

**Последствия крупного извержения вулкана Шивелуч (Камчатка)  
11–13 апреля 2023 г. для лесной растительности  
(предварительное сообщение)**

Сергей Юрьевич Гришин<sup>1</sup>✉, Полина Александровна Перепёлкина<sup>1</sup>,  
Валерий Александрович Цветков<sup>2</sup>, Александр Геннадьевич Лазарев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,  
Владивосток, 690022, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

Петропавловск-Камчатский, 683000, Российская Федерация

<sup>3</sup>Камчатский центр информатизации и оценки качества образования,  
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

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

Получена 2 ноября 2024 г.; принята к публикации 1 декабря 2024 г.

**Аннотация.** Сильное извержение вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. привело к радикальному изменению природной среды обширной территории. Анализ трансформаций по спутниковым изображениям и полевые работы летом 2023 и 2024 гг. позволили выявить формы, глубину и масштабы воздействия на лесную растительность. Многометровые высокотемпературные пирокластические отложения перекрыли площадь более 60 км<sup>2</sup> на южном и юго-восточном склонах вулкана. Основные погребённые территории включают в себя обширное поле отложений площадью 38 км<sup>2</sup> на высоте 400–800 м, и серию языков пирокластических потоков общей площадью 12.5 км<sup>2</sup>, спустившихся до высоты 140–350 м, максимальной протяжённостью 22 км от центра извержения. До извержения там располагались хвойные (*Larix cajanderi*) и лиственные (*Betula ermanii*) леса, покровы стланников (*Altis fruticosa*), горные луга и вулканические бедлэнды (наследие предыдущих извержений). На площади около 24 км<sup>2</sup> была перекрыта продуктами извержения и погибла древесная растительность, включая ценные хвойные леса. Общая площадь лесов, перекрытая мощными (до десятков метров) высокотемпературными толщами составила 20 км<sup>2</sup>. Пирокластические волны и шлейфы пирокластических потоков превратили леса и стланники в мёртвый древостой на площади ещё нескольких квадратных километров. Причиной их гибели было мощное и быстрое термическое поражение раскалёнными газово-песчаными вихрями. Сразу после извержения началось размывание поверхностными водотоками пирокластических отложений, их перенос и погребение лесных территорий перемытыми материалами. В результате происходит гибель леса. Растительность, прилегающая к полям пирокластических отложений, испытывает воздействие частых и интенсивных пылевых переносов, которые возникают на открытых территориях выше границы леса. Извержение 2023 г. стало крупнейшим эксплозивным событием последних десятилетий на Камчатке и Курилах и привело к масштабному уничтожению лесов.

**Ключевые слова:** вулканические воздействия, пирокластические потоки, пирокластические волны, разрушение растительности, *Larix cajanderi*, *Betula ermanii*, Камчатка.

**Consequences of a major eruption of Shiveluch volcano (Kamchatka, April 11–13, 2023) for forest vegetation (preliminary report)**

Sergey Yu. Grishin<sup>1</sup>✉, Polina A. Perepelkina<sup>1</sup>, Valery A. Tsvetkov<sup>2</sup>,  
Alexander G. Lazarev<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Kamchatka Center for Informatization and Assessment of Education Quality, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

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

Received November 2, 2024; accepted December 1, 2024

**Abstract.** The strong eruption of Shiveluch volcano in April 2023 led to radical changes in the natural environment of a vast territory. Analysis of changes in the affected area using satellite images and during field work in the summers of 2023 and 2024 revealed the features, depth and scale of the impact on forest vegetation. Multimeter layer of high-temperature pyroclastic deposits covered an area of more than 60 sq. km on the southern and southeastern slopes of the volcano. The main buried areas include a vast deposit field measuring 38 sq. km, lying in the altitude range of 400–800 m and a series of pyroclastic flow tongues with a total area of 12.5 sq. km, descending to an altitude of 140–350 m, with a maximum length of 22 km from the eruption center. Before the eruption, there were coniferous (*Larix cajanderi*) and deciduous (*Betula ermanii*) forests, dwarf alder (*Alnus fruticosa*) covers, mountain meadows and volcanic badlands (legacy of previous eruptions). Woody vegetation, including valuable coniferous forests, was buried and destroyed over an area of approximately 24 km<sup>2</sup>. Burial of forests by thick (up to tens of meters) high-temperature strata occurred over an area of more than 20 km<sup>2</sup>. The pyroclastic surge and the peripheral parts of the pyroclastic flows turned forests and dwarf alder forests into dead stands over an area of several square kilometers. The cause of its death was powerful and rapid thermal damage by hot gas-sand vortices. Immediately after the eruption, surface watercourses begin to wash away pyroclastic deposits, transporting them, and burying forest areas with washed-out materials. As a result, the forest dies. Vegetation adjacent to pyroclastic deposit fields is affected by frequent and intense dust transports that occur in open areas above the tree line. The 2023 eruption was the largest explosive event in Kamchatka and the Kuril Islands in recent decades, and caused large-scale destruction of forests.

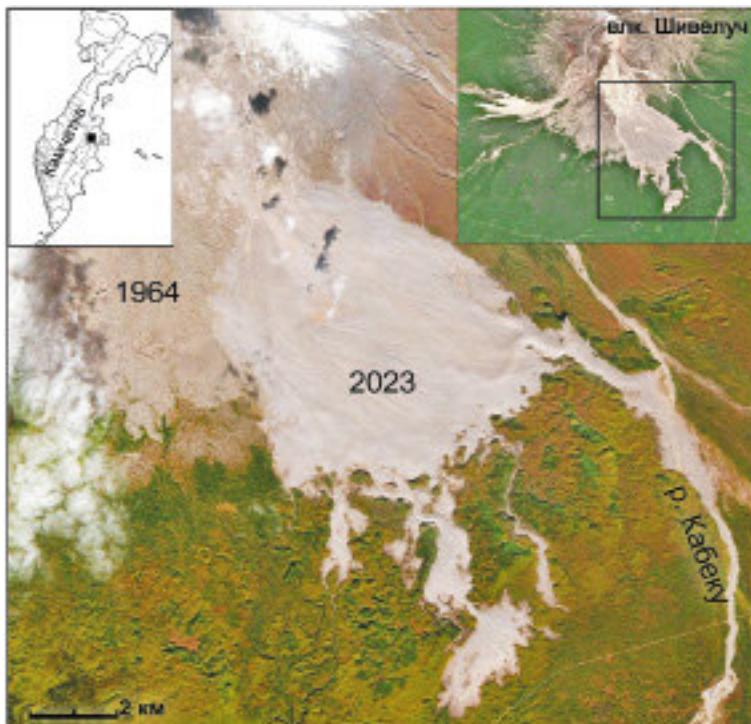
**Key words:** volcanic impact, pyroclastic flows, pyroclastic surges, vegetation devastation, *Picea yezoensis*, *Betula ermanii*, Kamchatka.

## Введение

Весной 2023 г. произошло сильное извержение Шивелуча – одного из активнейших вулканов Камчатки и российского Дальнего Востока в целом. Первоначально внимание общественности и СМИ было привлечено к пеплопаду, который оказал сильное негативное воздействие на повседневную жизнь поселков центральной Камчатки (пос. Ключи и др.). Пеплопад оказался весьма существенным по площади покрытия территории и общему объёму отложений, стал самым крупным за последние почти 60 лет после грандиозного извержения Шивелуча в 1964 г. Воздействие отложений пепла 2023 г. на лесную растительность было кратко описано в работе ранее (Гришин и др. 2024). Однако основные события извержения 2023 г., изменившие природный комплекс вулкана на обширной территории, произошли в другом секторе вулкана. В результате обвала активного купола произошёл масштабный сход глыбовых пирокластических потоков, перекрывших мощными раскалёнными толщами обширную территорию к юго-востоку от центра извержения (Жаринов, Демянчук 2024). Площадь этой территории составила десятки квадратных километров, языки пирокластических потоков глубоко вошли в лесной пояс, приблизившись к важной в регионе автомобильной трассе, проходящей у подножия вулкана (рис. 1).

В целом, по размерам территории, перекрытой мощными высокотемпературными толщами, извержение стало крупнейшим из двух десятков крупных эруптивных событий, произошедших на Камчатке и Курилах в XX и первой четверти XXI столетия. Масштабы природных трансформаций и необычность параметров и последствий извержения потребовали срочного обследования района катаклизма, поскольку многие характеристики новообразованной среды, в том числе сформированной высокотемпературными отложениями, меняются очень быстро – в первые дни, недели и месяцы. Существенные изменения видны уже через год.

В августе 2023 г., через четыре месяца после извержения, мы провели рекогносцировочное обследование территории воздействия, включая оценку последствий пеплопада, а в августе 2024 г. – более обстоятельные исследования, главным образом с упором на последствия прохождения пирокластических потоков и их воздействия на леса. Основными задачами исследования были: оценка разнообразия



**Рис. 1.** Поле пирокластических отложений апрельского извержения 2023 г. вулкана Шивелуч. Цифрами обозначены отложения извержений соответствующих годов. Внизу справа видна автомобильная трасса. Снимок со спутника Sentinel-2 (2023 г.).

**Fig. 1.** Pyroclastic deposits from the April 2023 eruption of Shiveluch volcano. The numbers indicate deposits from the corresponding years of eruptions. A highway is visible at the bottom right. Sentinel-2 satellite image (2023).

факторов изменения среды, степени и масштабов ее трансформации, выявление форм и факторов поражения растительного покрова, экологических рубежей гибели / выживания доминантов лесной растительности, учёт растений-пионеров зарастания вулканических отложений и начала первичных и вторичных сукцессий. Некоторые аспекты этих вопросов затронуты в предлагаемом предварительном сообщении. Дополнительно кратко рассмотрены специфические условия проведения полевых работ в районе активного вулканизма.

### Материал и методы

Проведён анализ материалов спутниковой съёмки, в том числе выполненной в течение 1.5 лет после извержения. Использовались снимки высокого разрешения со спутника Sentinel-2, сверхвысокого разрешения со спутников GeoEye-1 и WVO3. Выявлены зоны погребения растительности, включая частичное погребение, зоны поражения растительности, зоны существенного отложения пепла. Определена трансформация среды: изменение рельефа, зон высокотемпературных отложений разной толщины (по различной интенсивности прорастания снежного покрова), зон размыва отложений и их аккумуляции, направление вторичного переноса тонких отложений. По результатам дешифрирования спутниковых изображений были намечены маршруты, участки закладки экологических профилей и точки отбора проб.

В полевых условиях на маршрутах проведена съёмка с квадрокоптера зон поражения лесов и полосы контакта между зонами полного погребения и живым/повреждённым/полупогребённым лесом. На профилях, протягивающихся от погибшего к живому лесу, выполнена серия геоботанических описаний с прикопками, сопровождающаяся фиксациями мощности пирокластических отложений (с отбором проб), следов опаливания и повреждений на деревьях. На участках свежих отложений фиксировали пионерные растения, лишайники и грибы, заселяющие ювенильный субстрат. В зонах мощных толщ пирокластических отложений измерялась температура отложений на глубине 50 см. Для анализа изменения состояния окружающей среды использованы материалы полевых исследований, проведённых в данном районе в 1996 г. и 2012 г. (Гришин и др. 2000, 2015).

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

### Природные условия

Вулкан Шивелуч (высота 3283 м) – самый северный, один из крупнейших и наиболее активных вулканов Камчатки. Извергаемые продукты – андезиты, что определяет взрывной характер извержений с масштабными разрушительными последствиями. За последние столетия особо мощные извержения происходили в ~1430, ~1650, 1854 и 1964 гг. (Мелекесцев и др. 1991; Ponomareva et al. 2015). В результате катастрофического извержения 1964 г. на южном склоне вулкана образовалась вулканическая пустыня (рис. 1) площадью около 100 км<sup>2</sup> (Горшков, Дубик 1969; Белоусов, Белоусова 1995). Начиная с 1980 г. в кратере вулкана рос крупный активный купол. Периодические умеренные 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 сторону южных склонов Шивелуча. Значительная часть вулканитов устремляется по долинам р. Байдарная в юго-западном секторе вулкана, а также р. Кабеку в юго-восточном секторе (рис. 1, врезка). Крупные извержения со сходом пирокластических потоков произошли в 2005 и 2010 гг. (Жаринов, Демянчук 2013). Пирокластические потоки представляют собой смесь раскаленного (> 500 °C) обломочного материала и газа; потоки скатываются с большой скоростью по понижениям на склонах вулкана, погребая своими отложениями русла и долины. Потоки сопровождают пирокластические волны – газонасыщенные турбулентные вихри с песчаным материалом. Скорость волн составляет десятки метров в секунду, температура – несколько сотен градусов.

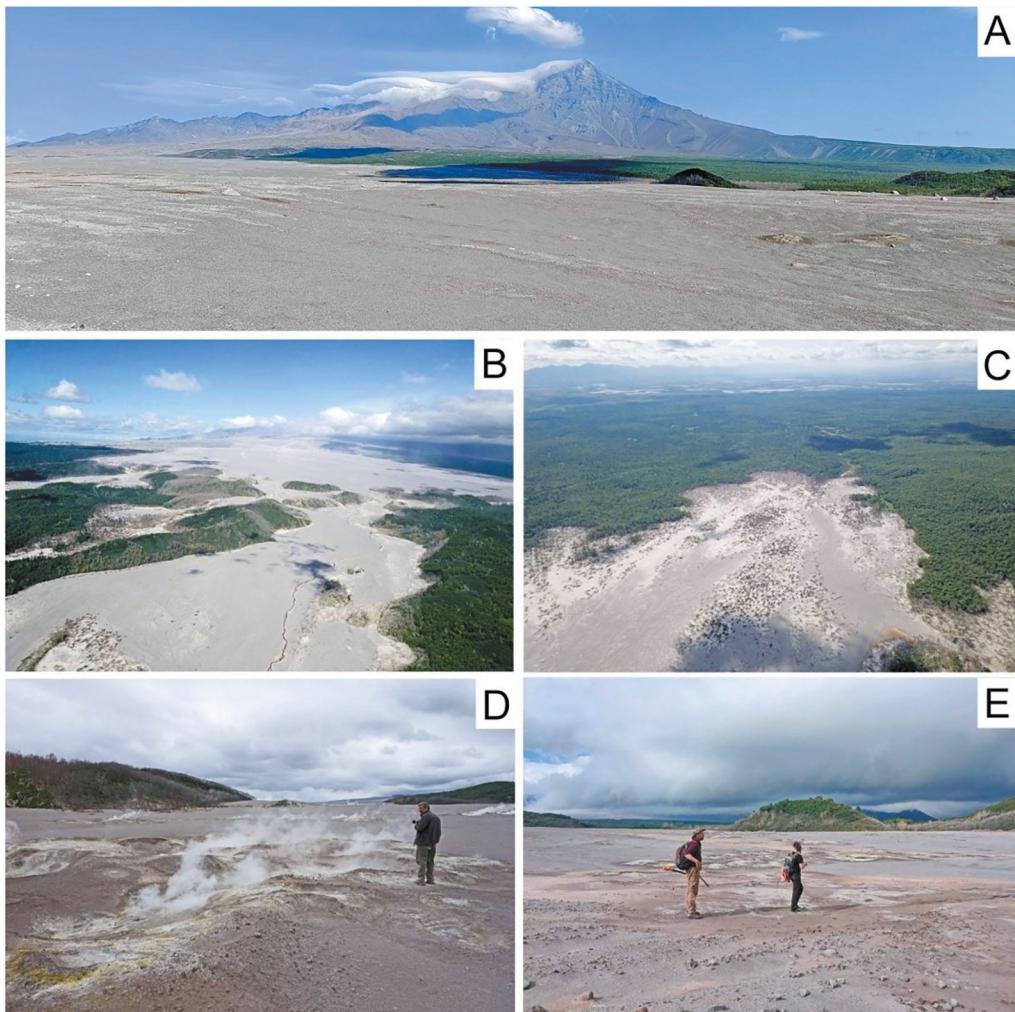
Растительность района распределена на разнородных по генезису и возрасту отложениях. Для территории воздействия извержения 2023 г. характерны два основных природных комплекса. Первый комплекс располагался выше 500 м над уровнем моря (далее над ур. м.) и до апреля 2023 г. представлял собой вулканическую пустыню с крайне разреженным растительным покровом (Гришин и др. 2000). Эта часть зоны поражения была сформирована отложениями извержения 1964 г. и расположенным восточнее отложениями извержения 2010 г. Первые отложения были обвальными, холодными с момента извержения; вторые – обвальными/пирокластическими горячими (судя по протаиванию снежного покрова, локально горячими они оставались вплоть до апреля 2023 г.). В результате извержения 2023 г. обширные территории, расположенные выше 500 м, были погребены. Второй комплекс располагался

гается ниже 500 м; здесь преобладает лесная, а также частично луговая и стланниковая растительность на старых (возраст около 600 лет) отложениях предыдущих вулканических катастроф. В высотном интервале 200–460 м над ур. м. лесная растительность из берёзы каменной *Betula ermanii* Cham. и лиственницы *Larix cajanderi* Cham. расположена на холмистых отложениях гигантского обвала, произошедшего в ходе катастрофического извержения в позднем плейстоцене (Ponomareva et al. 2015). По верхним частям склонов холмов доминируют заросли ольхового стланника *Alnus fruticosa* Pall. Ниже 300 м преобладают леса из лиственницы, часто с участием берёзы каменной и других видов лиственных деревьев. Растительность второго комплекса была погребена и пострадала на части территории в апреле 2023 г., но в целом сохранилась. Массив еловых лесов из *Picea jezoensis* Siebold et Zucc. расположен на юго-западных подножиях Шивелуча; в юго-восточном секторе вулкана ельники встречаются лишь местами и, как правило, разреженно.

## Результаты

**Изменение среды в результате извержения: распределение отложений, их толщина и температура.** В ходе извержения, помимо интенсивного пеплопада, произошёл обвал активного купола. Материалы, слагавшие купол, обрушились раскалённой лавиной к югу от него, а затем отложились на юго-восточном склоне вулкана. Высотный диапазон прохождения продуктов извержения от купола до нижней точки отложений составил около 2000 м по вертикали, а максимальная протяжённость – около 22 км. Основная часть отложений лежит на юго-восточном склоне в высотном интервале от 800 м до 400–500 м над ур. м. (рис. 2А). Поле площадью ~38 км<sup>2</sup> протянулось сверху вниз почти на 8 км, расширяясь в форме колокола, и имеет внизу ширину ~7 км. В нижней части этого поля отложениями были полностью перекрыты долины р. Кабеку и трёх её притоков. Отметим, что долина и притоки реки имели врез глубиной несколько десятков метров, причём третий приток р. Кабеку – глубиной более 50 м (Гришин и др. 2015). Отложения 2023 г. полностью перекрыли отложения предыдущего извержения (октябрь 2010 г.). Ниже пирокластические потоки сошли по руслам и долинам, в результате чётко сформировались пять рукавов потоков, имеющих длину от 2.5 до 6 км (рис. 1). Восточный рукав прошёл 4.5 км по долине р. Кабеку, спустившись до 220 м над ур. м. (протяжённость от центра извержения – 22 км). Ширина полосы его высокотемпературных отложений достигла 1 км. Наиболее крупный по площади центральный рукав (рис. 2В) спустился по старому, заросшему лесом, руслу до 145 м над ур. м., пройдя около 6 км. В конечной части его шлейфы растеклись крупным веером по лесу (в основном из лиственницы), перекрыв участок шириной около 3 км, и лишь 450–500 м не дошли до региональной автотрассы (рис. 2С). Лес в пределах этого «веера» был погребён полностью или частично. Общая площадь отложений всех рукавов пирокластических потоков составила ~12.5 км<sup>2</sup>.

Температура материала пирокластических потоков во время их отложения превышает 500 °С. В мощных (десятки метров) толщах температура может оставаться очень высокой в течение нескольких лет и даже десятилетий, а на поверхности она снижается, особенно в холодное время года. Полевые измерения в августе 2023 г. показали, что температура отложений на глубине 50 см достигала 50–65 °С. Во многих местах, где по условиям рельефа сформировались мощные толщи отложений, были встречены парящие фумаролы с температурой пара на выходе 200–300 °С. Выявлено, что крупные серии и цепочки фумарол были приурочены к погребённым руслам, особенно р. Кабеку и её притоков (рис. 2Д, 2Е).



**Рис. 2.** А – Вулкан Шивелуч и поле пирокластических отложений 2023 г; В – верхняя часть наиболее крупного пирокластического потока, видны погибшие леса; С – конечная часть того же потока, виден сплошной вывал леса; Д – фумарольное поле в долине р. Кабеку, 2023 г.; Е – погребённая долина р. Кабеку: под ногами – угасшие фумаролы и 30-метровая горячая толща, 2024 г.

**Fig. 2.** A: Shiveluch volcano and pyroclastic deposit field, 2023; B: upper part of the largest pyroclastic flow, dead forests are visible; C: terminal part of the same flow, continuous forest fall is visible; D: fumarole field in the Kabeku River valley. 2023; E: the buried Kabeku River valley: 30 meters thick layer of hot deposits underfoot, 2024.

По протаиванию снежного покрова, видимого на спутниковых изображениях, можно судить об интенсивности прогрева поверхности отложений, и, косвенно, о мощности отложений. На этой основе были выделены зоны разной мощности: предположительно 30–50 м, 10–25 м и до 5 м. В результате, общий объем пирокластических отложений можно предварительно оценить величиной 0.4–0.5 км<sup>3</sup>.

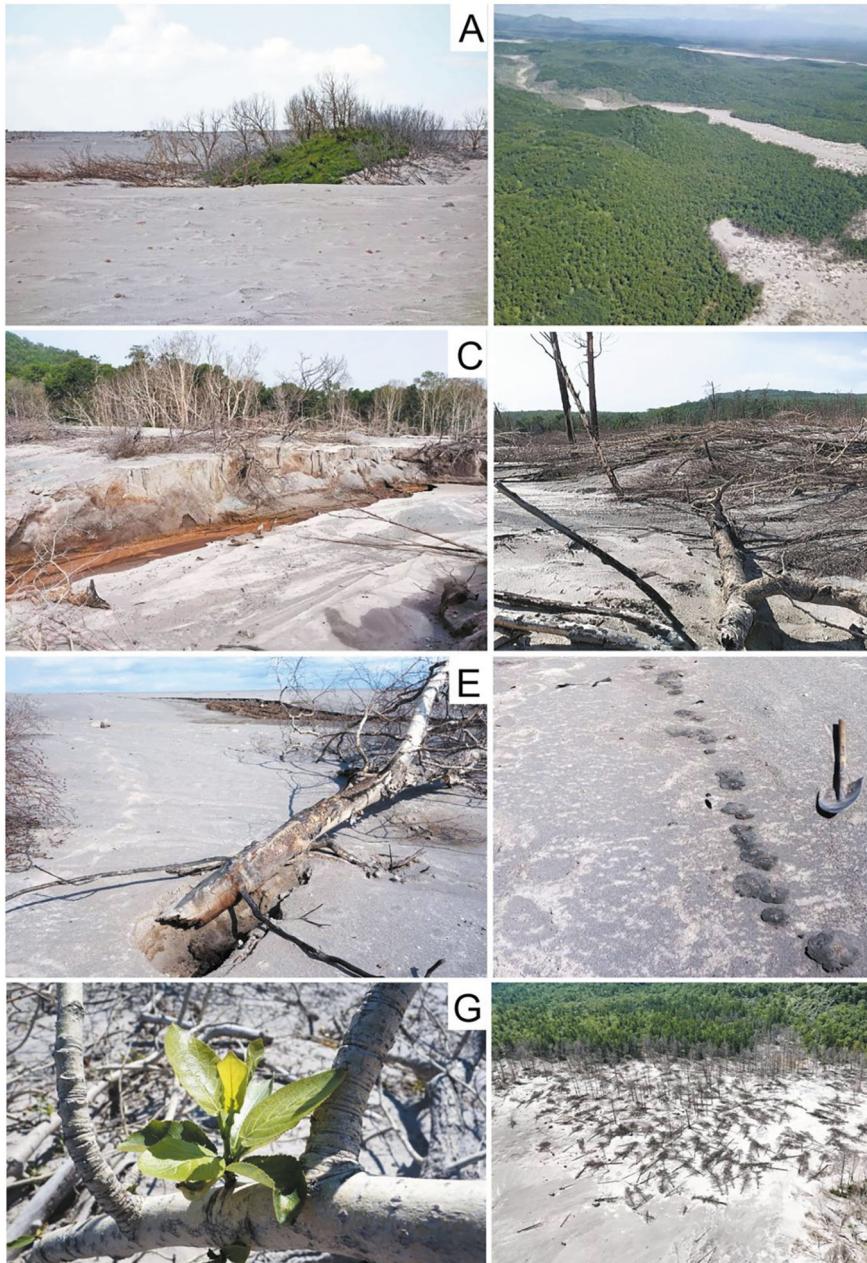
**Погребение лесной и стеллажниковой растительности.** Извергнутые пирокластические отложения продвинули вниз границу между вулканической пустыней и лесом. Смещение этой границы составило ~ 1–2.2 км, снижение по вертикали от высоты 490–540 м до 400–500 м над ур. м. Новая граница между вулканической

пустыней и лесом оказалась резкой; выше границы и близко к ней расположено более десятка островков леса ~50–500 м в поперечнике (рис. 2В). Они покрывают верхние части холмов, основания которых были перекрыты отложениями пирокластических потоков (рис. 3А). Между прежней и новой границами образовался контур длиной ~7 км по фронту и общей площадью ~11 км<sup>2</sup>, где была полностью погребена лесная, стланиковая и луговая растительность. Помимо сомкнутой растительности лесного пояса, пирокластические отложения 2023 г. перекрыли крайне разреженный растительный покров, который формировался на отложениях 1964 г.

Ниже обширного поля пирокластических отложений, лежащего на высоте ~500–800 м, лесная растительность была перекрыта ещё пятью языками пирокластических потоков (рис. 3В). Мощность отложений составила до нескольких десятков метров в глубоко врезанных руслах (р. Кабеку и её притоков) на высоте 390–450 м над ур. м. В основном оказались погребёнными леса из берёзы каменной и лиственницы, а также заросли стлаников, преимущественно ольховника. Как правило, вдоль погребённых русел по осевой части языков отмечены сплошные отложения без видимых погибших деревьев или валежа сломанных стволов. Эти полосы имеют мощную толщу пирокластики, которая оставалась горячей и год спустя после извержения. В нижней половине языков мощные толщи отложений окружены каймой полупогребённого леса (рис. 3С, 3Д, 3Е, 3Н). Мощность отложений в этой кайме составляет, по-видимому, до десятка метров; ближе к живому лесу она постепенно, на протяжении 100–400 м, выклинивается. Древостой разрежен, подлесок погребён, стволы деревьев частью погребены, а большей частью переломаны или перегорели у погребённого в раскалённых отложениях комля и лежат на поверхности (рис. 3Д, 3Е). Отложения в этих периферийных зонах через 4 месяца после извержения были горячими, и полупогребённая древесина местами тлела (рис. 3Е). Горячими они оставались и в августе 2024 г. На поверхности отложений нередко можно увидеть ряды «клепёшек» – возгоны из ствола дерева, погребённого близко к поверхности (рис. 3Ф). У некоторых перегоревших или обломанных в комле деревьев из почек на ствалах появились короткие облиственные побеги (рис. 3Г). Локально встречены и стоящие мёртвые деревья; из-за умеренного динамического воздействия на основания стволов, они устояли (рис. 3Д, 3Н). Общая площадь полупогребённых и погибших таким образом древостоев составляет ~2.5 км<sup>2</sup>.

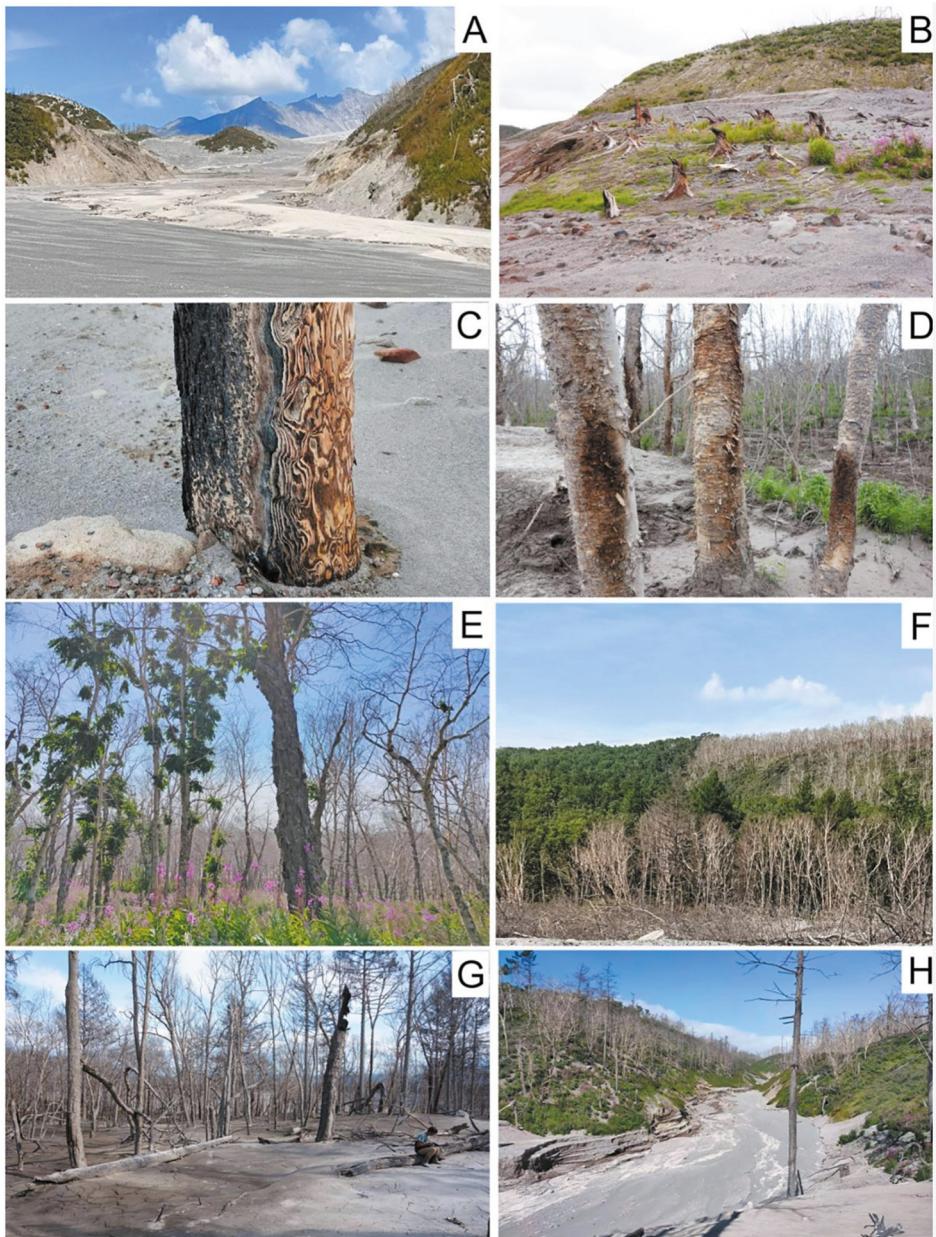
**Разрушение и поражение лесной растительности.** Основной формой вулканического воздействия, вызвавшего гибель лесов на обширном пространстве, были пирокластические потоки и ассоциированные с ними пирокластические волны. В настоящее время их рассматривают как части единого явления, обозначая в англоязычной литературе как «pyroclastic density currents = PDCs» (Druitt 1998). При прохождении потоков по руслам и узким долинам, на бортах русел возникают зоны, где разрушительное давление потока по мере удаления от русла сходит на нет. Это отражается на состоянии древесных растений – деревьев и стлаников, растущих по бортам. При максимальной и длительной нагрузке (результат прохождения многих потоков) растительность разрушается и сносится полностью, как и почвенный покров, и участок расчищается вплоть до материнской породы (рис. 4А).

При постепенном уменьшении степени воздействия можно выделить ряд состояний деревьев. 1. При менее интенсивном воздействии деревья ломаются, причём стволы уносятся (и погребаются) потоком; на месте остаются лишь низкие обломанные пни (рис. 4В). 2. Происходит обламывание ствола, причём ствол лежит рядом с пнем, крона повреждена; в нижней части ствола сильно выражено эродирование



**Рис. 3.** А – вершина погребённого холма, высота 550 м; В – пирокластические потоки в пояссе леса; С – водоток вскрыл мощность толщ у нижнего края языка пирокластики около 3 м; Д – стволы деревьев перегорели в раскалённых толщах и вывалились; Е – у отдельных деревьев процесс тления древесины шёл ещё 4 месяца спустя после извержения; F – «лепёшки» возгонов над погребённым стволом дерева; G – побеги из оживших почек на перегоревшем и вывалившемсяся тополе (2023 г.); Н – вывал перегоревшего леса в конечной части потока.

**Fig. 3.** A: the top of the buried hill, the height is 550 m; B: pyroclastic flows in the forest belt; C: the watercourse exposed the thickness of the strata at the lower edge of the largest tongue of pyroclastic rocks about 3 m; D: tree trunks burned in the hot strata and fell out; E: in some trees the process of wood smoulder continued for another 4 months after the eruption; F: “cakes” of sublimates over a buried tree trunk; G: shoots from revived buds on the burnt and fallen out poplar (2023); H: the fall of the burnt out forest at the end of the flow.



**Рис. 4.** А – склоны, ободранные пирокластическим потоком, В – пни от лиственниц, сломанных и унесённых потоком; С – ствол ободран воздействием пирокластической волны с правой стороны и обуглен с левой; Д – стволы берёз опалены пирокластической волной; Е – «ведьмины метлы» на пострадавших берёзах; F – граница между погибшим и живым лесом на склоне; G – лес погиб после прохождения маломощного шлейфа пирокластического потока; H – пирокластический поток прошёл по узкой лощине, а пирокластические волны погубили лес на склонах.

**Fig. 4.** A: slopes stripped by a pyroclastic flow; B: stumps of larch; trees broken and carried away by the flow; C: trunk stripped by the action of a pyroclastic surge on the right side and charred on the left; D: birch trunks scorched by a pyroclastic surge; E: “witches’ brooms” on damaged birches; F: boundary between dead and living forest on a slope; G: forest died after a thin plume of a pyroclastic flow passed; H: the pyroclastic flow passed through a narrow ravine and the pyroclastic surges destroyed the forest on the slopes.

коры и тканей древесины, опаливание ствола до высоты несколько метров. 3. Ствол уцелел, стоит, однако поврежден, опален и ободран в нижней части до древесины, причём зоны опаливания и эродирования находятся на разных сторонах ствола: воздействие шло на эродированную сторону, опалённая сторона была противоположной (рис. 4С). 4. Ствол и крона уцелели, отмечается лишь умеренное или слабое опаливание основания ствола со стороны воздействия (рис. 4D). 5. Ствол и крона уцелели, следов опаливания и повреждений нет, но дерево погибло.

У берёз отмечается ещё несколько градаций в диапазоне поражение/выживание (продолжение ряда 1–5). 6. Внешне погибшее, но неповреждённое, без следов опаливания, дерево, у которого на стволе или крупной ветви сформировался пучок коротких живых побегов, напоминающих «ведьмины мётлы». 7. То же, но «мётлы» несколько, до шести штук. 8. «Мётлы» много, они образуют своеобразную псевдокрону в средней части ствола (рис. 4Е). Рядом с последними стоят живые деревья без следов воздействия. Граница между живым и погибшим берёзовым древостоем внешне часто выглядит как резкая (рис. 4F), однако узкая переходная зона из деревьев с «ведьминими мётлами» обычно всегда присутствует.

Мы полагаем, что уровень состояния деревьев 2–3 в данном ряду отвечает воздействию шлейфов пирокластических потоков (маломощных краевых частей потока), уровень 4–8 – воздействию пирокластических волн. Мощность отложений в лесу, погибшем от прохождения шлейфов пирокластических потоков (рис. 4G), может составлять до 1.0–1.5 м и уменьшаться до 5–10 см в лесу, погибшем от воздействия пирокластических волн (рис. 4Н).

В конечных частях (шлейфах) пирокластических потоков, которые широкими веерами растеклись по лесу, толщина отложений уменьшается до одного метра и менее; поэтому они быстро остывли. Деревья не были снесены и погребены, а остались стоять. Отложения обожгли основания стволов в местах контакта, а также термически воздействовали на кроны (вплоть до опаливания; отдельные деревья выгорели). В результате, большинство деревьев погибло; образовались полосы и участки погибших древостоев.

Помимо этого, пирокластические волны, которые сопровождали пирокластические потоки, оставили свой след в виде полос мёртвых деревьев по бортам долин. Высокотемпературные газово-песчаные вихри опалили и частично разрушили древостой, приводя его к гибели в полосах шириной до ~50–100 м, примыкающих к зонам отложений потоков, так же, как это произошло в долинах рек Байдарная и Кабеку в 2005 и 2010 гг. (Гришин 2009; Гришин и др. 2015).

**Масштабы гибели древесной растительности.** Участки древостоя, погибшего от воздействия пирокластических волн и маломощных шлейфов пирокластических потоков, расположены в основном выше 200 м над ур. м.; они состоят преимущественно из берёзы каменной. В то же время леса из лиственницы, расположенные ниже 200–220 м, были разрушены (деревья сломаны, или перегорели и вывалены) под воздействием частичного погребения более мощными отложениями пирокластических потоков. По периферии зон частичного погребения (у контакта с живым лесом) деревья погибли без существенных внешних повреждений.

Спутниковые снимки, полученные в начале вегетации 2023 г., показали масштабы гибели древостоев от прохождения маломощных шлейфов пирокластических потоков и пирокластических волн – суммарно около 3.5 км<sup>2</sup>. Самый крупный участок погибшего древостоя площадью ~0.8 км<sup>2</sup> расположен в западной части полосы контакта поля отложений и леса (рис. 2В, 4А). Горные леса из берёзы каменной там погибли

на участке шириной до 1500 м и глубиной до 700 м (рис. 4F). В островках леса, расположенных в полосе контакта поля отложений и леса, деревья и стланики также в основном погибли. У ряда островков видно, что в их северной (верхней) половине древесная растительность полностью погибла от воздействия пирокластических волн, а в южной – частично уцелела, будучи защищённой рельефом.

В целом, лесная и стланиковая растительность, включая хвойные леса, была погребена полностью, а также погребена частично и погибла на площади около 24 км<sup>2</sup>. По предварительной оценке, уничтоженные леса состояли на ~50% из берёзы каменной, 25% – из лиственницы (включая ель), ~15% были смешанными лесами и ~10% зарослями ольхового стланика.

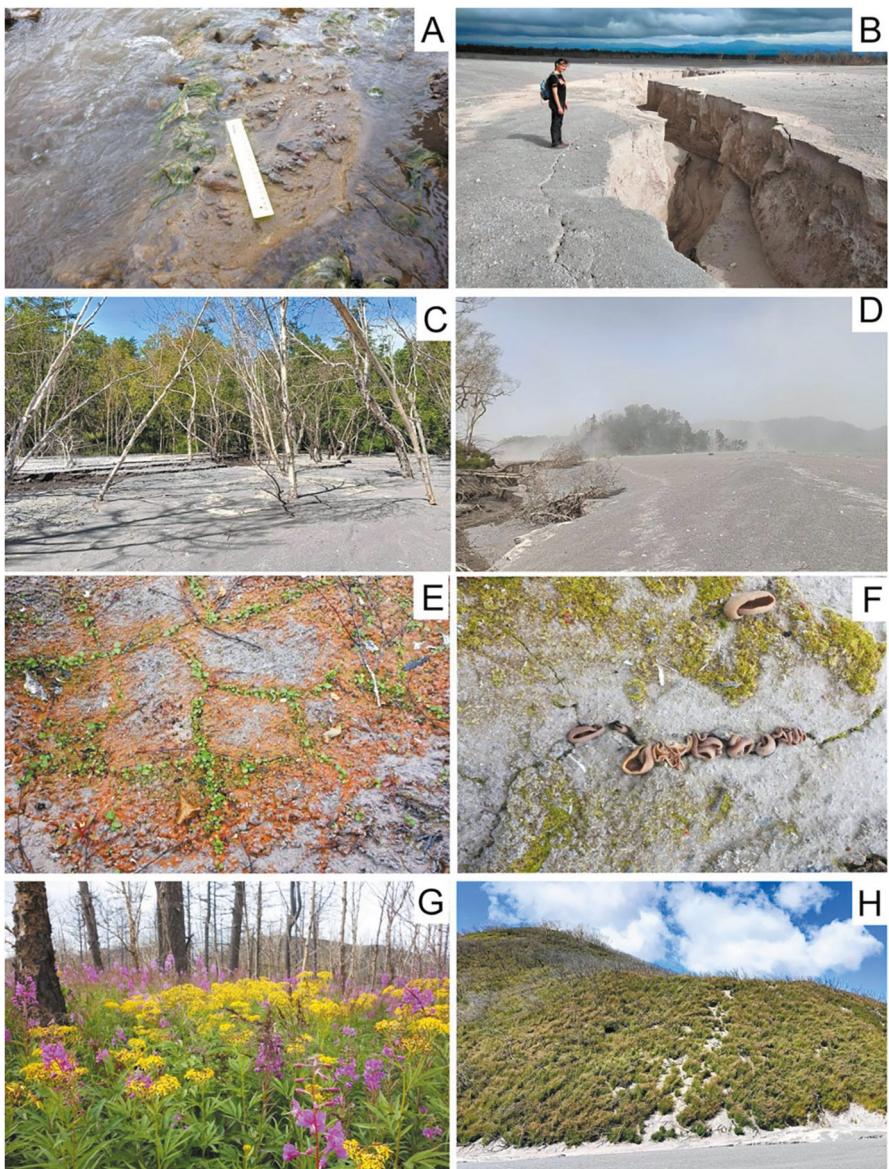
**Изменения в течение первого года.** В период между двумя обследованиями мы выявили существенные изменения в среде и растительном покрове района извержения. Произошло некоторое остывание поверхности отложений, в августе 2024 г. температура отложений на глубине 50 см снизилась до 37–50 °С, фумаролы проявлялись единично; выносы пара заметно уменьшились. Размыт и перенос отложений поверхностью водотоками начался ещё весной 2023 г. Летом в ручьях, образовавшихся на поверхности раскалённых толщ, появились колонии водорослей (рис. 5А). В течение года, особенно в период таяния снегов в высокогорьях, сформировались русла на поверхности поля пирокластических отложений выше 500 м над ур. м. В лесном поясе происходил интенсивный врез русел в толщу пирокластических отложений с глубиной размыва до нескольких метров (рис. 5В, 3С). Вынесенный по этим руслам материал переотложился ниже по течению, замывая как участки пирокластических отложений с полупогребённым лесом, так и (ниже по течению) участки живого леса, что приводит к усыханию и гибели древостоев (рис. 5С). Территории зон усыхания, вероятно, будут увеличиваться.

На обширных открытых пространствах выше новой границы леса рыхлые пирокластические материалы подвергаются эрозии, а их поверхность в ветреную погоду пылит (рис. 5Д). Этот процесс активно шел в беснежный период 2023 г. и 2024 г., особенно когда ветер становился сильным. Когда скорость ветра превышает 20 м/с (по данным метеостанции в пос. Ключи), тысячи тонн пыли, поднятой в воздух, перемещались не только в вулканической пустыне Шивелуча, но и уносились за десятки километров от вулкана, достигая Тихого океана (судя по спутниковым снимкам).

На открытых пространствах отложений пирокластических потоков, которые в толщах являются, как правило, горячими и, возможно, отчасти газонасыщенными, представители высших растений пока не появились. На контакте пирокластических потоков и леса, среди валежа поваленных деревьев и частей их крон, на остывших отложениях небольшой мощности (по-видимому, около метра) появляются небольшие участки с пионерами зарастания – сосудистыми

растениями, мхами, лишайниками и грибами (рис. 5Е, 5F). Условия заселения на бесплодной, исходно высокотемпературной поверхности являются явно неблагоприятными, поскольку и растения, и грибы тяготеют к закреплению в трещинах, где, вероятно, скапливается пыль, тонкий пепел, мелкий древесный мусор и др., и, как результат, появляется субстрат со стабильным локальным увлажнением.

Отмечено интенсивное разрастание отдельных видов растений травяного яруса в местах, где пирокластические волны погубили древесную растительность (рис. 5G). Под пологом погибшего древостоя это иван-чай *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. и крестовник *Senecio cannabifolius* Less., образующие яркий красочный покров высотой до 1.5–1.7 м, а под пологом погибших зарослей ольхового стланика –



**Рис. 5.** А – водоросли в ручье, текущем по пирокластическим отложениям; линейка длиной 20 см (2023 г.); В – врезы глубиной 3–4 м в пирокластических отложениях (2024 г.); С – берёзовый лес, погибший после частичного погребения наносами (2024 г.); Д – при порывах ветра поднимается пылевая завеса; Е – пирокластические отложения у края леса покрылись зелёными всходами ольхи по трещинам; красноватый фон создают грибы *Scutellinia* sp.; F – пирокластику заселяют мхи и грибы *Peziza* sp. по трещинам; G – иван-чай и крестовник под пологом погибшего древостоя; Н – на склонах, где погиб ольховник, интенсивно разрастается вейник.

**Fig. 5.** A: algae in a stream flowing through pyroclastic deposits; ruler 20 cm long (2023); B: 3–4 m deep cuts in pyroclastic deposits (2024); C: birch forest that died after partial burial by sediments (2024); D: a curtain of dust rises when the wind gusts; E: pyroclastic deposits at the edge of the forest are covered with green alder shoots along the cracks; the reddish background is created by fungi *Scutellinia* sp.; F: pyroclastics are inhabited by mosses and fungi *Peziza* sp.; G: fireweed and ragwort bloom under the canopy of the dead tree stand; H: reed grass grows intensively on the slopes where the alder forest died.

плотный покров вейника *Calamagrostis purpurea* (Trin.) Link. s. l. высотой от 0.7 до 1–1.2 м (рис. 5Н). Это зоны вторичных сукцессий; там же отмечено частичное восстановление жизненных функций у ряда пострадавших деревьев («ведьмины мётлы»).

## Обсуждение

**Факторы поражения древесной растительности.** На участках прохождения шлейфов пирокластических потоков и волн деревья и стланики погибли при небольшой мощности отложений – до 1.5 м. Однако метровая толщина отложений означала достаточно мощное воздействие – термическое и механическое (данных о химическом воздействии у нас нет, но оно, несомненно, присутствовало). При таком уровне и интенсивности давления происходило обламывание сучьев и умеренное опаливание стволов (особенно хорошо заметное у молодых берёз). Отдельные стволы (как правило, зрелые и старые деревья) загорались и выгорали. При минимальном воздействии, когда происходила гибель деревьев (оно коррелировало с мощностью отложений 5–10 см), следов опаливания и механических повреждений почти не было. Гибель древесных растений мы трактуем в этом случае как результат термического поражения. Этот вопрос был изучен ранее в долине р. Байдарная (юго-западный склон вулкана Шивелуч) в ходе исследования гибели ельников в результате прохождения пирокластической волны извержения 2005 г. (Гришин 2009; Гришин и др. 2018).

На участках, где произошло частичное погребение лесной растительности (толщиной отложений мощностью до нескольких метров), лишь меньшая часть деревьев осталась стоять, часто сохраняя обугливание или опалины на коре. У большинства деревьев в раскалённой толще перегорало основание стволов, после чего они вываливались. Тление обугленной древесины в воронках, образовавшихся на поверхности отложений в местах вываливания стволов, мы наблюдали в августе 2023 г., через четыре месяца после извержения. Любопытно, что у отдельных перегоревших и вывалившихся таким образом крупных стволов тополя летом 2023 г. из почек на ветвях образовались листья. В небольшом количестве они появились и летом 2024 г. Несмотря на то, что деревья в зонах частичного погребения получили разрушительное механическое воздействие, сопровождавшееся сильной эрозией стволов и обламыванием ветвей, причиной гибели, несомненно, было мощное и быстрое (по-видимому, практически мгновенное) термическое поражение. Погребение оснований стволов раскалённым материалом усугубило тепловой шок.

**Масштабы извержения и гибели растительности.** Извержение 2023 г. в значительной мере повторило эруптивное событие октября 2010 г., когда в результате обвала купола раскалённые массы легли на юго-восточном склоне; ниже обширной зоны аккумуляции сошли пирокластические потоки; пеплопад прошёл в южных секторах вулкана и удалённых окрестностях (десятки километров от центра извержения). Однако масштабы извержения 2023 г. заметно крупнее, площадь горячих отложений существенно больше. При этом высокотемпературные отложения 2023 г. перекрыли ещё не остывшие, горячие в мощных толщах, отложения 2010 г.

Пирокластические потоки 2023 г. прошли значительно дальше и ниже – до 22 км от купола вулкана (в 2010 г. – до 18 км); это максимальное расстояние для современных извержений на Камчатке и Курилах. Существенно, что при этом не образовались лахары (вулканогенные сели) несмотря на то, что извержение произошло в период максимума снегонакопления. Это можно объяснить особой мощностью

и температурой пирокластических отложений, потоки которых, стремительно двигаясь, перекрывали снежный покров и мгновенно испаряли его в своей многометровой раскалённой толще.

Площадь погребения лесной и стланниковой растительности в результате извержения 2023 г., существенно (на порядок, по нашим данным) превысила площадь лесов, погребённых в ходе извержения 2010 г. Первоначально (в апреле – июне 2023 г.) были не ясны масштабы поражения леса маломощными шлейфами пирокластических потоков и пирокластическими волнами, которые проходили по лесу и опаливали деревья, приводя их к гибели. С началом вегетации 2023 г. по полосам мёртвого древостоя, выявленным на спутниковых изображениях, удалось определить зоны поражения и оценить их площадь (около 3.5 км<sup>2</sup>).

В целом, извержение 2023 г. существенно увеличило площадь огромного (более 150 км<sup>2</sup>) вулканогенного бедлена, расположенного на южном, юго-западном и юго-восточном склонах вулкана Шивелуч. Негативное воздействие огромного объёма отложений на природу смежных районов будет продолжаться в течение ряда последующих лет и десятилетий. Наиболее существенное воздействие – замывание лесных территорий размытыми, вынесенными и переотложенными пирокластическими материалами. Возможна гибель леса на площади до нескольких квадратных километров. Первичные сукцессии растительности на пирокластических отложениях в лесном поясе растянутся на сотни лет, а выше границы леса они могут прерываться новыми извержениями.

**Условия проведения полевых исследований.** Стоит отметить, что район вблизи активного вулкана с мощными, внезапными извержениями – территория, потенциально опасная для нахождения людей. В ходе роста активного купола, особенно когда его высота превысила 500 м, угроза извержения выросла, по мнению вулканологов, до крайне опасной. После извержения 2023 г., когда активность вулкана резко снизилась, можно было начинать работать, учитывая определённые природные сложности и опасности. Приходилось принимать во внимание на маршрутах, что под ногами, несмотря на остывшую поверхность – многометровые толщи раскалённых отложений. Погибший лес представляет определённую угрозу внезапным вываливанием деревьев или падением крупных частей кроны; воду в водотоках по краю вулканической пустыни лучше не использовать; вулканическая пыль, в значительной мере состоящая из тонкого андезитового пепла, часто поднимающаяся в воздух, и загазованность в районах фумарол опасны для органов дыхания; рыхлые свежие отложения неустойчивы и склонны к обвалам. Мы наблюдали и испытывали на себе пылевой шторм 5 августа 2024 г., когда работали на маршруте в широкой долине р. Байдарная. Внезапно поднявшийся ветер (его скорость на открытом пространстве, по-видимому, превышала 12–15 м/с) поднял сплошную стену пыли (значительную часть которого составлял пепел 2023 г.), в результате чего видимость упала до 1–2 м. Пришлось надеть респираторы и, максимально прикрывая глаза от пыли, двигаться, выходя в зону леса. Шли сплошённой группой, контролируя присутствие друг друга, ориентируясь по компасу и GPS-приёмнику. В то же время положительным изменением стало появление возможности относительно легко подниматься в горную и высокогорную часть вулкана по долинам, перекрытым пирокластическими отложениями. По долине р. Кабеку летом 2023 г. стало возможным заезжать на внедорожном автомобиле, по крайней мере, до 750 м над ур. м. (по-видимому, размывание отложений в долине рано или поздно закроет эту возможность). Однако угрозы пеплопадов, а также схода грязевых потоков, лахаров и небольших пирокластических потоков

по долинам и руслам сохраняются и могут в ближайшие годы постепенно увеличиваться. Это надо учитывать при планировании полевых работ.

## Заключение

В результате сильного извержения на территории воздействия произошла радикальная смена природной среды с масштабным погребением и разрушением экосистем. Высокотемпературные отложения апрельского извержения 2023 г. многометровым чехлом площадью  $\sim 60 \text{ км}^2$  легли на склоны вулкана, заметно снизив верхнюю границу леса в его юго-восточном секторе. Пирокластические потоки прошли рекордно дальнее для современных извержений Камчатки расстояние – до 22 км от эруптивного центра. Удар по экосистемам юго-восточного сектора вулкана является локальной экологической катастрофой. На площади около 24  $\text{км}^2$  была погребена и погибла лесная и стланниковая растительность, включая хвойные леса. Основные причины уничтожения лесов связаны с погребением мощными (до десятков метров) высокотемпературными толщами на площади более 20  $\text{км}^2$ . Пирокластические волны и маломощные шлейфы пирокластических потоков превратили леса и стланники в мёртвый древостой ещё на площади в несколько квадратных километров. Причиной гибели было мощное и быстрое термическое поражение раскалённым газово-песчаным вихрем. Сразу после извержения начались размывание и перенос пирокластических отложений поверхностными водотоками, а также отложение тонких фракций перемытых материалов на разных территориях, в том числе и лесных. Последнее сопровождается замыванием леса и гибелю древостоев. Растительность, прилегающая к полям пирокластических отложений, особенно горные луга и высокогорные тундры, в определённой мере испытывает воздействие частых и интенсивных пылевых переносов, которые возникают на открытых территориях выше границы леса. Извержение 2023 г. стало крупнейшим эксплозивным событием последних десятилетий на Камчатке и Курилах, и произвело наиболее масштабное воздействие на растительный покров, включая леса. Последствия его для природы обширной территории будут сказываться крайне длительное время.

## Благодарности

Благодарим А. В. Богачеву за определение грибов, Ю. В. Демянчука за предоставленные фото района извержения; М. Г. Белоусову и А. Б. Белоусова за фото, видео и продуктивное обсуждение.

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) – плининское 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) proceeded by a large-scale failure of edifice. *Journal of Volcanology and Seismology* 4: 116–126. [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. 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., Белоусов А. Б., Белоусова М. Г., Перепёлкина П. А.** 2024. Воздействие пеплопада извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 11 апреля 2023 г.) на лесную растительность

- // Биота и среда природных территорий. Т. 12. № 1. С. 39–55. (Grishin S. Yu., Belousov A. B., Belousova M. G., Perepelkina P. A. 2024. Impact of ash fallout of the 2023 Shiveluch volcano eruption (Kamchatka) on forest vegetation. *Biota and Environment of Natural Areas* (12)1: 39–55. [In Russian].) [https://doi.org/10.25221/2782-1978\\_2024\\_1\\_3](https://doi.org/10.25221/2782-1978_2024_1_3).
- 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. 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>
- Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. 2013. Крупные взрывные 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>
- Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. 2024. Катастрофическое взрывное извержение вулкана Шивелуч 11 апреля 2023 г., Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 3–12. (Zharinov N. A., Demyanchuk Yu. V. 2024. The April 11, 2023 Catastrophic Explosive Eruption of Sheveluch Volcano (Kamchatka) // *Journal of Volcanology and Seismology* 1: 3–12. [In Russian].) doi: 10.31857/S0203030624010017.
- Мелекесцев И. В., Волынец О. Н., Ермаков В. А. и др. 1991. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. – М.: Наука. С. 84–103. (Melekestsev I. V., Volynets O. N., Ermakov V. A. et al. 1991. Shiveluch volcano. In: Active volcanoes of Kamchatka. Vol.1. M.: Nauka, pp. 84–103. [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].)
- Druitt T. H. 1998. Pyroclastic density currents. *Geological Society, London, Special Publications* 145(1): 145–182.
- 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>