

Формы поражающего воздействия вулканов на древесную растительность Камчатки и Курильских островов

Сергей Юрьевич Гришин[✉], Полина Александровна Перепёлкина,
Максим Леонидович Бурдуковский

*Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
Владивосток, 690022, Российская Федерация*

[✉] Автор-корреспондент, e-mail: alaid@bk.ru

Получена 15 августа 2025 г.; принята к публикации 14 ноября 2025 г.

Аннотация. На примере извержений последних десятилетий и другой вулканической активности на Камчатке и Курильских островах рассматривается ряд выявленных форм вулканического воздействия на экосистемы, эффект проявления которых может быть увязан с механическим, термическим, химическим и другими факторами поражения древесной растительности. Перечень форм воздействия сопровождается краткой информацией и иллюстрируется photographиями древесных растений и их сообществ, испытавших проявления конкретных вулканических событий.

Ключевые слова: вулканические воздействия, лавовые потоки, пирокластические потоки и волны, пеплопады, лахары, эмиссии газа, разрушение растительности, Камчатка, Курилы.

Forms of damaging effect of volcanoes on woody vegetation in Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands

Sergey Yu. Grishin[✉], Polina A. Perepelkina, Maksim L. Burdukovskii

*Federal Scientific Center of the East Asian Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation*

[✉] Corresponding author, e-mail: alaid@bk.ru

Received August 15, 2025; accepted November 14, 2025

Abstract. Drawing on eruptions of recent decades and other volcanic activities in Kamchatka and the Kuril Islands, this study identifies approximately thirty different forms of volcanic impact damaging woody plants. The mechanisms of damage are associated with mechanical effects (e. g., tephra fallout, pyroclastic density currents, lahars), thermal effects (e. g., pyroclastic surges, lava contact, red-hot bombs and lapilli), and chemical effects (e. g., acid deposition from volcanic gases and ash leachates). Most of these impact types are briefly described and illustrated with photographs of affected tree species and forest stands that experienced the consequences of specific volcanic events.

Key words: volcanic impact, lava flows, pyroclastic flows and surges, tephra fallout, lahars, gas emissions, vegetation destruction, Kamchatka, Kuril Islands.

Введение

В ходе вулканических извержений происходит вынос из эруптивных центров значительных количеств материала в виде расплава пород, взорванных обломков породы и газов. В большинстве случаев эти материалы имеют высокую температуру – до 1000 °С и выше. Извергнутые материалы на земной поверхности вступают в контакт с наземными экосистемами. При крупных извержениях огромный объём материала (десятки и сотни миллионов кубометров) приводит к погребению наземных экосистем (а в островных условиях – часто и аквальных экосистем), после чего возникает новая природная среда. На её поверхности начинаются первичные сукцессии. При ряде форм вулканического воздействия полного погребения не происходит, либо оно незначительное, однако экосистемы подвергаются мощному повреждающему воздействию (ударное кинетическое воздействие летящего, катящегося или

движущегося в водно-грязевом потоке материала, резкое давление газово-песчаной смеси, непосредственный контакт с массой движущегося материала и др.). В большинстве случаев извергающийся материал насыщен магматическими газами и имеет высокую температуру. Помимо воздействия ювенильных высокотемпературных материалов и газов, нередко воздействие оказывается ранее извергнутыми материалами, либо сторонними материалами, которые были вовлечены в динамические процессы на вулканах. Есть ряд форм воздействия, при которых вулканический материал является холодным и химически относительно инертным (обвалы постройки вулкана с последующими обломочными лавинами, лахары, замывание новых территорий размытыми и переотложенными материалами и др.). Таким образом, компоненты экосистем подвергаются интенсивному механическому, термическому и химическому воздействию, в результате которого возникают эффекты повреждения и поражения древесной растительности (Del Moral, Grishin 1999). Поскольку сильные и существенные (по критерию объема извергнутых продуктов) извержения – относительно редкие природные события, которые зачастую происходят в удалённых и труднодоступных районах, возможность изучить их последствия обычно представляется спустя месяцы, а нередко годы и даже десятилетия после их завершения. В этих условиях особенно важно изучать древесные растения, которые, испытав воздействие, несут на себе его отпечаток и позволяют реконструировать параметры вулканического нарушения экосистем. Другой важный аспект исследования биоты районов активного вулканизма – изучение устойчивости разных видов древесных растений, доминантов растительного покрова региона, к разным формам и различной интенсивности вулканического воздействия. В предлагаемой статье кратко рассмотрены основные формы вулканического воздействия и вызываемые ими факторы поражения древесной растительности на примере извержений последних десятилетий на Камчатке и Курилах.

Районы исследований

Полевые исследования проводились в районах более 20 сильных и существенных извержений, которые произошли в XX-начале XXI вв. на семи камчатских вулканах (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Толбачик, Карымский, Авачинский, Ксудач) и на четырёх курильских вулканах (Алаид – о-в Атласова, Чикирачки – о-в Парамушир, Пик Сарычева – о-в Матуа, Тятя – о-в Кунашир) (рис. 1). Помимо них изучены данные российских исследователей (главным образом, вулканологов) о воздействии на растительность и на других вулканах. Важно отметить, что последствия большинства извержений изучались нами, как правило, через несколько лет или несколько десятилетий после событий, лишь в отдельных случаях удалось застать проходившее извержение и наблюдать непосредственно некоторые формы воздействия на растительность (лавовые потоки вулканов Карымский, 1996–1998 гг. и Толбачик, 2013 г., небольшие пеплопады вулканов Ключевской, Карымский, Шивелуч, пылевые штормы на тех же вулканах, водно-грязевые потоки на вулканах Ключевской и Шивелуч, сольфатары на вулканах Менделеева (о-в Кунашир) и Эбеко (о-в Парамушир), газовые эмиссии вулканов Пик Сарычева и Эбеко). Для полноты охвата разнообразия вулканических проявлений привлечены данные по воздействиям на растительность в вулканических регионах Северной Пацифики – в тихоокеанских районах США и Японии. Далее в тексте при указании какого-либо извержения оно указывается как (Шивелуч, 1964 г.), где первое – название вулкана, второе – год извержения.



Рис. 1. Наиболее активные вулканы Камчатки и Курил.

Fig. 1. The most active volcanoes of Kamchatka and Kuriles.

Материал и методы

Основой метода был учет состояния древесных растений в зонах поражения. На трансектах и пробных площадках учитывались растения с разными формами повреждений (усыхание деревьев: изменение доли усохших/живых стволов по градиенту воздействия; обугливание, опаливание; высота опаливания по стволу, ориентация воздействия по опалинам и изгибам кроны, ствола; усыхание части кроны; облом и изгибание ветвей, части ствола, угол крена ствола и др.). При этом фиксировалось распределение вулканических отложений. Для выявления зон поражения использовались спутниковые снимки и результаты съёмки с квадрокоптера; для сравнения с ситуацией до извержения в ряде случаев применялись архивные аэрофотоснимки.

Природные условия и растительность районов исследования. Районы активного вулканизма российского Дальнего Востока находятся в широком диапазоне природных условий: от субарктических приокеанических до южно-бореальных умеренно-морских на Курилах и до северо-бореальных умеренно континентальных на Камчатке (Grishin 1995). Доминанты растительности более теплообеспеченных районов (Южные Курилы, Центральная Камчатка) представлены темнохвойными породами (*Picea jezoensis* Siebold et Zucc., *Abies sakhalinensis* (F. Schmidt) Mast., локально также *Picea glehnii* (F. Schmidt) Mast.); в Центральной Камчатке широко распространены леса из лиственницы *Larix cajanderi* Cham. В более холодных восточной и южной частях Камчатки доминирует берёза *Betula ermanii* Cham., образующая также пояс в горах центральной Камчатки и южных островов Курильского

архипелага. В наиболее холодных районах (Средние и Северные Курилы, прибрежные и горные районы Камчатки) доминантами растительного покрова становятся ольховый и кедровый стланики (*Alnus fruticosa* Pall., *Pinus pumila* (Pall.) Regel). Количество атмосферных осадков превышает 1000 мм/год на Курилах и в приокеанических частях (а также в высокогорьях) Камчатки, что в сочетании с низкой температурой воздуха означает длительное, до полугода, залегание снежного покрова. Минимальное количество осадков (< 500 мм/год) выпадает в южной половине «хвойного острова» Центральной Камчатки, что означает относительно маломощный снежный покров и периодические стрессовые условия для растительности, включая повышенный уровень пожарной опасности в хвойных лесах.

Основные формы вулканических проявлений. Это излияния лавовых потоков, пеплопады (в широком смысле, т. е. выпадение тефры; тефра – совокупность рыхлого извергнутого материала: бомб, лапилли, вулканического пепла), пирокластические потоки и пирокластические волны, обвалы вулканических сооружений и обломочные лавины, лахары, газовые эмиссии. Продукты первых четырех категорий представлены высокотемпературными материалами; материалы обвалов и обломочных лавин могут быть холодными (например, при извержении вулканов Шивелуч, 1964 г., и Безымянный, 1956 г.) и высокотемпературными (обвалы активных куполов: Шивелуч, 2010, 2023 гг.). Выпадение тонких фракций тефры (пеплопад в узком смысле) означает быстрое остывание падающего пепла, который приземляется холодным. Масса лахаров, формирующихся при контакте высокотемпературных извергнутых материалов со снегом и льдом высокогорий («горячие» лахары), может исходно иметь повышенную температуру, но при дальнейшем движении лахара его температура снижается. Материал «холодных» лахаров, образующихся при выпадении особо интенсивных атмосферных осадков или прорыве высокогорного озера на неактивном (на момент образования лахара) вулкане, имеет исходно невысокую температуру, соответствующую окружающей среде.

Результаты

Формы вулканического воздействия, приводящие к механическому повреждению и поражению древесных растений

Поражение бомбами и крупными лапилли. Вулканические бомбы (фрагменты вулканических пород размером более 64 мм) разлетаются по баллистической траектории на сравнительно небольшом расстоянии. Так, крупные бомбы (диаметром более 30 см) разлетались на расстояние до 3 км от эруптивного центра в ходе извержения Северного прорыва Толбачинского извержения (1975 г.) (Большое...1984). Они падают на землю, как правило, в раскалённом состоянии. Крупные лапилли (вулканические обломки размером 2–64 мм) могут перемещаться на расстояния десять и более километров. Падение с большой высоты и с большой скоростью приводит к ударному воздействию на кроны деревьев и стлаников. Происходит обламывание ветвей, верхушек деревьев, обдирание коры и эрозия прилегающих тканей, почек, листы, генеративных органов (рис. 2А). Ситуация усугубляется при интенсивной бомбардировке (всего около получаса в ходе плинианской стадии извержения вулкана Шивелуч в 1964 г.) (Горшков, Дубик (размер шрифта?) 1969; Гришин и др. 2000). Факторы поражения – главным образом механическое воздействие, в ограниченных случаях – термическое воздействие. Разрушения усугубляются быстрым (от нескольких часов до нескольких недель) погребением оснований стволов (ветвей, побегов), тефрой, насыщенной газами и легкорастворимыми компонентами, высвобождение

которых приводит к негативному химическому воздействию на растения и корнеоби-таемый слой почвы. Погребение почв даже относительно небольшим (10–20 см) слоем отложений заметно меняет их свойства (режимы температуры, влажности, аэрации).

Выпадение пепла из эруптивной тучи (пеплопады). Наиболее широко распро-страненный тип вулканического воздействия на экосистемы. Поражение вызывают длительные и/или интенсивные пеплопады, в результате которых нарастает мощность отложений тефры. Степень поражения древесных растений коррелирует с мощно-стью отложений. Имеется ряд факторов, которые могут влиять на критический уровень мощности, при котором происходит поражение (вид древесного растения, его размеры, жизненное состояние, сезон года, фенофазы, наличие снегового покрова, дожди в период выпадения тефры и др.). Повреждения вызывают нагрузка на крону, что влечёт за собой изгибание, облом части кроны, обрыв листвы, абразию тканей (рис. 2В). (Гришин и др. 2021). Тефра, особенно тонкозернистая, является хорошим адсорбентом газов и легкорастворимых веществ, что приводит к отравлению растений в ходе пеплопадов. Так, наблюдалось опадение листвы ольховника в разгар изверже-ния вулкана Алаид в 1972 г. (личное сообщение В. А. Костенко), хвои лиственницы в ходе Толбачинского извержения 1975 г. (Большое...1984; Гришин, Шляхов 2009). Факторы поражения – механическое воздействие, в меньшей степени – химическое воздействие и последствия от ухудшения условий местообитания.

Обвальные отложения, как горячие, так и холодные. Массы обвальных отложе-ний с большой скоростью скатываются по склонам вулкана, погребая многометро-выми толщами растительность на обширных территориях (до нескольких десятков квадратных километров). Отложения могут быть как холодными, так и горячими, как результат обрушения построек вулкана, или же активных куполов, соответственно. За последние 65 лет на Камчатке произошло шесть масштабных обвалов. Пострадав-шая растительность находится на контакте с обвальными отложениями, представля-ющими навал из грубообломочных отложений (рис. 2С). Деревья на контакте накре-нены, сломаны, надломлены, некоторые вырваны с корневой системой; стволы несут следы мощного воздействия – обломанную древесину, ободранную кору (Шивелуч, 1964 г.). При обширной территории погребения леса количество стволов на контакте может составлять несколько тысяч. Фактором поражения является исключительно механическое воздействие. Осложняющим фактором может быть резкое измене-ние мезорельефа в зоне контакта, вызывающее эффект «пьяного» леса (Шивелуч, 1964 г.), а также ухудшение условий произрастания деревьев, у которых произошло погребение оснований ствола.

Воздействие пирокластических волн. Отмечено в ходе ряда извержений вулканов Камчатки и Курил (Шивелуч, Безымянный, Кизимен, Пик Сарычева и др.). Пиро-кластические волны – скоростные высокотемпературные потоки из газов и тонкого пирокластического материала. Они являются вариацией пирокластического потока (и фактически его частью, окаймляя зону прохождения пирокластического потока), отличаясь пониженным содержанием твердого материала и движением часто неза-висимо от рельефа. Погребения лесной и стланиковой растительности отложениями волн не происходит, но скоростное прохождение турбулентного раскаленного вихря через лес приводит к механическому и термическому воздействию на деревья. Так, при извержении вулкана Шивелуч в феврале 2005 г. погибшие деревья в хвойном лесу имели существенные повреждения: изгибание и облом скелетных ветвей, обдирание коры, вмятины на стволах от ударов летевших камней и глыб (рис. 2Е), обрыв хвои и тонких ветвей, а также опаливание и обугливание коры (Гришин и др. 2017).

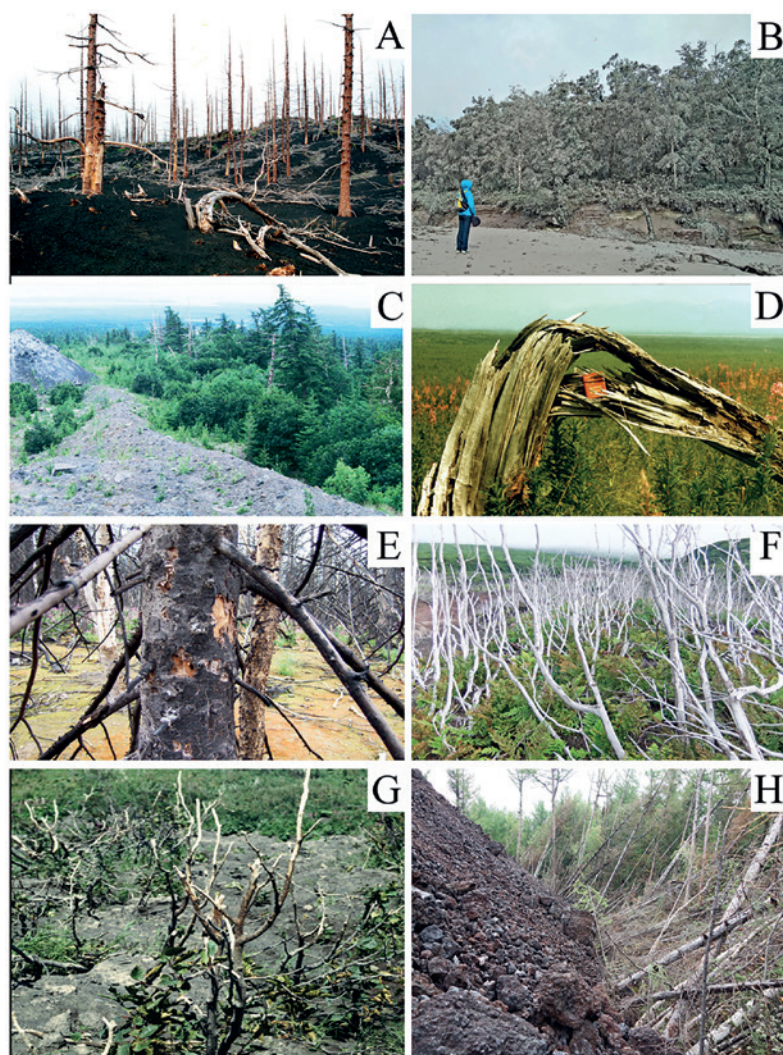


Рис. 2. А – Лес из лиственницы после длительного воздействия градом лапилли (Толбачик, 1975 г., фото 1998 г.). В – Лес из берёзы каменной после пеплопада (Шивелуч, извержение 29.08.2019, фото 30.08.2019). С – Отложения обломочной лавины на контакте с лесом (Шивелуч, 1964 г., фото 1995 г.). D – Берёза каменная, сломанная воздействием извержения (Безымянный, 1956 г., фото 1998 г.). E – Кора ели, разбитая крупными фрагментами пород при прохождении пирокластической волны (Шивелуч, 2005 г., фото 2008 г.). F – ольховник, ободраный лахаром (Пик Сарычева, 2009 г., фото 2010 г.). G – ольховник, ободраный обломками вулканических взрывов и цунами (Карымское озеро, извержение и фото 1996 г.). H – Лиственницы на контакте с лавовым потоком (Толбачик, 2012 г., фото 2013 г.). Фото А. Г. Лазарева (В), А. Б. Белоусова (D), С. Ю. Гришина (С, E–H).

Fig. 2. A – Larch forest after prolonged lapilli bombardment (Tolbachik, 1975, photo from 1998). B – *Betula ermanii* forest after tephra fallout (Shiveluch, eruption on August 29, 2019, photo from August 30, 2019). C – Debris avalanche deposits at the forest boundary (Shiveluch, 1964, photo from 1995). D – *Betula ermanii* tree broken by eruptive activity (Bezymianny, 1956, photo from 1998). E – Spruce bark shattered by large rock fragments during a pyroclastic surge (Shiveluch, 2005, photo from 2008). F – *Alnus fruticosa* stripped by a lahar (Sarychev Peak, 2009, photo from 2010). G – *Alnus fruticosa* stripped by volcanic explosion debris and tsunamis (Karymsky Lake, eruption and photo from 1996). H – Larch trees at the contact with a lava flow (Tolbachik, 2012, photo from 2013). Photos by A. G. Lazareva (B), A. B. Belousov (D), S. Yu. Grishin (C, E–H)

Воздействие пирокластической волны направленного взрыва. Редкое, но особо масштабное и катастрофическое по последствиям природное явление. Произошло в ходе извержения вулкана Безымянный на Камчатке в марте 1956 г. и вулкана Сент-Хеленс (США) в мае 1980 г. На Безымянном на расстоянии 10 км от центра извержения стланиковая растительность, прикрытая мощным снежным покровом, была буквально содрана вместе с почвенным покровом. На расстоянии ~20 км волна, движущаяся со скоростью > 60 м/с (Белоусов, Белоусова 2000), снесла лес, ломая деревья берёзы каменной диаметром до 50–80 см (рис. 2D). Остались только пни, высота которых с удалением от вулкана увеличивалась. В складках рельефа, экранированных от прямой экспозиции источнику взрыва, уцелели невысокие древесные растения (кустики стлаников, подрост деревьев) (Гришин 2019). На расстоянии около 29 км деревья устояли, но погибли уже вследствие термического воздействия. Таким образом, на обширной территории воздействия пирокластической волны (500 км²) древесная растительность была уничтожена (снесена) мощным механическим воздействием, а там, где оно ослабло – погибла от термического воздействия (Горшков, Богоявленская 1965; Белоусов, Белоусова 2000). На вулкане Сент-Хеленс масштабы вывала леса были еще больше, а стволы устоявших хвойных деревьев имели вмятины от ударов летящих камней; глубина вмятин коррелировала с расстоянием от центра извержения (The 1980 Eruptions... 1981).

Воздействие лахаров. Лахары – водогрязекаменные потоки, вулканогенные сели; образуются во время извержения, обычно при контакте высокотемпературных вулканитов и снежного (ледового) покрова. «Холодные» лахары возникают и в межэруптивный период, при контакте водных масс (особо интенсивные дожди, прорывы горных озёр и т. п.) и обширных толщ рыхлых отложений вулкана. Водно-грязевая масса лахара с высокой скоростью сходит по руслу на склонах вулкана и растекается широким шлейфом на пологих подножиях. В руслах происходит обдирание дна и бортов русла, иногда до скальной основы, весь почвенный и растительный покров там срывается; остаётся лишь полоса погибшей древесной растительности с ошкуренными и ободранными стволами (рис. 2F), отделяющая зону полного разрушения в русле от неповреждённой растительности на более высоких склонах. Ниже, в зоне выполаживания рельефа, лахар замедляется, растекаясь широким шлейфом; отложения погребают территорию этой зоны сравнительно маломощным слоем из грязи, глыб, снега, льда, древесных стволов и обломков. При относительно невысоком содержании твёрдого вещества в массе лахара он может пройти через участки лесной растительности, как водный поток, оставив на стволах грязевые следы, содранную кору, обломанные ветви и другие повреждения. Нередко лахар забрасывает на деревья небольшие глыбы, которые застревают между ветвей на высоте до 2 м над землей. Таким образом, воздействие лахаров на древесную растительность является преимущественно механическим, а диапазон воздействия меняется от погребения/уничтожения отложениями, через ряд, меняющийся по интенсивности воздействия, до умеренного разрушения и частичного повреждения деревьев и стлаников. Даже в зоне полного погребения начавшаяся сукцессия имеет, по-видимому, характер вторичной, поскольку на поверхности отложений остается немало растительных фрагментов, захваченных лахаром, включая диаспоры растений, а также компонентов почвенного покрова, вкрапленных в отложения.

Воздействие на растительность вулканогенных цунами. Сравнительно редкая форма вулканического воздействия. Цунами возникло в ходе извержения вулкана Севергина (о-в Харимкотан, Курилы) в 1933 г. (Мархинин 1967). В миниатюре

явление наблюдалось на оз. Карымское в ходе подводного извержения в январе 1996 г. (Белоусов, Белоусова 2011). На озере Карымское волны цунами, образованные мощными подводными взрывами, обрушились на близлежащий берег и содрали со склона растительный покров, в котором доминировал ольховый стланик (Grishin et al. 2000). Воздействие на древесную растительность было, безусловно, механическим, но специфика этого события в том, что растительность была поражена (рис. 2Г) одновременно и цунами (водой с глыбами льда), а также, видимо, глыбами породы со дна озера, и глыбами льда, вынесенными взрывами и разлетевшимися на сотни метров от центра извержения.

Воздействие лавовых потоков. Лавовые потоки масштабно воздействовали на лесную и стланиковую растительность на вулканах Ключевской и Толбачинский, а также, но в значительно меньшей степени – на курильских вулканах Алаид, Пик Сарычева, Сноу и др. Лавовые потоки, растекаясь на значительной территории, мощной толщей полностью покрывают древесную растительность, включая высокоствольные леса, меняя и рельеф местности. Поэтому обсуждается состояние деревьев только на контакте с лавой. Воздействие в основном механическое, напоминающее эффект обвалных отложений, но с частыми следами термического поражения. Подножия деревьев были погребены лавовой осыпью и глыбами, большая часть стволов наклонена (рис. 2Н), часть опалена. Некоторые были переломлены или перегорели в комле. Выявлено, что в большинстве случаев (73.3%) контакт с лавой вызвал гибель деревьев. Большинство погибших деревьев были сильно повреждены механически.

Воздействие взрывных осколков и разлетевшихся фрагментов горной породы. Случается в ходе извержений при взрывах разной природы (магматических, фреатомагматических, фреатических, метановых), в результате которых происходит разлёт обломков породы. Воздействие бывает на относительно близком расстоянии (десятки метров – первые сотни метров). Примеры: взрывы на северном склоне вулкана Тятя (о-в Кунашир) в 1973 г. (Мархинин 1985), взрывы на оз. Карымское в ходе подводного извержения в январе 1996 г. (разлёт обломков породы по баллистической траектории), метановые взрывы возле лавовых потоков Толбачинского извержения 2012–2013 гг. (Гришин 2015).

Эродирующее воздействие вторичного переноса частиц пирокластики. Широко распространенная и масштабно проявляющаяся форма воздействия. Для древесных растений в первую очередь влияет на листья, почки, молодые побеги с тонкой корой. Листья становятся жёлтыми, бурыми, отчасти перфорированными, верхушки древесных побегов на высоте 1–2 м теряют кору, обточены и засыхают. Ухудшает жизненное состояние молодых растений. Как правило, явление возникает на контакте стены древесной растительности с открытой вулканической пустыней, представленной обширными полями пирокластики, где возникают сильные ветры, нередко сопровождаемые небольшими смерчами (вулкан Чикурачки – о-в Парамушир, вулкан Алаид – о-в Атласова, камчатские вулканы Шивелуч, Толбачик, Ключевской, Карымский и др.). Зимой происходит перенос частиц тефры по снегу и насту.

Термическое воздействие

Поражение на контакте с раскаленными лавовыми потоками: возгорание и обугливание древесных растений. Взаимодействие высокотемпературного материала лавового потока при контакте с деревьями имеет сложный характер, как было изучено нами на обширных лавовых потоках Толбачинского извержения, вторгшихся

в декабре 2012 г. на несколько километров в лесную зону. В ходе учёта состояния стволов на контакте с лавой 2012 г. на вулкане Толбачик выявлено, что около 25% стволов имеют признаки термического воздействия – опал коры и древесины, следы опаливания крон, обугливание и перегорание стволов. Часть стволов загоралась. Пожаров при этом не возникало: горение в зимних условиях достаточно быстро прекращалось из-за погребения лавой надвигающегося фронта потока (Гришин и др. 2015).

Опаливание, обжигание, обугливание стволов (рис. 3А) и крон деревьев, а также стлаников и кустарников происходило и в период Толбачинского извержения 1975–1976 гг., которое имело два центра и обширные зоны излияний (общей площадью 45 км²). Возгорания деревьев и кустарников летом 1975 г. случались неоднократно, при этом лава Северного прорыва поджигала деревья лишь до определённых пределов от центра излияния; при движении лавы далее вниз возгорания уже не отмечались (Большое... 1984). Лавовые потоки внедрялись в лесной пояс в ходе извержений вулкана Ключевского (извержения 1932, 1938, 1946, 1951 и 1966 гг.), поражая леса из берёзы каменной и заросли стлаников, преимущественно ольховника. На Курилах воздействие на стланиковую растительность было отмечено на очень небольших территориях (извержение вулкана Алаид, 1972 г., вулкана Пик Сарычева, 1976 и 2009 гг.).

Погребение шлейфами пирокластических потоков. Пирокластические потоки – одни из наиболее опасных и разрушительных вулканических явлений. Мощный тяжело нагруженный раскалённой пирокластикой вихрь стекает с большой скоростью по понижениям рельефа, обычно по руслам, разрушая все на своем пути и погребая многометровыми толщами. Отложения потока 2005 г. на вулкане Шивелуч превысили по мощности 50 м и остаются (в толщах) горячими 20 лет после извержения. На периферии обширного поля отложений пирокластики мощность ее выклинивается и сходит на нет. При малой мощности (~1–2 м) стволы, захлестнутые раскалёнными отложениями (рис. 3В), подвергались сильному термическому воздействию, даже если стволы не перегорали. Фактором поражения, помимо погребения основания дерева, был и раскалённый газово-песчаный вихрь, который воздействовал на всё дерево, включая ветви и хвою у елей.

Воздействие пирокластических волн. Волны – более динамичный и газонасыщенный вариант пирокластических потоков, с меньшим содержанием твёрдого материала. Они сопровождают потоки, являясь их краевой частью, либо двигаясь как облако над ними. Поскольку они очень подвижны, они могут отрываться от потоков и двигаться самостоятельно, преодолевая некоторые препятствия рельефа.

Несмотря на то, что волны оставляют значительно меньшее количество отложений по сравнению с пирокластическими потоками (как правило, от нескольких сантиметров до первых десятков сантиметров), высокая температура (сотни градусов) и насыщенность раскалённым пеплом делают волны смертельно опасными для всех живых организмов. По полученным нами данным, (извержения вулкана Шивелуч 2005 и 2010 гг.) наиболее интенсивное действие волны (насыщенность твердым материалом, давление и температура) проявляется с приближением к поверхности земли (волна «прижимается» к земле). Изучен диапазон воздействия от максимального до минимального. В зоне максимального воздействия отмечены высокий уровень отложений (более 20 см), сильное механическое и сильное термическое воздействие, оставляющее следы опаливания на коре ствола (рис. 3С) и ветвей. Последние также обильно покрыты тонкими отложениями волны (рис. 4D). В зоне минимального

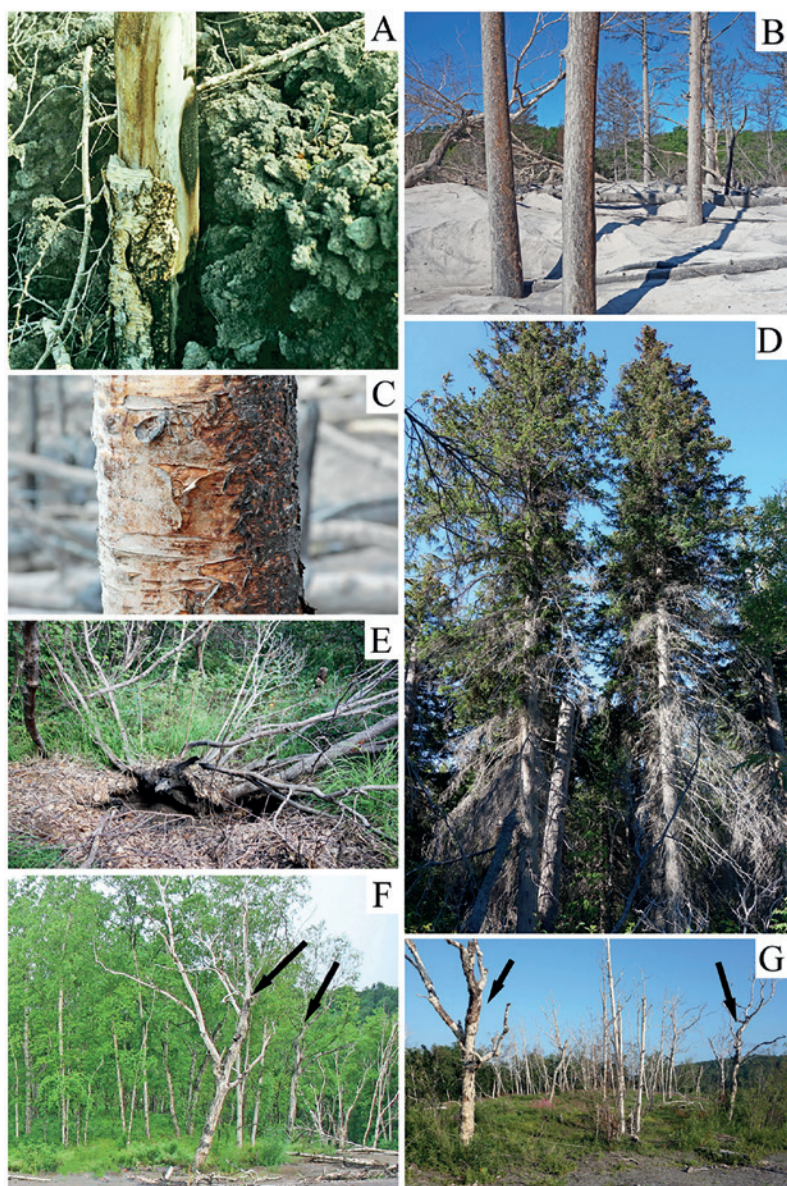


Рис. 3. А – Берёза каменная, опаленная и обугленная на контакте с лавовым потоком (Толбачик, 1975 г.). Фото 1985 г. В – Стволы лиственниц частично погребены горячими отложениями; кора опалена (Шивелуч, 2023 г.). Фото 2023 г. С – Кора берёзы каменной опалена пирокластической волной (Шивелуч, 2005 г.). Фото 2005 г. D – Нижняя половина крон елей погибла вследствие опаливания пирокластической волной (Шивелуч, 2005 г.). Фото 2014 г. E – Ветви ольховника, обугленные в струе пламени горевшего метана (Толбачик, 2012 г.). Фото 2013 г. F, G – Лес из берёзы каменной, погибший вследствие подземного нагрева почв (Шивелуч). Фото 2009 и 2017 гг. Стрелки показывают одни и те же деревья. Фото С. Ю. Гришина.

Fig. 3. A – *Betula ermanii* scorched and charred at the contact with a lava flow (Tolbachik, 1975). Photo taken in 1985. B – Larch trunks partially buried by hot deposits; bark scorched (Shiveluch, 2023). Photo taken in 2023. C – *Betula ermanii* bark scorched by a pyroclastic surge (Shiveluch, 2005). Photo taken in 2005. D – The lower half of the spruce tree crowns died from scorching by a pyroclastic wave (Shiveluch, 2005). Photo taken in 2014. E – *Alnus fruticosa* branches charred in a methane flame jet (Tolbachik, 2012). Photo taken in 2013. F, G – *Betula ermanii* forest killed by subsurface soil heating (Shiveluch). Arrows indicate the same trees. Photos by S. Yu. Grishin.

воздействия отсутствуют следы механического воздействия, почти не видны следы термического воздействия, отмечено небольшое количество отложений на деревьях. Погибшие и выжившие деревья отделяет довольно резкая граница, причём у деревьев, последних по профилю падения интенсивности воздействия, контактирующих с первыми внешне неповреждёнными живыми деревьями, как правило, большая часть кроны (обычно нижняя часть – от 1/3 до 3/4) погибает, а верхняя остаётся живой (рис. 3Д).

Поражение раскаленными бомбами и крупными лапилли. Выпадение крупного магматического материала на небольшом расстоянии от эруптивного центра приводит к тому, что пластичные раскалённые бомбы не успевают остыть во время полета, и лишь покрываются тёмной остывающей коркой, которая трескается при ударе о землю, открывая светящуюся красным раскалённую массу. Такие бомбы могут воспламенять древесную растительность, как отмечено при извержении прорыва Туйла, возникшего на склоне вулкана Ключевской в 1932 г. (Новограбленов 1933). Засыпание оснований стволов горячими лапилли могут привести к поражению и гибели древесных растений. Зафиксированных свидетельств нет, но очень вероятно, что такие ситуации возникали также при извержениях вулканов Ключевской в 1938 и 1951 гг., Толбачик в 1975–1976 гг., Алаид в 1972 г., Тятя в 1973 г., Пик Сарычева в 1946 г.

Воздействие теплового излучения из латерального эруптивного центра. Когда эруптивный центр находится в пределах пояса древесной растительности, непрерывно действующие эксплозии, которыми выносятся обычно бомбы и тефра, представляют собой мощный локальный источник теплового излучения. Такие ситуации возникали при извержении Ключевского вулкана в 1932, 1938, 1951 гг., вулкана Алаид в 1972 г., вулкана Тятя в 1973 г., Северного и Южного прорывов Толбачинского извержения в 1975–1976 гг. Так, очевидец извержения 1932 г. отмечал сильное тепловое излучение от кратера, при этом листва берёз в радиусе 500 м пожелтела (Новограбленов 1933); в этих же пределах деревья погибли, как было выяснено более полувека спустя (Гришин 2007). В последнем случае, несомненно, присутствовал фактор механического, и, весьма вероятно, химического воздействия.

Воздействие теплового излучения метановых возгораний. Сравнительно редкое явление, зафиксированное на Камчатке впервые у края лавовых потоков Толбачинского извержения 2012–2013 гг. Погребённая раскаленной лавой древесина в процессе пиролиза генерировала метан, который по подземным трещинам в подстилающей древней лаве (возраста ~ 1000 лет) выходил за пределы зоны погребения и либо взрывался (в смеси с воздухом), либо выгорал, опаливая и обугливая (рис. 3Е) древесную растительность (Гришин 2015). Явление так широко распространено при излиянии жидких базальтовых лав на Гавайских островах, что было включено в список опасностей для туристов (Heggie 2009).

Воздействие на древесную растительность через прогрев субстрата вследствие прохождения подземного теплового потока. Уникальное явление, изученное нами на вулкане Шивелуч (Камчатка): выявлен случай поражения лесной растительности, находящейся вне прямого контакта с материалом вулканического извержения, причем через восемь лет после извержения. В результате извержения 2005 г. высокотемпературная 50-метровая толща отложений пирокластического потока погребла одно из старых русел р. Байдарная. Взаимодействие мощной раскаленной толщи и подтекающих под нее грунтовых вод генерировало перегретый пар, который под давлением нашел себе выход через подземные горизонты древней

базальтовой тефры, выходящие в прирусловых склонах. Пар прошел по этим горизонтам (лежавшим до извержения в грунте на глубине несколько метров) перпендикулярно руслу на расстояние в несколько сотен метров. Участок разгрузки пара по условиям рельефа оказался на краю долины под зрелым лесом из берёзы каменной (рис. 3F). Выявлено, что разгрузка началась в 2013 г. и вызвала прогрев субстрата над горизонтами тефры, включая почвенный профиль. Нагрев корнеобитаемого горизонта привел к гибели древесные растения (в первую очередь деревья) в 2014 г. К 2017 г., вероятно, после частичного разрушения грибами корневых систем стволы деревьев вывалились (рис. 3G). В августе 2018 г. температура почвы на глубине 0.5 м достигала 50 °C; структура растительности на участке разгрузки была связана со степенью нагрева субстрата: от мертвого покрова над каналом прохождения пара до малоизмененного травяно-кустарникового покрова на слабо прогретых окраинах участка.

Химическое воздействие

Вынос большого количества химических веществ происходит в ходе всех извержений, а также в межэруптивный период. Полевые исследования требуют специального оборудования для учета эмиссии газов, сбора образцов и лабораторного анализа. Нами эти исследования не проводились, однако была описана одна из форм поражения, явно связанная с химическим воздействием. Остальные формы кратко перечислены по публикациям вулканологов и экологов, исследовавших данный аспект на вулканах мира.

Газы и легкорастворимые вещества, поступающие в экосистемы вместе с тефрой. Массовая форма поступления химических веществ в экосистемы. Тефра, особенно тонкозернистая, содержит значительное количество водорастворимых компонентов, сорбированных на поверхности частиц пепла (Товарова 1958). Даже при умеренном пеплопаде (5–10 см отложений тефры) у некоторых древесных растений, как у берёзы каменной и кедрового стланика в ходе Толбачинского извержения 1975–1976 гг., происходит опад листвы и смена хвои (Быкасов 1981). При выпадении большого количества тефры (слоем в десятки сантиметров), листва или хвоя деревьев и кустарников желтеет и опадает в разгар вегетативного сезона. Сами древесные растения (по крайней мере, их значительная часть), затем погибают. Здесь добавляется фактор механического воздействия, а также фактор ухудшения условий местобитания. Явление зафиксировано при извержении вулкана Алаид (о-в Атласова) в 1972 г. (листва ольховника пожелтела и опала, по наблюдениям В. А. Костенко (Гришин и др. 2009)) и Толбачинского извержения 1975–1976 гг., когда летом 1975 г. хвоя лиственницы пожелтела и опала (Большое ... 1984), но, вероятно, бывает выражено повсеместно, при всех существенных пеплопадах.

Газы эруптивного облака и формируемые ими кислотные дожди. В ходе извержений выносятся огромное количество газов. При крупнейших извержениях зафиксированы колоссальные выбросы газа; например, в ходе Толбачинского извержения 1975 г. было вынесено 1.6 млн т (Большое... 1984), а при извержении вулкана Пинатубо (Филиппины) в 1991 г. – 20 млн т (Guo et al. 2004). Большинство из них эруптивным столбом уносится в атмосферу и рассеивается там на огромной площади. Однако некоторая их часть попадает в наземные экосистемы (непосредственно, а также с туманами, низкой облачностью и осадками, особенно моросящими). В некоторых случаях, поражение лесной растительности может быть масштабным, как в ходе извержения вулкана Miyake-jima в Японии в 2000 г. (Kamijo, Hashiba 2003).

Газовые эмиссии из кратеров в периоды между извержениями. Относительно редко фиксируемое явление на Камчатке и Курилах. Выявлено на склонах вулкана Пик Сарычева (о-в Матуа, Курилы); произошло летом 2007 г., в результате заросли ольхового стланика погибли на площади $\sim 1.5 \text{ км}^2$ и пострадали на существенной территории острова (Гришин 2013). Поражение нанесено облаком двуокиси серы, которое в условиях безветрия и, возможно, тумана скатилось из кратера и зависло на склоне, трансформировавшись в аэрозольное облако серной кислоты. Воздействие вызвало масштабную дефолиацию и затем гибель древесной растительности (рис. 4 В). Подтверждением в ходе работ в 2010 г. были наблюдаемые на склонах конуса растения с пораженными листьями (рис. 4А) и периодически наблюдаемые интенсивные парогазовые выносы из кратера, сопровождаемые резким запахом сернистого газа (запах отмечался, как правило, выше 400 м над ур. м., на расстоянии до 3 км от кромки кратера). Аналогичное поражение ольховника отмечено в 2006 г. на склонах вулкана Августин (Алеутские о-ва) (<http://www.avo.alaska.edu/images/image.php?id=10885>). Интенсивность даже рядовых эмиссий может быть весьма высока: запах сернистого газа из кратера вулкана Эбеко (о-в Парамушир) мы чувствовали на расстоянии 15 км, находясь на соседнем острове Шумшу в августе 2004 г. На Гавайских островах вулканический смог (vog), образующийся в результате взаимодействия SO_2 с кислородом воздуха и водяным паром при участии солнечного излучения, повреждает растительность и является объектом постоянного мониторинга (Nelson, Sewake 2008).

Газы сольфатар и фумарол – постоянный источник поступления газов в экосистемы активных вулканов. Из-за ограниченного объема поступающих газов воздействие достаточно локально (десятки метров–первые километры от источника), как показано на примере сольфатарного поля вулкана Менделеева на острове Кунашир (Ворошилов, Сидельников 1978). Типично образование стабильной концентрической структуры растительности вокруг источников загазованности. Но в отдельных случаях вынос газа может иметь разрушительный характер. Так, сильные ветры тайфуна «Робин» вынесли в августе 1994 г. газы из зоны фумарол вулкана Кудрявого (о-в Итуруп) и повредили растительность в полосе шириной $\sim 500 \text{ м}$ (Соловьев 1995). Ранее (в 1946 г.) там же зафиксированы обширные заросли мертвого кедрового стланика, по мнению автора, погибшие от химического воздействия (Ефремов 1951).

Газы, выделяющиеся при взаимодействии раскалённой лавы и пирокластики с морской водой. На Гавайских о-вах выявлено, что при контакте лавы с морской водой происходят химические реакции с образованием соляной кислоты. В результате, над местом контакта поднимается мощный столб пара, обогащенного HCl (pH 1.5–2.0) и солёностью, превышающей солёность морской воды в 2–3 раза (Sutton, Elias 1993). В условиях Курил за последнее столетие произошло четыре извержения с истеканием лавовых потоков в море (Гришин 2015), причем одно извержение длилось 3.5 года (вулкан Сноу – о-в Чирпой, 2012–2016 гг.); в ходе шести извержений в воду поступали горячие отложения пирокластических потоков. Воздействие образовавшихся при этом газов на наземную растительность было, по-видимому, локальным.

Газы, поступающие из глубин через трещины в почву. Описаны у подножия потухшего вулкана Mammoth в Калифорнии, США, где участками погиб хвойный лес; исследования показали, что это результат выноса CO_2 через глубинные трещины в почву и воздействия газа через корневые системы на хвойные деревья, что вызвало их гибель (Farrar et al. 1995). Некоторая аналогия наблюдается в «Долине смерти»

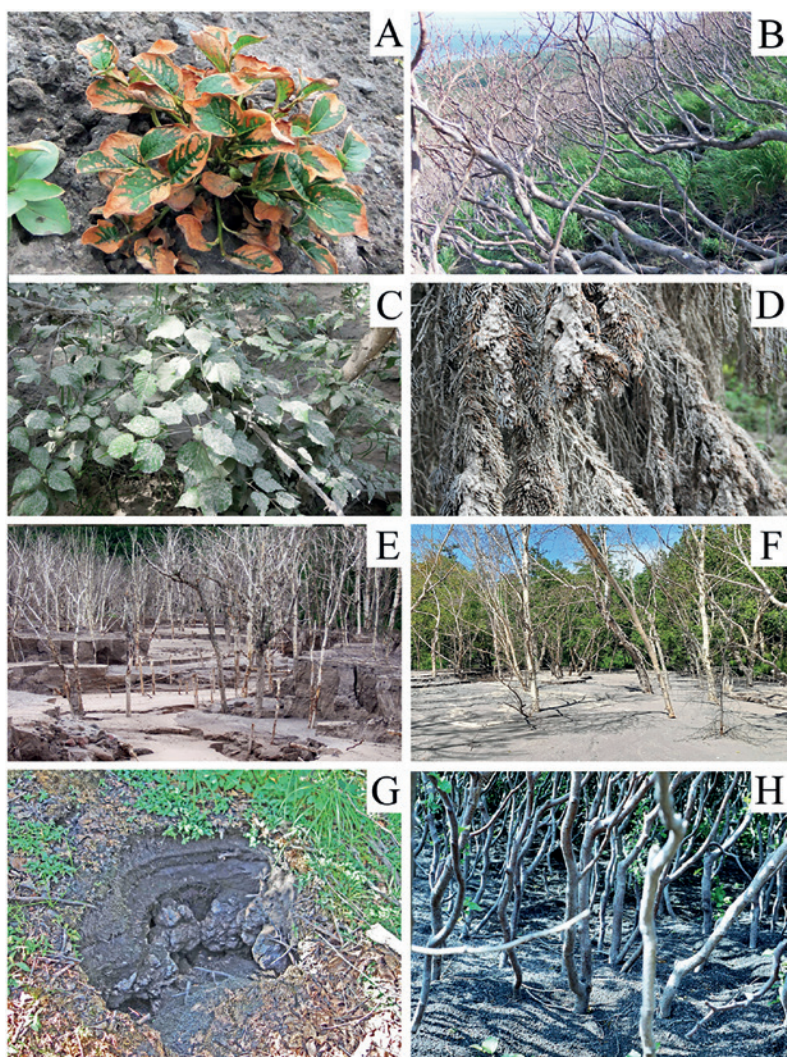


Рис. 4. А – Ива Накамуры *Salix nakamura*; листья пострадали от выносов сернистого газа (Пик Сарычева). Фото 2010 г. В – ольховник, погибший в 2007 г. от воздействия сернистого газа (Пик Сарычева). Фото 2010 г. С – Запыление листьев берёзы плосколистной *Betula platyphyla* Sukacz. в лесу пылевыми штормами (Шивелуч, 2023 г.). Фото 2023 г. D – Пепел пирокластической волны на ветвях погибшей ели (Шивелуч, 2005 г.). Фото 2005 г. E, F – Берёзовый лес, погибший вследствие частичного погребения размытой и переотложенной пирокластикой (Шивелуч, 2005 и 2023). Фото 2008 и 2024 г. G – Воронка метанового взрыва, около 1 м в поперечнике и 0.5 м в глубину (Толбачик, 2012 г.). Фото 2013 г. H – Стволики ольховника, подвергающиеся ветровой абразии и частичному погребению тефрой (Чикурачки, 1986 г.). Фото 2003 г. Фото F – П. А. Перепёлкиной, остальные – С. Ю. Гришина.

Fig. 4. A – *Salix nakamura* leaves damaged by sulfur dioxide emissions (Sarychev Peak). Photo taken in 2010. B – *Alnus fruticosa* died in 2007 due to sulfur dioxide exposure (Sarychev Peak). Photo taken in 2010. C – *Betula platyphyla* Sukacz. leaf dusting from ash storms (Shiveluch, 2023). Photo taken in 2023. D – Pyroclastic surge ash on the branches of a dead spruce (Shiveluch, 2005). Photo taken in 2005. E, F – Birch forest died due to partial burial by eroded and redeposited pyroclastics (Shiveluch, 2005 and 2023). Photos taken in 2008 and 2024. G – Methane explosion pit, approximately 1 m in diameter and 0.5 m deep (Tolbachik, 2012). Photo taken in 2013. H – *Alnus fruticosa* stems subjected to wind abrasion and partial burial by tephra (Chikurachki, 1986). Photo taken in 2003. Photo F by P. A. Perepelkina, others by S. Yu. Grishin.

в Кроноцком заповеднике на Камчатке, где была отмечена высокая концентрация CO_2 , приводящая к гибели животных (Карпов и др. 1983). Ботаник В. Ю. Баркалов (личное сообщение) наблюдал на Курилах два труднообъяснимых явления: непрерывное затухание разводимого костра в локальной низине у подножия вулкана Немо (о-в Онекотан), и взрыв разведённого костра на западном склоне вулкана Эбеко (о-в Парамушир). Эти случаи, возможно, связаны с просачиванием из недр углекислого газа в первом случае и метана – во втором.

Сопутствующие факторы повреждения и поражения растительности

Сопутствующие факторы являются следствием извержений, иногда опосредованными, иногда удалёнными во времени от активных проявлений вулканизма. Как правило, усугубляют негативное воздействие трех перечисленных выше факторов. Кратко перечислим их.

Запыление листьев, хвои, ветвей, стволов тонкозернистой тефрой (пирокластикой) (рис. 4А). Возникает как во время извержения, так и в межэруптивный период (следствие переноса и переотложение вулканической пыли в ходе сильных ветров в районах, контактирующих или близких к открытым вулканическим пустыням; происходит, как правило, в бесснежный период). Приводит к угнетению физиологического состояния растений, снижению фотосинтеза и др.

Налипание и частичное цементирование тонкой тефры на ветвях и стволах деревьев и кустарников. Возникает в условиях морозящих осадков, приводит к изгибанию крон деревьев, облому ветвей, по-видимому, ухудшает физиологическое состояние растений. Тефра на ветвях и изгибание стволов молодых деревьев могут сохраняться годами; это наблюдалось С. Ю. Гришиным через три года после сильного пеплопада, в зоне отложений 5–10 см тефры (Толбачик, 1975 г.). Другой вариант – тонкий материал пирокластической волны, который в зимних условиях, при участии снега, захваченного вихрем волны и превращенного в брызги воды, также закрепляется на кронах (рис. 4D).

Изменение эдафических условий (аэрация, режимы температуры, влажности, промерзания и оттаивания почв). Следствие аккумуляции значительных толщ тефры (десятки сантиметров), отложенной во время пеплопадов.

Замывание и погребение оснований стволов деревьев и стлаников переотложенной пирокластикой. Происходит посредством временных (сезонных) водотоков (рис. 4Е, 4F). Возникает через некоторое время (от нескольких месяцев до нескольких лет) после извержения. В зависимости от масштаба извержения и величины вулканического сооружения, территория зоны воздействия может составлять ~1 км² (Чикурачки, 1986 г., Шивелуч, 2005 г., Жупановский, 2015 г.), в отдельных случаях достигая ~20 км² (Безымянный, 1956 г.).

Образование воронок метановых взрывов, приводящее к разрушению почвенного и растительного покрова, локальному повреждению и гибели древесных растений (рис. 4G). Явление, сравнительно редкое в наших условиях, отмечено возле лавы извержения 2012 г. вулкана Толбачик (Гришин 2015). Широко распространено на вулканах Гавайских о-вов и, возможно, в других районах обширных базальтовых излияний, где лавы контактируют с древесной растительностью (Heggie 2009).

Погребение растительного покрова переотложенными вулканическими отложениями вследствие эрозии, дюнного эффекта, пылевыми вихрями. Эффект не столь сильно выражен, поскольку возникает без посредства водотоков, но происходит на значительных пространствах (рис. 4H).

Обсуждение

Другие формы воздействия на древесную растительность вулканических районов. Мы не учитывали такие распространённые на вулканах формы воздействия на растительность, как деятельность «сухих» рек – явление, затрагивающее обширные участки подножий активных вулканов. Сюда же можно включить оползни на склонах вулканов, возникновение молний в электризованном облаке тефры, и вызываемые ими возгорания леса; последствия сольфатарной и гидротермальной деятельности. Все они являются вторичными, по отношению к вулканизму, и в той или иной степени опосредованными явлениями, не говоря о морских цунами, являющихся следствием сейсмических событий, эпицентр которых находится вне суши. Мы специально остановились на этом, поскольку ряд из этих явлений включался в перечень вопросов, изучаемых в рамках проблемы «вулканизм и растительность» (Манько, Сидельников 1989), с чем вряд ли можно согласиться. Не учитывалось нами также воздействие на растительность изменений условий среды, возникших вследствие извержений, таких как изменение рельефа (образование складок в мезорельефе: извержение Безымянного в 1956 г., Шивелуча в 1964 г.), разрушение и гибель древесной растительности в очагах эрозии (Шивелуч, 2005 г.), подтопление растительности водами озёр, образовавшимися из-за подпруживания долин горных рек извергнутыми отложениями (Кизимен, 2010–2013 гг., Шивелуч, 2010, 2023 гг.) и др.

Факторы поражения, доминирующие при различных формах вулканических проявлений. Оценка роли факторов поражения растительности показывает, что, как правило, они действуют совместно, но при выраженном доминировании какого-либо фактора, либо вклад факторов меняется при разном уровне воздействия (разном удалении от центра извержения). Так, выше было показано, что в результате сильного пеплопада к нескольким десяткам сантиметрам отложений тефры, падение которой подвергло сильному механическому воздействию и разрушению кроны деревьев, добавилось предполагаемое химическое отравление растений и подкисление почв (химическое воздействие), а также изменение режимов температуры, влажности и аэрации почв (сопутствующие факторы). При нахождении растений в зоне бомбопада могло возникнуть и поражающее термическое воздействие. Там, где деревья и стланики погибли, видимо, свою роль сыграли все перечисленные факторы, но основным из них был фактор сильного механического разрушения.

В отдельных случаях сложно выбрать доминирующий фактор поражения. Так, при прохождении пирокластической волны направленного взрыва вулкана Безымянный в марте 1956 г., двигающейся с огромной скоростью и имеющей температуру несколько сотен градусов, интенсивность воздействия была столь высока, что в приземном слое сносило не только растительный, но и почвенный покров (Белюсов, Белоусова 2000). Это происходило в ближней (к центру извержения) зоне; в средней зоне волна ломала в комле зрелые деревья берёзы каменной; в дальней зоне деревья устояли, но были опалены и погибли. Очевидно, термическое воздействие присутствовало и в средней зоне, причём более интенсивное, чем в дальней зоне, но обсуждать его как причину гибели дерева нет смысла – после динамического удара волной дерева уже не существует, оно мгновенно погибло в результате переламывания ствола (но одновременно оно получило столь интенсивное высокотемпературное опаливание, что выжить бы не смогло, если бы даже устояло, и крона уцелела).

Лишь в одном случае мы выявили единственный фактор поражения – химическое воздействие в результате газовой эмиссии из кратера (Пик Сарычева, 2007 г.).

Распространенность (частота встречаемости) разных форм воздействия на растительность. Частота встречаемости зависит от типа извержения (эксплозивное, эффузивное и др.), его масштаба и ряда событий, произошедших в ходе каждого конкретного извержения. Так, извержение вулкана Безымянный в 1956 г. состояло из ряда событий, которые привели к пяти формам вулканических проявлений (обвал постройки вулкана и обломочная лавина, сход пирокластических потоков, образование гигантской пепловой тучи с последующим пеплопадом, прохождение пирокластической волны направленного взрыва, сход лахаров), которые вызвали до 10 различных форм воздействия на растительный покров на склонах вулкана. В целом можно отметить, что наиболее часто встречаются такие широко распространённые формы воздействия на древесные растения, как пеплопады и связанные с ними изменения эдафических условий; ещё чаще можно встретить запыление листьев и хвои тонким пеплом. Ряд форм являются достаточно распространёнными, присутствующими при соответствующих типах вулканических проявлений: например, механическое воздействие на растения при излиянии лавовых потоков, сходе пирокластических потоков и волн, при прохождении лахаров и др. Ряд форм являются редкими, для их проявления должны сложиться определённые условия (они встречаются при воздействии вулканогенных цунами, метановых взрывов; газов, поступающих через глубинные трещины в почву и др.). И наконец, некоторые формы можно оценить как уникальные, например, выявленный нами прогрев субстрата под участком леса вследствие воздействия подземного теплового потока, генерированного отложениями пирокластического потока. При этом не исключено, что представленный в данной статье список форм воздействия на растительность со временем может быть пополнен как в ходе анализа экологических последствий будущих извержений, так и в результате исследований на тех неизученных активных вулканах российского Дальнего Востока, которые извергались в XX-первой четверти XXI вв.

Благодарности

Искренне благодарим А. Г. Лазарева (г. Петропавловск-Камчатский), участвовавшего с нами в полевых исследованиях на ряде вулканов, а также вулканологов М. Г. Белоусову и А. Б. Белоусова (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), обсуждавших с нами широкий ряд вопросов, связанных с вулканизмом и предоставивших свои фотографии из разных вулканических районов Дальнего Востока России, а также зоолога В. А. Костенко и ботаника В. Ю. Баркалова (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН) за предоставленные наблюдения, сделанные в вулканических районах.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012400285-7).

Литература (References)

- Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. 2000. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка): отложения направленного взрыва // *Вулканология и сейсмология*. № 2. С. 3–17. (Belousov A. B., Belousova M. G. 2000. Deposits and Sequence of Eruptive Events at Bezymianny Volcano on 30 March 1956. Directed Blast Deposits. *Journal of Volcanology and Seismology* 2: 3–17. [In Russian].)
- Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. 2011. Вулканические цунами: от Кракатау до Карымского // *Природа*. № 6. С. 26–34. (Belousov A. B., Belousova M. G. 2011. Volcanic tsunamis: from Krakatau to Karymsky. *Priroda* 6: 26–34. [In Russian].)

- Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). 1984. – М.: Наука. 638 с. ([*The Great Tolbachik Fissure Eruption (1975–1976, Kamchatka)*]. 1984. Moscow: Nauka, 638 pp. [In Russian].)
- Быкасов В. Е. Шлаково-пепловый чехол извержения 1975 г. и поражение растительности Толбачинского дола // *Вулканология и сейсмология*. 1981. № 1. С. 76–78. (Bykasov V. E. Slag-ash cover of the 1975 eruption and damage to vegetation of the Tolbachinsky Dol. *Journal of Volcanology and Seismology* 1: 76–78. [In Russian].)
- Ворошилов В. П., Сидельников А. Н. 1978. Особенности размещения растительности в районе сольфатарного поля вулкана Менделеева // *Экология*. № 6. С. 30–35. (Voroshilov V. P., Sidelnikov A. N. 1978. Vegetation distribution patterns in the solfatara field of Mendelev Volcano. *Russian Journal of Ecology* 6: 30–35. [In Russian].)
- Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. 1965. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения. – М.: Наука. 170 с. (Gorshkov G. S., Bogoyavlenskaya G. E. 1965. *Bezymianny Volcano and features of its last eruption*. Moscow: Nauka, 170 pp. [In Russian].)
- Горшков Г. С., Дубик Ю. М. 1969. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. – М.: Наука. С. 3–37. (Gorshkov G. S., Dubik Yu. M. 1969. [Directional explosion on the Shiveluch volcano. In: *Volcanoes and eruptions*. Moscow: Nauka, pp. 3–37. [In Russian].)
- Гришин С. Ю. 2007. Влияние на растительность извержения группы Туйла на Ключевой сопке (Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. № 2. С. 9–16. (Grishin S. Yu. 2007. Influence of the eruption of the Tuyla group on the vegetation of the Klyuchevskaya Sopka (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 2: 9–16. [In Russian].)
- Гришин С. Ю. 2013. Поражение древесной растительности на острове Матуа (Курилы, 2007 г.) под воздействием газовой эмиссии вулкана Пик Сарычева // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. № 1. С. 66–76. (Grishin S. Yu. 2013. The impact on woody vegetation on Matua Island (The Kurils, 2007) caused by gas emissions from Sarychev Peak volcano. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 1: 66–76. [In Russian].)
- Гришин С. Ю. 2015. Воронки взрывов у края лавового потока Толбачинского извержения (Камчатка, 2012–2013 гг.) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. № 4. С. 72–79. (Grishin S. Yu. 2015. Craters from explosions near the edge of the lava flow from the Tolbachik eruption (Kamchatka, 2012–2013). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 4: 72–79. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Крестов П. В., Верхолат В. П., Якубов В. В. 2000. Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // *Комаровские чтения*. Вып. 46. С. 73–103. (Grishin S. Yu., Krestov P. V., Verkholat V. P., Yakubov V. V. 2000. Recovery of vegetation on the Shiveluch volcano after catastrophe of 1964. *V. L. Komarov Memorial Lectures* 46: 73–103. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Овсянников А. А., Перепёлкина П. А. 2015. Возгорание древесной растительности и опасность лесных пожаров в ходе Толбачинского извержения (Камчатка, 2012–2013 гг.) // *Вестник ДВО РАН*. № 5. С. 63–69. (Grishin S. Yu., Ovsyannikov A. A., Perepelkina P. A. 2015. Ignition of woody vegetation and wildfire hazards during the Tolbachik eruption (Kamchatka, 2012–2013). *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences* 5: 63–69. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Перепёлкина П. А., Бурдуковский М. Л., Лазарев А. Г. 2021. Пеплопад вулкана Шивелуч (Камчатка) 29 августа 2019 г. и его воздействие на растительность // *Известия Русского географического общества*. Т. 153. № 5. С. 34–47. (Grishin S. Yu., Perepelkina P. A., Burdukovsky M. L., Lazarev A. G. 2021. Ashfall of Shiveluch volcano (Kamchatka) on August 29, 2019 and its impact on vegetation. *Proceedings of the Russian Geographical Society* 153(5): 34–47. [In Russian].) DOI: 10.31857/S0869607121050049
- Гришин С. Ю., Перепёлкина П. А., Бурдуковский М. Л., Яковлева А. Н. 2017. Начало восстановления лесной растительности после воздействия пирокластической волны вулкана Шивелуч (Камчатка) 27 февраля 2005 г. // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. № 4. С. 28–38. (Grishin S. Yu., Perepelkina P. A., Burdukovskii M. L., Yakovleva A. N. 2017. The beginning of restoration of forest vegetation after the February 27, 2005 pyroclastic surge from Sheveluch volcano (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 4: 28–38. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Яковлева А. Н., Шляхов С. А. 2009. Воздействие извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1972 г. на экосистемы // *Вулканология и сейсмология*. № 4. С. 30–43. (Grishin S. Yu., Yakovleva A. N., Shlyakhov S. A. 2009. The impact of the 1972 eruption of Alaid volcano in the Kuril Islands on ecosystems. *Journal of Volcanology and Seismology* 4: 246–259. [In Russian].)

- Гришин С. Ю. 2019. Основные тенденции динамики растительного покрова на территории, испытавшей воздействие катастрофического извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка). // *Известия Русского географического общества*. Т. 151. Вып. 5. С. 32–47. (Grishin S. Yu. The main trends in the dynamics of vegetation on the territory affected by the catastrophic eruption of Bezymyanny Volcano on March 30, 1956 (Kamchatka). *Proceedings of the Russian Geographical Society* 151 (5): 32–47. [In Russian].)
- Ефремов Ю. К. 1951. *Курильское ожерелье*. – М.-Л.: Детгиз. 224 с. (Efremov Yu. K. 1951. *The Kuril Necklace*. Moscow-Leningrad: Detgiz, 224 pp. [In Russian].)
- Карпов Г. А., Миллер Ю. М., Заварзин Г. А. 1983. Состав воздуха и спонтанных газов в Долине смерти на Камчатке // *Вулканология и сейсмология*. № 4. С. 107–110. (Karpov G. A., Miller Yu. M., Zavarzin G. A. 1983. Composition of air and spontaneous gases in the Valley of Death, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology* 4: 107–110. [In Russian].)
- Манько Ю. И., Сидельников А. Н. 1989. Влияние вулканизма на растительность. – Владивосток: ДВО АН СССР. 161 с. (Manko Yu. I., Sidelnikov A. N. 1989. *Impact of Volcanism on Vegetation*. Vladivostok: DVO AN SSSR, 161 pp. [In Russian].)
- Мархинин Е. К. 1967. Роль вулканизма в формировании земной коры: на примере Курильской островной дуги. – М.: Наука. 256 с. (Markhinin E. K. 1967. *The Role of Volcanism in Earth's Crust Formation: Case Study of the Kuril Island Arc*. Moscow: Nauka, 256 pp. [In Russian].)
- Мархинин Е. К. 1985. *Вулканизм*. – М.: Недра. 288 с. (Markhinin E. K. 1985. *Volcanism*. Moscow: Nedra, 288 pp. [In Russian].)
- Новограбленов П. Т. 1933. Извержение Пацана и Фаины на Камчатке // *Известия Государственного географического общества*. Т. 65. Вып. 5. С. 387–401. (Novograbenov P. T. 1933. *Eruption of Patsan and Faina volcanoes in Kamchatka*. *Izvestiya Gosudarstvennogo Geograficheskogo Obshchestva* 65(5): 387–401. [In Russian].)
- Соловьев А. В. 1995. Экспедиция в кальдере Медвежья // *Вестник Сахалинского областного краеведческого музея*. № 1. С. 163–167. (Solovyev A. V. 1995. *Expedition to Medvezhya Caldera*. *Vestnik Sakhalinskogo Oblastnogo Kraevedcheskogo Muzeya* 1: 163–167. [In Russian].)
- Товарова И. И. 1958. О выносе водорастворимых веществ из пирокластики вулкана Безымянного // *Геохимия*. № 7. С. 686–688. (Tovarova I. I. 1958. On removal of water-soluble substances from pyroclastics of Bezymyanny Volcano. *Geochemistry International* 7: 686–688. [In Russian].)
- Alaska Volcano Observatory: Rapid Volcano Response Communication. <http://www.avo.alaska.edu/images/image.php?id=10885> (дата обращения 10 августа 2025)
- Del Moral R., Grishin S. 1999. Volcanic disturbance and ecosystem recovery. In: *Ecosystems of Disturbed Ground*. Amsterdam: Elsevier, pp. 137–160.
- Heggie T. W. 2009. Geotourism and volcanoes: Health hazards facing tourists at volcanic and geothermal destinations. *Travel Medicine and Infectious Disease*. 5: 257–261.
- Farrar C. D., Sorey M. L., Evans W. C. et al. 1995. Forest-killing diffuse CO₂ emission at Mammoth Mountain as a sign of magmatic unrest. *Nature* 376: 675–678. <https://doi.org/10.1038/376675a0>.
- Grishin S. Yu. 1995. The boreal forests of north-eastern Eurasia. *Vegetatio* 121: 11–21.
- Grishin S. Yu., Krestov P. V., Verkholat V. P. 2000. Influence of 1996 Eruption in the Karymsky volcano group, Kamchatka, on vegetation. *Natural History Research* 7: 39–48.
- Guo S., Bluth G., Rose W. et al. 2004. Re-evaluation of SO₂ release of the 15 June 1991 Pinatubo eruption using ultraviolet and infrared satellite sensors. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 5(4): 1–31. <https://doi.org/10.1029/2003GC000654>.
- Kamijo T., Hashiba K. 2003. Island Ecosystem and Vegetation Dynamics before and after the 2000-Year Eruption on Miyake-jima Island, Japan, with Implications for Conservation of the Island's Ecosystem. *Global Environmental Research* 7: 69–78.
- Nelson S., Sewake K. 2008. *Volcanic Emissions Injury to Plant Foliage* (Plant Disease PD-47). Honolulu, HI: University of Hawaii, 11 pp.
- Sutton A. J., Elias T. 1993. Volcanic gases create air pollution on the Island of Hawaii. *Earthquakes and Volcanoes* 24: 178–196.
- The 1980 Eruptions of Mount St. Helens*. Professional Paper 1250. Washington, DC: US Government Printing Office, 844 pp.