер М. М., Мелекесцев И. В., Пономарева В. В., Раковская Э. М. Воздействие катастрофических эксплозивных извержений на природную среду (на примере вулкана Шивелуч) // Изв. АН СССР, сер. геогр. 1994. № 1. С. 75—85.
- [18] Пийп Б. И., Мархинин Е. Г. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1965. № 39. С. 28—34.
- [19] Справочник по климату СССР. Вып. 27. Камчатская обл. Л., 1966. Ч. 2. 184 с.; 1968. Ч. 4. 211 с.
- [20] Хубуная С. А., Жаринов Н. А., Муравьев Я. Д. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3—19.
- [21] Ponomareva V. V., Pevzner M. M., Melekestsev I. V. Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol. 1998. Vol. 59. P. 490—505.
- [22] http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/45000/45872/shiveluch_ali_2010250_lrg.jpg
- [23] http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/49000/49468/shiveluch_ast_2011055_lrg.jpg

Владивосток
alaid@bk.ru, grishin@ibss.dvo.ru
Биолого-почвенный
институт ДВО РАН

Поступило в редакцию
4 августа 2013 г.