

## Распределение извержений вулканов на Камчатке по магнитудам в голоцене: геологический эффект эксплозивного вулканизма и прогнозные оценки

**В.В. Иванов, О.В. Дирксен**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: victor@kscnet.ru*

*Введение.* Изучение частотно-магнитудных распределений извержений важно, как для понимания фундаментальных вопросов вулканизма и его контроля, так и для количественной оценки вулканических опасностей. Под *магнитудой извержения* здесь понимается количество *тефры*, то есть всей выброшенной пирокластики, выраженной либо через десятичный логарифм объема, либо через величину *вулканического эксплозивного индекса VЕI*. Частотное распределение *VEI* для извержений вулканов земли и Камчатки рассматривалось во многих работах, однако в них не делалось прогнозных оценок, что является *целью настоящей работы*. В работе [3] показано, что частота встречаемости извержений вулканов на полуострове в диапазоне *VEI* от 2 до 5 составляет примерно 10% от общемировой, что достаточно много, поскольку длина вулканической дуги Камчатки всего около 2 % от суммы длин всех вулканических дуг на Земле. Давались также предварительные прогнозные оценки для Камчатки, основанные на экстраполяции исторических данных. Эти результаты требуют уточнения.

*Исходные данные и методика их обработки.* Уточненные данные об объемах *тефры* для исторических извержений с 1735 по 1993 гг. брались из работы [7]. Данные об объемах пирокластики голоценовых извержений представлены в табл. 1. Для каждой магнитуды анализировались кумулятивные графики чисел извержений, выявлялись представительные временные интервалы, в пределах которых оценивались частоты. Строились графики повторяемости магнитуды извержений в логарифмических масштабах, которые для целей прогноза аппроксимировались прямыми линиями. Оценивались средние интервалы повторяемости извержений и средние суммарные объемы *тефры*, которые следует ожидать в будущем в соответствующих логарифмических диапазонах объемов (или для данного *VEI*).

### Частотно-магнитудное распределение извержений вулканов Камчатки в голоценовое время

На рис. 1 показан сводный график частот повторяемости десятичного логарифма объема выброшенной *тефры* (сплошная аппроксимирующая прямая). Он составлен как по историческим (*VEI*=3-4), так и по голоценовым (*VEI* = 5-7) данным. Пунктиром показан график повторяемости исторических извержений, построенный только по двум точкам для *VEI* = 3 и 4 и затем экстраполированный на *VEI*=2 и *VEI* = 5-7.

Данные аппроксимируются следующей зависимостью

$$\log_{10}\tilde{N} = \log_{10}N_0 - b_{\text{diff}}\log_{10}(\bar{V}_t, \text{км}^3) \quad (1)$$

или в степенной форме

$$\tilde{N} = N_0(\bar{V}_t, \text{м}^3)^{-b_{\text{diff}}}, \quad (2)$$

где  $\tilde{N}$  – прогнозируемое количество извержений в десятичном логарифмическом интервале объемов *тефры* за 1000 лет,  $(\bar{V}_t, \text{км}^3)$  – средний объем *тефры* в кубических метрах в этом интервале,  $N_0$  – начальное значение,  $b_{\text{diff}}$  – коэффициент регрессии, равный для исторических и голоценовых извержений  $b_{\text{diff}}$  и  $b_{\text{rdiff}}$ , соответственно (рис. 1).

*Особенности графика.* В диапазоне *VEI*= 3-7 график имеет тангенс угла наклона  $b_{\text{diff}} = 0.85 \pm 0.14$  (95%), что существенно больше, чем соответствующий параметр в распределении *VEI* для извержений мира  $\gamma_{\text{mdiff}} = 0.72 \pm 0.08$  (95%) и Камчатки  $\gamma_{\text{kdiff}} = 0.7$  [3]. Это выражается в том, что с увеличением объема *тефры* сводный график дает все более заниженные величины частот извержений по сравнению с экстраполированным

Таблица 1. Крупнейшие эксплозивные извержения Камчатки за последние 10 000 лет

Вулкан – источник	Индекс тефры	Календарный возраст	Объем тефры, км <sup>3</sup>	Состав тефры
Шивелуч	Ш1964	1964 г.	0,6–0,8	Андезит
	Ш1854	96BP	~1	То же
	Ш1	310BP	≥2	»
	Ш2	764BP	≥2	»
	Ш3	1363BP	≥2	»
	Ш1450	1403BP	≥2	»
	Ш5	1852BP	~1	»
	Ш2800	2910BP	≥1	»
	Шсп	3959BP	~1	Базальт
	Ш	4158BP	≥1	Андезит
	Шдв	4892BP	≥2	То же
	Ш4700	5591BP	≥2	»
	Ш4800	5634BP	≥2	»
	Ш5600	6451BP	≥1	»
	Ш6850	7727BP	1.2	»
	Ш	8703BP	≥1	»
	Ш	9058BP	≥2	»
Ш	9222BP	≥1	»	
Ш	9362BP	≥2	»	
Безымянный	Б1956	1956 г.	1,8–2	»
Кизимен	КЗ	8124BP	4–5	Дацит
	КЗ2900* <sup>1</sup>	3055BP**	0,7-1	Андезит – дацит
	КЗ1* <sup>1</sup>	10300BP**	3,4-4,6	Дацит
Хангар	ХГ	7846BP	14–16	Дацит – риодацит
Карымская кальдера	КРМ	8771BP	13–16	Риодацит
Авачинский	II АВ3	3537BP	>1,2	Андезибазальт
	II АВ1(АВ1)	3779BP	≥3,6	То же
	IAв24 (АВ2)	4481BP	≥0,6	Андезибазальт – андезит
	IAв20 (АВ3)	5164BP	≥1,1	Андезит
	IAв12 (АВ4)	6309BP	≥1,3	То же
	IAв2	7978BP	≥8–10	»
Плоская* <sup>2</sup>	PL2	10199BP**	≥10	Андезибазальт
Заварицкого* <sup>3</sup>	ZVR	2910BP**	≥1	Базальт
Толб. Дол, Клешня* <sup>4</sup>	–	764-1363BP**	≥0,7	Базальт
Толб. Дол, Алаид* <sup>4</sup>	–	764-1363BP**	≥0,9	Базальт
Толб. Дол, Песчаные Горки* <sup>4</sup>	–	764-1363BP**	≥1	Базальт
Толб. Дол, Пельмень* <sup>4</sup>	–	1363-1686BP**	≥0,9	Базальт
Толб. Дол, Пра-Высокая* <sup>4</sup>	–	1363-1686BP**	≥0,9	Базальт
Кратер Чаша	ОПтр	5294BP	0,9–1	Риолит
Опала, кратер Бараний Амфитеатр	ОП	1412BP	9–10	То же
Ходуткинский кратер	ХД	2589BP	1–1,5	Риодацит
Ксудач, конус Штюбеля	КШт3	43BP	1,5–2	Андезибазальт-дацит
	КШт1	861BP	0,8–1	То же
Ксудач, кальдеры	КС1	1686BP	18–19	Риолит
	КС2	6886BP	7–8	Андезит
	КС3	7297BP	0,5–1	Риодацит – андезит
	КС4	9964BP	1,5–2	Андезит
Ильинский	ЖЛТ	5574BP	1,2–1,4	То же
Кальдера Курильского оз.	КО	8411BP	140–170	Риолит-андезибазальт

Примечание. Данные приводятся с изменениями по [6]. «Календарный возраст»: ВР означает количество лет до 1950 г., после 1950 г. указан год извержений. Год извержений влк. Шивелуч указан по [9]. Данные для извержений, отмеченных \*, взяты из: \*<sup>1</sup> [4], \*<sup>2</sup> [8], \*<sup>3</sup> [2], \*<sup>4</sup> [1]; отмеченных \*\*, рассчитаны с помощью интернет-ресурса: www.calpal.de

историческим графиком. Это связано с тем, что в половине случаев в каталоге голоценовых извержений приводятся только минимальные значения объемов тефры (табл. 1). Есть основания полагать, что степень занижения объемов может увеличиваться для более крупных и, соответственно, более старых голоценовых извержений. Таким образом, оценки средних частот повторяемости и средних объемов изверженной тефры, полученные по сводному графику повторяемости, следует считать минимальными оценками.

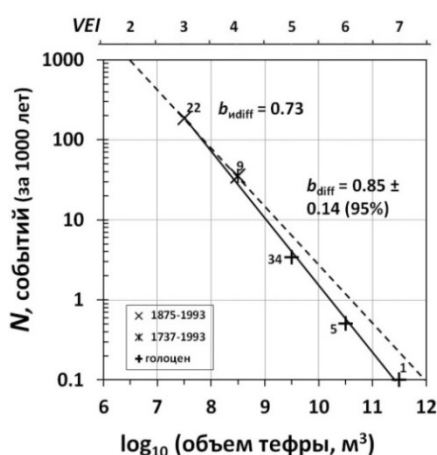


Рис. 1. Сводные дифференциальные графики частотных распределений десятичного логарифма объема изверженной на Камчатке тефры  $\log_{10} (V_t, \text{м}^3)$  за голоценовое (сплошная прямая) и историческое время (пунктирная прямая). Числа извержений  $N$  подсчитывались в интервалах  $\log_{10} (V_t, \text{м}^3) = 7-8; 8-9$  для исторических и  $\log_{10} (V_t, \text{м}^3) = 9-10; 10-11$  и  $11-12$  для голоценовых извержений.  $N$  нормировались на один и тот же 1000-летний интервал. Цифры у точек обозначают количества извержений в выборках для соответствующих, заранее выбранных представительных временных интервалов.  $b_{\text{diff}}$  и  $b_{\text{diff}}$  – тангенсы угла наклона аппроксимирующих прямых.

### Полученные результаты

1) Прогнозируемые средние интервалы между извержениями на Камчатке оцениваются следующим образом: катастрофические извержения с  $VEI = 5$  (объемы тефры от 1 до 10 км<sup>3</sup>), наподобие вулкана Ксудач в 1907 г. или Безымянного в 1956 г., будут происходить в среднем примерно 1 раз в 200 лет. Пароксизмальные извержения на Камчатке с  $VEI = 6$  (объемы тефры от 10 до 100 км<sup>3</sup>), наподобие извержения Кракатау в 1883 г., следует ожидать с интервалом одно извержение примерно в 1700 лет. А колоссальные извержения с  $VEI = 7$ , наподобие извержения Тамборы в 1815 г. ожидаются с интервалом примерно в 12000 лет (табл. 2).

Таблица 2. Ожидаемые средние интервалы между извержениями  $VEI= 3-7$  и суммарные объемы тефры на Камчатке на 1000-летнем интервале в предположении «устойчивого вулканизма» [10]

Диапазон магнитуд извержений		Средний интервал между извержениям и (лет)	Наиболее вероятный объем изверженной тефры за 1000 лет (км <sup>3</sup> )	Примеры извержений
объем тефры, км <sup>3</sup>	$VEI$			
0,001-0,01	2	1.3	3(экстраполяция)	Извержение вулкана Авача в 1991 г.
0,01-0,1	3	6	5	Новое трещинное Толбачинское извержение 2012-13 гг.
0,1-1	4	40	9	Ш1854 и Ш1964, БТТИ 1975 г.
1-10	5	200	14	КШТЗ, Б1956.
10-100	6	1700	19	Кракатау 1883 г.; ХГ, КРМ.
100-1000	7	12000	25	Тамбора 1815 г.; КО.

Итого  $\approx 70 \text{ км}^3$  за 1000 лет ( $VEI= 3 - 7$ )

2) Наиболее вероятные объемы тефры, которая будет выброшена вулканами Камчатки в следующие 1000 лет для извержений различных эксплозивных вулканических индексов, показаны на рис. 2 и в табл. 2. В условиях «устойчивого вулканизма» [10], ожидаемый средний геологический эффект эксплозивного вулканизма на Камчатке оценивается примерно в  $70 \text{ км}^3$  тефры за 1000 лет (для  $VEI= 2-7$ ). Это согласуется с данными о продуктивности вулканов Камчатки за последние 30 тысяч лет –  $150 \text{ км}^3$  вулканических продуктов за 1000 лет [5].

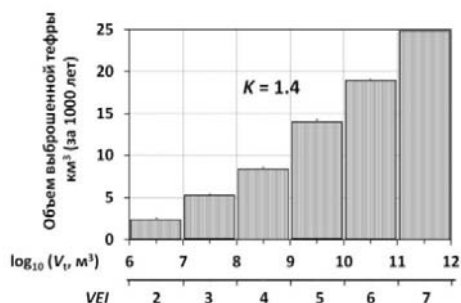


Рис. 2. Наиболее вероятные объемы тефры, которая будет выброшена вулканами Камчатки в следующие 1000 лет для извержений различных эксплозивных вулканических индексов  $VEI = 2-7$ .  $K$  - коэффициент увеличения объемов тефры при переходе от предыдущего к последующему логарифмическому диапазону.

Из-за наличия ~50% минимальных оценок объемов тефры в табл. 1 следует, что средние интервалы между извержениями в табл. 2 следует полагать систематически завышенными, а средние объемы тефры – заниженными; они будут уточняться по мере пополнения каталогов. Кроме того, реальные интервалы между извержениями будут иметь значительный случайный разброс относительно средних, как вследствие внутренне присущей магматическим системам случайности, так и в результате влияния общепланетарных и космофизических факторов, учет которых будет способствовать повышению эффективности прогнозирования таких систем.

### Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976 гг. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука. 1984. 637 с.
2. Дирксен О.В., Мелекесцев И.В. Хронология, динамика формирования и морфология эруптивных центров голоценового этапа ареального вулканизма бассейна р. Авача (Камчатка, Россия) // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 3-20.
3. Иванов В.В. Распределение вулканических извержений по масштабу с целью прогноза опасности и изучения возможных механизмов агрегации магмы в литосфере Земли // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXI научной конференции. Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 44-47.
4. Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Вольнец О.Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) - будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 30-32.
5. Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В. К оценке энергетического эффекта новейшего вулканизма островных дуг. Геотектоника. 1979. №1. С. 36-47.
6. Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В. и др. Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки. В кн. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. II. 2008. М.: ИГЕМРАН. С. 19-40.
7. Gusev A.A., Ponomareva V.V., Braitseva V.V. et al. Great explosive eruptions on Kamchatka during the last 10,000 years: Self-similar irregularity of the output of volcanic products. J. of Geoph. Res. 2003. 108(B2). P. 2126-2143.
8. Ponomareva V., Portnyagin M., Derkachev A. et al. 2013. Early Holocene M~6 explosive eruption from Plosky volcanic massif (Kamchatka) and its tephra as a link between terrestrial and marine paleoenvironmental records // Intern. J. of Earth Sciences. Vol. 102. No. 6. P. 1673-1699.
9. Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // Intern. J. of Earth Sciences. 2015. 104/5. P. 1459-1482.
10. Wadge G. Steady state volcanism: Evidence from eruption histories of polygenetic volcanoes // J. of Geoph. Res. 1982. Vol. 87. No. B3. P. 4035-4049.