

Частотно-магнитудное распределение взрывных извержений вулканов Камчатки за последние 40 000 лет и прогнозные оценки их повторяемости

Иванов В.В., Дирксен О.В.

Frequency-magnitude distribution of explosive volcanic eruptions in Kamchatka over the last 40 000 years and prediction of their recurrence

Ivanov V.V., Dirksen O.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: victorvasilievich53@gmail.com

Приводятся величины средних интервалов повторяемости извержений вулканов Камчатки за последние 40 000 лет в 9 диапазонах объемов тефры, охватывающих интервал от 0.01 до 316 км³. Средний расход пирокластики, выбрасываемой на Камчатке за последние 40 тысяч лет, оценивается примерно в 20 км³/1000 лет.

Введение

Знание магнитудного распределения извержений вулканов важно как для решения ряда фундаментальных вопросов, так и для практики. Вопрос о магнитудах в вулканологии обсуждается в работе [5]. В отличие от сейсмологии, где магнитуды землетрясений определяются инструментальным путем, расчет объемов изверженных продуктов требует огромной полевой работы, поэтому нужное количество данных было накоплено только спустя полвека с начала детальных тефрохронологических исследований. Здесь под *взрывной магнитудой извержения* (M_{ex}) понимается десятичный логарифм объема выброшенной во время извержения *пирокластики* в км³ (V_T)

$$M_{\text{ex}} = \log_{10}(V_T, \text{ км}^3) \quad (1)$$

Для краткости, вместо термина *пирокластика* мы используем термин *тефра*. В работе [6] исследовалось распределение взрывных магнитуд извержений вулканов Камчатки за последние 10 000 лет. В данной работе временной диапазон анализа расширен до 40 000 лет, что дает статистически более корректные оценки интервалов повторяемости извержений с большими взрывными магнитудами.

Исходные данные

Большинство работ, посвященных исследованию частотных распределений извержений, базируется на анализе вулканических взрывных индексов (*VEI*) из базы данных Global Volcanism Program [9]. *VEI* – это полуколичественная взрывная магнитуда, которая оценивается по восьми параметрам, среди которых наибольший рейтинг имеет объем выброшенной тефры, если данные о нем имеются [12]. За неимением других данных, взрывную магнитуду (M_{ex}) исторических извержений нам пришлось оценивать по формуле, которая следует из Таблицы 1 в [12]:

$$M_{\text{ex}} = \text{VEI} - 4.5 \quad (2)$$

На Камчатке за последние 50 лет были получены данные по возрастам и объемам тефры для извержений, произошедших от 40 000 лет назад и до настоящего времени, а также для ряда более древних извержений. В нашей работе мы использовали данные об объемах тефры по датированным 49 голоценовым и 13 позднеплейстоценовым извержениям (от 40 тысяч лет назад и до настоящего времени), опубликованные в [1-4, 7, 8, 10, 13-16]. Для построения кумулятивного графика тефры с 220 тысяч лет назад и до настоящего времени использовались данные по датированным 49 голоценовым и 37 позднеплейстоценовым извержениям. Для отдельных извержений, данные по объемам которых не публиковались, нами использовался метод расчета минимального объема по одной изопаките [11].

Методика анализа данных

Весь диапазон эксплозивных магнитуд M_{ex} (от -2 до 2.2) был разбит на 7 интервалов. Левые два интервала имели единичную длину, и в них накапливались данные об исторических извержениях с магнитудами, оцененными по VEI . Остальные пять интервалов имели длину, равную 0.48, в них накапливались тефрохронологические данные. Для каждого диапазона магнитуд в каталоге анализировались кумулятивные графики чисел извержений, на основе чего выявлялись представительные временные интервалы. В этих интервалах подсчитывались количества извержений, которые затем нормировались на единый 1000-летний интервал и на единичный интервал магнитуды (M_{ex}). Строились дифференциальные графики повторяемости M_{ex} в логарифмическом масштабе по оси OY , которые аппроксимировались прямыми линиями по методу наименьших квадратов. По этим данным оценивались средние интервалы повторяемости извержений в магнитудных интервалах с шириной, равной 0.5, в диапазоне объемов тефры от 0.01 до 316 км³.

Эволюция эксплозивного вулканизма на Камчатке в верхнем плейстоцене

На рис. 1 показан кумулятивный график объемов тефры, выброшенной вулканами полуострова, начиная от 220 тысяч лет назад и до настоящего времени. По интенсивности выноса тефры на поверхность земли график разбивается на три характерных временных отрезка. На первом этапе (от 220 до 75 тысяч лет назад) наблюдается относительно малый средний вынос тефры, равный примерно 1.4 км³ за 1000 лет. Начиная с 75 и до 40 тысяч лет назад, имела место пауза в извержениях длительностью примерно 35 тысяч лет. Третий, необычайно активный этап начался примерно 40 тысяч лет назад и продолжается в настоящее время. Средняя продуктивность на этом этапе примерно в 15 раз превышала таковую для первого этапа и составила около 20 км³ тефры за 1000 лет. Анализ этого этапа и посвящена данная статья.

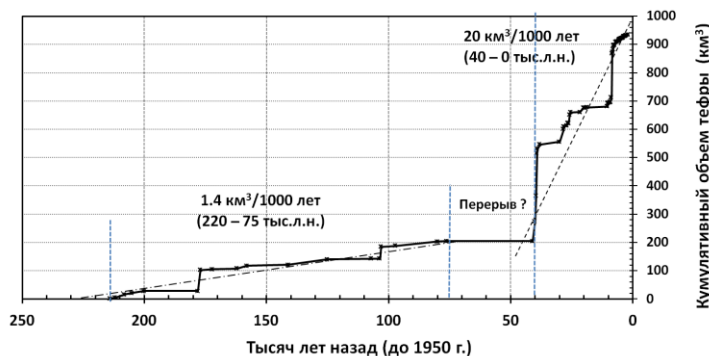


Рис. 1. Кумулятивный график объемов тефры, выброшенной всеми вулканами Камчатки, начиная с 220 тысяч лет назад и до 1950 г.

Частотно-магнитудное распределение эксплозивных извержений вулканов Камчатки за последние 40 000 лет

На рис. 2 показан сводный график повторяемости эксплозивной магнитуды (M_{ex}) извержений Камчатки за последние 40 тысяч лет. Он составлен как для исторических извержений по данным об их индексах VEI (M_{ex} от -2 до 0, левые два столбца), так и для более крупных извержений за последние 40 000 лет (M_{ex} от 0 до 2.2, правые пять столбцов). Экспериментальные частоты повторяемости эксплозивной магнитуды извержений аппроксимируются следующей прямолинейной зависимостью:

$$\log_{10} \tilde{N} = \log_{10} N_0 - b_{diff} M_{ex} = \log_{10} N_0 - \log_{10} (V_T, \text{км}^3) \quad (3)$$

или в степенной форме:

$$\tilde{N} = N_0 (V_T, \text{м}^3)^{-b_{diff}}, \quad (4)$$

где \tilde{N} – прогнозируемое количество извержений в единичном интервале эксплозивных магнитуд за 1000 лет, ($V_T, \text{км}^3$) – объем тефры в км³ в этом интервале, N_0 – начальное

значение, b_{diff} – коэффициент регрессии (тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой). $b_{diff\text{ общ}}=1.1$ и $b_{diff\text{ ТХ}}=0.87$ для всех извержений и извержений, определенных только по тефрохронологии, соответственно (рис. 2).

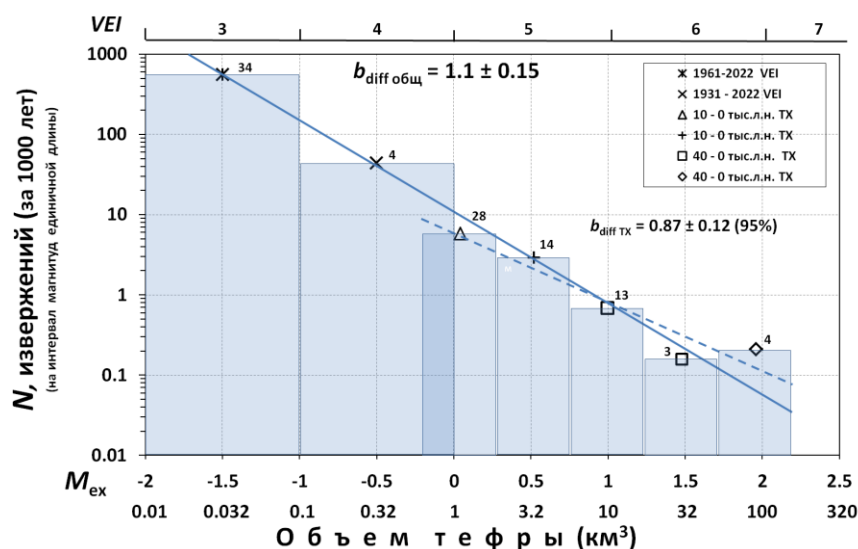


Рис. 2. Сводный дифференциальный график частотных распределений эксплозивной магнитуды (M_{ex}) извержений Камчатки по всем и только по тефрохронологическим данным (сплошная и пунктирная аппроксимирующие прямые, соответственно). Данные за 40 000 лет.

Полученные результаты

В таблице даны средние интервалы времени между извержениями Камчатки за последние 40 000 лет в магнитудных интервалах длины $\frac{1}{2}$ в диапазоне объемов тефры от 0.01 до 316 км³.

Таблица. Средние интервалы времени между крупнейшими извержениями Камчатки за последние 40 000 лет в магнитудных интервалах длины $\frac{1}{2}$

Диапазон объемов тефры (км ³)	Количество извержений за 1000 лет в диапазоне (аппроксимация)	Средний интервал между извержениями (лет)	Примеры извержений, вулканы (ВР – количество лет до 1950 г.)
0.01-0.03	380	3	Безымянный 2006-2013 гг.
0.03-0.1	110	9	Авачинский 1991 г.; ТТИ-50
0.10-0.32	33	30	Шивелуч 2001-2003 гг.
0.32-1.0	10	100	Шивелуч 1964 г.; Шивелуч 1854 г.; Ксудач, конус Штгобеля 861 ВР; Авачинский 4481 ВР
1.0-3.2	1.8	540	Безымянный 1956 г.; Ходутка 2589 ВР; Ильинский 5574 ВР
3.2-10	0.68	1500	Опала, кратер Бараний Амфитеатр 1412 ВР; Кизимен 8124 ВР
10-32	0.25	4000	Ксудач 1686 ВР; Хангар 7846 ВР; кальдера Карымская 8771 ВР; Плоская 10199 ВР
32-100	0.092	11000	Кальдеры вулканов Горелый (28000 ВР), Крашенинникова (40000 ВР), и Большой Семячик
100-316	0.034 (экстраполяция)	30000 (экстраполяция)	Кальдеры вулканов Опала (39000 ВР) и Узон (39000 ВР); кальдера Курильского озера 8411 ВР

Из таблицы следует, что с увеличением размеров извержений на 4 порядка от (0.01-0.03) км³ до (100-316) км³ средний интервал времени между ними также увеличивается на 4 порядка (от 3 до 30 000 лет). Однако следует учесть, что в первом приближении распределение вероятности этих интервалов подчиняется широкому Пуассоновскому закону. Оно имеет максимум на величине среднего интервала повторяемости и медленно спадает в области малых интервалов. Поэтому, большие

средние интервалы в сотни или даже в 1 000 лет не гарантируют, что извержение не может произойти в ближайшие десятилетия. С другой стороны, извержение может произойти и через бóльший интервал времени, чем средний интервал.

Список литературы

1. Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. и др. Вулканические катастрофы позднего плейстоцена – голоцена на Камчатке и Курильских островах. Часть 1. Типы и классы катастрофических извержений – главных компонентов вулканического катастрофизма // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 3-21.
2. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976 / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.
3. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. Новейший (N^2-Q_4) вулканизм Камчатки. В кн.: Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. С. 107-232.
4. 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.
5. Иванов В.В. Магнитуды, степенные распределения вероятностей и их применение в вулканологии // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 1-2. С. 85-95. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2022-1-2-00-00>
6. Иванов В.В., Дирксен О.В. Распределение извержений вулканов на Камчатке по магнитудам в голоцене: геологический эффект эксплозивного вулканизма и прогнозные оценки // Материалы XXII Всероссийской научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», 28-29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 78-81.
7. Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Вольнец О.Н. Вулкан Кизимен (Камчатка) – будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 30-32.
8. 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. Том II. Новейший вулканизм северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 19-40.
9. Global Volcanism Program – Volcanoes of the World 5.0.2. Режим доступа: <https://volcano.si.edu>.
10. Derkachev A.N., Gorbarenko S.A., Ponomareva V.V. et al. Middle to Late Pleistocene record of explosive volcanic eruptions in marine sediments offshore Kamchatka (Meiji Rise, NW Pacific) // Journal Quaternary Science. 2020. V. 35. P. 362-379.
11. Legros F. Minimum volume of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 96. № 1-2. P. 25-32.
12. Newhall C.A., Self S. The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // Journal of Geophysical Research. 1982. V. 87. № C2. P. 1231-1238.
13. Ponomareva V., Portnyagin M., Derkachev A. et al. Early Holocene M~6 explosive eruption from Plosky volcanic massif (Kamchatka) and its tephra as a link between terrestrial and marine paleoenvironmental records // International Journal of Earth Sciences. 2013. V. 102. № 6. P. 1673-1699.
14. Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // International Journal of Earth Sciences. 2015. V. 104/5. P. 1459-1482.
15. Ponomareva V., Bubenshchikova N., Portnyagin M. et al. Large-magnitude Pauzhetka caldera-forming eruption in Kamchatka: Astrochronologic age, composition and tephra dispersal // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. V. 366. P. 1-12.
16. Ponomareva V., Pendea I.F., Zelenin E. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications // Quaternary Science Reviews. 2021. V. 257. Art. 106838.