

# Высокотемпературные пирокластические потоки и волны — особо опасные для экосистем явления, возникающие при извержениях вулканов

## High-temperature pyroclastic flows and surges — especially dangerous for ecosystems phenomena of volcanic eruptions

**ГРИШИН С.Ю.**

Заведующий сектором геоботаники Биолого-почвенного института ДВО РАН, к.б.н., г. Владивосток, grishin@ibss.dvo.ru

**GRISHIN S.Y.**

Head of the Geobotany Sector of the Institute of Biology and Soil Science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, PhD (candidate of science in Biology), Vladivostok, grishin@ibss.dvo.ru

**Ключевые слова:** вулканы; извержения; пирокластические потоки; пирокластические волны; лахары; экосистемы; поражение растительности; вулкан Шивелуч; вулкан Пик Сарычева; полуостров Камчатка; остров Матуа; Курильские острова.

**Аннотация:** изучено влияние пирокластических потоков и волн на растительный покров. Эти разрушительные для экосистем явления возникают в ходе эксплозивных извержений вулканов и опасны внезапностью, масштабностью, глубиной изменений экосистем и долговременностью последствий. В частности, при недавних извержениях на полуострове Камчатка и на Курильских островах они вызвали экологические катастрофы на территориях общей площадью более 100 км<sup>2</sup>. Наиболее сильные из этих извержений (вулкана Шивелуч в 2005, 2010 гг., вулкана Пик Сарычева в 2009 г.) стали одними из крупнейших в дальневосточном регионе за последние 30 лет. Растительный покров (хвойные и лиственные леса, подгольцовые стланики, горные луга и тундры) в зонах поражения был погребен под высокотемпературными толщами, частично погиб или сильно пострадал. В статье представлены полученные в ходе исследований данные о специфике отложений (масштабах распространения, мощности и температуре принесших их пирокластических потоков или волн), о масштабах поражения растительного покрова, факторах гибели или повреждения древесной растительности в результате этих опасных явлений. Рассмотрены также особенности начавшихся первичных сукцессий на пирокластических отложениях.

**Key words:** volcanoes; eruption; pyroclastic flows; pyroclastic surges; lahars; ecosystems; vegetation damage; Sheveluch Volcano; Sarychev Peak Volcano; Kamchatka Peninsula; Matua Island; Kurile Islands.

**Abstract:** effects of pyroclastic flows and surges on vegetation are studied. These destructive to ecosystems phenomena occur during explosive eruptions of volcanoes and are very dangerous because of their suddenness, immensity as well as due to profoundness of ecosystem changes and durability of consequences. In particular, during recent eruptions in the Kamchatka Peninsula and Kuril Islands such phenomena caused environmental catastrophes in the territories having the total area of over 100 km<sup>2</sup>. The strongest of those eruptions (the Sheveluch Volcano eruptions in 2005, 2010, the Sarychev Peak Volcano eruption in 2009) were the largest in the region over the past 30 years. The vegetation cover (coniferous and deciduous forests, subalpine krummholz and meadows, mountain tundras) in the affected areas was buried by high temperature deposits, partly destroyed or severely damaged. The article presents research data on the specific of formation of the deposits (propagation scales, power and temperature of the pyroclastic flows or surges), the scales of the vegetation cover injury, the factors of destruction and damage of the lignosa due to the discussed dangerous phenomena. Features of the starting primary successions on the pyroclastic deposits are also considered.

### Введение

Извержения вулканов, продуктами которых являются кислые породы (с высоким содержанием SiO<sub>2</sub>, в том числе андезиты и андезибазальты), отличаются огромной взрывной мощностью. Вследствие высокой вязкости андезитовой магмы ее расширение в ходе извержений происходит очень быстро, практически мгновенно, с высокой степенью эксплозивности. В результате извержений, происходящих в очень короткое время, извергаются крупные, а иногда колоссальные массы вулканитов. Они перекрывают большие территории, полностью уничтожая или разрушая экосистемы. В последние годы произошла серия извержений вулканов Камчатки и Курил, в ходе которых крупные природные разрушения были вызваны пирокластическими потоками и волнами — крайне опасными и разрушительными вулканическими явлениями. Пирокластические потоки представляют собой смесь раскаленного пирокластического материала и газа с высоким содержанием обломочного материала; подобно лавинам, потоки скатываются с большой скоростью по понижениям на склонах вулкана. Главные черты пирокластических потоков — масштабность, высокая скорость, особо высокая температура раскаленных ювенильных вулканитов, обогащенность газами. В зонах аккумуляции отложений формируются толщи мощностью в десятки метров. Это явление сопровождают пирокластические волны — газонасыщенные турбулентные потоки с низким содержанием обломочного материала. Независимо от

рельефа они проносятся с огромной скоростью по склонам, разрушая и опалая все на своем пути. Пирокластические потоки и волны ведут к катастрофическому таянию ледников и снежников в горах, в результате чего разрушения усугубляются сходом лавхаров — вулканогенных селей. В данной публикации освещены масштабы и особенности воздействия данных проявлений на экосистемы (на примере растительного покрова) по результатам изучения трех районов недавних сильных извержений на Дальнем Востоке России.

## Методика

Природные изменения в районах, где по спутниковым снимкам было зафиксировано поражение экосистем, изучались в ходе полевых работ, проведенных в 2005–2013 гг. Для характеристики пирокластических потоков и волн закладывались трансекты, пересекающие зоны поражения. На регулярно расположенных точках отбора замерены мощности и взяты пробы отложений пирокластике. В долинах, на отложениях пирокластических потоков, цифровым термометром измерялась температура поверхности отложений. В зонах прохождения пирокластических волн на ключевых участках описана и закартирована растительность на склонах, включая древостой. В лабораторных условиях сделан гранулометрический анализ пирокластических отложений. Ситуация изучалась по спутниковым снимкам, главным образом ASTER/Терра, Landsat, EO-1 ALI и др. Для анализа специфики прохождения пирокластических потоков и выявления зон поражения растительного покрова использованы высокодетальные снимки WorldView-2 и QuickBird (разрешение 0,5 м/пиксель). Измерения высотных отметок и расстояний проводилось по спутниковым снимкам, загруженным в Google Earth.

## Результаты

**Масштабы явления.** Масштабность воздействия — одна из главных особенностей пирокластических потоков и волн. Совокупная площадь выявленной территории поражения экосистем на Камчатке и Курилах в 2005–2013 гг. — более 110 км<sup>2</sup> (без учета данных по извержению вулкана Кизимен, центральная Камчатка, в 2010–2012 гг.):

- Шивелуч, февраль 2005 г. — 31,5 км<sup>2</sup> [2];
- Шивелуч, сентябрь 2005 г. — 1,9 км<sup>2</sup> [17];
- Шивелуч, март 2007 г. — около 3 км<sup>2</sup> (сообщение Н.В. Горбач на сайте ИВиС ДВО РАН от 31.7. 2007

([http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform\\_messages/2007/Sheveluch\\_072007/Sheveluch\\_072007.html](http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2007/Sheveluch_072007/Sheveluch_072007.html));

- Шивелуч, октябрь 2010 г. — 24 км<sup>2</sup> (оценка автора по спутниковым снимкам);
- Шивелуч, декабрь 2013 г. — около 8–10 км<sup>2</sup> (оценка автора по спутниковому снимку);
- Пик Сарычева, июнь 2009 г. — 25 км<sup>2</sup> [13];
- Безымянный, в период 2005–2010 гг. — 10 небольших пирокластических потоков (сообщения группы KVERT на сайте ИВиС ДВО РАН), перекрывших суммарно, оценочно, не менее 10 км<sup>2</sup>;
- Безымянный, апрель 2011 г. — около 10 км<sup>2</sup> (оценка автора по спутниковому снимку).

Особо мощные извержения произошли на вулкане Шивелуч (центральная Камчатка) в 2005 и 2010 гг. и на вулкане Пик Сарычева (центральные Курилы) в 2009 г. Районы этих извержений обследовались нами сразу же, по «горячим следам» [6–14]. В целом совокупная площадь территории, на которой произошло поражение экосистем, — около 80 км<sup>2</sup>. Погибли вековые хвойные и лиственные леса, заросли стлаников, горные луга и тундры, несомкнутая растительность склонов вулканов.

**Вулкан Шивелуч, извержение 2005 г.** Шивелуч (высота 3283 м) — самый северный, один из крупнейших и наиболее активных вулканов Камчатки. Продукты извержений — преимущественно андезиты. За последние столетия особо мощные извержения происходили в ~1430, ~1650, 1854 и 1964 гг. [21]. В результате гигант-

ского извержения 1964 г. произошло перекрытие южного макросклона Шивелуча обвально-взрывными отложениями и пирокластическими потоками на площади около 100 км<sup>2</sup>. Вследствие сложной структуры рельефа вулкана выброс основной части вулканитов, в основном материалов раскаленных пирокластических потоков и лавхаров (вулканогенных селей), ориентирован в направлении южных склонов. Значительная часть вулканитов устремляется по долинам рек Байдарной и Кабеку (рис. 1). Как следствие, рельеф прирусловых частей долин крайне динамичен.

В результате очень сильного извержения 27 февраля 2005 г. по долине р. Байдарной (юго-западный склон вулкана Шивелуч) сошел особо крупный пирокластический поток (рис. 2). Вулканологи оценили его длину в 25 км, площадь отложений — 31,5 км<sup>2</sup>, среднюю мощность — 15 м, объем — 0,5 км<sup>3</sup>. Температура отложений на глубине около 170 см через 3 недели после извержения превышала 400 °С [17]. Раскаленные отложения потока перекрыли и уничтожили растительный покров на большой территории.

Поток 2005 г. (в действительности это был комплекс из напластований многих потоков) несколькими рукавами глубоко (до высоты 190–250 м) внедрился в лесной пояс [18]. Растительность юго-западного сектора вулкана представляет собой хвойный лес из ели (*Picea ajanensis*) и лиственницы (*Larix cajanderi*), на высоте около 500 м сменяемый лесом из березы каменной (*Betula ermanii*), который поднимается примерно до 700 м по склонам правобережья р. Байдарной (рис. 3).



**Рис. 1.** Вулкан Шивелуч. Фото со спутника Landsat, 2001 г. Видны долины р. Байдарной (1) и р. Кабеку (2). Зеленый цвет соответствует лесной и стланиковой растительности, желто-коричневый — горным лугам и тундрам, коричневый — вулканическим отложениям, голубой — снежно-ледовому покрову. На южном склоне выделяется пустыня, образованная отложениями гигантского извержения 1964 г.





Рис. 2. Долина р. Байдарной (юго-западный склон вулкана Шивелуч), перекрытая мощными толщами пирокластического потока 2005 г. На дальнем плане — хвойный лес, погибший от воздействия пирокластической волны, на горизонте — вулканы Ключевской и Крестовский. Фото автора

Выше располагаются заросли ольхового (*Alnus fruticosa*) и кедрового (*Pinus pumila*) стлаников, горные луга и тундры [15]. Несмотря на серию извержений в период между 1964 и 2005 гг. и вынос по долине р. Байдарной большого объема вулканитов, контуры долины были стабильны, судя по аэро- и космофотоснимкам. Таковыми они были и последние столетия, судя по зрелому хвойному лесу, который рос по террасам долины.

Длина трассы прохождения потока 2005 г. по нашим измерениям дости-

гает примерно 19 км. Изучение зоны поражения показало, что отложения потока погребли лесную растительность в долине р. Байдарной, резко расширив долину — от 100-200 м до 1000-2000 м. Часть обширного поля отложений свежей пирокластике была в первый после извержения весенне-летний период перекрыта материалом грязевых потоков.

**Масштабы поражения растительного покрова.** Пирокластический поток 2005 г. нанес мощный удар по экосистемам юго-западного подножия

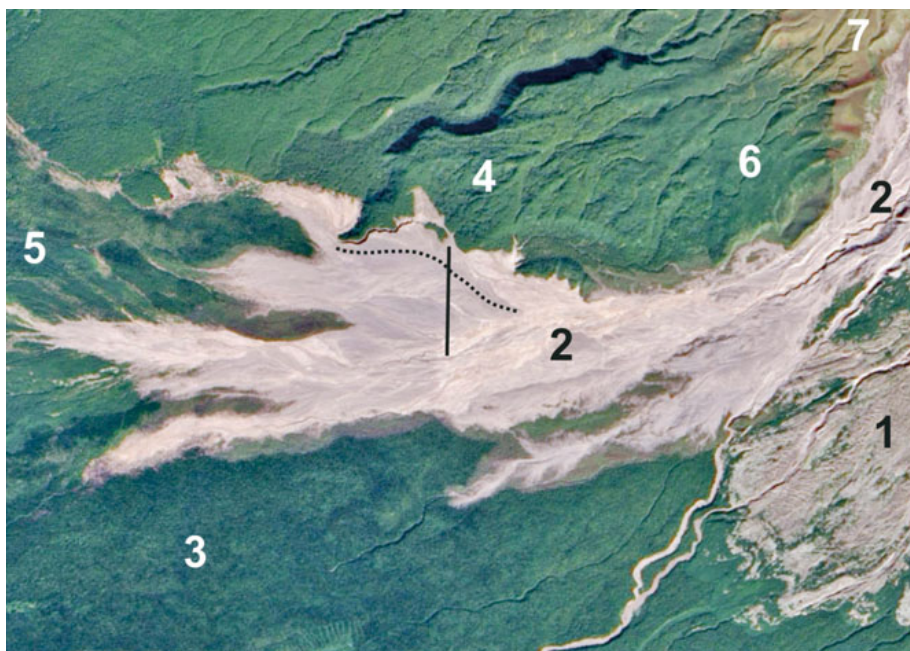


Рис. 3. Пирокластический поток 2005 г., вулкан Шивелуч: 1 — отложения извержения 1964 г., 2 — отложения пирокластического потока 2005 г., 3 — ельники, 4 — каменноберезовые леса, 5 — смешанные долинские леса, 6 — субальпийские стланики, 7 — горные тундры. Пунктиром обозначена осевая часть гряды мощных пирокластических отложений 2005 г., сплошной прямой линией — трансект, пересекающий эту грядку. Фото со спутника EO-1, 2010 г.

вулкана. По размерам и объему отложений этот поток сопоставим с потоками крупнейших вулканических катастроф последних десятилетий — на вулканах Безымянный (1956 г., Камчатка), Шивелуч (1964 г.), Сент-Хеленс (1980 г., США). В результате схода пирокластического потока 2005 г. растительный покров был уничтожен в пределах территории, перекрытой раскаленной пирокластикой; площадь ее около 30 км<sup>2</sup>. Отложениями пирокластического потока и воздействием пирокластических волн извержения 2005 г. были уничтожены: ельники, зарастающие участки вырубок на месте ельников, долинские ольхово-тополевые леса, елово-лиственничные леса с березой каменной, березняки, горные стланиковые заросли (преимущественно из ольхового стланика), отчасти горные и высокогорные луга и тундры. Кроме того, отложениями были перекрыты зоны, почти свободные от растительности: краевая часть вулканической пустыни 1964 г., где в минувшие десятилетия началось интенсивное зарастание [15], и прирусловая динамичная зона долины р. Байдарной (ниже 600 м над уровнем моря). Суммарную площадь погребенного леса можно оценить величиной 10-12 км<sup>2</sup>. Существенная часть уничтоженного леса относится к хвойным лесам (до 8 км<sup>2</sup>), в основном к ельникам (до 6 км<sup>2</sup>). Кроме того, лес погиб под воздействием пирокластической волны вдоль бортов новообразованной долины на общей площади около 4 км<sup>2</sup>.

**Мощность и гранулометрический состав отложений.** Обследование района показало, что мощность отложений пирокластического потока неоднородна — от долей метра на шлейфах отложений краевых частей потока до десятков метров (судя по рельефу) в крупной гряде с пологими склонами, которая расположена в пределах 300–400 м над уровнем моря, в поясе хвойного леса. Здесь пирокластический поток шел по старому руслу р. Байдарной. Напластования его отложений сформировали крупное, неявно выделяющееся в рельефе образование типа продольной гряды размером примерно 0,8×2 км. К осевой части гряды приурочена зона максимальной мощности отложений 2005 г., превышающая здесь 30 м. В 2008 г. на этой гряде были обнаружены миниатюрные кольцевые полосы растительного покрова, расположенные на площадках, которые были ощутимо нагреты. Дальнейшие измерения показали, что вся гряда интенсивно излучает тепло, несмотря на то что после извержения прошло несколько лет. Поперек гряды был заложен трансект протяженностью 1000 м (см. рис. 3), на котором были выполнены измерения температуры.

По данным проведенного нами гранулометрического анализа отложения

пирокластического потока в приповерхностных горизонтах (до 70 см глубиной) представлены средне- (50–53%, здесь и ниже — проценты от массы образца) и мелкозернистым (33–39%) вулканическим песком с существенной (10–15%) примесью пылеватой фракции. Отбор образцов был проведен в наиболее возвышенной части гряды из мощных отложений пирокластике, на высоте около 400 м на расстоянии около 15 км от активного купола. Цвет рыхлых отложений в сухом состоянии серый и серо-коричневый, во влажном — коричнево-бежевый. В массе песка обильно представлены включения лапиллей серого и коричневого цвета размером 1–2 см. Часто встречаются окатанные куски светло-серого пемзовидного материала размером от 2–5 до 10–15 см, иногда достигающие 30 см. Их доля в составе поверхности отложений составляет 5–10%, достигая иногда 30%.

**Температура отложений пирокластического потока.** Изучение серии спутниковых снимков, выполненных в период 2005–2013 гг., показало, что в районе изученной гряды отчетливо выражена термическая аномалия. Наземные измерения температуры поверхности (0–25 см) отложений через 5–7 лет после извержения показали, что по трансекту, пересекающему гряду, температура увеличивается с ростом высотных отметок [14]. Таким образом, с ростом мощности отложений усиливается тепловой поток из глубин к их поверхности. Спутниковые снимки показали, что тепло излучает и вся поверхность достаточно мощных отложений пирокластике в долине р. Байдарной, что ясно видно по протаиванию снегового покрова. Динамика стаивания позволяет выделить зоны с разной интенсивностью теплового излучения и, следовательно, с разной мощностью отложений.

Проведенные нами измерения показали, что температура отложений увеличивается с глубиной. Так, в 100-сантиметровом вертикальном разрезе, выполненном в 2011 г. в верхней части гряды, отмечен плавный рост температуры с глубиной от 15 до 40 °С. Отмечено, что эта закономерность в поверхностном горизонте в отдельные дни могла нарушаться в связи с нагревом субстрата инсоляцией или вследствие его охлаждения после дождей и/или резкого похолодания.

Тепловое излучение поверхности отложений неоднородно. К 2008 г. на гряде сформировались миниатюрные кольцевые структуры растительности, окаймляющие округлые пятна, которые достигают в поперечнике 0,5–2 м. Растительность сформирована низким и плотным покровом мха. Было обнаружено, что поверхность этих пятен ощутимо нагрета. Тепловые пятна встречаются преимущественно в наи-

более мощной части потока. Иногда они образуют группы. При раскапывании одного из таких пятен на глубину 70 см вскрыт рыхлый, влажный и сильно нагретый песчаный субстрат, выделяющий пар. Тепловые пятна, через которые происходит вынос пара и излучение тепла, по-видимому, образовались в результате остывания фумарол, действовавших на поверхности отложений после остановки пирокластического потока.

Сезонные климатические изменения сильно сказываются на температуре поверхности отложений. Это выявлено нами на спутниковых изображениях (ASTER/Terra, Landsat и др.), выполненных в период 2005–2011 гг.: зимой поверхность гряды сильно охлаждается и, несмотря на постоянное тепловое излучение снизу, снеговой покров не тает. Судя по спутниковым снимкам, такая ситуация наблюдается в разгар морозов (декабрь, январь и часть февраля). Когда баланс между поступлением тепла снизу и охлаждением сверху нарушается в сторону тепла, снег начинает протаивать. Этот процесс начинается в феврале в наиболее теплой возвышенной осевой части гряды. Затем постепенно, до мая включительно, он распространяется на склоны и другие участки поля относительно мощных отложений, продолжающих излучать тепло. Аналогичный процесс, но идущий в обратном направлении, наблюдается осенью и в начале зимы (октябрь — декабрь).

**Зарастание отложений пирокластического потока.** Старт первичной сукцессии растительности на горячем вулканическом субстрате — редкое природное явление. В первые годы после извержения 2005 г. высшие растения не заселяли пирокластике. В 2006 и 2007 гг. было отмечено появление древоразрушающих грибов на полупогребенной древесине. Появление сосудистых растений на потоке отмечено в 2008 г. Тогда же были обнаружены миниатюрные кольцевые структуры растительности. Они представляют собой полосы растительности, окаймляющие округлые пятна (поперечник пятен — около 0,5–1,5 м). Было обнаружено, что поверхность этих пятен ощутимо нагрета. Кайма имеет ширину 8–20 см, растительность ее представляет моховой покров с включением единичных небольших сосудистых растений (вегетирующие злаки, всходы березы *Betula ermanii*). Мох, заселивший тепловые пятна, — *Ceratodon purpureus*; это космополитичный пионерный вид с широкой экологической амплитудой, активно заселяющий нарушенные местообитания. Выявлено, что оптимальной для существования куртин мха является температура поверхности около 37 °С. Существенным фактором выживания мха является стабильный режим влажно-

сти субстрата вследствие просачивания снизу водяного пара, интенсивность поступлений которого, по-видимому, коррелирует с выносом тепла. Для сукцессий на безжизненных вулканических отложениях важнейшим препятствием является иссушение и уплотнение поверхностного субстрата, а также отсутствие источников питания [19]. Несмотря на неблагоприятные экотопы вулканической пустыни, открытой ветрам и инсоляции (иссушающим поверхностные горизонты), пионерный мох нашел узкую, но приемлемую для заселения нишу.

**Пирокластические волны вдоль окраин зоны прохождения пирокластических потоков.** Шквалы раскаленных пирокластических волн вызвали гибель леса вдоль бортов потока: в четко видимой полосе шириной около 200 м располагается погибший лес (хвойный по левому борту долины, и в основном березовый — по правому). В субальпийском поясе, по правому борту долины, заросли ольхового стланика уцелели благодаря защите снегового покрова, тогда как березы, возвышавшиеся над пологом стланика, погибли в результате термического воздействия.

В погибшем хвойном лесу (рис. 4) с целью выявления факторов гибели изучались деформации крон деревьев, распределение пятен обугливания и опаливания на коре и др., а также распределение пирокластических отложений по градиенту интенсивности воздействия пирокластических волн. Серия пробных площадок на трансекте через погибший лес (до живого леса) позволила выявить характер гибели/выживания древесных растений и особенности восстановления сообществ. Для выявления параметров пирокластической волны мы изучали распределение мощности отложений, их гранулометрический состав, кислотность и др., а также провели выявление высоты опаливания стволов деревьев и картирование векторов опаливания. Это позволило выявитьхождение высокотемпературного газово-песчаного вихря в трехмерном пространстве лесного сообщества, а также определить факторы гибели древесной растительности.

Гибель деревьев вдоль бортов долины произошла в результате направленного (сверху вниз, по ходу движения потока) обжигания древесных растений. Это хорошо видно по припеченной до черноты коре берез (рис. 5).

Наиболее интенсивное опаливание отмечается до высоты 1,5–3 м, иногда опалины охватывают стволы в круговую. По результатам детального картирования выявлено, что на высоте 300 м, в поясе хвойного леса, ожог ориентирован под углом около 45° к направлению движения пирокластического потока, то есть воздействие шло сверху





Рис. 4. Погибший ельник в долине р. Байдарной (Шивелуч). Август 2005 г. Фото автора

вниз и сбоку, со стороны потока. Хвоя кедрового стланика в погибшем ельнике не сгорела, но почернела, причем хвоинки были сжаты в плотные кисточки, ориентированные в одном направлении. Скорость, температура и насыщенность пеплом газовой-песчаной волны, по-видимому, быстро падала с удалением от края леса. Погибшие деревья показывают резкий градиент затухания мощности воздействия палящей волны: живые деревья начинают появляться через 100–150 м от края пирокластического потока. У многих выживших деревьев были повреждены и усохли нижние части крон. Еще через сотню метров располагается живой лес без признаков воздействия пронесшейся рядом огненной стихии. Тепловое и динамическое воздействие коррелирует с мощностью

отложений: через 100–200 м (перпендикулярно направлению движения волны) толщина отложений падала от 50–25 до 7–8 см, и в этом интервале мертвый лес сменялся выжившим. Если подстилка в усохшем лесу была перекрыта отложениями из мелкого песка (до супеси), то стволы и ветви деревьев в 2005 г. были обильно покрыты отложениями более тонкой фракции. Возможно, пепел, осевший на кронах, выпал из горячего газовой-пеплового облака, стоявшего над лесом, по которому пронеслась раскаленная волна. Из-за таяния снега на ветвях и стволах произошли увлажнение, налипание и частичное цементирование пепла.

Деревья, испытавшие воздействие пирокластической волны, погибли, но выглядят почти неповрежденными. Лишь ближе к краю потока и в верхней

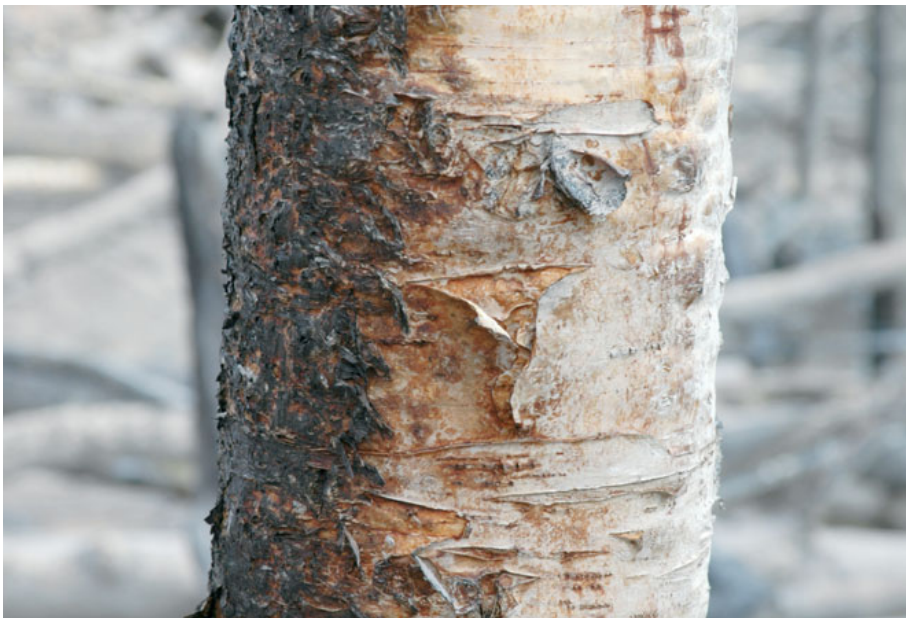


Рис. 5. Кора березы каменной, опаленная пирокластической волной в долине р. Байдарной (Шивелуч). Фото автора

части долины, где воздействие волны было максимально интенсивным, можно увидеть стволы с обломанными ветвями. Температура раскаленной волны была относительно небольшой (до 250 °С), поскольку возгораний хвойных деревьев и кедрового стланика в подлеске не наблюдалось. Помимо недостаточно высокой для возгорания температуры палящей волны этот факт можно объяснить несколькими причинами:

- кратковременность контакта;
- низкая температура зимнего леса;
- снеговой покров, прикрывший наиболее горючий материал;
- движение волны сверху вниз;
- насыщенность раскаленной волны песчаным материалом, который сбивал пламя при возгораниях.

Отдельные деревья, однако, близ края пирокластического потока загорались, причем многие перегорали в своей нижней части. Вероятно, это происходило после погребения оснований деревьев раскаленным материалом пирокластического потока либо вследствие мощного теплового излучения. В ходе извержений обычно происходят механическое повреждение растений, химическое отравление, запыление ассимиляционного аппарата. Однако в данном случае среди причин гибели деревьев явно доминировало опаливание стволов и крон высокотемпературными газовой-песчаными шквалами. Растения не выдерживают такого мощного термического воздействия.

**Вулкан Шивелуч, извержение 2010 г.** В конце октября 2010 г. произошло крупное извержение вулкана Шивелуч. В результате извержения мощные массы вулканитов отложились на юго-восточных склонах вулкана. Обширные пространства были погребены высокотемпературными отложениями. Растительность на этой территории была уничтожена, а в крайних частях зоны воздействия — повреждена. Отложения 2010 г. образовали обширное поле, перекрывшее комплекс мощных обвалов-взрывных и пирокластических отложений 1964 г. Поток 2010 г. оставил свои отложения в трех зонах [22]. Часть вулканитов отложилась в пустынной зоне транзита (протяженность около 9 км в интервале от 2000 до 800 м над уровнем моря), как в слабо врезанных руслах, так и на пологой равнине. Судя по протаиванию снегового покрова на спутниковых снимках, в течение первой зимы (2010/11 г.) отложения были горячими, но сравнительно быстро, ко второй зиме (2011/12 г.) остыли. Отсюда следует, что эти отложения были умеренной мощности (предположительно не более 5–10 м). Основная масса отложений потока 2010 г. сконцентрирована в компактной зоне аккумуляции вдоль правого берега р. Кабеку, в пределах зоны размером примерно 4×6 км, в высотном интервале ~ 800–500 м (рис. 6).



Площадь многометровых отложений в зоне аккумуляции ~ 16-18 км<sup>2</sup>. Судя по высокой температуре отложений, что четко проявляется на зимних снимках 3,5 года спустя после извержения, можно допустить, что средняя мощность отложений составляет не менее 15-20 м. Часть потоков прошла ниже основной зоны аккумуляции, пройдя около 6 км по долине р. Кабеку и ее притоку до высоты 300 м. Объем отложений зоны аккумуляции можно оценить величиной ~ 0,2 км<sup>3</sup>, а общий объем отложений 2010 г. — около 0,25-0,3 км<sup>3</sup>.

Летом 2011-2014 гг. мы обследовали нижнюю часть обширного поля пирокластических отложений, а также долины р. Кабеку и ее трех притоков, в интервале высот 150-600 м над уровнем моря. Растительный покров был погребен отложениями пирокластических потоков на днищах долины р. Кабеку и ее первого притока, а также погиб от воздействия пирокластических волн на склонах этих долин. До извержения 2010 г. два русла из трех были неработающими, днища долин заросли кустарниками, а также небольшими деревьями (это видно на аэрофотоснимках 1976 г.). Пирокластический поток прошел по руслу р. Кабеку на расстояние 6 км, а с учетом мощного потока, прошедшего по долине ее второго притока, суммарно около 8 км.

Основная масса пирокластики прошла по второму притоку р. Кабеку. Это индицируется по заполненности долины отложениями (остались видны только верхние части склонов) и по повышенной температуре отложений, видимой по протаиванию снегового покрова вплоть до весны 2014 г. По нашей оценке, глубина дна долины второго притока Кабеку уменьшилась с 35-45 до 10-20 м, при этом ширина его существенно увеличилась. На аэрофотоснимке 1976 г. видно, что днище было заросшим, а сам профиль долины близок к среднему между V- и U-образной формами. В 2010 г. дно долины было заполнено мощными пирокластическими отложениями, образовавшими почти ровную, полого снижающуюся, слабовыпуклую в средней части поперечного профиля поверхность. Древесная растительность на днище и нижних частях бортов была погребена; на оставшихся верхних частях бортов долины здесь полностью погибла.

Долина р. Кабеку до извержения 2010 г. имела относительно широкую (до 100 м) прирусловую часть, покрытую перемерзшими наносами вулканических отложений и полностью свободную от растительности. Водоток в летний период представлял собой ручей с переменной интенсивностью стока; эпизодически по нему проходили лахары. Склоны долины были покрыты стланиково-древесной растительностью из ольховника, березы ка-



**Рис. 6. Измерение температуры субстрата на поле горячих отложений 2010 г. (юго-восточный склон вулкана Шивелуч, высота около 600 м над уровнем моря). На дальнем плане — вулк. Шивелуч. Фото автора**

менной с участками лугов. Как и в других участках района исследования, на склонах и водоразделах повсеместно высятся стволы погибших в 1964 г. лиственниц, практически без крон. Пирокластический поток, прошедший по этой долине, оставил менее мощные по сравнению с долиной второго притока отложения (рис. 7), что видно на спутниковых снимках по отсутствию протаивания снегового покрова.

Пирокластические волны вызвали поражение лесной и стланиковой растительности на склонах этих долин. Четыре трансекта через зоны поражения показали особенности поражения, распределение, мощность и состав отложений пирокластических волн. Выявлено, что вся древесная раститель-

ность (заросли ольховника, деревья и подрост каменной березы, лиственницы и др.) на бортах долины р. Кабеку и ее притоков погибла при небольшом уровне мощности отложений тонкой пирокластики (5-7 см). Был сделан важный вывод: по третьему левому притоку р. Кабеку прошла мощная пирокластическая волна, оторвавшаяся от пирокластического потока. Древесная растительность погибла на склонах долины высотой до 50 м. Это яркий пример особой опасности пирокластических волн как для экосистем, так и для человека.

Максимально выраженное разрушительное действие волн наблюдалось в нижней части склона; древесные побеги были развернуты на 90° (по тече-



**Рис. 7. Толща отложений пирокластического потока в долине р. Кабеку (Шивелуч). Мощность отложений около 8 м. Видны деревья на склоне, погибшие в результате прохождения пирокластической волны. Фото автора**





**Рис. 8.** Ветви ольхового стланика, ободранные пирокластической волной, и пышно разросшиеся злаки (вейник Лангсдорфа). Долина притока р. Кабеку (Шивелуч). Фото автора, 2012 г.

нию потока), ободраны и слегка обуглены (рис. 8). В прирусловой части склона крайне редуцированные останки стволов стланика выглядели аналогично побегам, наблюдавшимся на вулкане Пик Сарычева (о-в Матуа) после извержения 2010 г. [12]. В верхней половине склонов температура волн не превышала, по-видимому, 250 °С, поскольку существенного опаливания и обугливания древесных растений не отмечено. Скорость волн там также не превысила порога, при котором происходит вываливание деревьев, повреждение крон, облом ветвей. В краевых частях зоны поражения древесная

растительность погибла, по-видимому, главным образом от термического воздействия, поскольку ветви и стволы не имеют внешних повреждений.

В целом в результате извержения 2010 г. древесная растительность погибла на относительно небольшой площади: толщи обвалных отложений и пирокластике перекрыли в зоне аккумуляции краевой сегмент территории (около 1 км<sup>2</sup>), на которой рос молодой формирующийся лес; пирокластические потоки в долине р. Кабеку и ее первого притока перекрыли растительность нижних частей склонов и прирусловой части на площади около 0,8 км<sup>2</sup>; пирокластические волны прошли по долинам всех трех притоков р. Кабеку и уничтожили древесную растительность на склонах, а также зачастую на водораздельных террасах, на общей площади около 1–1,2 км<sup>2</sup>. Таким образом, масштабы последствий извержения были относительно умеренными по сравнению с извержением 2005 г., когда в долине р. Байдарной были погребены леса на площади 10–12 км<sup>2</sup>.

Заращение отложений пирокластического потока к 2012 г. еще не началось; более того, в руслах на высоте 420–480 м отмечались участки высокотемпературных отложений. Однако уже в 2013 г. местами были зафиксированы первые пионерные растения — всходы иван-чая, ольховника, злаков (рис. 9).

**Вулкан Пик Сарычева, извержение 2009 г.** 12–16 июня 2009 г. на острове Матуа (средние Курилы) произошло мощное эффузивно-эксплозивное извержение, в ходе которого было извергнуто, по нашей оценке, около 150±50 млн м<sup>3</sup> вулканитов [13]. По другой оценке объем только изверженной



**Рис. 9.** Иван-чай узколистый — обычный первопоселенец на пирокластических отложениях, в том числе и имеющих повышенную температуру. Долина р. Кабеку (Шивелуч). Фото автора, 2013 г.

пирокластике превысил 400 млн м<sup>3</sup> [16]. Извержение протекало в виде серии мощнейших взрывов с образованием гигантского эруптивного столба, поднимающегося на высоту до 20 км. Один из таких взрывов был заснят экипажем международной космической станции: на снимке хорошо видны несколько пирокластических потоков с клубящимися газово-пепловыми шлейфами [23]. Потоки сформировались в результате обрушения краевых частей эруптивного столба.

Извержение вызвало природную катастрофу: половина острова превратилась в безжизненную пустыню [20]. При этом площадь острова увеличилась на 1,5 км<sup>2</sup>, что хорошо видно по линии побережья при сравнении со спутниковыми снимками предшествующих лет.

В августе 2010 г. автором проведено полевое обследование последствий извержения. Совокупность собранных и проанализированных материалов, включая дешифрирование спутниковых снимков, позволила оценить параметры и характер катаклизма, а главное, сделать первые выводы о влиянии этого катастрофического извержения на экосистемы.

Важнейший показатель мощности извержения и потенциальной трансформации экосистем — объем извергнутых вулканитов. Мы оценили [13] продукты июньского извержения следующими показателями: объем пирокластических потоков, сформированных на суше, — 20–40 млн м<sup>3</sup>, видимые отложения пирокластических потоков и, возможно, лахаров, увеличивших территорию суши, — 14–35 млн м<sup>3</sup>, толщи пирокластических потоков, скрытые под водой — 10–40 млн м<sup>3</sup>, отложения пирокластических волн на суше и в море — 2–5 млн м<sup>3</sup>, тефра на суше — 4–10 млн м<sup>3</sup>, тефра вне острова (в основном в море) — 40–60 млн м<sup>3</sup>, лавовые потоки — 10–15 млн м<sup>3</sup>. Сводная оценка общего объема вулканитов — 100–200 млн м<sup>3</sup>. Коэффициент эксплозивности извержения — 0,90–0,95. Вулканиты представлены в основном пирокластическими породами, подавляющую часть которых составляют отложения пирокластических потоков.

Обследование показало, что отложениям пирокластических потоков принадлежала главная роль в изменении рельефа вулкана Пик Сарычева, а также в воздействии на природную среду острова в ходе извержения 2009 г. Эти потоки с сопровождающими их пирокластическими волнами превратили конус вулкана в вулканическую пустыню. Наиболее интенсивно (по объему продуктов и длине прохождения) пирокластические потоки формировались на западном и северо-восточном склонах вулкана. Пирокластические потоки двигались по понижениям рельефа, в том числе по ложбинам, где



ранее прошли лавовые потоки, а отложения пирокластических волн перекрывали все поверхности, включая возвышенные. Пирокластические потоки 2009 г., судя по спутниковым снимкам, перекрыли часть склонов и подножья вулкана, а также обрушились в море. Крутизна склонов конуса (более 30°) способствовала тому, что потоки двигались с большой скоростью; их отложения приурочены главным образом к подножиям вулкана. Судя по снимкам теплового излучения поверхности острова ASTER TIR, потоки проходили по 13 трассам; горячие отложения перекрыли главным образом западную часть вулкана, а также секторы на северном и восточном склонах, местами далеко внедрившись в море. Мощность пирокластических потоков составила, по-видимому, не менее нескольких метров. Отложения пирокластических потоков внедрились в море, образовав новую сушу. В результате отложения огромных объемов вулканических на трех участках береговая линия отодвинулась на 400 м (рис. 10).

Зона, перекрытая многометровыми отложениями пирокластических потоков, превратилась в вулканическую пустыню. Через 2 недели после извержения, по данным сахалинских вулканологов [16], пирокластическая имела температуру сотни градусов. По наблюдениям автора, даже через 14 месяцев после из-

вержения отложения местами были горячими (рис. 11).

Это неудивительно: мощные (десятки метров) толщи могут остывать многие годы. Так, Г.С. Горшков [3] отмечал в 1954 г., что на поверхности пирокластических отложений 1946 г. бурно парили фумаролы. Раскаленные шлаковые пирокластические потоки полностью погребли растительность, тогда как столь же горячие отложения пирокластических газовой-песчаных волн обуглили и ободрали стволы ольховника, оставив на склонах обширные массивы мертвых зарослей. Лахары, порожденные пирокластическими потоками, пронесли по распадкам на склонах вулкана; наиболее заметный из них, длиной более 4 км, достиг зоны освоенной территории в юго-восточной части острова. В 2010 г. растений, даже единичных, на пирокластических отложениях 2009 г. видно не было — субстрат был слишком неблагоприятным для поселения.

Пирокластические потоки генерировали пирокластические волны. Если пирокластические потоки двигались по понижениям рельефа, то отложения пирокластических волн перекрывали прилегающие склоны, включая возвышенные поверхности. Скорость движения волн составляет десятки метров в секунду, температура может достигать нескольких сотен градусов. Обследование на склонах вулкана Пик

Сарычева показало, что зоны прохождения волн четко маркируются зарослями погибшего ольховника. Пирокластические газовой-песчаные волны обуглили и ободрали стволы ольховника, оставив на склонах обширные массивы мертвых зарослей (рис. 12).

Как было изучено на вулкане Шивелуч [6, 7], мощность отложений волн четко коррелирует с уровнем разрушительного воздействия волны. Там же отмечено, что, судя по опаленности и ошкурности стволов деревьев, наиболее интенсивное воздействие пирокластических волн происходило на высоте до 2–3 м. По этой причине низкорослые (1–4 м) заросли ольховника на склонах Пика Сарычева подверглись максимально возможному разрушительному воздействию, находясь в уязвимом состоянии: незадолго до извержения сошел снег, обнажив заросли, на ветвях начала появляться молодая листва. Мощный (и, по-видимому, неоднократный) термический и механический удары, а также химическое отравление и частичное погребение высокотемпературным материалом привели к гибели заросли стланика.

Отложения раскаленных пирокластических потоков и волн привели к катастрофическому таянию мощных снежников. На склонах вулкана к началу извержения находились миллионы кубометров плотного снега и фирна, при этом до 3/4 остатков снегового по-



Рис. 10. Отложения пирокластических потоков извержения 2009 г. внедрились в море на 400 м. Восточное побережье острова Матуа. Фото автора





**Рис. 11. Поверхность отложений пирокластических потоков 2009 г. местами была еще горячей 14 месяцев спустя после извержения. Восточное побережье острова Матуа. Фото автора**

кровы вулкана располагалось на склонах его юго-восточной части. Длина снежников достигала 2-3 км, ширина доходила до 400 м. Таяние снежников повлекло образование лахаров. Крупнейший из лахаров сформировался на южном склоне вулкана. Запас снега в зоне схода данного лахара к началу извержения можно оценить объемом около 0,7 млн м<sup>3</sup>; запас воды в этой зоне мог достигать 0,4-0,5 млн м<sup>3</sup>. В ходе извержения пирокластические потоки узкими полосами достигли высоты 450 м, перекрыв снежники на склоне и в русле [11]. Пирокластические волны широкими фронтами прошли по склонам, прилегающим к руслам. Раскаленные отложения пирокластических потоков и волн вызвали бурное таяние снега.

Сформировавшаяся селевая масса состояла из свежих вулканических продуктов, ранее извергнутых вулканитов, покрывавших склоны конуса, а также находящихся в зоне транзита лахара. Зона прохождения лахара заняла более 4 км; лахар узкой полосой (ширина около 50 м) прошел на юг от вулкана по распадку ручья, сметая водно-грязевой массой растительность и почву по бортам русла. Масса потока сдвинула рыхлый грунт, почвенный и растительный покровы, обнажая места склоны до скальных выходов (древних лав). Лахар уничтожил растительность в русле ручья и на пологой равнине, где растекались веером отложения конуса выноса потока, достигшего полосы аэродрома. Поток пе-



**Рис. 12. Погибшие под воздействием пирокластических волн заросли ольховника. Восточное побережье острова Матуа, 2010 г. Фото автора**

ренес и отложил, оценочно, около 0,2 млн м<sup>3</sup> твердого материала. Общая площадь территории, на которой растительность погибла в результате схождения крупнейшего лахара, — около 0,2 км<sup>2</sup>, а от воздействия четырех обследованных лахаров — около 0,3 км<sup>2</sup>. В целом территория, на которой произошло поражение экосистем под воздействием извержения 2009 г., составляет около 30 км<sup>2</sup> — более половины площади острова.

### Обсуждение

Извержения вулканов, продуктами которых являются кислые породы (с высоким содержанием SiO<sub>2</sub>, в том числе андезиты и андезибазальты), отличаются огромной взрывной мощностью. Вследствие высокой вязкости андезитовой магмы, ее расширение в ходе извержений происходит очень быстро, практически мгновенно, с высокой степенью explosивности. В результате извержений, происходящих в очень короткое время, извергаются крупные, а иногда колоссальные массы вулканитов. Они перекрывают большие территории, полностью уничтожая или разрушая экосистемы. К таким особо опасным вулканам («вулканам-убийцам») относятся Шивелуч и Безымянный на Камчатке, вулканы Севергина и Пик Сарычева на Курильских островах, вулкан Сент-Хеленс в США, Унзен в Японии, Суффриер на Антильских островах, Мерапи в Индонезии и многие другие. Извержения вулканов Сент-Хеленс, Унзен и Суффриер вызвали не только экологические катастрофы в своих регионах, но и многочисленные человеческие жертвы. Благодаря слабой населенности Камчатско-Курильского региона в нашей стране жертв не было, но катастрофические природные изменения, включая гибель растительности, были отмечены на больших (десятки квадратных километров) территориях.

Февральский пирокластический поток 2005 г. на вулкане Шивелуч с объемом отложений около 0,5 км<sup>3</sup>, по-видимому, стал одним из крупнейших за последние три столетия в Камчатско-Курильском регионе. Для сравнения отметим, что в ходе двух гигантских извержений XX в. на Камчатке объем отложений пирокластических потоков достиг 0,3-0,5 км<sup>3</sup> во время извержения вулкана Шивелуч в 1964 г. [4] и 0,7-0,8 км<sup>3</sup> во время извержения вулкана Безымянный в 1956 г. [1]. Таким образом, в ходе двух последних мощных извержений вулкана Шивелуч были извергнуты пирокластические потоки объемом около 0,5 и 0,3 км<sup>3</sup>, перекрывшие суммарно примерно 55 км<sup>2</sup> территории в юго-западном и юго-восточном секторах вулкана. В результате этих извержений растительность погибла на площади около 20 км<sup>2</sup>, в том



числе леса на площади 12-13 км<sup>2</sup>. Наиболее ценным компонентом этих лесов были ельники в долине р. Байдарной. В новейшей истории Камчатки (с конца XVII в.) это был крупнейший массив темнохвойных лесов, погибших в результате вулканического извержения. Там же, в долине Байдарной, произошло уникальное для Курило-Камчатского региона явление гибели хвойных лесов от воздействия пирокластической волны [6, 7].

Помимо первичных (инициальных) этапов заселения свежих пирокластических отложений, мы изучали долговременные сукцессии на отложениях старых потоков. Сделан вывод, что восстановление лесной растительности в долине р. Байдарной, на отложениях 2005 г., может произойти в течение 300-400 лет [14]. Это существенно меньше, чем длительность сукцессии (до 2000 лет) на лавовых потоках [5]. Горный и высокогорный растительный покров южного макросклона вулкана Шивелуч (в том числе разреженный покров вулканических пустынь) находится в зоне периодических воздействий извержений, и длительность его восстановления будет зависеть от активности вулкана.

Территория, на которой произошло полное поражение экосистем в результате извержения вулкана Пик Сарычева (2009 г.), составляет более половины

площади острова Матуа, достигая около 30 км<sup>2</sup>. По этому параметру извержение является одним из крупнейших на Курилах за последние 100 лет, превосходя по масштабам экологических последствий гигантское извержение вулкана Севергина (1933 г., о-в Харимкотан), крупные извержения вулкана Алаид (1972, 1981 гг., о-в Атласова) и вулкана Тятя (1973 г., о-в Кунашир). Извержение 2009 г. стало не только катастрофой для биотических компонентов экосистем вулкана, но и также полностью погребло или сделало ограниченно доступными для растений почвенные ресурсы на огромной территории (почти половине острова), существенно изменило рельеф склонов вулкана и характер береговой линии, увеличив площадь острова. Восстановление растительности до состояния, наблюдавшегося перед извержением, может занять нескольких десятков лет на склонах, сформированных старыми лавовыми потоками и перекрытых маломощными (доли метра) свежими рыхлыми отложениями. На мощных (многометровых) отложениях пирокластических потоков сукцессия потенциально может длиться сотни лет, однако это вряд ли реально в условиях крайне высокой вулканической активности, поскольку сукцессии периодически прерываются очередным извержением

и разреженный растительный покров, по-видимому, на данном этапе развития вулкана не сможет сформироваться в развитии, зрелую растительность.

В целом совокупная площадь выявленной территории поражения экосистем пирокластическими потоками и волнами вулканов Пик Сарычева, Шивелуч, Безымянный, Кизимен (на последних двух полевые исследования не проводились) в ходе извержений 2005–2013 гг. составила около 100 км<sup>2</sup>. Последствия поражения долговременны, и восстановление природной среды занимает сотни лет. Обе величины (площадь поражения и длительность сукцессий) очень значительны. Пирокластические потоки и волны являются крайне разрушительными явлениями (а волны в силу особой мобильности и непредсказуемости — особо опасными для всего живого), которые приводят к масштабному катастрофическому поражению экосистем с долговременными последствиями. В связи с этим изучение радикальных трансформаций экосистем, в первую очередь реакций растительного покрова на воздействие, а также сукцессий растительности, начавшихся после извержений, становится важной и актуальной задачей научного исследования в Курило-Камчатском регионе.

*Исследование поддержано грантом РФФИ № 13-05-00686.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдавленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 168-194.
2. Гирина О.А., Демячук Ю.В., Мельников Д.В. и др. Пароксизмальная фаза извержения вулкана молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16-23.
3. Гориков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
4. Гориков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3-37.
5. Гришин С.Ю. Сукцессии подгольцовой растительности на лавовых потоках Толбачинского дола // Ботанический журнал, 1992 г. № 1. С. 92-100.
6. Гришин С.Ю. Поражение растительности в результате крупного извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 2005 г.). Вестник ДВО РАН, 2008. № 1. С. 45-52.
7. Гришин С.Ю. Гибель леса на вулкане Шивелуч под воздействием палящей пирокластической волны (Камчатка, 2005 г.) // Экология. 2009. № 2. С. 158-160.
8. Гришин С.Ю. Воздействие вулканических извержений на растительный покров острова Матуа (Курильские острова) // Известия Русского географического общества. 2011. Т. 143. Вып. 3. С. 79-89.
9. Гришин С.Ю. Воздействие на окружающую среду мощного извержения вулк. Пик Сарычева (Курильские острова, 2009 г.) по данным космической съемки // Исследование Земли из Космоса. 2011. № 2. С. 92-96.
10. Гришин С.Ю. Заселение растениями поверхности горячего пирокластического потока (вулкан Шивелуч, Камчатка). Экология. 2012. № 2. С. 156-158.
11. Гришин С.Ю. Лахары на вулкане Пик Сарычева (Курильские острова) при извержении 2009 г. и их воздействие на окружающую среду // Геориск. 2012. № 4. С. 56-63.
12. Гришин С.Ю. Сильное извержение вулкана Пик Сарычева // Природа. 2013. № 6. С. 54-66.
13. Гришин С.Ю., Гирина О.А., Верещага Е.М. и др. Мощное извержение вулкана Пик Сарычева (Курильские острова, 2009 г.) и его воздействие на растительный покров // Вестник ДВО РАН. 2010. № 3. С. 40-50.
14. Гришин С.Ю., Комачкова И.В. Температура отложений мощного пирокластического потока вулкана Шивелуч (2005 г., Камчатка) и начало его за-растания // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2011. Вып. 18. № 2. С. 135-141.
15. Гришин С.Ю., Крестов П.В., Верховат В.П. и др. Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // Комаровские чтения. Вып. XLVI. Владивосток: Дальнаука. 2000. С. 73-104.
16. Левин Б.В., Рыбин А.В., Разжигалева Н.Г. и др. Комплексная экспедиция «Вулкан Сарычева-2009» (Курильские острова) // Вестник ДВО РАН. 2009. № 6. С. 98-104.
17. Нурдаев А.А., Гирина О.А., Мельников Д.В. Некоторые результаты изучения пирокластических отложений извержений 28 февраля и 22 сентября 2005 г. вулкана Молодой Шивелуч наземными и дистанционными методами // Вестник КРАУНЦ. 2005. № 2. С. 62-66.
18. Activity at Shiveluch Volcano // Earth Observatory. NASA, 2010. URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=45872/>
19. del Moral R., Grishin S. Volcanic disturbance and ecosystem recovery // Ecosystems of disturbed ground. ELSEVIER, 1999. P. 137-160.
20. Eruption of Sarychev Peak, Kuril Islands // Earth Observatory. NASA, 2009. URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=39120/>
21. Ponomareva V.V., Pevzner M.M., Melekestev I.V. Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol. 1998. V. 59. P. 490-505.
22. Pyroclastic Flow Remnants at Shiveluch Volcano // Earth Observatory. NASA, 2011. URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=49468/>
23. Sarychev Peak Eruption, Kuril Islands // Earth Observatory. NASA, 2009. URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=38985/>