

УДК 581.524.323.(571.645)

https://doi.org/10.25221/2782-1978_2024_1_3

<https://elibrary.ru/bjqrrw>

Воздействие пеплопада извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 11 апреля 2023 г.) на лесную растительность

Сергей Юрьевич Гришин^{1✉}, Александр Борисович Белоусов², Марина Геннадьевна Белоусова², Полина Александровна Перепёлкина¹

¹Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, 690022, Российская Федерация

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683000, Российская Федерация

✉ Автор-корреспондент, e-mail: grishin@biosoil.ru

Получена 14 февраля 2024 г.; принята к публикации 1 марта 2024 г.

Аннотация. Пеплопад извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) 11 апреля 2023 г. стал самым крупным пеплопадом вулкана за последние почти 60 лет. По результатам полевых исследований и анализа спутниковых изображений оценены распределение и площадь существенных отложений пепла, свойства отложений тонкого андезитового пепла и воздействие пеплопада на лесные сообщества, формируемые *Picea yezoensis* (Siebold et Zucc.) Carrière, *Larix cajanderi* Mayr и *Betula ermanii* Cham. В результате умеренного пеплопада в лесном поясе (мощность свежих отложений 5–8 см) негативное воздействие на растительность было минимизировано благодаря ряду обстоятельств (тонкий пепел, отсутствие облиствения, мощный снежный покров, на который лег слой пепла). Древесная растительность в нижней половине лесного пояса в основном не была повреждена, однако сильные изменения произошли в травяно-кустарничковом ярусе лесных сообществ: разреживание покрова растений, уменьшение размеров травянистых растений, а также количества видов в сообществе. *Calamagrostis purpurea* (Trin.) Link. s. l., широко распространённый доминант травяной растительности, заметно уменьшил своё присутствие, зато существенно увеличилась доля *Chamerion angustifolium* (L.) Holub. Возможность прорастания сквозь слой пепла лесного мелкотравья оказалась резко ограничена. Мохово-лишайниковый ярус лесных сообществ оказался погребен, восстановление может растянуться на несколько десятилетий. Выявлено заметное воздействие на растения вторичного запыления переложением пеплом; наиболее сильно оно сказывается на открытых пространствах и опушках леса. Вторичное запыление может продолжаться много лет, учитывая большое количество пепла, лежащего на открытых пространствах вулкана.

Ключевые слова: вулканические воздействия, пеплопад, запыление, смены растительности, *Picea yezoensis*, *Betula ermanii*, Камчатка.

Impact of ash fallout of the 2023 Shiveluch volcano eruption (Kamchatka) on forest vegetation

Sergey Yu. Grishin^{1✉}, Alexander B. Belousov², Marina G. Belousova², Polina A. Perepelkina¹

¹Federal Scientific Center of the East Asian Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation

²Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russian Federation

✉ Corresponding author, e-mail: grishin@biosoil.ru

Received February 14, 2024; accepted March 1, 2024

Abstract. The ash fallout of Shiveluch volcano (April 11, 2023, Kamchatka) is the most intensive volcanic ash fallout of the last 60 years. We present the results of the reconnaissance field investigations supplemented with analyses of satellite images of the area for estimations of deposits distribution and area affected by the ash fallout. We also estimated the properties of fine grained ash of andesitic composition and its influence on the forest vegetation composed by *Picea yezoensis* (Siebold et Zucc.) Carrière, *Larix cajanderi* Mayr и *Betula ermanii* Cham. As a result of moderate-scale ash fallout in the forest (thickness of freshly deposited ash is 5–8 cm), the negative impact on vegetation was minimal because the ash was fine-grained and was deposited on a

thick snowpack, and the leaves were not formed yet.

The forest vegetation on lower elevations was not damaged at all but strong changes occurred in grass and bush vegetation. We have observed the diminished density of plant coverage, decreased size of grass vegetation and a decreased number of plant species. *Calamagrostis purpurea* (Trin.) Link. s. l., a broadly represented dominant species among grass vegetation, became less common, but *Chamerion angustifolium* (L.) Holub became more widespread. The possibility of small plants to grow through the ash layer turned out to be strongly reduced. Mosses and lichens in the forest have been buried under the ash, the recovery could take several decades. We have found a notable impact on plants by ash remobilized by strong wind, this impact is the strongest in the open areas and on forest edges. This process can continue for many years due to the large volume of the deposited ash covering the open spaces of the volcano foot.

Key words: volcanic impact, ash fallout, dustiness, changes of vegetation, *Picea yezoensis*, *Betula ermanii*, Kamchatka.

Введение

10 апреля 2023 г. начал извергаться вулкан Шивелуч (центральная Камчатка). По сообщениям сотрудников Камчатской вулканостанции, а также СМИ, включая телевизионные репортажи, произошёл интенсивный пеплопад, причём в пос. Ключи (45 км к югу от вулкана) пепел выпал на снег слоем толщиной около 6–8 см. Это крайне затруднило повседневную жизнь жителей посёлка. Значительные проблемы отмечались также в расположенных далее к юго-западу посёлках Майское и Козыревск (рис. 1). Апрельский пеплопад стал крупнейшим за почти 60 лет, минувших после разрушительного пеплопада гигантского извержения 1964 г. При этом пеплопад стал лишь частью проявлений сильного и разрушительного извержения 10–13 апреля 2023 г.

Пеплопады – наиболее частое проявление последствий вулканизма, оказывающее при этом масштабное действие на наземные экосистемы. Воздействия на растительность, в зависимости от толщины слоя отложений, могут варьировать в широком диапазоне – вплоть до погребения многометровыми толщами и образования ландшафта вулканической пустыни. При отложениях толщиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров происходит поражение растительности разных ярусов лесного сообщества от нижнего мохово-лишайникового до древесного яруса с полной гибелью сообщества. Пеплопады с минимальной (до 1 мм) толщиной отложений достаточно часты на активных вулканах, таких как Шивелуч, и зачастую несут не разрушительное, а созидательное начало, стимулируя рост растений и ускоряя первичную сукцессию на незаселённых субстратах.

Исследования влияния пеплопадов на растительность уже проводились на Камчатке ранее, но, к сожалению, экспедиции в районы извержений осуществлялись спустя несколько лет или даже десятилетий после событий, а краткие заметки, выполненные по «горячим следам», были редки и разрозненны (см. обзор публикаций: Гришин и др. 2021а). Большой интервал времени после пеплопада не позволял полноценно выявить реакцию растений на воздействие; состояние разрушенных (в той или иной степени) растительных сообществ за это время менялась в ходе процессов естественного восстановления.

После появления в конце апреля 2023 г. спутниковых изображений района воздействия стало ясно, что в целом произошло незаурядное и масштабное извержение с разрушительными экологическими последствиями. Мощный обвал активно растущего купола вулкана с образованием протяжённых пирокластических потоков вызвали локальную экологическую катастрофу. Нам удалось оценить масштаб воздействия извержения на природу района, включая погребение, гибель и поражение растительности разных высотных поясов, оценить разнообразие пострадавшей

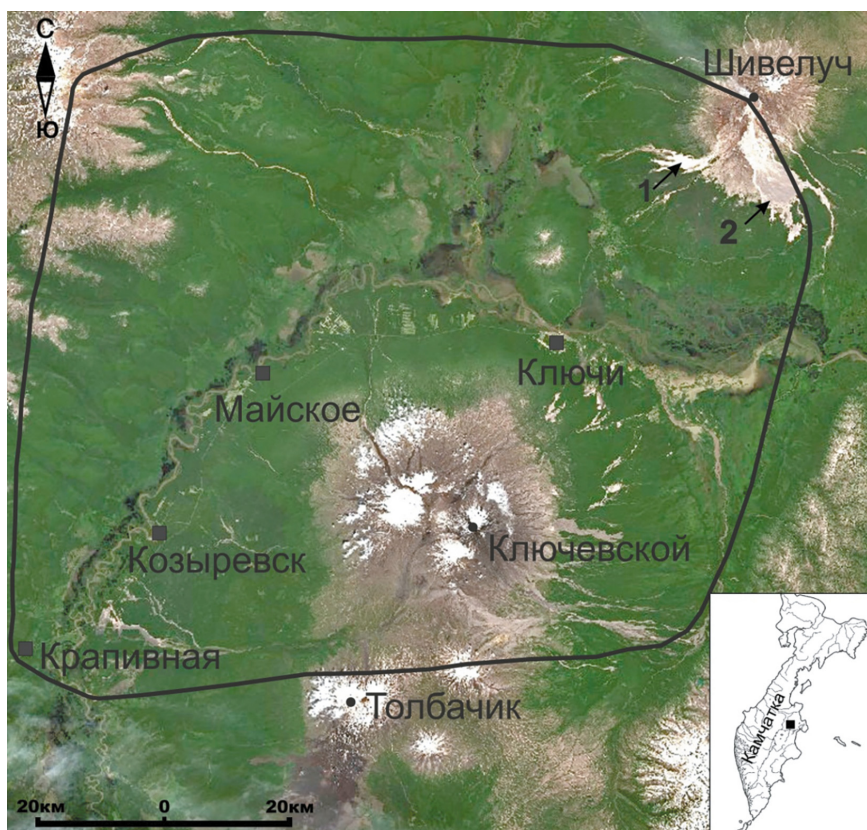


Рис. 1. Область распространения пеплопада 11 апреля 2023 г. в пределах отложений толщиной 1 см: 1 – долина р. Байдарная, 2 – зона распространения пирокластических отложений апрельского извержения 2023 г. Точками обозначены вулканы, квадратики – посёлки.

Fig. 1. Ashfall deposits (April 11, 2023) distribution area with > 1 cm layer: 1: Baydarnaya River valley, 2: zone of distribution of pyroclastic flows of the April 2023 eruption. Dots indicate volcanoes, squares indicate villages.

растительности (Гришин 2023). Динамика пеплопада 2023 г., направления шлейфов выноса пепла и площадь минимальных отложений по спутниковым данным были описаны (Гирина и др. 2023), но ареал отложений со значительной толщиной слоя пепла (более 1 см) остался неясным, как и экологические последствия пеплопада. Проведя анализ признаков присутствия пепла на спутниковых изображениях, мы выявили его распределение на обширной территории, и определили такой ареал. В ходе полевых работ в августе 2023 г. выполнены описания и измерения в серии точек, что позволило конкретизировать распределение мощности отложений пепла и выявить реакцию растительности на это воздействие. В данном сообщении приводятся некоторые предварительные данные о параметрах пеплопада и его воздействии на лесные экосистемы.

Природные условия района извержения

Вулкан Шивелуч (высота 3283 м) – самый северный, один из крупнейших (диаметр основания – до 50 км) и наиболее активных вулканов Камчатки (Мелекесцев и др. 1991). За последние столетия крупные извержения происходили в ~1640, 1854 и 1964 гг. (Ponomareva et al. 2015). Извержение 1964 г. относится к сильнейшим

историческим эксплозивным извержениям Камчатки (Горшков, Дубик 1969; Белоусов, Белоусова 1995). В результате этой катастрофы на южном склоне вулкана образовалась вулканическая пустыня площадью около 100 км². Начиная с 1980 г., в кратере вулкана формировался лавовый купол. Периодические умеренные эксплозивные извержения (в 1993, 2001, 2004 гг. и др.) сопровождались обрушениями частей купола, пеплопадами, сходом раскалённых лавин и пирокластических потоков. Из-за особенностей морфологии вулкана, основные направления схода обвалов, раскалённых лавин, пирокластических потоков и волн ориентированы в направлении южного подножья влк. Шивелуч. Значительная часть образующегося грубообломочного вулканокластического материала распространяется вдоль долины р. Байдарная в юго-западном секторе подножья вулкана, а также р. Кабеку в юго-восточном секторе подножья. Наиболее крупные извержения со сходом пирокластических потоков и волн произошли в 2005 и 2010 гг. (Жаринов, Демянчук 2013).

Для района южного макросклона влк. Шивелуч характерен континентальный климат центральной Камчатки. Основными здесь являются два природных комплекса: крайне разреженная растительность безлесной территории (выше 500–600 м над ур. м. до апреля 2023 г.) и нижележащий пояс бореальных лесов. Обширная безлесная территория макросклона сформирована в основном отложениями гигантского извержения 1964 г.; долина р. Байдарная в значительной степени заполнена отложениями сильного извержения 2005 г., а верховья долины р. Кабеку была частично перекрыта отложениями извержения 2010 г. (Гришин и др. 2000; 2015; 2018). Ниже 600 м располагалась лесная, стланиковая и луговая растительность на старых отложениях предыдущих вулканических катастроф (Мелекесцев и др. 1991).

Материал и методы

По спутниковым снимкам Sentinel-2 были оценены масштабы изменения среды и воздействия на лесную растительность в ходе извержения. Удалось выявить признаки скоплений отложений пепла (см. детали в разделе «Некоторые параметры пеплопада») и по этим участкам очертить границы зоны пеплопада (существенных отложений пепла). Полевые наблюдения проведены на южном подножье влк. Шивелуч, между «сухими» реками Байдарная и Кабеку (приблизительно поперёк основного направления пеплопада), а также вдоль автотрассы от влк. Шивелуч к пос. Ключи и далее на юг, к пос. Козыревск, р. Студеная, юго-западному склону влк. Толбачик и южнее, до бывшего пос. Крапивная (в целом – приблизительно вдоль осевой части пеплопада). Некоторые дополнительные сведения о распространении пепла получены от коллег, работавших в зоне пеплопада.

Детальные исследования проведены близ осевой части пеплопада, в юго-западном секторе подножья вулкана (район р. Байдарная), на высоте 300–400 м над ур. м. Серия геоботанических описаний охватила ряд экотопов по профилю, идущему через долину р. Байдарная и охватывающему прилегающие берега. Долина была перекрыта в 2005 г. отложениями крупного пирокластического потока шириной до 2 км. По левому берегу реки описания сделаны в еловом лесу, а также еловом лесу, погибшем от воздействия пирокластической волны извержения 2005 г. Ранее там нами были проведены исследования последствий воздействия волны и начала последующих сукцессий (Гришин 2009; Гришин и др. 2017, 2018, 2021). Это помогло сделать повторные описания и выявить изменения, произошедшие в результате пеплопада 2023 г. То же выполнено в лесах из березы каменной по правому берегу долины. На отдельных участках профиля измерена толщина слоя пепла и отобраны

его образцы. Кроме этого, мы наблюдали за прорастанием растений через слой пепла, установив камеру видеонаблюдения (таймлапс-камеру) весной 2023 г. на окраине пос. Ключи у леса.

Номенклатура латинских названий растений дана по Каталогу флоры Камчатки (Якубов, Черныгина 2004).

Результаты

Последствия извержения, масштабы пеплопада и свойства пепла

Основные последствия извержения. В ходе масштабного извержения влк. Шивелуч в апреле 2023 г. произошёл обвал активно растущего купола, образовались протяжённые пирокластические потоки, и прошёл интенсивный пеплопад. По спутниковым изображениям Sentinel-2, а также на основе проведённых наземных исследований, нами определены масштабы погребения территории грубообломочными вулканическими отложениями – $\sim 60 \text{ км}^2$, а также оценено разнообразие погребённых и погибших экосистем. Широкий веер высокотемпературных ($> 500 \text{ C}$) отложений глыбово-пепловых пирокластических потоков мощной толщей перекрыл юго-восточный сектор подножья вулкана на площади около 60 км^2 в интервале высот $\sim 2000\text{--}500 \text{ м}$ над ур. м. Ниже распространились отдельные узкие языки пирокластических потоков, фронтальные части которых спустились до отметок около 150 м над ур. м., на расстояние до 22 км от купола. Площадь отложений этих языков, вложенных в речные долины, составила около 10 км^2 . Лесная и стланиковая растительность была уничтожена на площади $\sim 20 \text{ км}^2$, причём в основном погребена (до 90% площади), а также погибла из-за захлёстывания деревьев краевыми частями пирокластических потоков и воздействия связанных с потоками пирокластических волн. В зоне воздействия пирокластических потоков уничтоженные леса, по приблизительной оценке, на 50% были образованы берёзой каменной, 25% – лиственницей, 10% – зарослями ольхового стланика, 15% – смешанными лесами из лиственных пород и стлаников. Ельники влк. Шивелуч в зону прямого воздействия пирокластических потоков 2023 г. почти не попали, но попали в зону воздействия мощного пеплопада, от конвективного облака пирокластических потоков.

Некоторые параметры пеплопада. Пеплопад был интенсивным и, по наблюдениям в посёлках Ключи и Козыревск, коротким (несколько часов). По имеющимся пока неполным данным, включая полевые измерения в 15 точках, а также по результатам анализа спутниковых изображений, пеплопад охватил широкий сектор юго-западного подножья вулкана, а также территории к западу (до Срединного хребта; расстояние около $90\text{--}100 \text{ км}$), юго-западу (долина р. Камчатки, около 130 км) и югу/юго-западу от него (северная половина Ключевской группы вулканов). Пепел образовал слой толщиной в свежееотложенном состоянии $6\text{--}8 \text{ см}$ в районе пос. Ключи. Наши измерения осенью 2023 г. показали толщину слежавшегося пепла 4 см . В августе 2023 г. в лесном поясе южного склона вулкана (высотой $100\text{--}400 \text{ м}$ над ур. м.) нами отмечен слой $3\text{--}6 \text{ см}$ слежавшегося тонкого пепла. Максимальная толщина слоя зарегистрирована на юго-западном подножье вулкана в долине р. Байдарная, а на юго-восточном подножье у р. Кабеку отложения становились минимальными. Наиболее протяжённая ось выноса пепла простирается к юго-западу от активного купола на расстояние около 130 км . Замеры мощности отложений пепла по этой оси сделаны в августе–октябре 2023 г. на расстоянии от активного купола: $13 \text{ и } 16 \text{ км}$ (мощность $4\text{--}6 \text{ см}$), $27 \text{ и } 32 \text{ км}$ ($3\text{--}4 \text{ см}$), 45 км (4 см), 90 км ($2\text{--}2.5 \text{ см}$), 110 км (2 см), 130 км (1 см).

Изучение спутниковых снимков показало, что после начала вегетации светлый подсохший пепел был замечен уже только на участках обнажённых грунтов. Всего удалось выявить более 10 типов естественных и антропогенных ландшафтов, где на спутниковых изображениях зафиксировано присутствие скоплений пепла. Это ледники, горные тундры, снежники в горах, отложения недавних лавовых и пирокластических потоков вулканов, а также сухих рек. Наиболее крупными участками с видимым покровом пепла были аллювиальные отложения сухих рек, широко распространённых на конусах выноса временных водотоков в лесном поясе подножий влк. Шивелуч и вулканов Ключевской группы (Толбачик, Ключевской, Безымянный и др.), а также горные тундры, где вегетация началась с задержкой по сравнению с лесным поясом. Кроме того, здесь присутствуют участки обнажённых полигональных грунтов. Среди антропогенных ландшафтов наиболее информативными в плане выявления признаков отложения пепла были сельскохозяйственные земли (пашни) и недавние вырубки, а также территории посёлков, дороги, взлётно-посадочные полосы. Выявив определённое соответствие между признаками изображения пепла в ландшафте и мощностью его отложений, мы нашли рубеж ~1 см критическим для распознавания участков аккумуляции пепла на весенне–летних спутниковых снимках среднего (10 м) разрешения. По этим отметкам удалось очертить территорию распространения отложений пеплопада, имеющих толщину более 1 см.

По полученным данным (которые являются предварительными и приблизительными) контур зоны пеплопада в пределах изопакиты 1 см имеет площадь около 10000 км² (рис. 1). Допустив среднюю толщину слоя слежавшихся отложений 2.5 см, получим объём пепла на этой территории около 0.25 км³. Это большая величина даже без учёта тефры дальнего разноса (которая отложилась слоем толщиной менее 1 см). Пеплопад стал крупнейшим в России за последние 40 лет.

Свойства покрова пепла. Образцы пепла были собраны на расстоянии от 12 км до 137 км от вулкана. Размерность материала: фракция <0.063 мм – 75–86%, фракция 0.063–0.1 мм – 14–25%. В сухом состоянии пепел светло-серого, почти белого цвета; по составу SiO₂ (59.5–62.7%, данные Н. В. Горбач) соответствует известково-щелочному андезиту.

Пепел лёг на снег холодным, он выпал в период максимума снегонакопления (более 1 м толщиной, по данным метеостанции «Ключи»). По наблюдениям вулканолога Ю. В. Демянчука в пос. Ключи (личное сообщение), сначала выпавший пепел был «сухим и пушистым», но в дальнейшем пепел выпадал с небольшой примесью снега. Яркое весеннее солнце на следующий день растопило этот снег, и слой пепла стал напоминать густой строительный раствор, налипавший на обувь. Осевшая на кроны берёз «шуба» пепла была вскоре сдута сильным верховым ветром.

Оценивая свойства пепла, стоит учитывать разницу между свежееотложенным рыхлым пеплом и пеплом слежавшимся, многократно промытым дождевой и талой водой, испытавшим пресс снежного покрова (после пеплопада 11 апреля выпадавший в середине апреля снег увеличил снежную толщу на ~20 см, по данным метеостанции «Ключи»). Снег или снег с дождём эпизодически выпадал в течение приблизительно месяца после пеплопада. Затем толща снега под слоем пепла (а также над ним) постепенно протаяла, и пепел лёг на лесную подстилку и иные субстраты. Ко времени наших наблюдений прошло четыре месяца со дня пеплопада; за этот период пепел был многократно промочен метеорными водами. Слежавшийся пепел, по наблюдениям в августе 2023 г., уплотнён и неоднороден, имел плотную корку, нередко разбитую трещинами усыхания; иногда слой пепла можно было снять небольшим

пластом с подстилающей поверхности. На открытых местностях, в местах переотложения ветром, корка была особенно уплотнённой. Пепел, переотложенный ветром, присутствовал во всех экотопах, а в лесу он осыпался с деревьев и кустарников.

Сделанное нами определение кислотности водной вытяжки образца, отобранного 11 апреля в посёлке Ключи, показал рН 4.58, а для образца, отобранного в долине р. Байдарная спустя четыре месяца – рН 6.93. Таким образом, произошло снижение кислотности пепла от среднекислой до нейтральной вследствие многократной промывки метеорными водами.

Воздействие пеплопада на лесную растительность

Общее состояние древостоя в зоне пеплопада. На южном макросклоне влк. Шивелуч в высотном интервале 200–500 м над ур. м. распространена лесная растительность из берёзы каменной *Betula ermanii* Cham., лиственницы *Larix cajanderi* Mayr и ели *Picea yezoensis* (Siebold et Zucc.) Carrière; локально (по вершинам холмов, крутым склонам) присутствуют заросли ольхового стланика *Alnus fruticosa* Pall. Ниже 300 м преобладают леса из лиственницы, часто с участием берёзы каменной. На юго-западных подножиях вулкана расположены еловые леса из *Picea yezoensis*, при этом долина р. Байдарная ограничивает их распространение, и ель сейчас встречается в основном по левобережью долины; на правом берегу распространены березняки с *Betula ermanii*.

Обследованная нами в ходе полевых работ территория охватывает основной сектор выпадения пепла 2023 г. (от западных склонов влк. Шивелуч, где расположена долина р. Карина, до юго-восточных склонов – долины р. Кабеку) и характеризует район максимальной толщины слоя отложений пепла в лесной и стланиковой зоне. Видимых повреждений древесной растительности, таких как обламывание ветвей деревьев, провисание и изгибание крон, пеплопад не вызвал. Следов повреждения, усыхания, некрозов растений также почти не выявлено. Не отмечено и сплошного покрытия крон деревьев пеплом, выраженного на обширных пространствах, как это мы наблюдали сразу после небольшого пеплопада (толщина слоя отложений 10–13 мм) 29 августа 2019 г. (Гришин и др. 2021а: рис. 2 и 3). Заметное запыление хвои и листвы деревьев отмечено лишь как следствие вторичного переноса пепла (см. ниже) на участках, примыкающих к обширным открытым пространствам. Тем не менее пепел в небольших количествах присутствовал на стволах деревьев с неровной, «лохматой» корой, как у зрелых деревьев берёзы каменной, и в малых количествах – на ветвях с гладкой корой. Валеж крупных деревьев покрыт толстым слоем пепла, схватившимся коркой. На ряде участков леса, погибшего по бортам долины р. Кабеку (юго-восточный сектор вулкана), на стволах, ветвях и валеже можно наблюдать внешне похожие отложения. Однако они не являются отложениями пепла, выпавшего из поднимающегося вертикально пеплового облака, а представляют собой отложения небольших пирокластических волн – движущихся горизонтально облаков пепла, отделившихся от пирокластического потока, прошедшего по долине.

Проиллюстрируем ситуацию с воздействием пеплопада в основных экотопах долины р. Байдарная: хвойный лес по левому (южному) берегу долины, берёзовый лес по правому (северному) берегу, и широкая речная долина, перекрытая в 2005 г. горячими толщами пирокластических отложений. Серия точек описаний образует профиль длиной ~ 2.5 км, идущий с севера на юг, поперёк долины р. Байдарная.

Изменения в хвойном лесу после пеплопада. Еловый лес с заметным участием берёзы каменной и, единично, лиственницы. Основной ярус формируют ели высотой

до 20–24 м и диаметром 30–45 см. Подлесок разрежен, состоящий на прогалинах из кустов ольховника *A. fruticosa* и кустарниковой рябины *Sorbus sambucifolia* (Cham. et Schlecht.) M. Roem., кустиков смородины *Ribes triste* Pall. В травяном ярусе до пеплопада господствовал вейник *Calamagrostis purpurea* (Trin.) Link. s. l. высотой до 1.3 м, покрывавший 30% площади (до 70% на прогалинах), и *Actaea erythrocarpa* (Fisch.) Freyn (5–10%), а также в небольшой степени иван-чай *Chamerion angustifolium*. Под пологом этих растений встречались в небольших количествах папоротник *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newm., на почве и основаниях стволов деревьев линнея *Linnaea borealis* L. (часто), *Equisetum arvense* L., а также лесное мелкотравье: *Rubus arcticus* L., *Maianthemum dilatatum* (Wood) Nels. et Macbr., *Trientalis europaea* L.

После пеплопада в живом еловом лесу на почве и валеже лежит слой пепла 5–7 см. Пепел густо покрывает основания стволов, отмечен на стволах и ветвях. Пеплом припорошены и травянистые растения, появившиеся летом, после пеплопада. Здесь причина во вторичном переотложении тонкого пепла, легко поднимаемого ветром и переносимого на сотни метров в глубь леса. Травяной покров заметно поредел; покрытые коркой слежавшегося пепла незаросшие поляны занимают не менее 50% площади. Травостой стал не только разреженней, но и ниже. Слой слежавшегося пепла образует сплошную корку, лежащую на лесной подстилке между кронами елей; местами корка растрескавшаяся, через трещины проросли побеги (рис. 2 А, С), в основном древесных: смородина (высотой 30 см), княжик *Atragene ochotensis* Pall. (40 см), рябина *S. sambucifolia* (30 см), линнея (5 см), иногда вейник *C. purpurea* (40 см).

Между вышеописанным ельником и заполненной отложениями пирокластических потоков 2005 г. долиной р. Байдарная расположена полоса ельника (ширина полосы ~ 200 м), погибшего от воздействия пирокластической волны 2005 г. Здесь лесная растительность, формирующаяся в ходе вторичной сукцессии (Гришин и др. 2017), испытала воздействие самого пеплопада, и постоянно подвергается прессингу пыльных штормов, разыгрывающихся в непосредственной близости, на открытой пустыне долины. В результате корка пепла покрывает сплошь почву, вся древесная и травяная растительность густо запылены; пепел повсюду, сыплется с крон при задевании молодняка ив *S. udensis*, берёз и подроста хвойных. Плотным пластом толщиной до 5–6 см пепел лежит на валеже (рис. 2В). Отмечены прогалины в травяном покрове с коркой пепла в них, а также небольшая высота травяного яруса в сравнении с предыдущими годами. Заметно поредел густой покров высокого вейника *C. purpurea*, покрывавшего в предыдущие годы поляны, образовавшиеся на месте погибшего и вывалившегося древостоя. Его участок отчасти занял иван-чай *C. angustifolium*. Разнообразие видов растений также заметно снизилось. Прорасти через слой пепла удаётся только иван-чаю и кустарникам.

Изменения в берёзовом лесу после пеплопада. Лес из берёзы каменной на противоположной, северной стороне долины р. Байдарная. Участок леса кратко описан ранее (Гришин и др. 2019; фото там же: рис. 4). Это «парковый» лес со зрелыми деревьями высотой до 15–18 м, диаметром на высоте груди 30–60 см. В подлеске и травяно-кустарничковом ярусе до пеплопада было отмечено 25 видов сосудистых растений. В подлеске (до 1.5 м высотой), покрывавшем до 40–50% площади, господствует невысокая рябина *S. sambucifolia* с участием жимолости (*Lonicera caerulea* L., *L. chamissoi* Bunge ex P. Kir.), шиповника *Rosa amblyotis* C. A. Меу и др. Травянистые растения до извержения образовывали почти сомкнутый (проективное покрытие 90%) покров высотой до 1 м, в котором доминировали вейник и иван-чай, дополня-

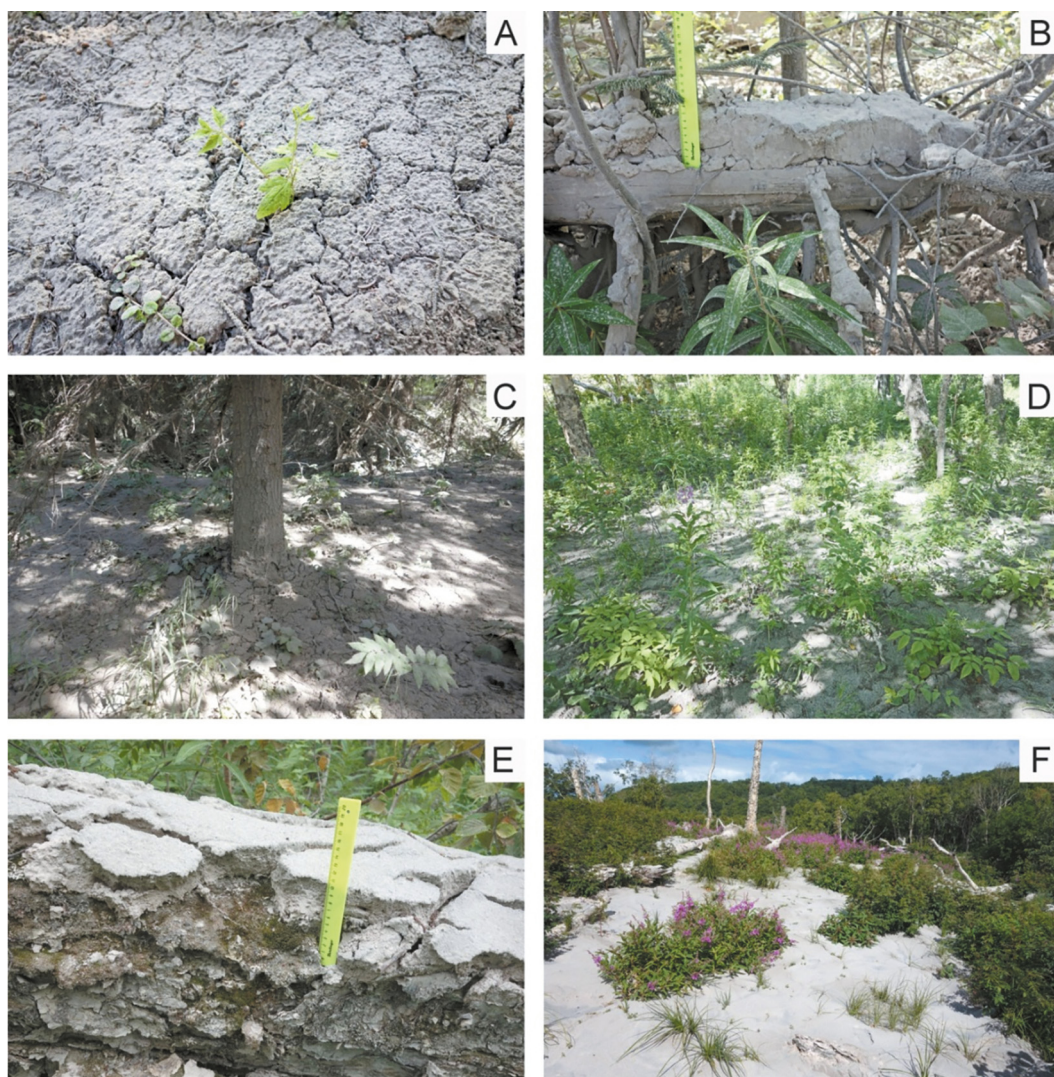


Рис. 2. Последствия пеплопада в лесу: А – побеги *Atragene ochotensis* и *Linnaea borealis* пробиваются через трещины; В – пепел на валеже; листья запылены вторичным переносом пепла; С – под кроной ели пробиваются побеги *Sorbus sambucifolia*, *Ribes triste*, *Clematis ochotensis*; D – пепел и разреженный травяной покров под пологом леса из *Betula ermanii*; E – пепел на валеже берёзы каменной; F – поляна на участке погибшего в 2013 г. березняка.

Fig. 2. Consequences of ash fallout in a forest: A: shoots of *Atragene ochotensis* and *Linnaea borealis* break through the cracks; B: ash on fallen trees; leaves are dusty due to secondary ash transfer; C: shoots of *Sorbus sambucifolia*, *Ribes triste*, *Atragene ochotensis* emerge under a spruce crown; D: sparse grass cover under the forest canopy of *Betula ermanii*; E: ash on *Betula ermanii* deadwood; F: a clearing in a birch forest that died in 2013.

емые видами разнотравья и лесного мелкотравья. Вейник при этом местами создавал почти сплошное покрытие. Моховой ярус был почти не выражен, мхи отмечены в основном на валеже и основаниях стволов берёз. После пеплопада пепловые проплешины, свободные от растений, занимают под пологом березняка 40–50% площади, на валеже берёз отмечен пепел мощностью 5 см (рис. 2Е). Общее покрытие травяного яруса снизилось до 30% (рис. 2D), сохранилось участие иван-чая (до 15%), но резко упала доля вейника (до 3–5%) и ряда видов, слагавших травостой – *Parasenecio*

hastatus (L.) Н. Koyama (= *Cacalia hastata* L.), *Geranium erianthum* DC., *Aruncus dioicus* (Walt.) Fern. и др. (до 1–2% у каждого). Общее число встреченных видов растений уменьшилось до 18.

Отметим, что в августе 2019 г. в районе данного березняка, сразу после пеплопада, мы наблюдали различные формы провисания ветвей и крон ряда видов древесных растений (Гришин и др. 2021a). Значительно более сильный пеплопад 2023 г. (толщина отложившегося пепла в 5–6 раз больше) не вызвал таких последствий. Однако сравнительно плотный пласт пепла, образовавшийся после стаивания снега, привёл к погребению и угнетению части растений травяного яруса лесных сообществ.

К описанному лесу примыкает участок погибшего березняка; лес погиб в 2013–2014 гг. от теплового воздействия, которое шло из глубин грунта (Гришин и др. 2018). Пепел 2023 г. лежит на этом участке плотным слоем толщиной около 6 см. После пеплопада 2023 г. возникли сильные изменения в составе и состоянии травяно-кустарниковой растительности, покрывавшей участок.

Там, где был сплошной покров высокого вейника, произошла смена доминанта: в настоящее время преобладает иван-чай узколистый. На территории с несомкнутым невысоким ярусом шиповника, иван-чая и осоки *Carex koraginensis* Meinsh., где также присутствуют незаросшие площадки, покрытые коркой пепла (они занимают около 30–40% площади), растения находятся в благополучном состоянии (рис. 2F). Многие из них цветут или плодоносят; усохших или пожелтевших почти нет. Пеплопад вызвал здесь определенную разреженность покрова и снижение высоты травяной и кустарниковой растительности, а также уменьшение количества видов растений (мхи и мелкотравье отсутствуют).

Пепел на безлесных пространствах в лесном поясе. Обширное (до 2 км шириной) открытое пространство долины р. Байдарная, перекрытое отложениями пирокластического потока 2005 г., до пеплопада являло собой вулканическую пустыню с крайне разреженно растущими сосудистыми растениями, среди которых чаще всего встречался иван-чай *C. angustifolium* (Гришин и др. 2021б), имеющий адаптации к специфическому, местами нагретому ювенильному субстрату. На поверхности отложений отмечен крайне разреженный покров угнетённых мхов. После выпадения пепла на открытом пространстве территории установился жёсткий режим частого ветрового переноса пепла, абразивно повреждающего растения и приводящего к эрозии тканей. Пепел в зоне прохождения нашего профиля частью был сдут, частью перераспределен в соответствии с микрорельефом, и сформировал линзы отложений из плотно сбитого пепла мощностью до 10–12 см (рис. 3D). Несмотря на то, что значительная часть пепла была сдута, сосудистые растения здесь отсутствуют. Ближе к стене хвойного леса пепла встречается больше, вплоть до сплошного покрова. Растения в таких местах либо отсутствуют, либо с трудом пробиваются через слой пепла, часто используя трещины в его корке (рис. 3А, В). Более благоприятна ситуация у северного борта долины, близ склонов, покрытых живым берёзовым лесом, где давление пыльных вихрей менее выражено. Здесь, в пределах 50–100 м от стены леса, относительно обилён подрост берёзы каменной, который в основном пережил пеплопад и частые пыльные позёмки (рис. 3С).

Вторичное запыление растительности переотложенным пеплом. Отмечено сильное вторичное запыление растительности склонов вулкана ранее отложенным пеплом. По приблизительной оценке, на открытых (выше границы леса) пространствах южного макросклона влк. Шивелуч 11 апреля 2023 г. легло около 10 млн тонн

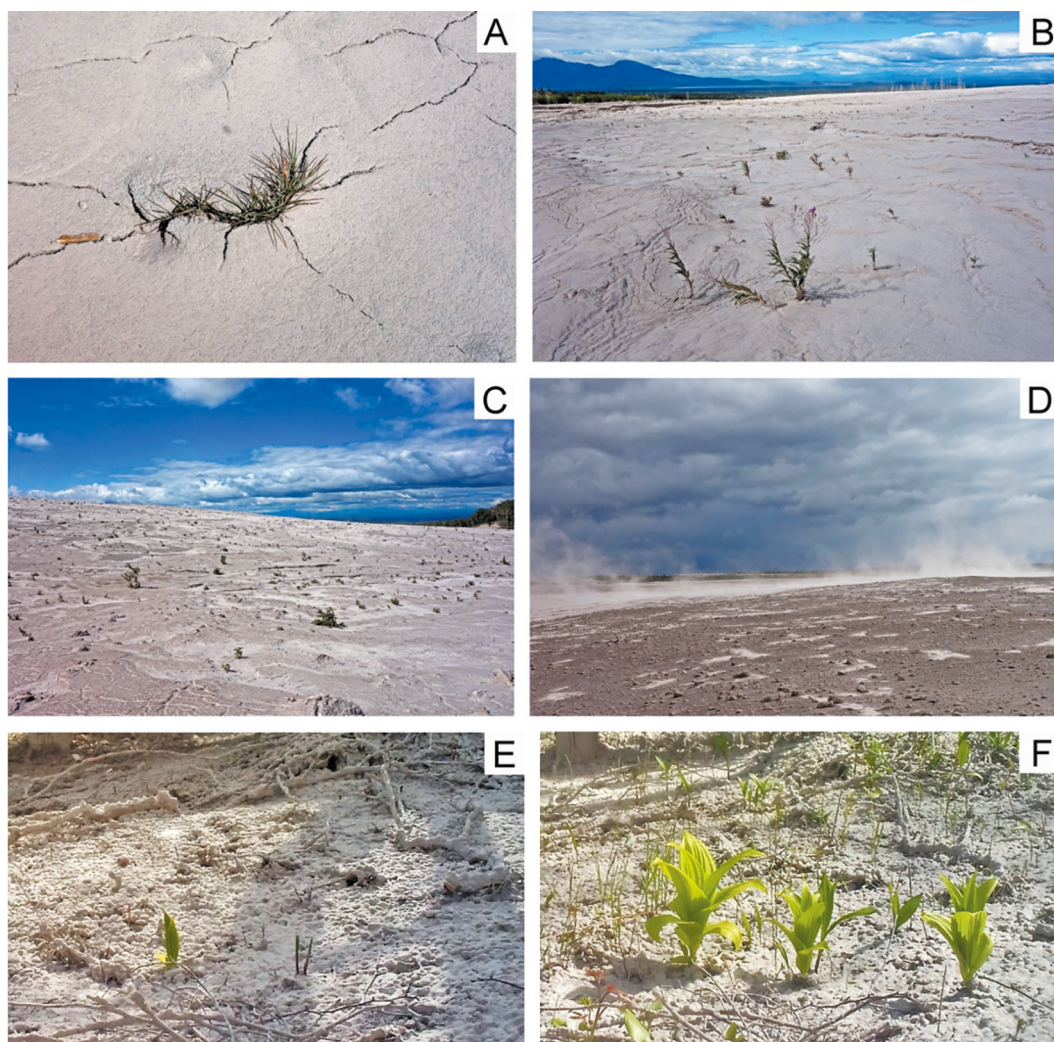


Рис. 3. Последствия пеплопада в долине р. Байдарная: **А** – сквозь трещины пробивается мятлик *Poa* sp.; **В** – *Chamerion angustifolium* преодолевает покров пепла; **С** – мелкий подрост *Betula ermanii* в вулканической пустыне у края долины пережил пеплопад; **Д** – пылевые шлейфы над отложениями пирокластического потока; **Е** – прорастание через пепел, 21 мая 2023 г.; **Ф** – прорастание через пепел, 30 мая 2023 г. Фото Е–Ф сделаны таймлапс-камерой в пос. Ключи.

Fig. 3. Consequences of ashfall in the Baidarnaya River valley: **A**: bluegrass *Poa* sp. emerges through the cracks; **B**: *Chamerion angustifolium* plants grow through the ash layer; **C**: the *Betula ermanii* young growth in the volcanic desert near the edge of the valley safely survived the ashfall; **D**: dust plumes over pyroclastic flow deposits in the river; **E**: plants begin to sprout through the ash, May 21, 2023; **F**: plants sprout through the ash, May 30, 2023. Photos E–F were taken with a time-lapse camera in the Klyuchi village.

пепла. После схода снега и подсыхания пепла в ветреную погоду он начал пылить. В течение летнего периода, с конца мая до октября, метеостанция «Ключи» каждый месяц фиксировала несколько дней с «пыльной поземкой». На открытых пространствах ветер легко поднимает пепел (рис. 3Д), создавая пыльные вихри, а иногда сплошную стену пыли. В ветреную погоду, когда скорость ветра достигает 20 м/с, перенос пепла может принимать огромные масштабы. Так, по спутниковым данным,

4 сентября 2023 г. при сильном западном ветре пепел апрельского извержения в виде плотного пылевого облака уносился со склонов влк. Шивелуч до Тихого океана на расстояние более 100 км. Ветер поднимал пылевые облака и с участков аккумуляции пепла на склонах влк. Ключевской, расположенных на расстоянии более 60 км от центра извержения. Этот процесс приводит к переотложению пепла в обширных зонах прилегающей растительности. Большое количество пепла на открытых пространствах (в долине р. Байдарная и выше границы леса) означает, что этот процесс будет продолжаться многие годы. В целом для растений его можно оценить негативно (абразия тканей, запыление листвы и хвои, погребение мелких растений и др.). Интересно, что в изученных условиях долины р. Байдарная преобладавшие в районе влк. Шивелуч северо-западные ветры привели к резким различиям в степени запылённости берёзового леса и ельника: для первого она минимальна, для второго – максимальна (при примерно равной мощности отложенного первичного пепла).

Наблюдения за прорастанием растений сквозь пепел. Таймлапс-камера была установлена на окраине лесопарка из берёзы каменной в пос. Ключи, на небольшом огороженном пустыре у края леса. К началу вегетации в мае 2023 г. площадка была пуста, на ней были видны лишь ветки древесного опада; все было покрыто густым слоем пепла и безжизненно. К середине мая появился первый проросток – чемерица *Veratrum oxyssepalum* Turcz. Это крупное растение, высотой до 1.5 м, с толстым плотным стеблем, обладающим высокой «пробивной» способностью. На 21 мая оно имело высоту ~15 см (рис. 3Е). К 25 мая тонких, как карандаш, проростков без листьев, высотой около 10 см, стало много, до 20 штук на 1 м². К 1 июня на площадке размером 5х5 м было около десятка растений чемерицы высотой до ~30 см с распусившимися листьями. Появились также вейник *C. purpurea*, волжанка *A. dioicus*, черемша *Allium ohotense* Prokh. Высота формирующегося травостоя составила ~20–30 см, проективное покрытие – около 10% (рис. 3F). К 10 июня развернулись веточки хвоща *Equisetum pratense* L., высота травостоя достигла ~40–50 см, проективное покрытие – ~25%. К 20 июня поле зрения объектива камеры перекрыло крупное растение *Cacalia hastata*; травостой поднялся до высоты 60 см, а отдельные растения – до ~70–80 см; проективное покрытие составило ~70%, но при этом был ясно виден сплошной покров пепла под пологом трав. К концу июня верхний полог травостоя вырос до ~0,9 м высотой, общее покрытие достигло ~80%. Однако при этом не было видно лесного мелкотравья и мхов. По проведенным наблюдениям выявлено, что слой пепла оказался непреодолимым препятствием для них (по крайней мере, в начале первого, после пеплопада, вегетационного сезона). Условия успешного прорастания основной части травостоя – открытая солнцу, но в то же время защищенная от ветра и пыльных смерчей площадка, предположительно, не слишком уплотнённый (в отсутствие сильных ветров) слой пепла и стабильный режим влажности почвы.

Обсуждение

Воздействие пеплопада 2023 г. на растительность было специфичным по сравнению с существенными пеплопадами на Камчатке, проходившими в отсутствие снежного покрова. Пепел был тонким, выпал относительно сухим (без участия дождевых осадков), лёг сплошным, достаточно толстым слоем на снег, а также на кроны деревьев, частично защищённые снегом. Механических повреждений (облом веток, изгибание стволов и т. п.) при этом почти не было. Часть пепла, осевшего на кронах, обвалилась вместе со снегом при порывах ветра; другая часть

сползла или стекла с ветвей вместе с тающим снегом, и наконец, третья часть была смыта весенне-летними дождями. Вероятно, запас влаги, накопленный в виде метрового слоя снега, на который лёг пепел, а также атмосферные осадки, поступавшие в течение 1–2 месяцев после извержения, пока протаивал снег, вымыли из пепла легкорастворимые соединения. Это минимизировало негативное химическое воздействие пепла (Мелекесцев и др. 2011) на растения и почву к началу вегетативного сезона.

Отметим, что сильные пеплопады вулканов Камчатки, в ходе которых был нанесён существенный ущерб лесной растительности, проходили как зимой, так и летом (вулканы Ксудач, март 1907 г., Авачинский, февраль 1945 г., Шивелуч, ноябрь 1964 г., Толбачик, июль-сентябрь 1975 г.). Характерной для последних была не только мощная толща вулканических отложений в зонах гибели древостоев, но и размер фрагментов тефры, который мог достигать нескольких сантиметров. Так, в 1964 г. бомбардировка андезитовыми лапилли влк. Шивелуч размером 1–6 см в течение короткого времени (около получаса) привела к разрушению крон деревьев и в целом к масштабной гибели лесов в юго-восточном секторе вулкана; при этом мощность тефры, отложившейся в зоне поражения древостоя, была сравнительно небольшой: 12–20 см (Гришин и др. 2000). Малоаметными событиями для растительного покрова остались пеплопады влк. Шивелуч в феврале 2005 г. (облако пепла ушло в сторону незаселённой территории к западу от вулкана), в конце октября 2010 г. (по многим параметрам, включая свойства пепла, пеплопад 2010 г. был сходен с пеплопадом 2023 г., но его ось была ориентирована на юго-восток), а также масштабный пеплопад влк. Безымянный (март 1956 г.), тонкий андезитовый пепел которого отложился на склонах влк. Шивелуч толщей в 4–5 см.

Для древостоя и подлеска лесных сообществ воздействие апрельского пеплопада 2023 г. не оказалось разрушительным. Для доминирующих здесь в лесном поясе деревьев с опадающей листвой и хвоей (берёза каменная, лиственница) воздействие было минимизировано. Деревья ели внешне не пострадали, несмотря на сильную запылённость крон и плотный слой пепла под пологом леса. Пеплопад такой мощности может в целом негативно воздействовать на физиологическое состояние деревьев (абразия хвои, снижение фотосинтеза вследствие запыления и др.), но степень этого воздействия может быть небольшой. Могут изменяться условия в корнеобитаемой толще почв через ухудшение аэрации, снижение температуры, удлинение периода и глубины промерзания благодаря изолирующему чехлу пепла. Кроме того, слой пепла, являясь теплоизолятором, задержал стаивание снега, что затруднило прохождение растениями сезонного цикла развития, вызвало угнетение их состояния (в том числе из-за пониженной температуры почвы в вегетационный период), а часть растений привело к гибели.

Негативным фактором к началу вегетации для мелких растений также стало уплотнение слоя пепла и образование корки на его поверхности. Корка может препятствовать прорастанию семян и подавлять рост растений (Tarasenko et al. 2019). Однако для кустарников и крупного подроста деревьев воздействие пеплопада оказалось незначительным. Более того, небольшой пеплопад может увеличивать прирост древесины через эффект мелиорации из-за минеральной подкормки (Шамшин 1965). Пепел, выпавший слоем 1–5 см, может приводить как к стимулирующему, так и угнетающему действию на разные группы растений. Древесная растительность может испытывать локальное воздействие, связанное с механическим воздействием (изгибание, иногда обломы ветвей). В данном случае этого не произошло в связи с отсут-

ствием листвы у деревьев (хвои у лиственницы). Нагрузка на облиственную крону зрелого дерева может составить сотни килограммов даже при мощности отложений всего 1 см пепла (Гришин и др. 2021а). При этом кроны провисают, ветви изгибаются. При большей нагрузке ветви ломаются; у молодых лиственных и хвойных деревьев (берёза белая, осина, лиственница) тонкие стволы круто изгибаются так, что верхушки крон обращены к земле и зафиксировались в таком состоянии, по крайней мере, на несколько лет. Это наблюдалось нами через три года после сильного пеплопада Толбачинского извержения 1975 г. при мощности отложений пепла на почве 3–6 см и более. Деревья при этом оставались живыми. Причина была в большой нагрузке на облиственную крону тонкого влажного пепла в условиях морозящих дождей во время пеплопада; пепел отчасти цементировался на ветвях, в пространстве между стволом и ветвями, сохраняясь, таким образом, минимум три года. При ударе по стволу небольшого дерева (5–7 м высотой), с ветвей кроны с шумом обрушивался сухой «дождь» из нескольких килограммов базальтовой тефры (пыль и песок).

Регулярное поступление пепла может приводить к определённом отбору экологических групп растений, адаптированных к пеплопадам, в том числе и опосредованно, через меняющиеся свойства быстро нарастающего профиля вулканических почв. Чувствительными к небольшим поступлениям пепла оказываются в первую очередь мхи, лишайники, часть травянистых растений и мелкий подрост древесных. Их соотношение в растительных сообществах может несколько измениться. Так, отмечалось, что выпадение в районе р. Байдарная в 1956 г. пепла влк. Безымянный мощностью 3–5 см снизило до 15% проективное покрытие мохового яруса в ельниках, по описаниям 1963 г. (Карпачевский, Турков 1972). Однако в ходе естественного восстановления к 1972 г. покрытие мохового яруса увеличилась до 30–70% (Манько, Ворошилов 1978). В 2015 г. в обследованных нами моховых ельниках покрытие мхов в среднем превышало 70%, а местами достигало 90%. Можно предположить, что естественное восстановление прежнего состава и относительного обилия видов травянистых растений в лесных сообществах последует в течение небольшого периода: от нескольких лет до 1–2 десятилетий, а мохово-лишайникового яруса – за более длительный период.

Ветровое переотложение пепла в больших количествах и на обширных территориях может быть дополнительным негативным фактором воздействия на природную среду. В случае влк. Шивелуч, леса которого сейчас не являются объектом массовых лесозаготовок и других форм практического использования, это не столь актуально. Перенос пепла может быть достаточно разрушительным многолетним следствием пеплопада для высокогорной растительности, а также формирующейся растительности вулканических пустошей, и в целом для биоты обширного вулканического района. Однако в регионах с развитым сельским хозяйством процессы переотложения после сильных пеплопадов приводят к экономическим бедствиям, поскольку погребают или превращают в малопригодные ценные земли, препятствуют выпасу скота или приводят к его массовой гибели, разрушают инфраструктуру, выводят из строя технику и создают угрозу здоровью населения (Wilson et al. 2011).

Заключение

Существенный пеплопад (более 1 см отложений) охватил территорию, простирающуюся более чем на 100 км к юго-западу от влк. Шивелуч. В результате отложений пеплопада даже максимальной мощности (более 5 см) в лесном поясе на склонах вулкана негативное воздействие на растительность было минимизировано благодаря

ряду обстоятельств: отсутствие листьев и хвои (у лиственниц), мощный, близкий к максимальному снежный покров, на который лёг тонкий пепел. Древесная растительность в нижней половине лесного пояса уцелела, и в основном даже не была повреждена, однако сильные изменения произошли в травяно-кустарничковом ярусе лесных сообществ: разреживание и уменьшение размеров травянистых растений, а также снижение видового разнообразия. Вейник *C. purpurea*, широко распространённый доминант травяной растительности, стал встречаться гораздо реже, зато существенно увеличилась доля иван-чая *C. angustifolium*. Более сильное воздействие испытал мохово-лишайниковый ярус сообществ: он оказался погребён; его восстановление может растянуться на несколько десятилетий. После извержения выявлено заметное воздействие вторичного запыления переотложенным пеплом, наиболее сильно оно сказывается на открытых пространствах и опушках леса. Этот процесс может идти много лет, учитывая огромные количества пепла, распределённые на открытых пространствах склонов вулкана. В целом, произошедший масштабный пеплопад – существенное и относительно редкое природное событие; последствия его для экосистем требуют разностороннего и, желательно, систематического наблюдения и изучения в течение ряда лет.

Благодарности

Благодарим за данные об отложениях пепла, отбор образцов в отдельных точках и предоставленные фотографии коллег Н. В. Горбач, Б. Н. Гордейчика, Ю. В. Демянчука, О. А. Чернягину.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, тема № 121031000134-6.

Литература (References)

- Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. 1995. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // *Вулканология и сейсмология*. № 4. С. 116–126. (Belousov A. B., Belousova M. G. 1995. Plinian eruption of Shiveluch volcano in 1964 (Kamchatka) preceded by a large-scale failure of edifice. *Journal of Volcanology and Seismology* 4: 116–126. [In Russian].)
- Гирин О. А., Лупян Е. А., Хорват А. и др. 2023. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 20, № 2. С. 283–291. (Girina O. A., Loupian E. A., Horvath A. et al. 2023. Analysis of the development of the paroxysmal eruption of Sheveluch volcano on April 10–13, 2023, based on data from various satellite systems. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* (20) 2: 283–291. [In Russian].) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
- 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. Directed blast on the Shiveluch volcano. In: *Volcanoes and eruptions*. Moscow: Nauka, pp. 3–37. [In Russian].)
- Гришин С. Ю. 2009. Гибель леса на вулкане Шивелуч под воздействием палящей пирокластической волны (Камчатка, 2005 г.) // *Экология*. № 2. С. 158–160. (Grishin S. Yu. 2009. Forest die-off under the impact of burning pyroclastic surge on the Shiveluch volcano (Kamchatka, 2005). *Russian Journal of Ecology* (40)2: 146–148). <https://doi.org/10.1134/S106741360902012X>
- Гришин С. Ю. 2023. Формы воздействия на растительность в ходе сильного извержения вулкана Шивелуч (апрель 2023 г., Камчатка). Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы XXIV международной научной конференции. – Петропавловск-Камчатский. С. 45–48. (Grishin S. Yu. 2023. Forms of vegetation impact by a strong eruption of the Shiveluch volcano (April 2023, Kamchatka). Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters. Materials of the XXIV International Scientific Conference. Petropavlovsk-Kamchatsky, pp. 45–48. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Бурдуковский М. Л., Лазарев А. Г. и др. 2015. Гибель растительности в результате прохождения пирокластической волны (вулкан Шивелуч, Камчатка, 2010 г.) // *Вестник*

- ДВО РАН*. № 2. С. 101–108. (Grishin S. Yu., Burdukovskii M. L., Lazarev A. G. et al. 2015. Devastation of vegetation as a result of the impact of pyroclastic surge (Shiveluch volcano, Kamchatka, 2010). *Vestnik DVO RAN* 2: 101–108. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Крестов П. В., Верхолат В. П. и др. 2000. Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // *Комаровские чтения*. Вып. 46. С. 73–104. (Grishin S. Yu., Krestov P. V., Verkholat V. P. et al. 2000. Restoration of vegetation on the Shiveluch volcano after the 1964 disaster. *Komarov Memorial Lectures* 46: 73–104. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Перепёлкина П. А., Бурдуковский М. Л. и др. 2017. Начало восстановления лесной растительности после воздействия пирокластической волны извержения 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. et al. 2017. The beginning of restoration of forest vegetation after the February 27, 2005 pyroclastic surge from Shiveluch volcano (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* 4: 28–38. [In Russian].)
- Гришин С. Ю., Перепёлкина П. А., Бурдуковский М. Л. и др. 2018. Природные изменения в долине р. Байдарной (вулкан Шивелуч, Камчатка) после сильного извержения 27 февраля 2005 г. // *Вестник ДВО РАН*. № 6. С. 133–145. (Grishin S. Yu., Perepelkina P. A., Burdukovskii M. L. et al. 2018. Natural changes in the valley of the Baydarnaya River (Shiveluch volcano, Kamchatka) following the strong eruption on February 27, 2005. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences* 6: 133–145. [In Russian].) <https://doi.org/10.25808/08697698.2018.202.6.015>
- Гришин С. Ю., Перепёлкина П. А., Бурдуковский М. Л. и др. 2021а. Пеплопад вулкана Шивелуч (Камчатка) 29 августа 2019 г. и его воздействие на растительный покров // *Известия Русского географического общества*. № 5. С. 1–14. (Grishin S. Yu., Perepelkina P. A., Burdukovskii M. L. et al. 2021. Ashfall of Shiveluch Volcano (Kamchatka) on August 29, 2019 and Its Impact on Vegetation. *Proceedings of the Russian Geographical Society* 5: 1–14. [In Russian].) <https://doi.org/10.31857/S0869607121050049>
- Гришин С. Ю., Перепёлкина П. А., Бурдуковский М. Л. 2021б. Начало первичных сукцессий на отложениях пирокластического и лавового потоков вулканов Шивелуч и Толбачик (Камчатка). Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы XXII международной научной конференции. – Петропавловск-Камчатский. С. 29–32. (Grishin S. Yu., Perepelkina P. A., Burdukovskii M. L. 2021. The beginning of primary successions on deposits of pyroclastic flows and lava flows of the Shiveluch and Tolbachik volcanoes (Kamchatka). Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters. Materials of the XXII International Scientific Conference. Petropavlovsk-Kamchatsky, pp. 29–32. [In Russian].)
- Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. 2013. Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // *Вулканология и сейсмология*. № 2. С. 48–62. (Zharinov N. A., Demyanchuk Yu. V. 2013. Large explosive eruptions of Shiveluch volcano (Kamchatka) resulting in partial destruction of the extrusive dome (February 28, 2005 and October 27, 2010). *Journal of Volcanology and Seismology* 7(2): 131–144. [In Russian].) <https://doi.org/10.1134/S0742046313020061>
- Карпачевский Л. О., Турков В. Г. 1972. К характеристике растительности и почв южного склона вулкана Шивелуч // *Биологические науки*. № 8. С. 119–126. (Karpachevsky L. O., Turkov V. G. 1972. On the characteristics of vegetation and soils of the southern slope of the Shiveluch volcano. *Biologicheskie nauki* 8: 119–126. [In Russian].)
- Якубов В. В., Чернягина О. А. 2004. Каталог флоры Камчатки (сосудистые растения). – Петропавловск-Камчатский: изд-во «Камчатпресс». 165 с. (Yakubov V. V., Chernyagina O. A. 2004. Catalog of the flora of Kamchatka (vascular plants). Petropavlovsk-Kamchatsky: “Kamchatpress”, 165 pp. [In Russian].)
- Манько Ю. И., Ворошилов В. П. 1978. Еловые леса Камчатки. – М.: Наука. 256 с. (Manko Yu. I., Voroshilov V. P. 1978. Spruce forests of Kamchatka. Moscow: Nauka, 256 pp. [In Russian].)
- Мелекестев И. В., Волынец О. Н., Ермаков В. А. и др. 1991. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1. С. 84–103. (Melekestev I. V., Volynets O. N., Ermakov V. A. et al. 1991. Shiveluch volcano. In: Active volcanoes of Kamchatka. Vol. 1, pp. 84–103. [In Russian].)
- Мелекестев И. В., Карташева Е. В., Кирсанова Т. П. и др. 2011. Загрязненная свежевывавшей тефрой вода как фактор природной опасности (на примере извержения вулкана Корякский, Камчатка, в 2008–2009 гг.) // *Вулканология и сейсмология*. № 1. С. 19–32. (Melekestev I. V., Kartasheva E. V., Kirsanova T. P. et al. 2011. Water contaminated by fresh tephra as a natural

hazard factor: the 2008–2009 eruption of Koryakskii volcano, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology* 1(5): 17–30). <https://doi.org/10.1134/S0742046311010064>

Шамшин В. А. 1965. Влияние вулканических пеплопадов на леса Центральной Камчатки // *Вопросы географии Камчатки*. Вып. 3. С. 83–89. (**Shamshin V. A.** The effect of volcanic ashfalls on the forests of Central Kamchatka. *Voprosy geografii Kamchatki* 3: 83–89. [In Russian].)

Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al. 2015. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass. *International Journal of Earth Sciences* 104: 1459–1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>

Saputra D., Sari R., Hairiah K. et al. 2022. Recovery after volcanic ash deposition: vegetation effects on soil organic carbon, soil structure and infiltration rates. *Plant and Soil* 474: 163–179. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05322-7>

Tarassenko I., Biolders C., Guevara A. et al. 2019. Surface crusting of volcanic ash deposits under simulated rainfall. *Bulletin of Volcanology* 81: 30. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1289-6>.

Wilson T. M., Cole J. W., Stewart C. et al. 2011. Ash storms: Impacts of wind-remobilised volcanic ash on rural communities and agriculture following the 1991 Hudson eruption, southern Patagonia, Chile. *Bulletin of Volcanology* 73(3): 223–239. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0396-1>