

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВОЗДЕЙСТВИЕ КРУПНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ (АПРЕЛЬ 2023 г., КАМЧАТКА) НА ЭКОСИСТЕМЫ: МАСШТАБЫ ПОГРЕБЕНИЯ И ПОРАЖЕНИЯ ЛЕСОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. С. Ю. Гришин¹, *

¹Федеральный научный центр биоразнообразия ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: grishin@biosoil.ru

Поступила в редакцию 31.07.2024 г.

В ходе сильного извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. произошел обвал активного купола, сошли пирокластические потоки и прошел масштабный пеплопад. По спутниковым изображениям с ИСЗ Sentinel-2 определены масштабы погребения территории высокотемпературными отложениями — ~60 км², а также оценено разнообразие погребенных и погибших экосистем. Пирокластические отложения обвала перекрыли юго-восточный сектор вулкана на площади более 50 км² в высотном интервале ~2000–500 м н.у.м. Ниже этой территории, русла и долины рек до высоты ~150 м заполнили узкие языки пирокластических потоков. Отложения языков заняли площадь 12 км²; нижняя граница одного из них находится на расстоянии 22 км от эруптивного центра. Лесная и стланиковая растительность была уничтожена на площади ~24 км², причем в основном погребена (до 85% площади), а также погибла из-за захлестывания деревьев шлейфами пирокластических потоков и воздействия пирокластических волн. В зоне схода пирокластических потоков уничтоженные леса образованы главным образом березой *Betula ermanii* и лиственницей *Larix sibirica*, а также зарослями ольхового стланика *Alnus fruticosa*. Слой пепла толщиной более 1 см перекрыл территорию центральной Камчатки площадью более 10000 км². В лесном поясе на склонах вулкана Шивелуч отложился пепел толщиной 6–10 см, древесные растения в основном уцелели. Постэруптивные явления в виде вторичного переноса пепла и переотложения размытой водотоками пирокластики будут протекать многолетний период и повлекут образование новых зон повреждения и поражения растительности.

Ключевые слова: вулканизм, извержение, динамика среды, лесная растительность, пирокластические потоки, пирокластические волны, Камчатка

DOI: 10.31857/S0205961425010023, EDN: DHSCQA

ВВЕДЕНИЕ

10–13 апреля 2023 г. произошло пароксизмальное извержение вулкана Шивелуч (центральная Камчатка). По первым сообщениям очевидцев, в результате интенсивного пеплопада в пос. Ключи (45 км к югу от вулкана) выпал слой пепла мощностью до 8 см (Гришин и др., 2024). В дальнейшем было обнаружено, что извержение сопровождалось сходом пирокластических потоков, отложения которых перекрыли обширную территорию. После появления спутниковых изображений стало очевидно, что воздействие извержения на окружающую среду особо масштабно, а само оно является крупнейшим вулканическим событием последних десятилетий на Камчатке. Были опубликованы первые данные по параметрам пеплопада и воздействию его на окружающую среду (Гирина и др., 2023; Гришин и др., 2024). В данной работе по спутниковым изображениям с ИСЗ Sentinel-2 определена площадь отложе-

ний пирокластических потоков, а также выявлен масштаб воздействия извержения на природу района, включая погребение и поражение лесов, дана оценка разнообразия уничтоженной растительности. Помимо анализа спутниковых данных, использованы материалы кратких полевых исследований, проведенных в данном районе в августе 2023 г., и ранее, в 1996 г. и 2012 г. (Гришин и др., 2000, 2015).

СОВРЕМЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ

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. (Меле-

кесцев 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 км² (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 раскаленных лавин и пирокластических потоков. Из-за особенностей морфологии вулкана, основные направления схода обвалов, раскаленных лавин, пирокластических потоков и волн ориентированы в направлении южных склонов Шивелуча. Значительная часть вулканистов устремляется по долине р. Байдарная в юго-западном секторе вулкана, а также р. Кабеку в юго-восточном секторе. Крупные извержения со сходом пирокластических потоков (рис. 1) произошли в 2005 и 2010 г. (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.

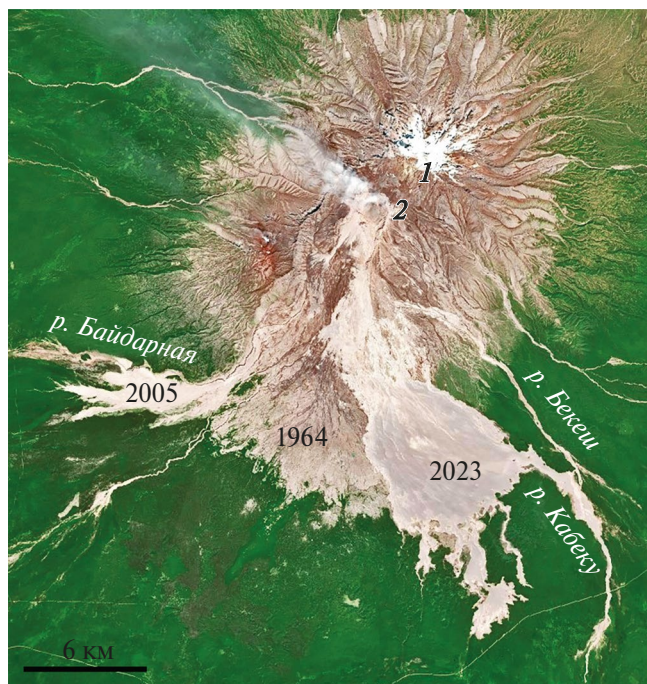


Рис. 1. Массив вулкана Шивелуч. Территории, перекрытые отложениями крупных недавних извержений (числа соответствуют году извержений). 1 – вершина Старый Шивелуч (высота 3283 м); 2 – активный купол. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 01.07.2023.

СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2023 г.

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 н.у.м. и до апреля 2023 г. представлял собой вулканическую пустыню с крайне разреженным растительным покровом (Гришин и др., 2000). Эта часть зоны поражения сформирована отложениями извержения 1964 г. и расположенными восточнее отложениями извержения 2010 г. (рис. 1; 2а). Первые были обвальными, холодными с момента извержения; вторые – обвальными / пирокластическими горячими (локально горячими, судя по протаиванию снежного покрова, они оставались вплоть до апреля 2023 г.). Второй комплекс располагался ниже 500 м; здесь преобладала лесная, а также частично луговая и стланиковая растительность на старых (возраст около 600 лет) отложениях предыдущих вулканических катастроф. В высотном интервале 200–460 м н.у.м. лесная растительность из березы каменной *Betula ermanii* и лиственницы *Larix cajanderi* 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 стланика *Alnus fruticosa*. Ниже 300 м преобладают леса из лиственницы, часто с участием березы каменной и других видов лиственных деревьев (рис. 2а). Массив еловых (*Picea jezoensis*) лесов расположен на юго-западных подножиях Шивелуча, а в юго-восточном секторе вулкана ельники встречаются лишь местами и, как правило, разреженно.

МАСШТАБЫ ОТЛОЖЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

В ходе извержения, помимо интенсивного пеплопада, произошел обвал активного купола. Материалы, слагавшие купол, обрушились раскаленной лавиной к югу от купола, а затем прошли и отложились на юго-восточном склоне вулкана (рис. 1; 2б). Высотный диапазон прохождения продуктов извержения от купола до нижней точки отложений составил около 2000 м по вертикали, а максимальная протяженность – около 22 км. При этом можно условно выделить 3 зоны (рис. 2б), которые назовем зонами транзита (зона I), аккумуляции (II) и дальнего прохождения пирокластических потоков (III).

Зона транзита протянулась на 7–8 км к югу от активного купола. Верхняя ее половина проходит до высоты ~1300 м н.у.м. по безжизненному склону, пе-

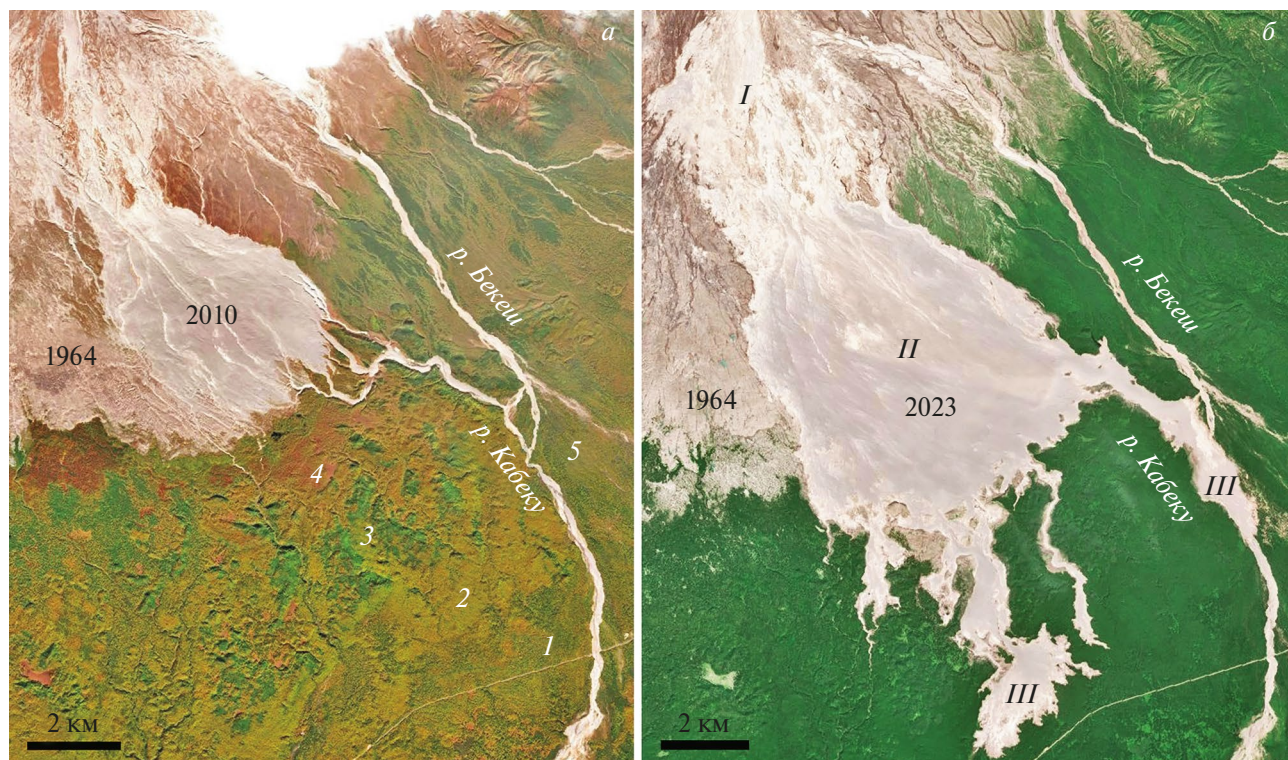


Рис. 2. Юго-восточный склон вулкана Шивелуч: *а* — состояние до извержения 2023 г. Цифры показывают преобладающую растительность: 1 — леса из лиственницы, 2 — леса из березы каменной, 3 — заросли ольховника, 4 — комплекс из лугов, стлаников и лесов, 5 — смешанные долинные леса и стланики. На территориях перекрытых вулканическими отложениями указан год извержения. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 24.09.2022; *б* — отложения извержения 2023 г., зоны отложений: I — зона транзита, II — зона масштабной аккумуляции пирокластических отложений, III — зона дальнего прохождения пирокластических потоков. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 01.07.2023.

рекрытому вулканическими отложениями предыдущих извержений, многократно отложенными за последние десятилетия. В интервале 1300–800 м н.у.м. происходит поворот на юго-юго-восток, а на склоне участками, полосами и грядами появляются участки свежих отложений. К нижней границе зоны I этих участков становится больше, они смыкаются местами, покрывая до 70–80% территории. Площадь видимых отложений 2023 г. в зоне I, согласно изображению от 29.04.2023 г. — около 10.5 км².

Зона аккумуляции представляет собой поле площадью ~38 км², сплошь покрытое отложениями. Отложения лежат на юго-восточном склоне, в высотном интервале от 800 м до 400–500 м н.у.м. Поле протянулось сверху вниз почти на 8 км, расширяясь в форме колокола, и имеет внизу ширину ~7 км. В нижней части зоны II отложениями были полностью перекрыты долины р. Кабеку и трех ее притоков, при этом третий приток имел почти V-образный врез глубиной более 50 м (Гришин и др., 2015). Отложения 2023 г. перекрыли отложения предыдущего извержения (октябрь 2010 г.), которые в наиболее мощных толщах были горячими вплоть до извержения 2023 г., судя по протаиванию снега на площади ~2 км².

Ниже зоны II пирокластические потоки сошли по руслам и долинам, в результате четко выделяются пять рукавов потоков, образовавших зону III (рис. 2б). Восточный рукав прошел 4.5 км по долине р. Кабеку, спустившись до 220 м н.у.м. Ширина полосы его высокотемпературных отложений достигла 1 км. Наиболее крупный по площади центральный рукав спустился по старому, заросшему лесом руслу до 145 м н.у.м., пройдя около 6 км. В конечной части его шлейф растекался крупным веером по лесу (в основном из лиственницы), перекрыв участок шириной около 3 км, и лишь 400–500 м не дошел до региональной автотрассы (рис. 2б; 4б). Общая площадь отложений всех рукавов пирокластических потоков составила ~12.5 км².

ТЕМПЕРАТУРА И ТОЛЩИНА ОТЛОЖЕНИЙ

Температура материала пирокластических потоков во время их отложения превышает 500°C. В мощных (десятки метров) толщах температура может оставаться очень высокой в течение нескольких лет и даже десятилетий, а на поверхности она быстро снижается, особенно в холодное время

года. Полевые измерения в августе 2023 г. в зонах II и III показали, что температура отложений на глубине 50 см достигала 50–65°C. Во многих местах, где по условиям рельефа сформировались мощные толщи отложений, были встречены парящие фумаролы с температурой пара на выходе 200–300°. Выявлено, что серии и цепочки фумарол были приурочены к погребенным руслам.

В зоне I к весне 2024 г. перестал стаивать снег, покрывающий большую часть отложений. Это означало остывание отложений и, соответственно, их относительно небольшую толщину. Лишь малая часть отложений, выраженная цепочкой островков в осевой части зоны, оставалась без снега, то есть горячей.

На большей части зон II и III отложения оставались горячими в течение первого года после извержения, судя по стаиванию снежного покрова весной 2024 г. Сильные морозы зимой 2023/2024 г. привели к тому, что большая часть поверхности остыла; снег в таких условиях протаивал лишь на участках глубоких врезов в V-образных долинах, где толщина отложений достигала 50 м (рис. 3а). Когда морозы к весне 2024 г. ослабли, протаивание снега возобновилось на большей части территории зоны II (рис. 3а). Таким образом, многометровые

толщи отложений, которые перекрыли пологие склоны в зоне II, не остыли и в течение длинной морозной (в горных условиях) зимы. Однако в связи с различной мощностью отложений произошла дифференциация интенсивности протаивания. Крупные участки, покрытые нестайвающим снегом, показывают наличие маломощных отложений внутри контура зоны II. Их общая площадь около 8–12 км², а толщина отложений, предположительно — 1–5 м. На спутниковых изображениях марта 2024 г. видно, что основная часть территории зоны II остается нагретой. Заметно проявилась структура прохождения и отложения материала: видно, что субпараллельные полосы более горячих отложений (голый субстрат) чередуются с полосами остывшей поверхности, покрытыми снегом.

В зоне III снег сначала протаял на поверхности отложений большей части самых крупных потоков (“центральный” и в долине р. Кабеку). Протаивание на остальных пирокластических потоках отсутствовало или было представлено фрагментами, т.е. их отложения оказались маломощными.

Таким образом, по протаиванию снежного покрова можно судить о температуре и, соответственно, о мощности отложений, а также условно выделить зоны разной мощности: предположительно

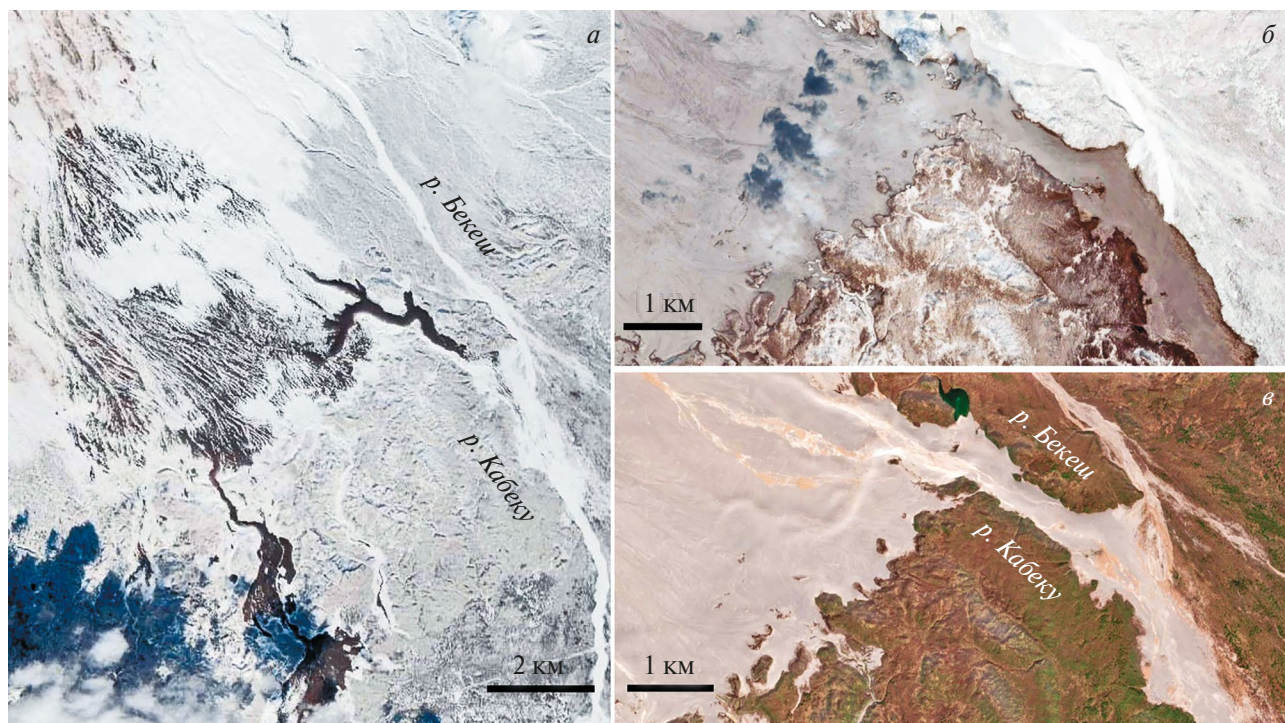


Рис. 3. Трансформация поверхности пирокластических отложений: а — протаивание снежного покрова на горячих пирокластических отложениях извержения 2023 г. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 24.03.2024; б — юго-восточная часть зоны II, долины р. Кабеку и ее притоков погребены. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 29.04.2023; в — тот же участок 13 месяцев спустя: отложения на участках погребенных долин притоков просели; свежие наносы обозначили новые русла; сформировано подпрудное озеро (вверху, посередине). Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 05.06.2024.

30–50 м, 10–25 м и до 5 м. В результате, можно предварительно оценить общий объем пирокластических отложений в зонах I–III величиной $0.4\text{--}0.5\text{ км}^3$.

Изменение рельефа вызвало локальное подпруживание одного из водотоков, путь которому преградили пирокластические отложения. В результате образовалось озеро, которое к началу лета 2024 г. достигло 700 м в поперечнике и площади около 0.08 км^2 (рис. 3в).

ПОГРЕБЕНИЕ ЛЕСНОЙ И СТЛАНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Извергнутые пирокластические отложения продвинули вниз границу между вулканической пустыней и лесом (рис. 2). Смещение этой границы составило $\sim 1\text{--}2.2\text{ км}$, снижение по вертикали от высоты 490–540 м до 400–500 м н.у.м. Новая граница между вулканической пустыней и ниже расположенными склонами с уцелевшим лесом оказалась резкой; выше границы и близко к ней расположено более десятка островков леса, размером $\sim 50\text{--}500\text{ м}$ в поперечнике (рис. 2б; 4а). Они являются верхними частями холмов, основания которых были погребены отложениями движущихся пирокластических потоков. Между прежней и новой границами образовался контур длиной $\sim 7\text{ км}$ по фронту и общей площадью $\sim 11\text{ км}^2$, где была полностью погребена лесная, луговая и стланиковая растительность. Помимо сомкнутой растительности лесного пояса, пирокластические отложения 2023 г. погребли крайне разреженный растительный покров на отложениях

1964 г. (к западу от зоны II) и лугово-стланиковую растительность (к востоку от зоны II).

Ниже зоны II лесная растительность была погребена отложениями пяти языков пирокластических потоков. Мощность отложений составила до нескольких десятков метров в глубоко врезанных руслах самых крупных языков (на высоте 390–450 м н.у.м.). В основном оказались погребенными леса из березы каменной и лиственницы, а также заросли стлаников, преимущественно ольховника. Как правило, вдоль погребенных русел, по осевой части языков, отмечены сплошные отложения, без погибших деревьев или валежа сломанных стволов. Эти полосы отложений имеют мощную толщу пирокластики, которая оставалась горячей и год спустя после извержения. В нижней половине языков мощные толщи отложений окружены каймой полупогребенного леса (рис. 4б). Толщина отложений в этой кайме составляет, по-видимому, до десятка метров; по удалению от мощных толщ к живому лесу она постепенно, на протяжении 200–400 м, выклинивается. Древостой разрежен, подлесок погребен, стволы деревьев частью погребены, а большей частью переломаны или перегорели у погребенного в раскаленных отложениях комля и лежат на поверхности. Отложения в этих периферийных зонах через 4 месяца после извержения были горячими и полупогребенная древесина местами тлела. Локально встречены и стоящие мертвые деревья; из-за умеренного динамического воздействия на основание стволов они устояли. Общая площадь полупогребенных и погибших таким образом древостоев составляет $\sim 2.5\text{ км}^2$.



Рис. 4. Гибель и погребение древостоев: а — изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 01.07.2023; б — изображение с ИСЗ GeoEye-1 от 29.04.2023. 1 — зоны мощных отложений пирокластических потоков, которые полностью погребли леса; 2 — участки разрушенного и полупогребенного леса; 3 — участки гибели леса под воздействием пирокластических волн; 4 — лес до начала вегетации, со снежным покровом под пологом древостоя.

ПОРАЖЕНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В конечных частях (шлейфах) пирокластических потоков, которые широкими веерами растекались по лесу, толщина отложений уменьшается до 1 метра и менее; поэтому они быстро остыли. 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 мертвых деревьев по бортам долин в горном рельефе. 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 2005 г. в долине р. Байдарной и в долине р. Кабеку в 2010 г. (Гришин, 2009; Гришин и др., 2015)).

Участки древостоя, погибшего от воздействия пирокластических волн и маломощных шлейфов пирокластических потоков, расположены в основном выше 200 м н.у.м.; они состоят преимущественно из березы каменной. В то же время леса из лиственницы, расположенные ниже 200–220 м, были разрушены (деревья сломаны, обгорели и вывалены) или погибли (без существенных внешних повреждений) под воздействием частичного погребения более мощными отложениями пирокластических потоков.

Начало вегетации (снимок от 26.06.2023) показало масштабы гибели древостоев от прохождения маломощных шлейфов пирокластических потоков и пирокластических волн — около 3.5 км². Самый крупный участок погибшего древостоя площадью ~0.8 км² расположен в западной части полосы контакта отложений зоны II и леса (рис. 2б; 4а). Горные леса из березы каменной там погибли на участке шириной до 1500 м и глубиной до 700 м. В островках леса, расположенных возле нижней границы зоны II, 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, защищенная рельефом.

В целом, лесная и стланиковая растительность, включая хвойные леса, была погребена и погибла на площади около 24 км². По предварительной оценке, уничтоженные леса состояли на ~50% из березы каменной, 25% — из лиственницы (включая

местами встречающуюся ель), около 15% — смешанные леса и леса из лиственных пород, и около 10% — из зарослей ольхового стланика.

ПЕПЛОПАД

Пеплопад охватил широкий сектор юго-западного подножья вулкана, а также территории, расположенные от вулкана к западу (до Срединного хребта; расстояние около 90–100 км), юго-западу (долина р. Камчатки, около 130 км) и югу/юго-западу (северная половина Ключевской группы вулканов). Изучение спутниковых снимков показало, что после начала вегетации 2023 г. светлый подсохший пепел был замечен только на участках обнаженных грунтов. Всего удалось выявить более 10 типов естественных и антропогенных ландшафтов, где на спутниковых изображениях зафиксировано присутствие скоплений пепла. По этим отметкам удалось очертить территорию распространения отложений пеплопада, имеющих толщину более 1 см, площадью около 10000 км² (Гришин и др., 2024). Допустив, в соответствии с результатами наших полевых измерений, среднюю толщину слоя слежавшихся отложений 2.5 см, получим объем пепла на этой территории около 0.25 км³. Это большая величина даже без учета тефры дальнего разноса (которая отложилась слоем толщиной менее 1 см). Пеплопад 11 апреля 2023 г. по объему извергнутых продуктов стал самым крупным пеплопадом вулкана за последние почти 60 лет и крупнейшим в России за последние 40 лет. Негативное воздействие умеренного пеплопада на растительность лесного пояса (мощность свежих отложений 6–10 см) было минимизировано благодаря ряду обстоятельств (тонкий пепел, отсутствие облиствения, снежный покров, на который лег слой пепла).

ПОСТЭРУПТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В бесснежный период 2023 г. свежие вулканические отложения начали размываться и переноситься водотоками. Начало этого процесса зафиксировано на изображении с ИСЗ WorldView-3 от 20.05.2023: поток р. Бекеш, впадающей в р. Кабеку, размывает отложения пирокластического потока. Вслед за ним начался размыв отложений в верховьях р. Кабеку и ее притоков, долины которых были погребены отложениями 2023 г. На поверхности свежих и горячих отложений начали формироваться новые русла; на изображении с ИСЗ Sentinel-2 от 05.06.2024 видны 6 русел, пересекающих зону II сверху вниз и уходящих ниже, в зону III (часть из них видна на рис. 3в). Вынесенные по этим руслам пирокластические отложения переотложены ниже по течению и заывают участки леса, что приводит

к усыханию и гибели древостоев. Так, стал формироваться крупный участок замывания леса по левобережью р. Кабеку; к 17.6.2024 г. его площадь составила около 2 км² (рис. 5а, б).

На обширных открытых пространствах выше новой границы леса свежесотложенные рыхлые материалы будут подвергаться эрозии, а их поверхность в ветреную погоду пылить. Этот процесс активно шел в бесснежный период 2023 г., особенно когда ветер становился сильным (более 20 м/с, по данным метеостанции в пос. Ключи). В результате тысячи тонн пыли, поднятой в воздух, перемещались не только в вулканической пустыне, но и уносились за десятки километров от вулкана, достигая Тихого океана (рис. 5в). Эти процессы усугублены значительным объемом

тефры, выпавшей в ходе масштабного пеплопада 11 апреля 2023 г., и могут продолжаться много лет.

ОБСУЖДЕНИЕ

Извержение 2023 г. в значительной мере повторило эруптивное событие октября 2010 г., когда в результате обвала купола раскаленные массы легли на юго-восточном склоне; ниже обширной зоны аккумуляции сошли пирокластические потоки; пеплопад прошел в южных секторах вулкана и удаленных окрестностях (десятки километров от центра извержения). Однако масштабы извержения 2023 г. заметно крупнее, площадь горячих отложений существенно больше. При этом высоко-

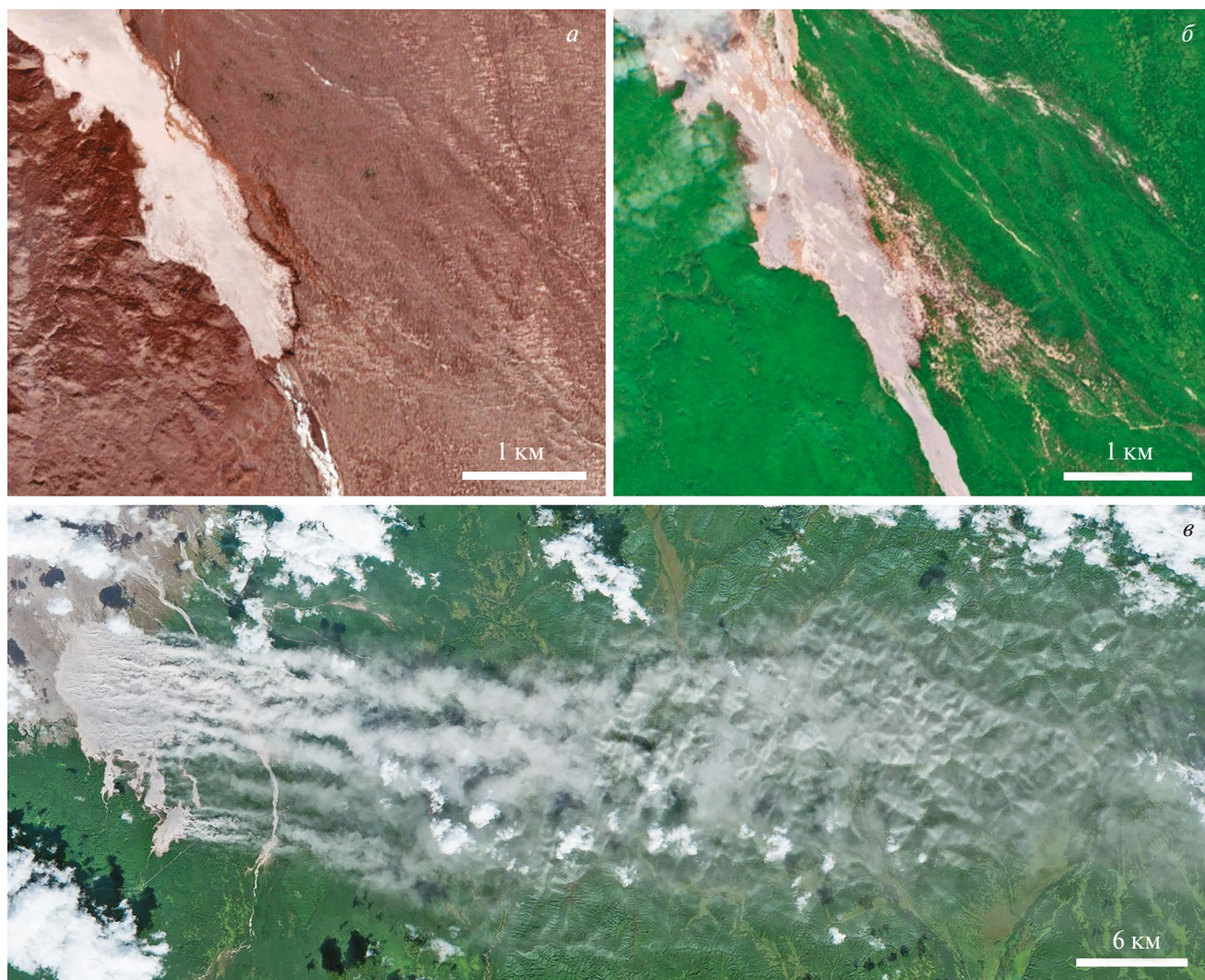


Рис. 5. Постэруптивные явления: а — язык пирокластического потока в долине р. Кабеку до начала его размывания. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 17.05.2023; б — замывание территории по левому берегу р. Кабеку переотложенными пирокластическими отложениями. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 17.06.2024; в — перенос пепла и тонких пирокластических отложений сильным ветром с поверхности поля отложений извержения 2023 г. (в левой части). Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 04.09.2023.

температурные отложения 2023 г. перекрыли еще 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 раскаленной толще.

Площадь погребения лесной и стланиковой растительности в результате извержения 2023 г. существенно (на порядок, по нашим данным) превысила площадь лесов, погребенных 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 мертвого древостоя удалось определить зоны поражения и оценить их площадь (около 3.5 км²).

В целом, извержение 2023 г. существенно увеличило площадь огромного (более 150 км²) вулканогенного бедленда, расположенного на южном, юго-западном и юго-восточном склонах вулкана Шивелуч. Негативное воздействие огромного объема отложений на природу смежных районов будет продолжаться в течение ряда последующих лет и десятилетий.

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 ~60 км² легли на склоны вулкана, заметно снизив верхнюю границу леса в его юго-восточном секторе. Пирокластические потоки прошли рекордно дальше 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 км² была погребена и погибла лесная и стланиковая растительность, включая хвойные леса.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарю вулканологов М.Г. Белоусову и А.Б. Белоусова (ИВиС ДВО РАН), которые просмотрели статью и сделали конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.* Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки. Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 116–126.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч / Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
- Гришин С.Ю.* Гибель леса на вулкане Шивелуч под воздействием палящей пирокластической волны (Камчатка, 2005 г.) // Экология. 2009. № 2. С. 158–160.
- Гришин С.Ю., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. и др.* Воздействие пеплопада извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 11 апреля 2023 г.) на лесную растительность // Биота и среда природных территорий. 2024. Т. 12. № 1. С. 39–55.
- Гришин С.Ю., Бурдуковский М.Л., Лазарев А.Г. и др.* Гибель растительности в результате прохождения пирокластической волны (вулкан Шивелуч, Камчатка, 2010 г.) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 2. С. 101–108.
- Гришин С.Ю., Крестов П.В., Верхолат В.П. и др.* Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 46. С. 73–104.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 48–62.
- Мелекесцев И.В., Волинец О.Н., Ермаков В.А. и др.* Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. 1991. Т. 1. С. 84–103.
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al.* Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // International Journal of Earth Sciences. 2015. V. 104. P. 1459–1482.

Impact of a Major Eruption of the Shiveluch Volcano (April 2023, Kamchatka) on Ecosystems: The Extent of Burial and Destruction of Forests According to Satellite Data

S. Yu. Grishin¹

¹*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

During large-scale eruption of the Shiveluch volcano in April 2023, the active dome collapsed and intense ashfall occurred. Based on the Sentinel-2 satellite images, the scale of burial of the territory by volcanic deposits was determined — ~ 60 km², and the diversity of buried and dead ecosystems was also estimated. The high-temperature deposits of the collapse blocked the southeastern sector of the volcano over an area of more than 50 km² in the altitude range of ~ 2000–500 m a.s.l. Below, up to ~150 m, pyroclastic flows descended, the lower mark of one of the 5 tongues is located at a distance of 22 km from the eruptive center. Flow deposits occupied an area of 12 km². Forest and dwarf vegetation was destroyed in an area of ~24 km², and was mostly buried (up to 85% of the area), and also died due to the flooding of trees by plumes of pyroclastic flows and the impact of pyroclastic waves. In the zone of pyroclastic flows, the destroyed forests are formed mainly by stone birch and larch, as well as thickets of dwarf alder. An ash layer more than 1 cm thick covered an area of more than 10,000 km² in central Kamchatka. Ash 6–10 cm thick was deposited in the forest belt on the slopes of the Shiveluch volcano, woody plants mostly survived. Post-eruption phenomena in the form of secondary ash transfer and redeposition of pyroclastics washed out by watercourses will last for many years and will lead to the formation of new zones of damage and destruction of vegetation

Keywords: volcanism, eruption, environmental dynamics, forest vegetation, pyroclastic flows, Kamchatka

REFERENCES

- Belousov A.B., Belousova M.G.* Izverzhenie vulkana Shiveluch v 1964 g. (Kamchatka) — plinianskoe izverzhenie, predvayavsheesya krupnomasshtabnym obrusheniem postroyki [The 1964 eruption of Shiveluch (Kamchatka) — a plinian eruption preceded by a voluminous slide of the cone top] // *Volcanology and Seismology*. 1996. V. 17. P. 497–508. (In Russian).
- Girina O.A., Lupyan E.A., Horvat A., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Bril' A.A., Ozerov A.Yu., Kramareva L.S., Sorokin A.A.* Analiz razvitiya paroksizmal'nogo izverzheniya vulkana Shiveluch 10–13 aprelya 2023 goda na osnove dannyh razlichnyh sputnikovyyh sistem [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 distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023. № 2. P. 283–291. (In Russian).
- Gorshkov G.S., Dubik Yu.M.* Napravlenyy vzryv na vulkane Shiveluch [Direct explosion on the Shiveluch volcano] // *Vulkany i izverzheniya*. Moscow: Nauka, 1969. P. 3–37. (In Russian).
- Grishin S.Yu.* Forest die-off under the impact of burning pyroclastic surge (Shiveluch volcano, Kamchatka, 2010) // *Russian Journal of Ecology*. 2009. № 2. P. 146–148.
- Grishin S.Yu., Belousov A.B., Belousova M.G., Perepelkina P.A.* Vozdeystvie peplopada izverzheniya vulkana Shiveluch (Kamchatka, 11 aprelya 2023 g.) na lesnyu rastitel'nost' [Impact of ash fallout of the 2023 eruption of Shiveluch volcano (Kamchatka) on the forest vegetation] // *Biota i sreda prirodnih territoriy*. 2024. № 1. P. 39–55. (In Russian).
- Grishin S.Yu., Burdukovskiy M.L., Lazarev A.G., Komachkova I.V., Perepelkina P.A., Yakovleva A.N.* Gibel' rastitel'nosti v rezul'tate prohozhdeniya piroklasticheskoy volny (vulkan Shiveluch, Kamchatka, 2010 g.) [Devastation of vegetation as a result of an impact of pyroclastic surge (Shiveluch volcano, Kamchatka, 2010)] // *Vestnik DVO RAN*. 2015. № 2. P. 101–108. (In Russian).
- Grishin S.Yu., Krestov P.V., Verholat V.P., Yakubov V.V.* Vosstanovlenie rastitel'nosti na vulkane Shiveluch posle katastrofy 1964 g. [Restoration of vegetation on the Shiveluch volcano after the 1964 disaster] // *Komarovskie chteniya*. Vladivostok: Dal'nauka, 2000. № 46. P. 73–104. (In Russian).
- Zharinov N.A., Demyanchuk Yu.V.* Large explosive eruptions of Shiveluch volcano (Kamchatka) with partial destruction of the extrusive dome (February 28, 2005 and October 27, 2010) // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2013. T. 7. № 2. C. 131–144.
- Melekescev I.V., Volynec O.N., Ermakov V.A., Kirsanova T.P., Masurenkov Yu.P.* Vulkan Shiveluch [Shiveluch volcano] // *Deystvuyushchie vulkany Kamchatki*. 1991. Vol. 1. P. 84–103. (In Russian).
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle Ph., Derkachev A.* Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // *International Journal of Earth Sciences*. 2015. V. 104. P. 1459–1482.