

С.Ю. ГРИШИН, П.А. ПЕРЕПЕЛКИНА,
М.Л. БУРДУКОВСКИЙ, А.Г. ЛАЗАРЕВ

Природные изменения в долине реки Байдарная (вулкан Шивелуч, Камчатка) после сильного извержения 27 февраля 2005 г.

Приводятся новые данные о состоянии экосистем долины р. Байдарная (влк. Шивелуч). Эти экосистемы развиваются на отложениях пирокластических потоков и волн в ходе первичных и вторичных сукцессий после сильного извержения в феврале 2005 г.

Ключевые слова: пирокластические потоки, извержение, растительность, экосистемы, сукцессии, вулкан Шивелуч, Камчатка.

Natural changes in the valley of the Baydarnaya River (Shiveluch volcano, Kamchatka) following the strong eruption on February 27, 2005. S.Yu. GRISHIN, P.A. PEREPELKINA, M.L. BURDUKOVSKII (Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok), A.G. LAZAREV (Kamchatka Center for Informatization and Assessment of Education Quality, Petropavlovsk-Kamchatsky).

The new data on the state of ecosystems of the Baydarnaya River valley (Shiveluch volcano) are provided. The ecosystems are developing on deposits of pyroclastic flows and surges as primary and secondary successions after severe eruption in February 2005.

Key words: pyroclastic flows, eruption, vegetation, ecosystems, successions, Shiveluch volcano, Kamchatka.

Введение

В последние годы произошла серия извержений на вулканах Камчатки и Курил, в ходе которых крупные природные разрушения были вызваны пирокластическими потоками и пирокластическими волнами – крайне опасными и разрушительными вулканическими явлениями. Пирокластические потоки представляют собой смесь раскаленного пирокластического материала и газа с высоким содержанием обломочного материала; подобно лавинам они скатываются с большой скоростью по понижениям на склонах вулкана, формируют в зонах аккумуляции отложения толщиной в десятки метров. Их сопровождают газонасыщенные турбулентные пирокластические волны с низким содержанием обломочного материала, проносящиеся с огромной скоростью по склонам независимо от

*ГРИШИН Сергей Юрьевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ПЕРЕПЕЛКИНА Полина Александровна – младший научный сотрудник, БУРДУКОВСКИЙ Максим Леонидович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник (Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток), ЛАЗАРЕВ Александр Геннадьевич – заместитель начальника отдела (Камчатский центр информатизации и оценки качества образования, Петропавловск-Камчатский).
*E-mail: grishin@biosoil.ru

рельефа, разрушая и опаливая все на своем пути. Главные черты действия пирокластических потоков и волн – масштабность, высокая скорость, особо высокая температура раскаленных ювенильных вулканитов, обогащенность газами. Пирокластические потоки и волны ведут к катастрофическому таянию ледников и снежников в горах, в результате чего разрушения усугубляются сходом лахаров – вулканогенных селей. Крупнейший за последние десятилетия на Дальнем Востоке России пирокластический поток сошел на влк. Шивелуч в феврале 2005 г.

Шивелуч – самый северный, один из крупнейших (3283 м над ур. м.) и наиболее активных вулканов Камчатки [12]. В результате гигантского извержения 1964 г. произошло перекрытие южного макросклона Шивелуча вулканическими отложениями на площади около 100 км² [4]. Среди этих отложений наибольший объем (более 1 км³) принадлежал материалам постройки вулкана, которые были перемещены, согласно различным представлениям, либо направленным взрывом [4, 12], либо обрушением постройки, спровоцированной извержением [1]. Вследствие сложной структуры рельефа вулкана выброс основной части вулканитов, в основном материалов раскаленных пирокластических потоков, и лахаров (вулканогенных селей) ориентирован в направлении южных склонов. Значительная часть вулканитов устремляется по долинам рек Байдарная и Кабеку [5]. Как следствие рельеф прирусловых частей долин крайне динамичен.

В результате очень сильного извержения 27 февраля 2005 г. по долине р. Байдарная (юго-западный склон влк. Шивелуч) сошел особо крупный пирокластический поток (рис. 1, 2). Вулканологи оценили его длину в 25 км, площадь отложений – 31,5 км², среднюю мощность – 15 м, объем – 0,5 км³ [2]. Раскаленные отложения потока перекрыли и уничтожили растительный покров на большой площади. Обширная территория краевой зоны, примыкающей к зоне погребения, стала зоной гибели экосистем в результате воздействия пирокластических волн. В течение ряда лет на примере растительного

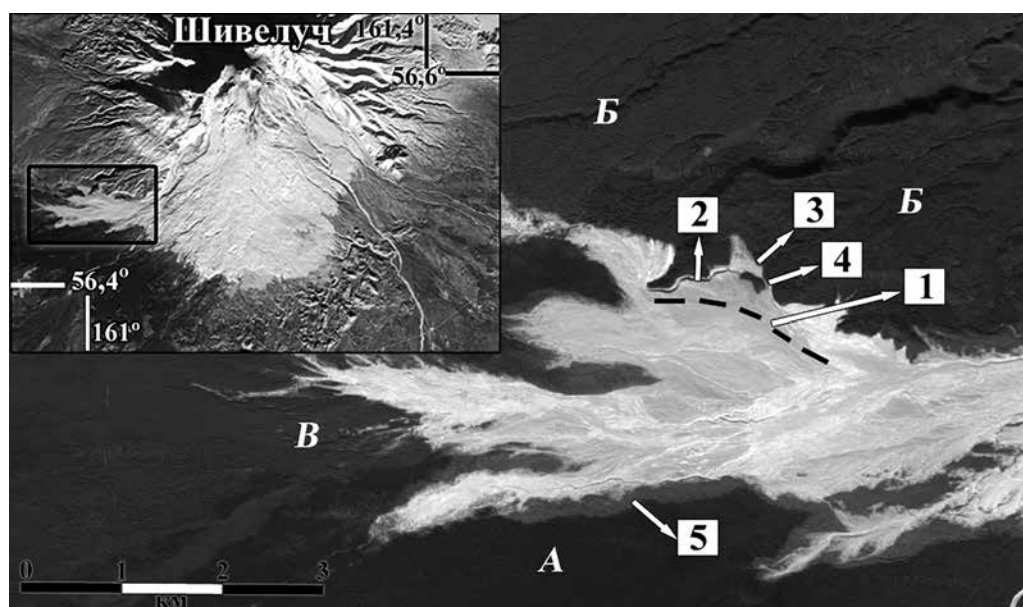


Рис. 1. Район исследований. Пирокластический поток 2005 г. (светлый контур) вторгся в зону леса (А – хвойный лес из ели и лиственницы, Б – лес из березы каменной, В – смешанный долинный лиственный лес). Цифрами обозначены места сбора материалов: 1 – осевая часть гряды (показана пунктиром) мощных пирокластических отложений с тепловыми пятнами (см. рис. 4), 2 – каньон, промытый водотоками, с термальной стенкой, покрытой растениями (см. рис. 5), 3 – участок леса, погибший от замывания переотложенным пирокластическим материалом (см. рис. 3), 4 – термальная стенка на борту русла, образованного новым рукавом р. Байдарная (см. рис. 6), 5 – полоса леса, погибшего от воздействия пирокластических волн (см. рис. 2, 8). Фото со спутника WVO-2 от 4 сентября 2013 г.



Рис. 2. Общий вид долины р. Байдарная. Справа – погибший и распавшийся еловый лес, на его месте интенсивно возобновляется ива удская. На дальнем плане – массив вулкана Шивелуч; виден газово-пепловый выброс из активного купола. 2017 г. Фото А.Л. Лукомского

и почвенного покровов нами выявлялись специфика этого воздействия на экосистемы, а также реакция основных компонентов экосистем на него и начало восстановления экосистем после полного уничтожения. Результаты наблюдений в первые годы (2005–2007) были опубликованы [7, 8, 10]. В данном сообщении рассматриваются природные изменения, произошедшие главным образом в последующее десятилетие (2008–2018 гг.).

Материал и методика

Летом в 2005–2018 гг. (за исключением 2013 и 2016 гг.) в долине р. Байдарная мы обследовали отложения пирокластического потока, на котором начиная с 2009 г. закладывали пересекающие его трансекты длиной до 1000–1500 м. На трансектах провели нивелирование, регулярно измеряли температуру отложений на глубине до 25 см, на сериях регулярно закладываемых учетных площадок определяли встречаемость и проективное покрытие растений. В погибшем лесу, примыкающем к зоне отложений, исследовалось воздействие пирокластических волн на лесную растительность, выяснялось время начала восстановления растительного покрова. Для этого применялся комплекс методов (изучение распределения пирокластических отложений, анализ воздействия волн на деревья по следам опаливания, по изменению радиального прироста выживших деревьев, картирование растительности вдоль трансект и др.). Изменения выявлялись и по спутниковым снимкам, выполненным в 2002–2017 гг. (включая снимки высокого разрешения), а также по аэрофотоснимкам 1976 г.

Результаты

Отложения пирокластического потока

Длина трассы прохождения потока по нашим измерениям достигает ~19 км. Поток 2005 г. несколькими рукавами глубоко (до высоты 190–250 м) внедрился в лесной

пояс и перекрыл в нем территорию площадью около 13 км². Изучение зоны поражения показало, что отложения потока погребли лесную растительность в долине р. Байдарная, резко расширив долину от 200–700 до 1000–2000 м (рис. 2). Отложения максимальной мощности совпали со старым, почти заросшим лесом, руслом, находившимся к северу от главного (до 2005 г.) русла на расстоянии 0,5–1 км. Нивелирование поверхности крупнейшей гряды отложений и сравнение изменений рельефа (за основу взяты топографические карты масштаба 1 : 25000 (съемка 1973 г.) и аэрофотоснимки, выполненные в 1976 г.) показали, что максимальная толщина отложений достигает 50 м. В зоне пирокластических отложений интенсивная денудация происходила начиная с весны 2005 г. Так, крупнейший врез, с субвертикальными стенками высотой более 20 м, начал образовываться уже летом 2005 г. Видимая толщина отложений мощностью более 10 м прослеживается на ряде участков, размытых временными водотоками. На обнажившихся в результате размывания стенках отложений начиная с 2008 г. стали видны обугленные стволы деревьев. Объем отложений пирокластического потока, по нашей оценке, составляет 0,2–0,3 км³.

Мощные толщи отложений изменили конфигурацию долины и положение русел. Прежнее (существовавшее до 2005 г.) русло р. Байдарная отчасти изменило положение и сейчас является второстепенным (оно просматривается в средней части долины, см. рис. 1). Основной вынос водно-грязевых масс происходит по правому рукаву, проходящему между северной окраиной толщ отложений и склонами правобережья долины Байдарной, которые сформированы древними лавовыми потоками (эти склоны покрыты вековыми лесами из березы каменной и стланиками). Третье русло прижимается к левому борту долины, где пологие склоны покрыты хвойными лесами. После февральского извержения 2005 г. по этим руслам идет постоянный вынос водно-грязевых масс, которые отлагаются в нижней части долины (ниже 300 м). Водно-грязевые потоки, переотлагавшие большие объемы пирокластики 2005 г., вызвали замывание обширной территории – более 0,5 км². На этой территории деревья по мере погребения нижней части ствола усыхают и гибнут (рис. 3). В определенной мере процесс замывания продолжается и поныне.

Время от времени по долине р. Байдарная отмечаются новые, относительно небольшие, пирокластические потоки. Заметные по размерам потоки сходили в сентябре 2005 г. и в июле 2013 г. [3]. В декабре 2013 г. поток (его горячие отложения хорошо видны на



Рис. 3. Лес из березы каменной, погибший после погребения холодными пирокластическими отложениями, переотложенными лахарами. 2008 г. Фото 3–8 выполнены С.Ю. Гришиным

спутниковом снимке от 18 апреля 2014 г.) прошел около 14 км, спустившись до высоты менее 500 м. До лагерной стоянки, где останавливались последнее десятилетие полевые отряды (рис. 1, 4), он не дошел 2,3 км. К новым отложениям пирокластики добавляется постоянный вынос грязевых масс, характерный для так называемых сухих речек районов активного вулканизма.

Температура отложений пирокластического потока

Мощные толщи отложений, имеющие огромный объем, исходно были высокотемпературными. Замеры в борте потока три недели спустя после извержения показали температуру выше 400 °С [2]. Нами выявлены некоторые закономерности распределения температуры поверхности, основанные на измерениях 2010 и 2011 гг. [11]. К весне 2017 г. площадь прогретой поверхности, на которой произошло протаивание снегового покрова, не превышала 2 км². Толщина отложений на этой территории составляет предположительно не менее 20–30 м. Периферийные участки, где толщина отложений не более 5–10 м, остыли еще до 2008 г. По данным, полученным нами в 2010–2018 гг., происходит постепенное остывание поверхности и крупнейшей гряды отложений. Это подтверждают три ряда наблюдений: за температурой отложений на глубине 0,25 м на трансектах, заложенных поперек наиболее мощной гряды (см. рис. 1), температурой тепловых пятен и изменением контуров протаивания снегового покрова на спутниковых снимках 2005–2018 гг.

Тепловые пятна, группирующиеся вдоль погребенных русел, отмечены в основном вдоль осевой части (рис. 4) наиболее мощной гряды отложений [11]. Они являются, по видимому, локальными участками парогазовой разгрузки, вариантами бескорневых фумарол. Температура в центральной части этих пятен, достигающих в поперечнике 1–2 м, на глубине 10 см была близка к 100 °С. Вблизи одного из таких пятен даже был слышен шум выходящего пара. Ряд крупных пятен продолжали оставаться горячими до 2015 г., но многие другие стали остывать или полностью остыли к 2018 г.

Заметное остывание крупнейшей гряды в 2013–2017 гг., возможно, связано с разгрузкой тепловой энергии, происходящей через стенки каньона, промытого новым северным руслом р. Байдарная (рис. 5). Температура, замеренная нами в 2014 г., достигала 82 °С на



Рис. 4. Тепловые пятна в осевой части гряды горячих пирокластических отложений. Кайма образована мхами. 2014 г.

глубине 10 см слегка парящей стенки, покрытой мхами, водорослями и единичными сосудистыми растениями. Другим местом тепловой разгрузки является участок погибшего леса площадью около 5000 м² (этот лес известен всем полевым отрядам, работающим в последние годы на Байдарной – возле него отряды разбивают лагерь). Деревья (береза каменная) здесь погибли от перегрева субстрата. Гибель по этой необычной причине, как было выявлено по спутниковым снимкам, произошла в 2013 г. и первоначально была необъяснимой, поскольку погибшие деревья находились за пределами зоны пирокластических



Рис. 5. Измерение температуры термальной стенки в «каньоне», образовавшемся в результате интенсивной эрозии водно-грязевыми потоками нового русла р. Байдарная. Стенка покрыта мхами и водорослями. 2014 г.



Рис. 6. Термальная стенка – участок разгрузки тепловой энергии крупной гряды горячей пирокластике извержения 2005 г.

отложений. Сам участок погибшего леса был осмотрен нами в 2014 г., а в 2017 г. было обнаружено, что деревья в основном вывалились, кроме них погибли и кустарники. Небольшая стенка (~100 м²) в обнажении борта у русла, огибающего этот лес (рис. 6), является еще одним участком тепловой разгрузки. Данная стенка, температура которой в августе 2018 г. достигала местами 90 °С, фрагментарно покрыта мхами и водорослями.

Зарастание отложений пирокластического потока

В первое время после извержения 2005 г. высшие растения не заселяли пирокластику. В 2006 и 2007 гг. было отмечено появление древоразрушающих грибов на полупогребенной древесине. Сосудистые растения стали встречаться здесь с 2008 г. Тогда же были обнаружены миниатюрные кольцевые структуры растительности, окаймляющие округлые пятна (около 0,5–1,5 м в поперечнике). Было обнаружено, что поверхность этих пятен ощутимо нагрета. Растительная кайма имеет ширину 8–20 см, часто она разорвана или выражена фрагментарно. Растительность ее представляет низкий моховой покров (рис. 3), похожий на корку, изредка с включением единичных небольших сосудистых растений (вегетирующие злаки, иван-чай, всходы березы *Betula ermanii*). Мох вокруг тепловых пятен – *Ceratodon purpureus*; это космополитичный пионерный вид с широкой экологической амплитудой, активно заселяющий нарушенные местообитания. Высота его зеленых побегов не превышает 1–2 мм, спорогонии отсутствуют; ризоиды скрепляют поверхностный слой отложений, образуя плотную дернину. По данным обмеров кольцевых структур в 2011 г., диапазон температур поверхности в средней части полосы мхов составлял 32–42 °С, на глубине 10 см – 47–57 °С. Выявлено, что оптимальной для существования куртин мха является температура поверхности около 37 °С. Важным фактором выживания мха является стабильный режим влажности субстрата вследствие просачивания снизу водяного пара, интенсивность поступления которого, по-видимому, коррелирует с выносом тепла. Для сукцессий на безжизненных вулканических отложениях важнейшим препятствием являются иссушение и уплотнение поверхностного субстрата, а также отсутствие источников питания [14]. Несмотря на неблагоприятные экотопы открытой ветрам и инсоляции (иссушающим поверхностные горизонты) вулканической пустыни, пионерный мох нашел узкую, но приемлемую для обитания нишу. Другой мох, *Funaria hygrometrica*, заселил ковром пирокластику по опушкам леса, погибшего от воздействия пирокластической волны [10]. Первичная сукцессия растительности на горячем вулканическом субстрате – редкое природное явление.

Появление сосудистых растений на потоке отмечено, как и мхов, в 2008 г. Наблюдения на регулярных трансектах, заложенных в 2009–2018 гг., показали, что заселение сосудистыми растениями, включая мелкий подрост деревьев, достаточно интенсивно идет только у границы леса; с удалением от опушки ситуация быстро меняется в худшую сторону. На открытых продуваемых поверхностях с резким иссушением субстрата растений ничтожно мало; по-видимому, существует баланс между их поселением и отмиранием. Даже самое распространенное на пирокластических отложениях пионерное растение – иван-чай узколистный (рис. 7) чувствует себя на субстрате с повышенной температурой не очень уверенно: небольшие (10–30 см высотой) побеги в августе обычно угнетены, побеги и листья зачастую буровато-краснеющие, иногда с усохшими листьями. При этом иван-чай распространяет свои корневища в прогретом грунте горизонтально на глубине 10 см и в какой-то мере защищен от пересыхания поверхности субстрата. Мхи, заселение которыми означает стабилизацию субстрата, присутствуют в ничтожном количестве. В 2017 г. мы зафиксировали появление водяники черной (шикши) *Empetrum nigrum* – небольшого кустарничка, куртины которого постепенно разрастаются, захватывая первичный субстрат (этот процесс наблюдался нами в обширной вулканической пустыне влк. Ксудач и у подножия влк. Чикурачки). Пока лучше зарастают узкие, шириной 50–200 м, языки пирокластического потока: отложения там давно остыли, действует

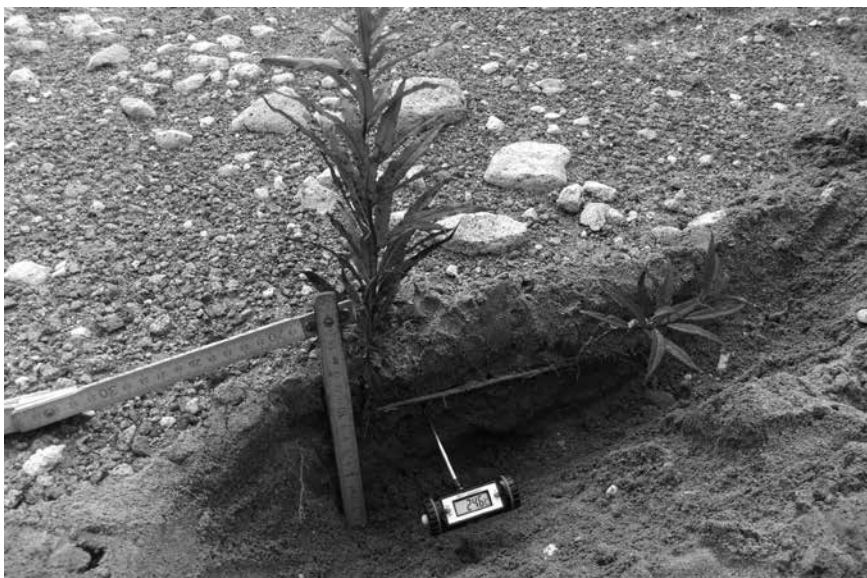


Рис. 7. Иван-чай узколистный – одно из пионерных растений, растущих на вулканическом субстрате с повышенной температурой. 2011 г.

опушечный эффект, и среди пионерных растений заметно больше древесных (мелкий подрост ели, лиственницы, березы, кедрового стланика, тополя и ивы удской). Древесный подрост состоит почти исключительно из березы каменной вдоль северного борта долины и со значительным участием хвойных вдоль южного борта.

Полосы леса, погибшего от воздействия 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 лиственный – по правому). В субальпийском поясе, по правому борту долины, заросли ольхового стланика уцелели местами благодаря защите снегового покрова, тогда как березы, возвышавшиеся над пологом стланика, погибли в результате термического воздействия.

В погибшем хвойном лесу с целью выявления факторов его гибели изучались деформации крон деревьев, распространение пятен опаливания на коре и др., а также распределение пирокластических отложений по градиенту воздействия пирокластических волн. Серия пробных площадок на трансекте через погибший лес (до живого леса) позволила определить характер гибели / выживания древесных растений и особенности восстановления сообществ. Параметры пирокластической волны мы реконструировали, изучая распределение мощности отложений, их гранулометрический состав, кислотность и др., а также определяя высоту опаливания стволов деревьев и картируя векторы опаливания. Это дало возможность выявить в лесном сообществе пространство, которое было охвачено высокотемпературным газовой-песчаным вихрем.

Деревья вдоль бортов долины погибли в результате направленного сверху вниз, по ходу движения потока, термического воздействия. Это хорошо видно по припеченной до черноты коре елей (рис. 8) и берез. Наиболее интенсивное опаливание стволов отмечается на высоте 1–5 м, иногда опалины охватывают стволы в круговую. По результатам детального картирования выявлено, что на высоте 300 м, в поясе хвойного леса, ожоги деревьев ориентированы под углом около 45° к направлению движения пирокластического потока, т.е. воздействие шло сверху и сбоку, со стороны потока. Скорость, температура и

насыщенность пеплом газовой-песчаной волны, по-видимому, быстро спадали с удалением от края леса. Погибшие деревья показывают резкий градиент мощности воздействия палящей волны: живые деревья начинают появляться уже через 150 м от края пирокластического потока. У первых выживших деревьев были повреждены и усохли нижние части крон. Еще через 10–20 м располагается живой лес без признаков воздействия прошедшей рядом огненной стихии. Тепловое и динамическое воздействие коррелирует с толщиной отложений: через 100–200 м (перпендикулярно направлению движения волны) она уменьшилась с 70–25 до 8–7 см, и на этом пространстве 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, прошедшего над лесом. Таяние снега на ветвях и стволах вызвало увлажнение, налипание и частичное цементирование пепла.

Детальным картированием векторов воздействия волны на древостой (по опаливанию коры) выявлена турбулентная структура волны, а также зона максимальной (скорость, температура, насыщенность песчано-пылевой фракцией) интенсивности воздействия. Установлено, что волна «прижимается» к поверхности субстрата, который обтекает волна, и интенсивность воздействия падает с высотой. Толщина и состав отложений коррелируют с уровнем интенсивности воздействия и удаления от осевой части прохождения волны.

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. О силе волны свидетельствуют изгибание скелетных ветвей, обрыв хвой и тонких ветвей, обдирание коры, заброс кусков пемзы, включая глыбы до 30 см, на десятки метров вглубь леса, вмятины на стволах от ударов летевших камней и глыб, заброс большого объема тонкой пирокластики на расстояние до 200 м и более, опаливание и обугливание стволов и ветвей.



Рис. 8. Ельник, погибший в результате прохождения пирокластической волны. На дальнем плане – возобновление ивы удской. 2012 г.

Восстановление растительности в зоне поражения пирокластическими волнами

Мы изучили 14-летний период восстановления экосистемы погибшего хвойного леса в долине р. Байдарная [9]. Наиболее впечатляющие изменения произошли за последние годы. Мертвый лес, погибший от воздействия пирокластической волны, с нижними ярусами растений, полностью погребенными толщей серо-коричневатых отложений, каким мы его увидели летом 2005 г., десятилетие спустя сильно преобразился. Поредевший частокол погибших стволов распадающегося древостоя стала окаймлять сплошная зеленая полоса плотных зарослей из молодняка ивы удской *Salix udensis* (рис. 8). Выявлено, что заросли ивняка быстро увеличиваются в размерах, смыкаются и расширяют свои пределы. Столь бурный прогресс растительного покрова на ювенильных вулканических отложениях – редкое явление. В результате нашего исследования выявлены факторы, способствующие быстрой сукцессии на первично безжизненном субстрате. Главными из них являются: благоприятный режим влажности корнеобитаемой зоны, созданной отложениями волны, ресурсы погребенной почвы, которые использует ива, и защитная роль погибшего древостоя [9].

В полосе мертвого леса шириной 150–200 м условно выделены 3 зоны: 1) полного поражения растительности, 2) разрушения, неполного поражения растительности, 3) переходная к не пострадавшему лесу, отмеченная деревьями с частично погибшей кроной (нижняя половина). В зоне 1, перекрытой мощной толщей (до 50–70 см) отложений пирокластической волны, полностью погибла как травянистая, так и древесная растительность. Несмотря на развал мертвого древостоя и, в связи с этим, обильный валеж, начавшаяся сукцессия протекала как первичная. Неблагоприятный для заселения субстрат (плотная однородная поверхность отложений пирокластической волны) на 2–3-й год начал заселяться мхами, а также сеянцами ивы удской. Мхи через 5–6 лет создали почти сплошной покров (рис. 8). В зоне 2 толща отложений волны была заметно меньше (12–25 см), поэтому кустарники, чьи побеги развились из уцелевших почек, а также дерновинные травянистые растения (вейник Лангсдорфа, иван-чай узколистный) в отсутствие конкуренции начали крайне интенсивно разрастаться, создав через 5–6 лет после извержения гипертрофированно мощный покров высотой до 2 м. В зоне 3 (2–12 см отложений) сильных изменений не происходило, но отмечено разрастание вейника в условиях разрежения древесного полога. Здесь проходила граница между выжившими и погибшими деревьями. Через 10 лет после извержения характер сукцессии радикально изменился: в зоне 1 вырос сплошной ярус мощного густого ивняка высотой до 5–7 м. Мы провели исследование корневых систем ивы и выявили, что сеянцы ивы селились на поверхности пирокластических отложений; в ходе роста их корни проникали через слой отложений, а достигнув погребенной почвы, начинали интенсивно использовать ее ресурсы, демонстрируя крайне энергичный прирост. Сукцессия, таким образом, превратилась из первичной во вторичную и резко ускорилась.

Обсуждение

Масштабы явления

Пирокластический поток и волны 2005 г. нанесли мощный удар по экосистемам юго-западного подножия вулкана. Непосредственным воздействием и отложениями они уничтожили ельники, зарастающие участки вырубок на месте ельников, долинные сероольхово-тополевые и 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, и прирусловая динамичная зона долины р. Байдарная (ниже 600 м над ур. м.). Суммарную площадь погребенного леса можно оценить величиной около 10 км². Значительная часть уничтоженного леса относится к особо ценным на Камчатке хвойным лесам (до 8 км²), в основном к ельникам (до 6 км²). Существенно, что лес погиб вдоль бортов новообразованной долины на площади около 4 км² под воздействием особо опасного и разрушительного фактора – пирокластической волны. Под воздействием волн погибла также стланиковая растительность вышерасположенного пояса на площади около 2 км². Таким образом, в долине р. Байдарная выявлено уникальное для Курило-Камчатского региона явление гибели массива хвойных. Это крупнейший массив хвойного леса, погибший от воздействия пирокластической волны в исторический период (с конца XVII столетия) в Дальневосточном регионе России.

Факторы поражения

Лесная растительность в долине Байдарной погибла под воздействием как минимум 5 разрушительных факторов. Основным, наиболее масштабным и очевидным, фактором было погребение леса многометровыми толщами пирокластического потока. Вторым – локальное заливание оснований стволов шлейфами тех же потоков; при этом стволы, как правило, перегорали и деревья падали. Третьим фактором было заливание стволов холодной переотложенной массой пирокластики, перенесенной водой, а также отложениями грязевых потоков. Деревья, у которых часть ствола была перекрыта частично сцементированными отложениями, погибли, но остались стоять. Четвертым, весьма необычным, фактором было тепловое воздействие от мощных толщ горячей пирокластики 2005 г., возникшее через 8 лет после извержения вследствие прохождения пара по наклонным каналам (горизонты древней рыхлой пирокластики) до участков разгрузки. На одном из этих участков зафиксирована гибель леса. Пятым, достаточно масштабным, фактором было поражение леса воздействием пирокластических волн.

Пирокластические волны являются низкоплотным высокотемпературным турбулентным потоком из смеси вулканических газов, воздуха и тонкой пирокластики, движущимся с высокой скоростью (десятьки метров в секунду). Известно, что пирокластическая волна вызывает повреждения в результате динамического давления на объект, высокой температуры, абразивного воздействия частиц. Динамическое давление прямо пропорционально произведению плотности волны на квадрат скорости волны. При величине давления 4–10 кПа происходит вывал большинства деревьев [13]. В ходе извержений обычно происходят механическое повреждение растений, химическое отравление, запыление асимиляционного аппарата. Однако для живых организмов (древесных растений в том числе) температура волны более критична, чем динамическое давление. Это было подтверждено в ходе наших исследований. Среди причин гибели деревьев явно доминировало опаливание стволов и крон высокотемпературными газово-песчаными шквалами. Растения не выдерживают такого мощного термического воздействия и погибают (зачастую без видимых внешних повреждений).

Угроза лесных пожаров

Извержение 2005 г. влк. Шивелуч произошло в холодное время года, в конце зимы, когда снеговой покров достиг максимальной мощности. Уязвимый для возгорания район находился на склонах вулкана и в долине р. Байдарная, где были широко распространены хвойные леса из ели и лиственницы, а также заросли кедрового стланика. Там же, ниже 300 м над ур. м., находились посадки сосны. Отмечены возгорания единичных стволов на границе леса с толщей пирокластических отложений. Кроме того, при частичном погребении оснований стволов раскаленным материалом пирокластического потока деревья перегорали и падали. Лесные пожары при этом не возникли. По следам опаливания было установлено, что температура раскаленной волны была относительно

небольшой (до 250 °С), поскольку возгораний хвойных деревьев и кедрового стланика в подлеске не наблюдалось. Помимо недостаточно высокой для возгорания температуры палящей волны, отсутствие пожаров можно объяснить несколькими причинами: 1) кратковременностью контакта; 2) низкой зимней температурой; 3) снегом, прикрывшим наиболее горючий материал; 4) движением волны сверху вниз; 5) насыщенностью раскаленной волны песчаным материалом, который сбивал пламя при возгораниях. Мы пришли к заключению, что лесные пожары в условиях влк. Шивелуч могут возникнуть только в поясе хвойных лесов (ель, лиственница, заросли кедрового стланика) в теплый и сухой летний период. Поэтому посадки хвойных (сосна) в зоне схода потоков и волн, практикуемые Ключевским лесхозом, нерациональны и создают риск лесных пожаров, которые могут возникнуть в результате извержений.

Перспективы сукцессий

В настоящее время растения, селящиеся на отложениях пирокластического потока, испытывают сильные проблемы из-за теплового стресса, ветров, пересыхания поверхности субстрата, отсутствия азота и микоризы. Субстрат должен остыть, должны начаться процессы эрозии, возникнуть локальные участки накопления органики и повышенного увлажнения (вдоль русел временных водотоков, участков задержки снегового покрова). На этих участках будут селиться и образовывать куртины и заросли растения следующего этапа освоения, включая древесные. Продвижение будет идти от краев леса. Судя по зарастанию отложений 1964 г. [6], определенного прогресса можно ждать приблизительно через 30–40 лет после извержения. Весь процесс заселения гряд отложений пирокластических потоков растительностью (предположительно, травяно-кустарниковой, с участием полянок кустарничковой и мохово-лишайниковой, отдельными деревьями) может растянуться на столетие, а восстановление коренной растительности, представленной ельниками и березняками, – на несколько столетий. Вновь образованные русла и прилегающие к ним участки являются зоной крайне высокой динамики и за столетие могут быть многократно перекрыты отложениями лахаров, водно-грязевых и пирокластических потоков. Эти участки в периоды стабилизации будут заселяться быстрорастущими лиственными деревьями и кустарниками (ольха серая, ивы, тополь и др.).

В полосе леса, погибшего от воздействия пирокластических волн, активно идет процесс восстановления. Дальнейшие этапы сукцессии – внедрение хвойных в полосу ивняка, медленный захват ими пространства и ресурсов при выходе в верхний полог. Развитие лесной экосистемы до зрелого состояния потребует смены в пределах жизненного цикла ели и лиственницы (~ 150–200 лет). Отметим, что лес, погибший в 2005 г. на террасах долины р. Байдарная, вырос на отложениях пирокластического потока, сошедшего около 380 л.н. [15].

Все предполагаемые процессы восстановления экосистем будут происходить при отсутствии столь масштабных воздействий, которые произошли 27 февраля 2005 г. Это было относительно редкое событие; извержения такого масштаба, по-видимому, происходят здесь не чаще одного раза в несколько столетий.

Заключение

Крупнейший за последние десятилетия на территории нашей страны пирокластический поток, сошедший 27 февраля 2005 г., произвел радикальные изменения в природном комплексе юго-западного склона влк. Шивелуч. Отложения потока перекрыли обширную территорию, уничтожив лесные и стланиковые сообщества, включая ограниченно распространенные на Камчатке темнохвойные леса. Мы выявили пять факторов гибели лесных сообществ: погребение леса многометровыми толщами пирокластического потока; заливание оснований стволов шлейфами тех же потоков; заливание стволов холодной

переотложенной массой пирокластики и отложениями грязевых потоков; тепловое воздействие от мощных толщ горячей пирокластики 2005 г., возникшее вследствие прохождения пара по наклонным горизонтам древней пирокластики до участков разгрузки (на одном из которых произошла гибель леса); поражение леса воздействием пирокластических волн. Горячие уже почти полтора десятилетия мощные толщи пирокластических отложений обусловили формирование здесь бедленда с почти безжизненным субстратом. Растения пытаются заселить этот специфический излучающий тепло субстрат, однако этому препятствуют жесткие условия открытых вулканогенных экотопов. Среди них недостаток минерального, в том числе азотного, питания, нестабильное обеспечение влагой, пересыхающая поверхность субстрата, отсутствие защиты от ветра, избыточной инсоляции, абразивного воздействия ледяных кристаллов и частичек пирокластики. Более уверенно заселение происходит поблизости от стен леса, там отмечено заметное количество мелкого древесного подроста, в том числе хвойных. На территории, окаймляющей пустынную зону долины р. Байдарная, произошла гибель леса вследствие воздействия пирокластических волн – мощных высокотемпературных газовой-песчаных шквалов, сопровождавших пирокластические потоки. В погибшем лесу, древостой которого заметно распадается, за минувшее десятилетие стал формироваться полог быстрорастущего подроста ивы удской, заросли которой уже достигли высоты 7 м.

Необычная вулканогенная экосистема долины р. Байдарная быстро меняется; в целом процессы сукцессий могут привести к восстановлению коренной растительности в течение нескольких сотен лет, при отсутствии новых катаклизмов. Этот интереснейший природный объект заслуживает разностороннего и систематического исследования.

Литература

1. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предвалявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4/5. С. 116–126.
2. 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.
3. Горбач Н.В., Плечова А.А., Пономарева В.В., Тембрел И.И. Эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 26 июля 2013 г. // Вестн. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2013. № 2. С. 15–99.
4. Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
5. Гришин С.Ю. Воздействие извержений вулкана Шивелуч (Камчатка) на растительный покров // Изв. Рус. геогр. о-ва. 2013. Т. 145, вып. 6. С. 17–28.
6. Гришин С.Ю., Крестов П.В., Верхолат В.П. и др. Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 46. С. 73–104.
7. Гришин С.Ю. Гибель леса на вулкане Шивелуч под воздействием палящей пирокластической волны (Камчатка, 2005 г.) // Экология. 2009. № 2. С. 158–160.
8. Гришин С.Ю. Заселение растениями поверхности горячего пирокластического потока (вулкан Шивелуч, Камчатка) // Экология. 2012. № 2. С. 156–158.
9. Гришин С.Ю., Перепелкина П.А., Бурдуковский М.Л., Яковлева А.Н. Начало восстановления лесной растительности после воздействия пирокластической волны вулкана Шивелуч (Камчатка) 27 февраля 2005 г. // Вестн. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2017. № 4. С. 28–38.
10. Гришин С.Ю. Поражение растительности в результате крупного извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 2005 г.) // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 45–52.
11. Гришин С.Ю., Комачкова И.В. Температура отложений мощного пирокластического потока 2005 г. на вулкане Шивелуч (Камчатка) и начало его зарастания // Вестн. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2011. № 2. С. 128–134.
12. Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 84–103.
13. Baxter P.J., Boyle R., Cole P. et al. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat // Bull. Volcanol. 2005. Vol. 67, iss. 4. P. 292–313.
14. del Moral R., Grishin S. Volcanic disturbance and ecosystem recovery // Ecosystems of Disturbed Ground. Ch. 5. Amsterdam: Elsevier, 1999. P. 137–160.
15. Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // Intern. J. Earth Sci. 2015. Vol. 104. P. 1459–1482.