

УДК 553.46

ЭКСПЛОЗИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ЗАВАРИЦКОГО (о. СИМУШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА) В ГОЛОЦЕНЕ

© 2025 г. О. В. Дирксен^{а, *}, В. В. Пономарева^а, Е. А. Зеленин^б,
П. Ю. Плечов^с, Т. М. Философова^а, **А. В. Рыбин^д**

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^бГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^сМинералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН,
Ленинский просп., 18, корп. 2, Москва, 119071 Россия

^дИнститут морской геологии и геофизики ДВО РАН,
ул. Науки 1Б, Южно-Сахалинск, 693022 Россия

*e-mail: oleg.dirksen@gmail.com

Поступила в редакцию 05.07.2024 г.

После доработки 01.09.2024 г.

Принята к публикации 20.10.2024 г.

В настоящей статье мы приводим первые данные о голоценовой эксплозивной активности вулкана Заварицкого, крупнейшего кальдерного центра на острове Симушир (Центральные Курилы). Нам впервые удалось реконструировать хронологию эксплозивных извержений этого вулканического центра за последние 10 тыс. лет, а также оценить параметры его наиболее мощных извержений. В общей сложности, в разрезах почвенно-пирокластических чехлов было идентифицировано более 40 горизонтов тефры, что позволяет оценить частоту извержений: 1 событие за 250 лет. Возрастная модель, основанная на полученных нами радиоуглеродных датах для проксимальных отложений и опубликованных датах для тефры вулкана Заварицкого и маркирующего горизонта тефры СКг, позволила определить возраст большинства извержений. Установлено, что вулканические стекла голоценовой пирокластики по составу отвечают низкокалиевым андезибазальтам–риолитам, при этом очень низкое содержание K_2O позволяет достаточно уверенно отличить тефру вулкана Заварицкого не только от тефры соседних умереннокалиевых вулканов, но и от тефры других низкокалиевых вулканов Курило-Камчатской островной дуги.

Голоценовая активность вулкана Заварицкого началась с двух сильнейших извержений с консервативно оцененной магнитудой (M) 6.4 и 5.6, которые произошли около 9.5 и 9.2 тысяч лет назад (тыс. л. н.). Тефра первого извержения (ZV-1) распространилась на северо-восток и обнаруживается в разрезах вплоть до северо-западной части Северной Америки. Тефра второго мощного извержения (ZV-3) распространилась на север и была найдена в осадках Охотского моря. Пирокластика извержения ZV-1 характеризовалась вулканическим стеклом риолитового состава с самым высоким содержанием SiO_2 (72.5–74.0 мас. %). Стекла в продуктах извержения ZV-3 по составу варьировали от дацитов до риодацитов (65.0–71.9 мас. % SiO_2). Продукты последующих извержений были представлены шлаками со стеклами дацит-андезитового и андезибазальтового состава. Вновь дацитовые стекла появились лишь в тефре самого последнего крупного эксплозивного извержения произошедшего незадолго до середины XIX века.

Наши исследования установили катастрофический характер раннеголоценовых эксплозивных извержений вулкана Заварицкого и его практически постоянную активность на протяжении всего голоцена. Появление в тефре последнего мощного извержения вулкана (ZV-40) высококремнистых стекол говорит о вероятном сильном извержении в ближайшем будущем.

Ключевые слова: вулкан Заварицкого, кальдера, эксплозивное извержение, тефра, Курильские острова, состав вулканического стекла, голоцен

DOI: 10.31857/S0203030625010016, EDN: HNEVON

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных природных процессов, оказывающим влияние на климат Земли, который необходимо учитывать в прогнозных моделях, является крупномасштабный эксплозивный вулканизм [Baldini et al., 2015; McConnell et al., 2020]. Многочисленные попытки установить причины вспышек эксплозивной активности и понять их связь с геодинамикой и/или изменениями климата пока не увенчались успехом, прежде всего в связи с отсутствием точных и подробных хроник извержений за длительные периоды времени. Особенную трудность представляет реконструкция эксплозивной активности в пределах островных дуг, пирокластические отложения которых часто скрыты под водой, а на суше образуют сложноустроенные и частично эродированные толщи. Одной из таких дуг является Курильский сегмент Курило-Камчатского вулканического пояса в северо-западной части Тихого океана. Свидетельствами неоднократных сильнейших извержений здесь служат многочисленные кальдеры и пачки пемзовых отложений [Горшков, 1967], но летопись прошлых извержений до сих пор расшифрована фрагментарно и лишь для единичных вулканов [Дегтерев и др., 2012; Hasegawa et al., 2011; Nakagawa et al., 2002]. В настоящей статье мы сопоставляем результаты изучения наземной пирокластики с опубликованными данными о пеплах, захороненных в морских и наземных осадках, чтобы впервые реконструировать хронологию эксплозивных извержений вулкана Заварицкого (о. Симушир, Курильские острова) за последние 10 тыс. лет и оценить параметры его крупнейших извержений.

Вулкан Заварицкого расположен в центральной части о. Симушир (Центральные Курилы) (рис. 1а). Он представляет собой щитообразную вулканическую постройку диаметром около 17 км, срезанную двумя вложенными друг в друга кальдерами. Диаметр внешней, более древней, кальдеры, составляет около 10 км, внутренней, более молодой — 7–8 км [Горшков, 1967]. Последующие извержения сформировали внутри молодой кальдеры стратовулкан с диаметром основания около 6 км, вершина которого также была разрушена в результате мощных эксплозивных извержений. Образовавшийся

кратер (кальдера?) размером 3.5×2.7 км в настоящее время заполнен оз. Бирюзовым, в котором расположены два небольших экструзивных купола. Вулканический массив сложен породами низкокальцевой известково-щелочной серии [Парфенова и др., 2015].

Единственные зафиксированные извержения этого центра произошли в 1916–1932 гг. и в 1957 г., в результате чего возникли купола Восточный и Северный соответственно [Горшков, 1967], однако тефры этих извержений за пределами кальдеры не было обнаружено. Сведения о более древних, в т.ч. кальдерообразующих, извержениях и о возрасте вулкана в целом весьма немногочисленны и противоречивы. Анализ морфологии склонов обеих кальдер позволил предположить, что они образовались в среднем–позднем плейстоцене [Горшков, 1967] или же в самом конце верхнеплейстоценового оледенения или сразу после него [Мелекесцев и др., 1974]. Отложения голоценового почвенно-пирокластического чехла (далее ППЧ) в окрестностях вулкана, включающие многочисленные горизонты тефры, были описаны в работе [Разжигаетова и др., 2013], но эти исследования были посвящены, прежде всего, развитию ландшафтов острова, а не истории извержений. Исследования удаленных голоценовых пеплов на других островах Курильской гряды, а также в кернах из морских осадочных колонок, позволили связать с вулканом Заварицкого два пепловых горизонта. Первый из них — это распространившийся вплоть до о. Шумшу раннеголоценовый пепел, первоначально датированный ~8.9 тыс. лет (все значения возраста в статье приведены в калиброванных годах до 1950 г.) [Nakagawa et al., 2008]. В осадочных колонках Охотского моря также был обнаружен низкокальцевый пепел, изначально описанный как тефра кальдеры Тао-Русыр, но в последующих работах отнесенный уже к вулкану Заварицкого с присвоением индекса TR(Zv) [Derkachev et al., 2016]. Криптитефра вулкана Заварицкого была обнаружена в торфянике в северо-западной Канаде, где ее возраст оценен в 9560±110 лет [Davies et al., 2018]. В то же время единичные описания разрезов проксимальной пирокластики на о. Симушир не позволяли установить, являются ли обнаруженные пеплы результатом одного катастрофического извержения или же они

сформировались в результате серии мощных извержений. Кроме того, еще одна тефра вулкана Заварицкого (Zav-1) была обнаружена на островах Чирпой и Уруп [Nakagawa et al., 2008; Razjigaeva et al., 2022]. Ее возраст ранее оценивался в диапазоне 1000–600 лет назад (л. н.) [Nakagawa et al., 2008; Razjigaeva et al., 2022]. Другая информация об эруптивной активности в пределах вулканического центра Заварицкого отсутствовала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Во время полевых работ 2011 г. на о. Симушир нами было описано более 20 разрезов голоценовых почвенно-пирокластических чехлов (ППЧ), в которых идентифицировано не менее 40 горизонтов пирокластиче-ски вулкана Заварицкого и отобрано более

160 образцов его тефры (см. рис. 1а, 1б). Определение содержаний главных породообразующих оксидов в вулканических стеклах выполнялось на Геологическом факультете МГУ энерго-дисперсионным электронно-зондовым анализом (спектрометр Oxford X-MaxN с площадью кристалла 80 мм², установленный на электронный микроскоп JEOL JSM-6480LV). Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кэВ и токе зонда 10 нА. В качестве стандартов использованы природные силикаты [Jarosevich et al., 1980] и синтетические оксиды металлов. В дополнение, образцы раннеголоценовых пемз были проанализированы в ИВиС ДВО РАН при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 80 mm² и программным обеспечением AZtec. Условия

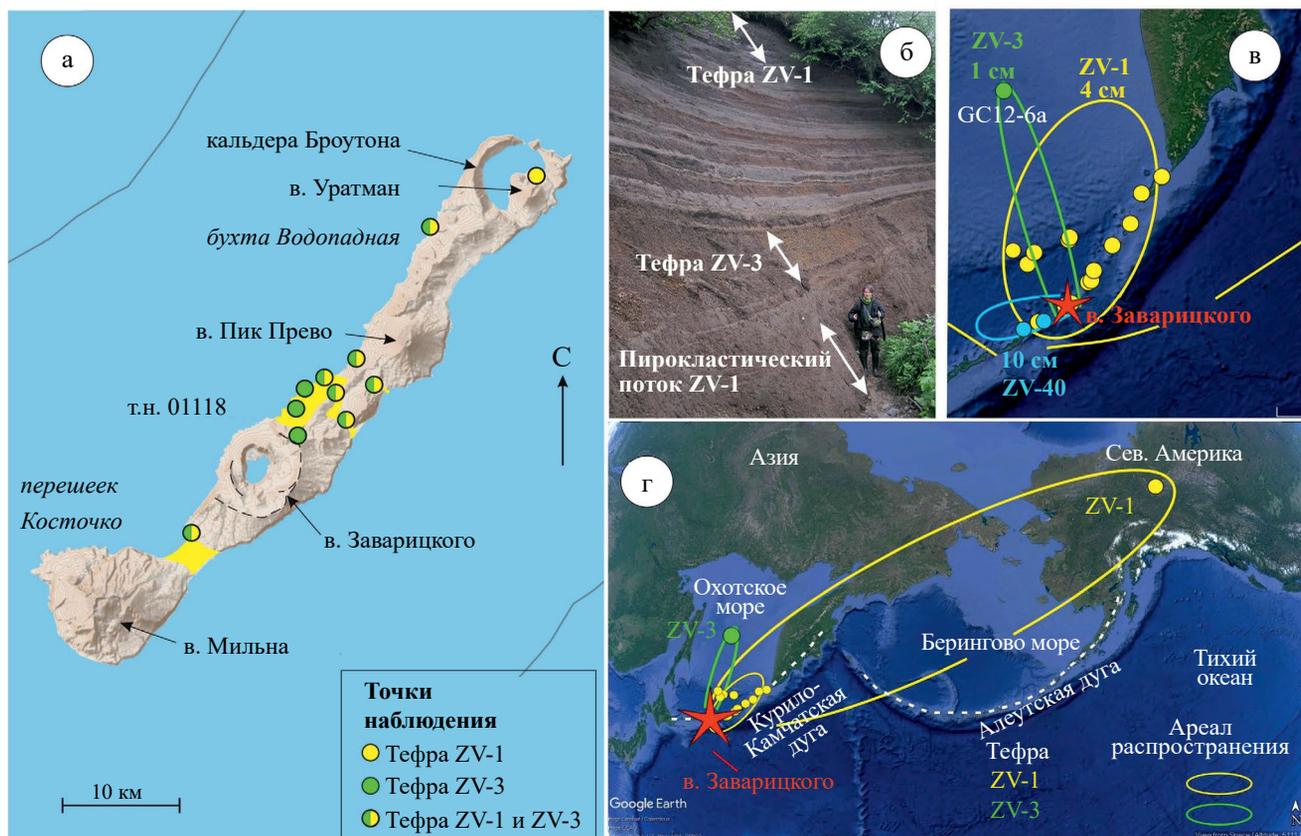


Рис. 1. Распространение отложений эксплозивных извержений вулкана Заварицкого в голоцене. а — вулканы о. Симушир — кружками показано положение разрезов, в которых были описаны тефры ZV-1 и ZV-3, желтой заливкой — отложения пирокластических потоков извержения ZV-1, пунктирные линии — бровки кальдер I и II, также показано положение опорного разреза т.н. 01118 (см. рис. 1б); б — общий вид опорного разреза тефры в т.н. 01118; в — изохиты тефры для извержений ZV-1 (4 см), ZV-3 (1 см) и ZV-40 (10 см); г — распространение раннеголоценовых тефр ZV-1 (желтая линия) и ZV-3 (зеленая линия); точки наблюдения показаны соответствующими цветами.

анализа составили: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на эталоне никеля $\sim 0.7-0.75$ нА, время накопления спектра 10 с и диаметр электронного пучка 5 мкм [Горбач и др., 2022].

Возрастная модель для разреза голоценовой пирокластики в опорном разрезе точки наблюдения (далее т.н. 01118) была создана в программе OxCal [Bronk Ramsey, 2009] с калибровочной кривой IntCal2020 [Reimer et al., 2020] на основании полученных нами радиоуглеродных датировок для проксимальных отложений и опубликованных дат для тефр вулкана Заварицкого и маркирующего горизонта тефры СКг (табл. 1) с учетом мощностей прослоев супеси, разделяющих горизонты пирокластики. Все возрасты в тексте даны в калиброванных годах до 1950 г., если не оговорено иное.

ПРОКСИМАЛЬНЫЕ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ ВУЛКАНА ЗАВАРИЦКОГО

В наиболее полных разрезах ППЧ на о. Симушир нами было обнаружено не менее 40 горизонтов пеплов, сформировавшихся в результате эксплозивных извержений массива Заварицкого за последние 10 тыс. лет. Детально горизонты тефры были описаны и изучены в опорном разрезе т.н. 01118. В нижней части разреза (см. рис. 1б) залегают две мощных пачки пемзовой пирокластики, сформировавшихся в результате катастрофических извержений в начале голоцена. Верхняя же часть разреза представляет собой дробное чередование горизонтов шлаков серого и темно-серого цвета, отложившихся в результате менее сильных извержений с прослоями

Таблица 1. Радиоуглеродные даты, использованные при построении возрастной модели

Номер образца	Лаб. номер	Место отбора	Материал	Стратиграфическое положение	^{14}C возраст	Источник
01118/A1	ЛЕ-11049	о. Симушир	древесина	в тефре ZV-40	260±25	данные авторов
01118/A3	ЛЕ-11050	о. Симушир	древесина	в тефре ZV-40	290±25	данные авторов
07-US-18-10	IAAA-72953	о. Ушишир	палеопочва	над тефрой СКг	1910±40	Nakagawa et al., 2008
292	AA-42209	о. Чирпой	угли	под тефрой СКг	2178±42	Nakagawa et al., 2008
293	AA-42209	о. Чирпой	угли	под тефрой СКг	2290±43	Nakagawa et al., 2008
2/307	LU-5947	о. Уруп	торф	под тефрой СКг	2280±90	Razjigaeva et al., 2022
2/3709	LU-6257	о. Уруп	торф	под тефрой СКг	2140±110	Razjigaeva et al., 2022
01118/A11	ЛЕ-11046	о. Симушир	палеопочва	под тефрой ZV-34	2130±120	данные авторов
07-SM-7-22	IAAA-72952	о. Симушир	палеопочва	под тефрой ZV-3	6820±40	Nakagawa et al., 2008
08MT-1-12	IAAA-82142	о. Матуа	палеопочва	под тефрой ZV-1	7920±50	Nakagawa et al., 2008
08RS-2-4	IAAA-82151	о. Расшуа	палеопочва	под тефрой ZV-1	8100±40	Nakagawa et al., 2008
B15-62	IAAA-72598	о. Парамушир	торф	под тефрой ZV-1	8540±40	Hasegawa et al., 2011
—	—	Аляска	торф	рассчитанный возраст тефры ZV-1	9560±110	Davies, 2018

слабогумусированных супесей. Венчается разрез тефрой последнего мощного эксплозивного извержения вулкана (тефра ZV-40) (см. рис. 1б).

В основании разреза залегает стратифицированная пачка пемзовой пирокластики, названная нами ZV-1, состоящая из горизонта тефры и перекрывающих его отложений пирокластических потоков. Мощность тефры меняется от 3–4 м на внешних склонах кальдеры до 20 см на северной оконечности о. Симушир. Отложения пирокластических потоков представлены слегка уплотненными пемзовыми туфами, мощность которых составляет 3–5 м на расстоянии 6–8 км от кальдеры.

Выше по разрезу лежит тефра еще одного сильного извержения (ZV-3), мощность которой в т.н. 01118 составляет около 70 см. В отличие от извержения ZV-1, это извержение не сопровождалось формированием пирокластических потоков.

Залегающие выше по разрезу многочисленные горизонты тефры вулкана Заварицкого представляют собой хорошо сортированные, пористые, хрупкие шлаки серого и темно-серого цвета. Мощность отдельных горизонтов меняется от 2 до 25 см, а крупность обломков — от 0.5 до 10 см (рис. 2а). Их разделяют маломощные (от 1 до 7 см) прослойки супесей, при этом богатые органикой почвенные прослойки отсутствуют, что препятствовало широкому использованию радиоуглеродного датирования для определения возраста отдельных горизонтов.

В самом верху разреза лежит тефра ZV-40, образовавшаяся в результате последнего сильного

извержения вулкана Заварицкого. Мощность тефры в опорном разрезе составляет около 90 см. Отложения пирокластических потоков здесь также отсутствуют, однако в кровле тефры, зачастую со следами размыва, залегают отложения мощного грязекаменного потока (лахара), распространявшегося по всем распадкам по периферии кальдерного комплекса. Выходя на берег Охотского моря и Тихого океана, эти отложения формируют полого-наклонные террасовидные поверхности, высотой до 6 м, быстро выклинивающиеся при удалении от долины водотока (рис. 2б).

СОСТАВ ВУЛКАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Состав вулканических стекол был изучен в представительных образцах тефры 40 крупных и умеренных извержений, опробованных в т.н. 01118 (табл. 2). Вулканические стекла голоценовой пирокластики вулкана Заварицкого по составу отвечают низкокалиевым андезибазальтам-риолитам (рис. 3а). Стекла горизонта ZV-1 самые кислые и по составу отвечают риолитам (72.5–74.0 мас. % SiO_2), стекла горизонта ZV-3 более основные и отвечают дацитам-риолитам (65.0–71.9 мас. % SiO_2). Стекла большинства извержений имеют достаточно однородный состав (колебание содержания SiO_2 — не более 5 мас. % (рис. 3б)). Единственное исключение — тефра ZV-3, в стеклах которой содержание кремнезема варьирует в диапазоне 61.8–71.8 мас. %. В целом, наблюдаются волнообразные изменения содержания SiO_2 вверх по разрезу (рис. 4). Самые низкие содержания кремнезема (~55–56 мас. %) отмечены около 6.4–6.3 и 2.5–1.7 тыс. л. н. Однако, около 1650 л. н. эта тенденция внезапно изменилась и стекла тефры последующих извержений становятся все более кислыми, достигая максимальных значений (до 67 мас. % SiO_2) в тефре последнего крупного извержения (ZV-40). Отличительной особенностью тефры массива Заварицкого является исключительно низкие содержания K_2O , отличающие ее от тефры не только соседних вулканов Пик Прево и Мильна, но и подавляющего большинства других вулканов Курильских островов и Камчатки. В наиболее основных стеклах содержание K_2O составляет 0.3–0.5 мас. %, в наиболее кислых — не более 0.9–1.0 мас. %.



Рис. 2. Дробное чередование горизонтов шлаков вулкана Заварицкого в разрезе почвенно-пирокластического чехла т.н. 01118 (а) и отложения лахара извержения ZV-40 на берегу Охотского моря (б).

Таблица 2. Модельный возраст и средние составы для тефры голоценовых извержений вулкана Заварицкого

Индекс	Модельный возраст (ВР)		95% уровень вероятности		Время, лет (см. примечание)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cl	Сумма	Первичная сумма	N
	среднее	погрешность	от	до																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Zv#40	119	1	121	117	1032	64.02	0.86	15.53	7.44	0.23	1.77	5.79	3.36	0.66	0.25	0.00	0.09	100.00	98.05	6
Zv#39	1151	184	1514	784	294	59.60	1.17	14.86	10.46	0.24	2.12	6.73	3.88	0.64	0.25	0.00	0.05	100.00	100.33	3
Zv#38	1445	171	1773	1100	147	59.45	1.09	15.87	9.45	0.24	2.30	6.80	3.96	0.62	0.15	0.00	0.06	100.00	100.42	2
Zv#37	1592	156	1884	1273	6	57.21	1.19	14.86	11.54	0.20	3.39	7.60	3.29	0.50	0.17	0.00	0.06	100.00	99.43	5
Zv#36	1598	155	1886	1280	720	57.79	1.29	14.04	12.13	0.22	3.05	7.32	3.30	0.58	0.21	0.00	0.07	100.00	99.43	9
Zv#35	2318	104	2535	2126	143	58.58	1.23	14.66	10.98	0.22	2.66	7.31	3.52	0.59	0.17	0.00	0.07	100.00	100.16	3
Zv#34	2461	124	2716	2226	928	56.44	0.99	16.71	10.38	0.24	3.08	8.37	3.16	0.47	0.12	0.00	0.04	100.00	99.39	6
Zv#33	3389	202	3802	2996	500	62.28	0.97	14.37	9.29	0.25	2.25	6.26	3.45	0.67	0.14	0.00	0.06	100.00	98.74	3
Zv#32	3889	226	4354	3446	285	60.81	1.16	14.04	11.53	0.23	2.49	6.91	1.68	0.78	0.23	0.01	0.14	100.00	94.73	3
Zv#31	4174	237	4653	3706	286	61.16	0.91	15.30	9.08	0.20	1.90	6.44	4.06	0.68	0.19	0.00	0.07	100.00	99.21	6
Zv#30	4460	246	4956	3972	285	59.74	1.01	15.88	9.52	0.17	1.78	7.00	3.92	0.69	0.23	0.00	0.06	100.00	100.48	6
Zv#29	4745	253	5259	4246	72	60.43	0.99	15.11	9.72	0.22	2.28	6.76	3.59	0.64	0.20	0.00	0.07	100.00	100.41	3
Zv#28	4817	255	5331	4312	214	62.14	1.02	14.94	9.69	0.20	2.27	6.63	1.99	0.72	0.24	0.04	0.09	100.00	96.07	5
Zv#27	5031	259	5549	4519	2	61.44	0.94	16.24	7.90	0.16	1.55	6.71	4.05	0.74	0.19	0.00	0.08	100.00	99.70	3
Zv#26	5033	259	5561	4527	141	60.37	1.00	14.80	10.13	0.20	2.65	6.79	3.26	0.58	0.13	0.00	0.09	100.00	99.07	5
Zv#25	5174	259	5693	4659	141	60.65	0.90	15.82	9.14	0.20	2.04	6.88	3.55	0.54	0.19	0.00	0.09	100.00	98.99	3
Zv#24	5315	259	5840	4804	423	59.28	0.92	15.88	9.55	0.21	2.47	7.33	3.60	0.54	0.17	0.00	0.04	100.00	99.48	3
Zv#23	5738	261	6260	5215	352	59.25	0.78	16.72	8.83	0.23	2.59	7.36	3.83	0.41	0.00	0.00	0.00	100.00	101.15	2
Zv#22	6090	265	6618	5562	70	56.46	1.07	15.57	12.21	0.23	3.49	8.31	1.88	0.53	0.17	0.01	0.06	100.00	97.08	3
Zv#21	6160	266	6690	5633	141	57.21	1.33	14.07	13.16	0.24	2.84	7.71	2.63	0.58	0.18	0.00	0.05	100.00	99.62	4
Zv#20	6301	268	6836	5775	71	55.40	1.06	15.91	11.64	0.24	3.90	8.71	2.61	0.39	0.10	0.00	0.06	100.00	100.77	3
Zv#19	6372	269	6906	5845	211	57.35	1.23	14.38	12.37	0.26	3.35	7.79	2.54	0.53	0.12	0.00	0.07	100.00	99.56	3

Таблица 2. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Zv#18	6583	274	7121	6065	423	60.99	0.96	15.01	9.36	0.20	2.17	6.58	3.81	0.64	0.21	0.00	0.07	100.00	99.94	3
Zv#17	7006	284	7535	6504	71	63.40	0.90	14.73	9.31	0.22	2.05	6.02	2.27	0.69	0.19	0.11	0.10	100.00	96.86	4
Zv#16	7077	286	7598	6573	141	62.34	0.90	15.08	8.66	0.20	2.05	6.11	3.81	0.67	0.10	0.00	0.08	100.00	98.50	3
Zv#15	7218	290	7733	6725	70	61.43	0.87	15.36	8.76	0.21	2.16	6.36	3.96	0.59	0.21	0.00	0.08	100.00	99.43	3
Zv#14	7288	293	7800	6796	2	62.77	0.86	15.16	8.15	0.20	2.01	5.97	3.99	0.62	0.19	0.00	0.08	100.00	99.49	3
Zv#13	7290	293	7800	6798	282	63.48	0.91	14.39	8.74	0.23	1.93	5.69	3.66	0.68	0.19	0.00	0.10	100.00	98.99	6
Zv#12	7572	290	8063	7100	141	67.57	0.83	14.81	7.03	0.16	1.01	4.97	2.43	0.83	0.23	0.01	0.13	100.00	96.91	4
Zv#11	7713	288	8195	7255	71	64.47	0.75	14.44	7.64	0.21	2.21	5.22	4.15	0.64	0.18	0.00	0.09	100.00	100.99	3
Zv#10	7784	287	8261	7333	141	65.96	0.83	14.29	8.07	0.19	1.91	5.46	2.05	0.84	0.26	0.02	0.12	100.00	96.65	3
Zv#9	7925	285	8391	7485	212	64.96	0.73	14.70	7.33	0.19	1.78	5.31	3.89	0.73	0.27	0.00	0.11	100.00	99.61	3
Zv#8	8137	282	8570	7715	3	65.32	0.63	15.26	6.42	0.20	1.41	5.33	4.36	0.77	0.20	0.00	0.09	100.00	99.68	6
Zv#7	8140	282	8575	7717	505	63.10	0.91	14.74	8.64	0.19	2.21	6.02	3.19	0.72	0.19	0.00	0.10	100.00	97.87	3
Zv#6	8645	232	9003	8288	72	65.96	0.67	14.74	6.70	0.16	1.27	5.08	4.28	0.79	0.22	0.00	0.11	100.00	99.45	3
Zv#5	8717	224	9060	8370	72	64.65	0.82	14.45	8.86	0.21	2.06	5.74	1.96	0.79	0.25	0.05	0.18	100.00	96.25	4
Zv#4	8789	216	9120	8456	217	64.12	0.70	15.13	7.50	0.16	1.64	5.86	3.96	0.72	0.10	0.00	0.11	100.00	99.11	6
Zv#3	9006	190	9285	8716	226	67.23	0.62	14.23	6.43	0.03	1.37	4.93	4.20	0.84	0.05	0.00	0.08	100.00	99.71	87
Zv#2	9232	138	9440	9001	233	65.51	0.65	14.63	7.39	0.21	1.70	5.16	3.65	0.75	0.22	0.00	0.11	100.00	99.92	3
Zv#1	9465	64	9546	9333	0	73.49	0.48	12.95	3.98	0.01	0.55	2.87	4.47	1.01	0.03	0.00	0.16	100.00	98.08	106

Примечание. Время — временной промежуток между двумя соседними извержениями; содержания породообразующих окислов и летучих компонентов — в мас. %; N — количество анализов для данной тefры.

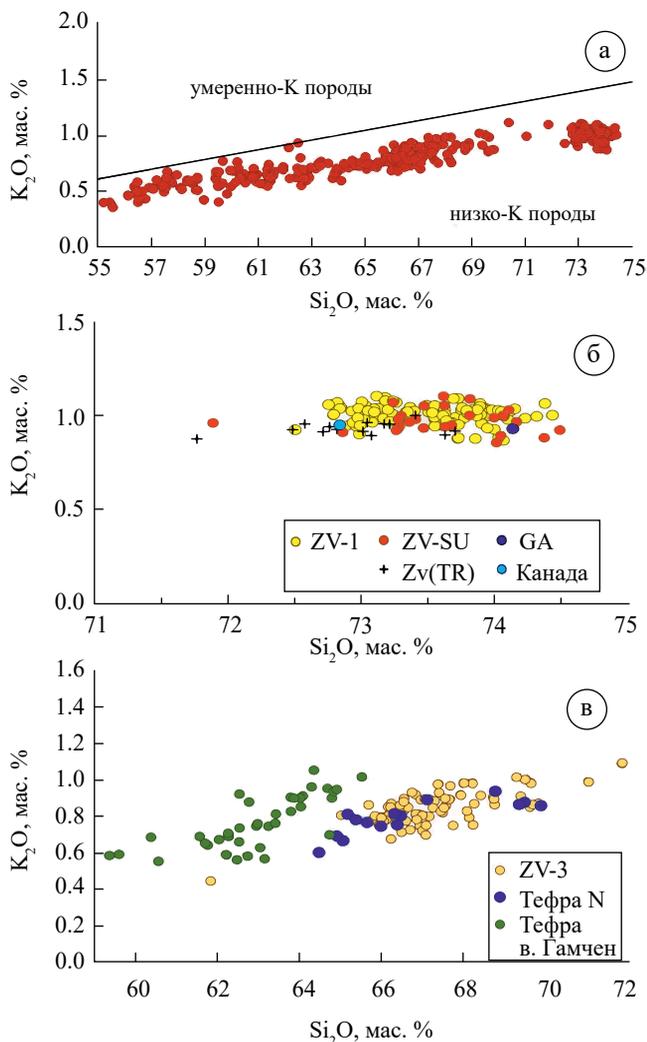


Рис. 3. Диаграммы содержания SiO_2 и K_2O в вулканических стеклах голоценовой пирокластике вулкана Заварицкого. а — классификационная диаграмма K_2O – SiO_2 для всех изученных стекол. Граница умеренно- и низкокальциевых составов показана, согласно работе [Le Maitre et al., 2002]; б — состав стекол в проксимальных и дистальных образцах тефры ZV-1 (пояснения см. в тексте); в — состав стекол в проксимальных и дистальном образцах тефры ZV-3, также показаны составы стекол вулкана Гамчен, по работе [Portnyagin et al., 2020].

ВОЗРАСТ И МАГНИТУДА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА ЗАВАРИЦКОГО И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИХ ТЕФР

Стратиграфическое положение горизонтов пемз ZV-1 и ZV-3 и специфические геохимические характеристики позволили нам уверенно идентифицировать эти горизонты в разрезах о. Симушир, а также скоррелировать их со слоями удаленных пеплов, описанными нами,

а также другими авторами в разрезах Курильских островов [Nakagawa et al., 2008; Hasegawa et al., 2011], в морских колонках Охотского моря [Derkachev et al., 2016] и в торфянике на северо-западе Канады [Davies, 2018].

Тефра ZV-1. Региональные тефрохронологические работы на Курильских островах выявили присутствие низкокальциевого риолитового пепла в нижней части многих разрезов голоценовых отложений Центральных и Северных Курил (рис. 1в). Тефра, получившая индекс ZvSu и связанная, по мнению авторов, с одним из извержений вулкана Заварицкого, описана на островах Расшуа (где ее мощность составляет 10–15 см), Матуа (5 см), Шиашкотан (4–5 см) и Онекотан (4 см) [Nakagawa et al., 2008]. При этом южнее Симушира, на островах Чирпой и Уруп, эта тефра отсутствует. Тефрохронологические исследования на о. Парамушир выявили уникальный для этого острова пепел (индекс GA) с очень низким содержанием K_2O , мощность которого составляла 3–4 см [Hasegawa et al., 2011]. В разрезах почвенно-пирокластического чехла эта тефра лежит под горизонтом тефры КО, связанным с кальдерообразующим извержением Курильского озера на Южной Камчатке [Hasegawa et al., 2011]. В колонках морских отложений в Охотском море также был обнаружен пепел, названный авторами TR(Zv), со сходными геохимическими характеристиками [Derkachev et al., 2016]. Кроме состава стекол, соответствующего низкокальциевым риолитам, к идентификационным признакам этих тефр также можно отнести особенности минералогического состава: присутствие клино- и ортопироксена при отсутствии амфибола [Hasegawa et al., 2011]. Еще одна находка раннеголоценового низкокальциевого риолитового пепла, сходного по своим геохимическим характеристикам с пирокластикой кальдеры Заварицкого (на этот раз не в виде прослоя, а в виде криптотефры), была сделана в торфянике на северо-западе Канады [Davies, 2018].

Анализ приведенных в этих работах данных по составу стекол пеплов ZvSu, GA и TR(Zv), а также криптотефры с северо-запада Канады, показал, что как по стратиграфии, так и по составам стекол они идентичны описанной нами проксимальной пемзе ZV-1 (см. рис. 3б), то есть являются продуктами

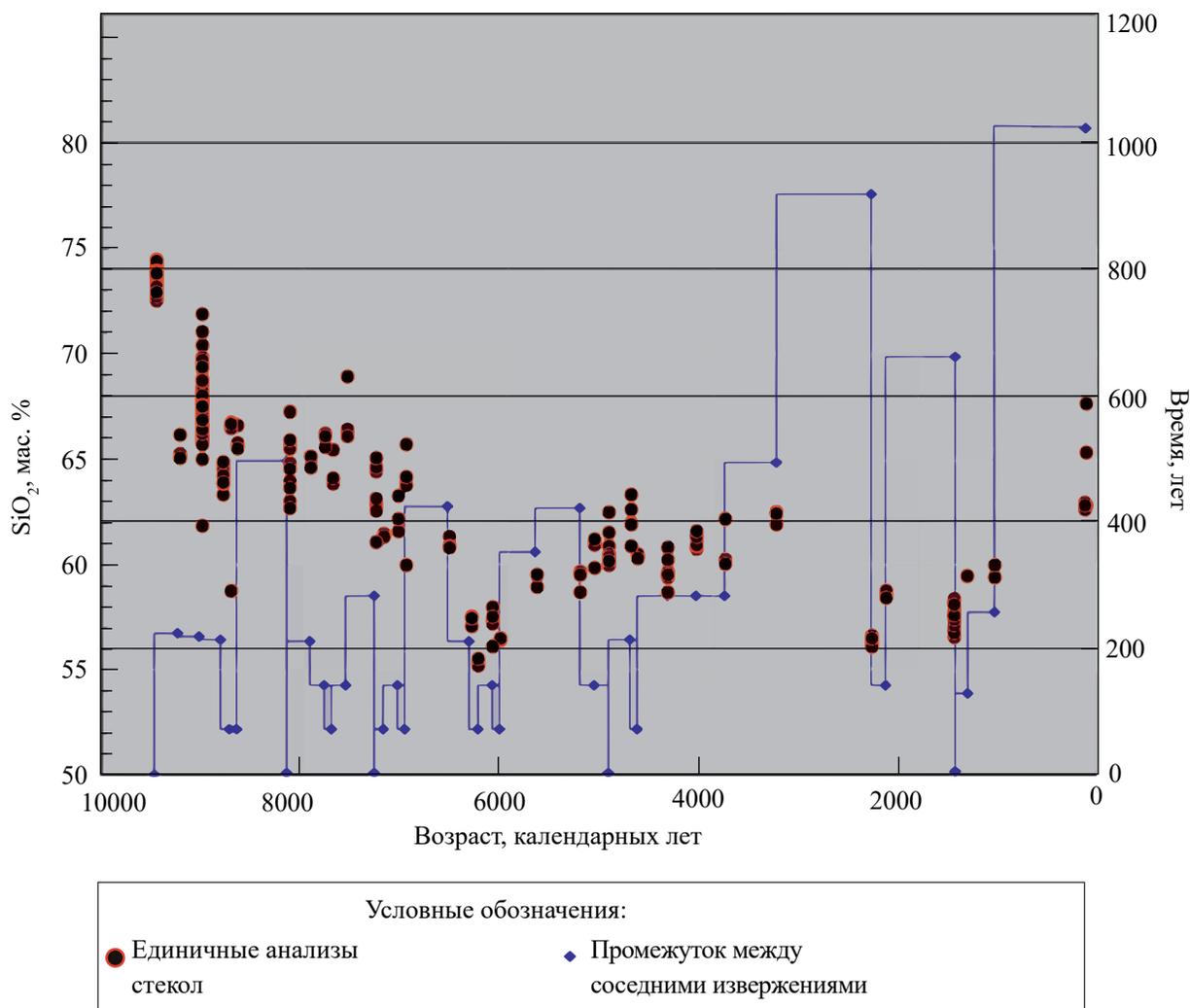


Рис. 4. Изменение содержания SiO₂ в вулканических стеклах тефры вулкана Заварицкого и промежутки между извержениями за последние 10 тыс. лет.

одного и того же извержения. Обнаружение тефры ZV-1 в разрезах Северных и Центральных Курил, а также в колонках Охотского моря и на северо-западе Канады, и ее отсутствие в разрезах южнее о. Симушир свидетельствует о том, что перенос тефры происходил преимущественно в северо-восточном направлении. Направление оси пеплопада на северо-восток и обнаружение этой тефры на северо-западе Канады очевидно подразумевает выпадение ее на территории Камчатки, Чукотки и Аляски; площадь пеплопада составила более 6 млн км² (см. рис. 1г).

Имеющиеся данные [Nakagawa et al., 2008; Hasegawa et al., 2011; Derkachev et al., 2016] позволили нам оконтурить зону выпадения пепла мощностью 4 см и оценить ее площадь

в 250 тыс. км² (см. рис. 1в). По минимальным оценкам (согласно [Legros, 2002]) объем изверженной тефры составляет 36.9 км³, а общий объем пирокластики извержения ZV-1 с учетом отложений пирокластических потоков на суше можно оценить в 37.0 км³ (или ~15 км³ в пересчете на плотную породу). Данная оценка консервативна и не учитывает объем отложенных пирокластических потоков на дне океана, а также может недооценивать объем удаленной тефры. Минимальная оценка магнитуды извержения (*M*), при удельной плотности пемзы 700 кг/м³, составляет 6.4. К сожалению, пока не разработаны методы оценки объема пепла с учетом криптефры, но сам факт обнаружения частиц тефры ZV-1 на северо-западе Канады на расстоянии почти 4500 км от

вулкана говорит об исключительно мощном извержении (см. рис. 1г). Таким образом, даже минимальная оценка объема изверженной пирокластики позволяет поставить извержение ZV-1 в ряд крупнейших в Курило-Камчатской зоне за последние 10 тыс. лет. По объему оно уступает только извержению, приведшему к образованию кальдеры Курильское озеро, однако превосходит все известные извержения вулканов Курильских островов в голоцене. Столь большие объемы извергнутого пирокластического материала свидетельствуют о том, что извержение ZV-1 может быть связано с формированием последней кальдеры в массиве Заварицкого (кальдеры II, по [Горшков, 1967]), однако это утверждение нуждается в дополнительных подтверждениях. Оценки возраста тефры колеблются от 8.9 [Nakagawa et al., 2008] до 9.6 [Davies, 2018] тыс. лет; в нашей модели возраст этого извержения 9462 ± 67 лет. Эти оценки возраста согласуются с положением тефры ZV-1 ниже тефры КО с возрастом около 8.4 тыс. лет [Ponomareva et al., 2004].

Тефра ZV-3. Данная тефра, возраст которой, по нашей модели, составляет около 9.2 тыс. лет, была обнаружена нами в разрезах к северу от кальдеры Заварицкого, вплоть до бухты Водопадная, однако в бухте Броутона, на северо-востоке острова, она отсутствует (см. рис. 1а). К юго-западу от кальдеры она описана на ее внешнем склоне и на перешейке Косточко (см. рис. 1а), однако отсутствует на о. Уруп. Это свидетельствует о том, что ось пеплопада была направлена на ССЗ и подавляющая часть тефры выпала в Охотском море, что затрудняет подсчет ее объема. Для оценки ареала распространения тефры были проанализированы данные исследований осадочных колонок в Охотском море. В колонке GC12-6A (см. рис. 1в) была обнаружена низкокальцевая тефра (индекс N) [Derkachev et al., 2016] мощностью 1 см, по составу стекловидная пеплу ZV-3 (рис. 3в). Авторы связали ее с извержением вулкана Гамчен на Камчатке, однако, сравнение составов стекловидной тефры N и пирокластики вулкана Гамчен не подтверждает это заключение (см. рис. 3в). Кроме того, для вулкана Гамчен не известны эксплозивные извержения в раннем голоцене: его конус начал формироваться лишь ~3.6 тыс. л. н. [Kozhurin et al., 2006]. По нашему мнению, тефра N является дистальным аналогом тефры ZV-3,

свидетельствуя о ее распространении в северном направлении на расстояние более 700 км (см. рис. 1г). Минимальный объем тефры ZV-3 (по [Legros, 2000]) можно оценить в 5.5 км^3 , а минимальную магнитуду извержения — в 5.6.

Тефра ZV-40. Эта тефра, под индексом ZAV-1, описана в нескольких работах по Средним Курилам. Радиоуглеродные датировки этой тефры, встречающиеся в литературе, колеблются от 1070 ± 70 до 40 ± 90 ^{14}C лет [Разжигаева и др., 2013; Nakagawa et al., 2008; Razjigaeva et al., 2022], составляя в среднем около 600 ^{14}C лет. Однако большинство этих датировок были получены из подстилающей тефру почвы, т.е. характеризовали исключительно временной диапазон формирования этой почвы и могли давать удревненную оценку возраста перекрывающей ее тефры. Дата 40 ± 90 ^{14}C лет получена из разреза с отчетливой инверсией возрастов [Разжигаева и др., 2013] и не учитывалась при расчете возраста. Для получения более точного возраста нами были датированы обугленные растительные остатки (ветви и стволы кустарников), обнаруженные непосредственно в тефре ZAV-1. Полученные даты 260 ± 25 и 290 ± 25 (см. табл. 1) свидетельствуют о более молодом возрасте тефры. Калибровка этих дат показывает, что извержение произошло около 150–430 лет назад. Еще более точный возраст этого извержения был определен в результате изучения ледовых кернов Гренландии [Hutchison, personal communication]. В четырех скважинах (NEEM-2011-S1, NGRIP1, B19 и Tunu2013) в горизонте льда, образовавшемся по предварительным данным незадолго до середины XIX века, была обнаружена зона повышенной концентрации пепловых частиц. Проведенный геохимический анализ вулканического стекла из этого горизонта показал, что состав стекол пепловых частиц идентичен составу стекол тефры ZV-40 [Hutchison, personal communication]. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что извержение ZV-40 около 1830–1850 гг. н. э. В разрезах ППЧ тефра ZV-40 была обнаружена на островах Симушир, Чирпой и Уруп. Пространственные вариации мощности горизонта тефры позволяют предположить, что ось пеплопада была направлена в ЮЗ направлении (см. рис. 1в): в СВ направлении тефра очень быстро выклинивается, и на севере о. Симушир (на расстоянии 30 км

от кальдеры) ее мощность составляет всего 1–2 см, в то время как на островах Чирпой и Уруп, т.е. на расстоянии 100–130 км от центра извержения, мощность тефры ZV-40 достигает 10–12 см. Ограниченное количество точек наблюдения позволило нам определить лишь минимальный объем выброшенного материала. Рассчитанный по методу [Legros, 2000], он составил около 3.5 км³. Магнитуда извержения составила не менее 5.4.

ЭКСПЛОЗИВНАЯ АКТИВНОСТЬ В СРЕДНЕМ–ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ И ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ВУЛКАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА В ТЕФРАХ

Извержения, последовавшие за выбросами пемзовых тефр ZV-1 и ZV-3, имели более скромный масштаб и их тефры обнаружены только в пределах о. Симушир. В период 9.8–7.3 тыс. л. н. стекла в тефре в основном отвечают дацитам (см. рис. 4). Затем содержание SiO₂ в стеклах постепенно понижается и около 6.4 тыс. л. н. достигает минимума (55 мас. %). После этого, примерно в течение 2.3 тыс. лет, следуют извержения тефры со стеклами андезитового состава, но около 2.5–1.6 тыс. лет содержание SiO₂ вновь падает до значений основных андезитов–андезибазальтов. Стекла тефр последующих умеренных извержений демонстрируют некоторый рост содержания SiO₂, однако, после значительного перерыва, следует третья за голоцен сильное эксплозивное извержение (ZV-40), содержание SiO₂ в стеклах которого резко возрастает. В тефре этого извержения вновь появляются стекла с повышенным содержанием кремнезема (до 67.6 мас. %), подобные стеклам раннеголоценовых извержений (см. рис. 4).

Волнообразные колебания содержания SiO₂ в стеклах из пирокластики крупнейших извержений ранее отмечались для камчатских вулканов Шивелуч [Ponomareva et al., 2015] и Ключевской [Portnyagin et al., 2009]. Поскольку вулканические стекла представляют собой фрагменты частично дегазированного расплава, закаленные при выбросе в атмосферу, их составы отражают эволюцию магмы в очаге. Тефры с наиболее кислыми стеклами соответствуют выносу максимально дифференцированного вещества, эволюционировавшего в очаге длительное

время без значительного притока свежей магмы, пирокластика с наиболее основными стеклами свидетельствует о поступлении в очаг и быстром выносе на поверхность свежих, наименее дифференцированных магм. Соответственно, нисходящий тренд содержания SiO₂ характеризует постепенное замещение дифференцированной магмы свежими порциями, а восходящий — замедление подачи свежей магмы и постепенное преобладание дифференцированных разностей в очаге. Повышение содержания SiO₂, после 1.5 тыс. л. н. (см. рис. 4), может говорить о подготовке нового мощного извержения.

В целом, режим деятельности вулкана за последние 10 тыс. лет весьма необычен (см. рис. 4). В раннем и среднем голоцене (до 4000 лет назад) крупные и умеренные эксплозивные извержения происходили достаточно регулярно, промежутки между извержениями составлял в среднем около 200 лет. Однако после 4000 лет назад режим активности существенно изменился. Между эксплозивными извержениями стали наблюдаться длительные (до 900 лет) перерывы, за которыми следовали одно или несколько извержений с промежутком в 100–250 лет. Последний длительный период “затишья” завершился извержением ZV-40 и, если предположенная закономерность верна, в ближайшие 100 лет на вулкане Заварицкого следует ожидать достаточно сильное эксплозивное извержение.

ВЫВОДЫ

1. Вулкан Заварицкого в голоцене был одним из самых активных вулканов Курильской островной дуги.

2. Вулканические стекла голоценовой пирокластики в. Заварицкого по составу отвечают низкокалиевым андезибазальтам–риолитам и обнаруживают волнообразные вариации от 55 до 75 мас. % SiO₂. Самые кремнекислые (риолитовые) стекла отмечены в пемзах самого первого голоценового извержения ZV-1.

3. Сильнейшим извержением было извержение ZV-1, которое произошло около 9.5 тыс. л. н. Извержение имело магнитуду 6.4. Тефра этого извержения распространилась как минимум на 4500 км на СВ. Объем тефры составил около 37 км³. В связи со своим широким распространением и особенностями вещественного состава,

тефры ZV-1 может служить прекрасным маркером для корреляции и синхронизации морских и наземных палеоархивов на огромной территории от Охотского моря до СЗ части Северной Америки.

4. Тефра последовавшего за ним извержения ZV-3 распространялась на расстояние не менее 700 км. Объем тефры составил около 5.5 км³.

5. Повышение содержания SiO₂ в стекле последнего крупного извержения ZV-40 (произошедшего около 1830–1850 гг.) до раннеголоценовых значений, совпадающее с увеличением магнитуды извержения, а также длительный период покоя перед этим извержением могут свидетельствовать о подготовке нового мощного эксплозивного извержения в ближайшие 100 лет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00074, <https://rscf.ru/project/22-17-00074/>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горбач Н.В., Филофова Т.М., Мельников Д.В., Маневич Т.М. Состав вулканических стекол в продуктах вершинного извержения и побочного прорыва им. Г.С. Горшкова на вулкане Ключевской в 2020–2021 гг.: сравнительный анализ и интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2022. № 2. С. 28–37.

Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.

Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Мелекесцев И.В., Разжигалева Н.Г. Эксплозивные извержения вулкана Пик Сарычева в голоцене (о. Матуа, Центральные Курилы): геохимия тефры // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 16–26.

Мелекесцев И.В., Егорова И.А., Лупкина Е.Г. Внутренний хребет Курильской дуги // Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Наука, 1974. С. 265–327.

Парфенова О.В., Бурикова И.А., Дриль С.И. Особенности эволюции состава кремнекислых пород низкокальциевой известково-щелочной серии вулкана Заварицкого (Курильская островная дуга,

о. Симушир) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2015. № 6. С. 53–61.

Разжигалева Н.Г., Ганзей Л.А., Белянина Н.И., Гребенникова Т.А., Арсланов Х.А., Пшеничникова Н.Ф., Рыбин А.В. Роль климатического и вулканогенного факторов в формировании органогенных отложений и развитии ландшафтов о. Симушир (Центральные Курилы) в среднем-позднем голоцене // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 55–67.

Baldini J.U., Brown R.J., McElwaine J.N. Was millennial scale climate change during the Last Glacial triggered by explosive volcanism? // Scientific Reports. 2015. V. 5(1). P. 1–9.

Bronk Ramsey C. Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates // Radiocarbon. 2009. V. 51. P. 337–360.

Davies L.J. The Development of a Holocene Cryptotephra Framework in Northwestern North America / PhD thesis. Edmonton: University of Alberta, 2018. 235 p.

Derkachev A.N., Nikolaeva N.A., Gorbarenko S.A., Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Nürnberg D., Sakamoto T., Iijima K., Liu Y., Shi X., Lu H., Wang K. Tephra layers in the Quaternary deposits of the Sea of Okhotsk: Distribution, composition, age and volcanic sources // Quaternary International. 2016. V. 425. P. 248–272.

Hasegawa T., Nakagawa M., Yoshimoto M., Ishizuka Y., Hirose W., Seki S., Ponomareva V., Rybin A. Tephrostratigraphy and petrological study of Chikurachki and Fuss volcanoes, western Paramushir Island, northern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activity and temporal change of magma system // Quaternary International. 2011. V. 246. P. 278–297.

Jarosewich E., Nelen J.A., Norberg J.A. Reference samples for electron microprobe analysis // Geostandart Newsletters. 1980. V. 4(1). P. 43–47.

Kozhurin A., Acocella V., Kyle P.R., Lagmay F.M., Melekestsev I.V., Ponomareva V., Rust D., Tibaldi A., Tunesi A., Corazzato C., Rovida A., Sakharov A., Tengonciang A., Uy H. Trenching studies of active faults in Kamchatka, eastern Russia: paleoseismic, tectonic and hazard implications // Tectonophysics. 2006. V. 417. P. 285–304.

Legros F. Minimum volume of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 96. P. 25–32.

Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lameyre J.A., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Wooley A.R. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

- McConnell J.R., Sigl M., Plunkett G., Burke A., Kim W.M., Raible C.C., Wilson A.I., Manning J.G., Ludlow F., Chellman N.J., Innes H.M. Extreme climate after massive eruption of Alaska's Okmok volcano in 43 BCE and effects on the late Roman Republic and Ptolemaic Kingdom // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. V. 117. № 27. P. 15443–15449.
- Nakagawa M., Ishizuka Y., Kudo T., Yoshimoto M., Hirose W., Ishizaki Y., Gouchi N., Katsui Y., Solovyov A., Steinberg G., Abdurakhmanov A. Tyatya Volcano, southwestern Kuril Arc: Recent eruptive activity inferred from widespread tephra // *Island Arc*. 2002. V. 11. P. 236–254.
- Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T., Baba A., Kosugi A. Preliminary Report on Volcanological Research of KBP 2007–08 Cruise by Japanese Volcanology group. Sapporo, Japan: Hokkaido University, 2008. Unpublished report (tDAR ID: 391304)
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V., Rinkleff P.G., Dirksen O.V., Sulerzhitsky L.D., Zaretskaia N.E., Rourke R. The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. V. 136. P. 199–222.
- 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 (Geol Rundschau)*. 2015. V. 104. P. 1459–1482.
- Portnyagin M., Ponomareva V., Bindeman I., Hauff F., Krasheninnikov S., Kuvikas O., Mironov N., Pletchova A., van den Bogaard C., Hoernle K. Millennial variations of major and trace element and isotope compositions of Klyuchevskoy magmas, Kamchatka // *Terra Nostra*. 2009. V. 1. P. 64–65.
- Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Pevzner M.M., Plechova A.A., Rogozin A.N., Garbe-Schönberg D. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12(1). P. 469–486.
- Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov K.A., Pshenichnikova N.F. Coastal dunes of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific): Palaeoclimatic and environmental archive // *Geosystems of Transition Zones*. 2022. V. 6. P. 100–113.
- Reimer P., Austin W., Bard E., Bayliss A., Blackwell P., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R., Friedrich M., Grootes P., Guilderson T., Hajdas I., Heaton T., Hogg A., Hughen K., Kromer B., Manning S., Muscheler R., Palmer J., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R., Richards D., Scott E., Southon J., Turney C., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020. V. 62. P. 725–757.

Explosive Activity of Zavaritsky Volcano (Simushir Island, Central Kuriles) during the Holocene

O. V. Dirksen^{1, *}, V. V. Ponomareva¹, E. A. Zelenin², P. Yu. Plechov³,
T. M. Filosofova¹, A. V. Rybin⁴

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

²*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

³*Fersman Mineralogical Museum RAS,
Leninsky prosp., 18, bld. 2, Moscow, 119071 Russia*

⁴*Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS,
Nauki str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

*e-mail: oleg.dirksen@gmail.com

In our paper we represent the first data on the Holocene explosive activity of Zavaritsky volcano, the largest caldera center on Simushir Island (Central Kuriles). For the first time, we reconstructed the chronology of explosive eruptions of this volcanic center for the past 10 000 years, as well as estimate the parameters of its largest eruptions. In total, more than 40 tephra horizons have been identified, which allows us to estimate the frequency of eruptions: 1 event in 250 years. Constructed age model allowed us to determine the age of most eruptions. Volcanic glasses of Holocene tephtras correspond in composition to low-potassium basaltic andesite-rhyolites, while the very low K₂O content makes it possible to fairly

confidently distinguish Zavaritsky tephra not only from the tephra of neighboring moderate-potassium volcanoes, but also from the tephra of other low-potassium volcanoes of the Kuril-Kamchatka Island arc. Holocene activity of Zavaritsky volcano started with two powerful eruptions with a conservatively estimated magnitude (M) of 6.4 and 5.6, which occurred about 9.5 and 9.2 thousand years ago (ka BP). Tephra from the first eruption (ZV-1) spread to the northeast and was found as far as northwestern North America. Tephra from the second powerful eruption (ZV-3) spread north and was found in sediments of the Sea of Okhotsk. Volcanic glass of ZV-1 tephra is characterized by rhyolitic composition with the highest SiO_2 content (72.5–74 wt. %). Glasses of the ZV-3 tephra varied in composition from dacites to rhyodacites (65–71.9 wt. % SiO_2). The products of subsequent eruptions were represented by scoria with glasses of dacite — andesite and basaltic andesite composition. Dacitic glasses reappeared only in the tephra of the last large explosive eruption that occurred early before the middle of the 19th century. Our studies revealed the catastrophic explosive eruptions of Zavaritsky volcano during the Early Holocene and sustained activity of this eruptive center throughout the Holocene. The appearance of high-silica glasses in the tephra of the last powerful eruption (ZV-40) indicates a possible strong eruption in the near future.

Keywords: Zavaritsky volcano, caldera, explosive eruption, tephra, Kurile Islands, volcanic glass composition, Holocene