

УДК 550.2:521.937 +550.340.6

Сильные эксплозивные извержения на Камчатке по данным радиоуглеродного датирования за последние 10 тысяч лет с объемом продуктов $V \geq 5 \text{ км}^3$ и их прогноз с использованием резонансных ритмов на ближайшие 12 тысяч лет
В.А. Широков¹, И.В. Мелекесцев²

¹ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
shirokov@emsd.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Памяти выдающегося российского сейсмолога и геофизика А.А.Гусева

Введение

В работе А.А.Гусева, В.В.Пономаревой, О.А.Брайцевой, И.В.Мелекесцева и Л.Д. Сулержицкого [10] выявлены и изучены при тефрохронологических исследованиях сильные эксплозивные извержения вулканов Камчатки, в том числе датированы 9 крупнейших эксплозивных извержений за последние 10 тысяч лет с объемом (тефра) V от 5 до 170 км³ по радиоуглеродным данным. Выявлена тенденция к группированию событий во времени. Гипотеза о случайном распределении крупнейших извержений отвергается с уровнем значимости около 7%. Выявлена автомодельная и фрактальная нерегулярность вулканической продуктивности. Эти результаты указывают на вероятную связь извержений с внешними по отношению к Земле возмущающими воздействиями с широким набором характерных периодов. Авторы настоящей работы продолжили исследования крупномасштабных эксплозивных извержений на Камчатке с целью выявления их связи с природными ритмами и решения задачи прогноза.

В работах [6, 8, 9] предложена методика выявления целочисленных резонансных ритмов (ЦРР) и использования их для прогноза вулканических извержений и тектонических землетрясений. Эта методика использовалась для прогноза эксплозивных извержений Камчатки по данным за последние 10 тысяч лет.

Поясним термин ЦРР. Если в системе отношения периодов колебаний, вращений или обращений кратны отношению целых чисел, то говорят, что они находятся в целочисленном резонансе [1]. Термин ЦРР впервые предложен и использовался Лапласом [11] для объяснения устойчивого взаимосвязанного обращения трех Галилеевских спутников вокруг Юпитера. Целочисленный резонансный ритм T_x согласно [1] связан с возмущающим ритмом T_y формулой

$$n \cdot T_x \approx m \cdot T_y \approx T_{\text{цикл}} \quad (1)$$

Здесь n и m – целые числа, $T_{\text{цикл}}$ – полный цикл резонанса для двух ритмов. Резонансы могут быть не только полезными, но и приводить к разрушительным последствиям. Поэтому появилась идея использования ЦРР для прогноза сильных землетрясений и вулканических извержений [6, 8, 9]. В соответствии с этим подходом новые ЦРР T_x (далее – *резонансные ритмы* или *просто ритмы*), связанные с устойчивым возмущающим природным ритмом T_y , рассчитывались не по приближенным формулам (1), а по точным:

$$T_x = (m/n) \cdot T_y \quad (2)$$

В качестве устойчивого возмущающего ритма T_y далее используется лунный ритм 18,613 г., связанный с обращением узлов орбиты Луны вокруг Земли [3, 5]. В формуле (2) m и n – целые числа, представляющие произведение простых чисел, которые могут повторяться. Фазы ритмов меняются от 0 до 1,0 по кольцу [3, 6].

Исходные данные об извержениях

Основные параметры 9 эксплозивных извержений (объемы изверженных продуктов V , датированное время событий R , рассчитанное по радиоуглеродным данным ^{14}C , расчетное время t возникновения извержений, отсчитываемое от нулевой фазы ритмов) приведены в табл. 1. За начальную нулевую фазу резонансных ритмов принято время, равное 8000 лет до новой эры. Поясним также, что ошибка радиоуглеродного датирования ^{14}C составляет в среднем всего около ста лет [10].

Таблица 1. Параметры выборок сильнейших эксплозивных извержений Камчатки, использовавшиеся для расчета опасных интервалов времени на ближайшие 12 тысяч лет

№	Вулкан	$R, ^{14}\text{C}$	$V, \text{км}^3$	$t, \text{тыс. лет}$	$\Phi (T_1)$	$\Phi (T_2)$	$\Phi (T_3)$
1	Карымский	- 6642	13-16	1,358	0,278	0,417*	0,223
2	Ильинский	- 6459	140-170	1,541	0,315	0,473	0,523
3	Кизимен	- 6377	4- 5	1,623	0,332	0,498	0,657**
4	Авачинский	- 5977	8-10	2,023	0,414	0,621	0,312
5	Хангар	- 5769	12-13	2,231	0,457	0,685	0,653
6	Ксудач	- 4907	7- 8	3.093	0,633	0,95**	0,064*
7	Авачинский	- 1812	> 5	6,188	0,266*	0,9	0,132
8	Ксудач	236	18-19	8.236	0,686	0,528	0.485
9	Опала	606	9-10	8.606	0,761**	0,642	0,091

В качестве примера рассчитаем момент возникновения t извержения влк. Карымского (№1). Время начала извержения по радиоуглеродным данным $R = -6642$ г. [10]. Так как за нулевую фазу извержений выбран момент времени 8000 лет до н. эры, поэтому значение (в годах) $t(1) = -6642 - (-8000) = 8000 - 6642 = 1358$ г. В табл. 1 приведены значения t в тыс. лет. Аналогично рассчитано время возникновения других 8 извержений. При делении значений t для каждого извержения на три выявленных резонансных ритма $T_1 = 4885,9125$ г., $T_2 = 3257,275$ г. и $T_3 = 610,7390625$ г. (табл. 2), рассчитаны фазы отклика $\Phi(T)$, которые приведены в трех последних столбцах табл. 1. Минимальные (начальные) значения фаз отклика $\Phi_{\text{нач}}$ для каждого ритма обозначены одной звездочкой, максимальные (конечные) $\Phi_{\text{кон}}$ – двумя. Поясним, как рассчитаны резонансные ритмы, использовавшиеся для прогноза (табл. 2, столбец 5).

ЦРР, рассчитанные по формуле (2), в работе [6] получены при использовании каталога ($N=7$) наиболее сильных мировых землетрясений с $M_w \geq 9,0$ с 1700 г. по данным [2] и <http://earthquakes.usgs.gov/>. Выбирались небольшие значения m и n с оценкой их значимости ($P = (\Delta\Phi)^N$, где N – число событий каталога). Принято, что значимость $P < 0,01$. Второе необходимое условие: приуроченность всех N событий каталогов к активной фазе ритмов. Для $m=14$ и $n=5$ получим значимый ритм $(14/5) \cdot 18,613$ г. = 52,1164 г. ($P=0,0007$). Выявлен второй значимый ритм 55,839 г. = $3 \cdot (18,613$ г.) с $P=0,0001$ [6]. Как известно, полный цикл резонанса $T_{\text{цикл}}$ для двух ритмов равен их произведению, поделенному на модуль разницы [1], поэтому $T_{\text{цикл}} = 781,746$ г. Поделив 781,746 г. на оба ритма, получим целые числа 15 и 14. Формула резонанса запишется в виде $15 \cdot (52,1164 \text{ г.}) = 14 \cdot (55,839 \text{ г.}) = 42 \cdot (18,613 \text{ г.}) = 781,746$ г. Ясно, что другие ритмы, связанные с лунным 18,613 г., можно рассчитать при делении 781,746 г. на целые числа 16, 17, 18 и т.д. и на числа менее 14. Среди рассчитанных ритмов нужно выявить статистически значимые.

Например, при делении 781,746 г. на 80 получим резонансный ритм 9,771825 г. Он не значим для мировых землетрясений. Но для 8 извержений вулканов Земли с $V \geq 4$ км³ с начала XIX века [4,12] все события приурочены к узкому фазовому коридору $\Delta\Phi$ шириной всего 10,2 % (табл. 2). Так как $P = 0,00000001$ (табл. 2), это означает, что из 10

миллионов случайных реализаций эта комбинация возникает в среднем один раз. Ритм оказался значимым и для трех сильнейших камчатских извержений с $V \geq 2-3 \text{ км}^3$ (табл. 2). $\Delta\Phi=0,0286$, $P=0,002$ (табл. 2). Выявленные эффекты использовались для прогноза в работе [8]. Используемый в ней алгоритм прогноза прост: извержения ожидаются только в пределах активных фаз статистически значимых резонансных ритмов, так вне активных фаз события не происходили и поэтому не ожидаются. Этот алгоритм используется и в настоящей работе. Наиболее полно методика прогноза описана в [9].

Таблица 2. Основные параметры отклика вулканических извержений Земли и Камчатки на целочисленные резонансные ритмы T_0/m

№	Характеристика выборки	N	m	T_0/m , годы	$\Delta\Phi$	P
1	Извержения Земли 1800-2018 гг., $V \geq 4 \text{ км}^3$	8	1	9,771825	0,102	10^{-8}
2	Извержения Камчатки, 1800-2018 гг., $V = 2-3 \text{ км}^3$	3	1	9,771825	0,0286	$2 \cdot 10^{-3}$
3	То же	7	5	1,954365	0,321	$4 \cdot 10^{-4}$
4	То же	7	30	0,3257275	0,383	10^{-3}
5	То же	7	1/20	195,4365	0,53	10^{-3}
6	Извержения Камчатки с $V(\text{тефра}) \geq 5 \text{ км}^3$	9	2/1000	4885,9125	0,495	$2 \cdot 10^{-3}$
7	То же	9	3/1000	3257,275	0,533	$2 \cdot 10^{-3}$
8	То же	9	16/1000	610,7390625	0,593	$9 \cdot 10^{-3}$

Примечание. $\Delta\Phi$ – ширина активного фазового коридора, к которому приурочены каждое из N событий выборки, T_0 – ритм-донор, равный 9,771825 г., значимость $P=(\Delta\Phi)^N$.

Таким образом, сильнейшие мировые и камчатские извержения значимо откликаются на ритм $T_0=9,771825$ г., который рассматривается в качестве ритма-донора, т.к. равен T_0/m (табл. 2). Все ритмы в табл. 2 соответствуют значению T_0/m . Для извержений Камчатки с $V \geq 5 \text{ км}^3$ значения m, T_0/m и значимость ритмов приведены в табл. 2.

Методика расчета опасных интервалов времени для ожидаемых извержений

Зная табличные значения трех резонансных ритмов для 9 извержений Камчатки с $V \geq 5 \text{ км}^3$, рассчитаем полный цикл резонанса для резонансных ритмов T(1) и T(2) (в тыс. лет). Он равен их произведению, поделенному на модуль разницы. В итоге получим $T_{\text{цикл}} = 9,771825$ тыс. лет. Формула резонанса (в тыс. лет) для трех ритмов имеет вид: $2 \cdot 4,8859125 = 3 \cdot 3,257275 = 16 \cdot 0,6107390625 = T_{\text{цикл}} = 9,771825$. Разница во времени извержений №1 и №9 составляет 7,248 тыс. лет. Это означает, что все 9 извержений произошли в пределах полного цикла резонанса 9,771825 тыс. лет. Рассчитаем опасные интервалы для первого полного цикла резонанса. Для ритма T(1) из табл. 1 видно, что его начальная фаза $\Phi_{\text{нач}} = 0,266$ (одна звездочка в табл.), конечная $\Phi_{\text{кон}} = 0,761$ (2 звездочки). Время начала опасных интервалов для ритма T(1) равно $\Phi_{\text{нач}} \cdot T(1) + r \cdot T(1)$, где r – целые числа 0, 1, 2, 3 и т.д. [8,9]. Для конца опасных интервалов формула аналогична: $\Phi_{\text{кон}} \cdot T(1) + r \cdot T(1)$. Аналогичны формулы и для ритмов T(2) и T(3). Далее для двух первых ритмов по программе Excel по описанному алгоритму рассчитаны 3 прогнозных интервала первого полного цикла резонанса (в тыс. лет): Первый интервал – (1,358– 3,093), второй (6,188– 6,35) и третий (7,8725– 8,606). Рассчитав интервалы для третьего ритма, получим по расчетам в Excel уже согласованные интервал по трем ритмам (в тыс. лет): I (1,358–1,623), II (1,87– 2,23), III (2,48– 2,84), IV (2,993–3,193), V (6,188– 6,35), VI (7,98–8,34), VII (8,59–8,606). Чтобы рассчитать опасные интервалы для второго полного цикла резонанса, прибавляем к

каждому значению начала и конца семи интервалов $T_{\text{цикл}} = 9,771825$ тыс. лет. Получим первый опасный интервал: I (11,1298–11,3948) тыс. лет. Чтобы получить годы новой эры, нужно вычесть 8 тыс. лет, которые прошли до новой эры. В результате получим первый опасный интервал в годах новой эры с округлением до года : I (3130 г.– 3395 г.). Аналогично получим остальные опасные интервалы: II (3642 г.– 4002 г.), III (4252 г.– 4612 г.), IV (4765 г.– 4965 г.), V (7980 г.– 8122 г.), VI (9752–10112 г.), VII (10362 г.– 10378 г.). Следует учитывать, что средняя ошибка радиоуглеродного датирования ^{14}C для 9 камчатских извержений составляет около ста лет [10]. Длительность семи интервалов равна 1503 г., что составляет 15, 4% от длительности полного цикла резонанса 9771,8 года. Приведем краткие выводы проведенных исследований.

Выводы

Впервые на основе ранее разработанной методики долгосрочного прогноза, основанной на использовании целочисленных резонансных ритмов, впервые сделан прогноз сильнейших эксплозивных извержений вулканов Камчатки с объемом изверженных продуктов (тефра) $V \geq 5 \text{ км}^3$ по данным за последние 10 тысяч лет с использованием радиоуглеродного ^{14}C датирования. С использованием трех резонансных ритмов рассчитаны семь опасных интервалов, в которых ожидаются извержения в ближайшие 12 тысяч лет. Ближайший прогнозируемый интервал: 3130–3395 гг. Заключительный седьмой интервал: 10362 – 10378 гг.

Список литературы

1. *Бялко А.В.* Наша планета – Земля. Библиотечка Квант. Вып. 29. М.: Наука.1989. 240 с.
2. *Гусев А.А.* О реальности 56-летнего цикла и повышенной вероятности сильных землетрясений в Петропавловске-Камчатском в 2008-2011 гг. согласно лунной цикличности // *Вулканология и сейсмология.* 2008. № 6. С. 55–65.
3. *Гусев А.А., Петухин А.Г.* О возможной синхронизации сильных землетрясений лунным 18,6- летним циклом, его долями и кратными // *Вулканология и сейсмология.* 1997. № 3. С. 64–79.
4. *Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира (каталог). М.: Наука. 1979. 475 с.
5. *Куликовский П.Г.* Справочник любителя астрономии. Москва: Физматгиз.1961.494 с.
6. *Широков В.А.* О ключевой роли целочисленных резонансов при изучении причин возникновения 11- и 22-летних циклов солнечной активности и сильных мировых землетрясений // *Материалы Четвертой региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России».* Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 210–215.
7. *Широков В.А.* О ключевой роли резонансных ритмов в подготовке глубокого Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г., $M_w=8.3$ // *Сильные камчатские землетрясения 2013 года.* Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга». 2014. С. 139–144.
8. *Широков В.А.* О резонансной природе наиболее сильных извержений вулканов Земли и их прогноз на ближайшие десятилетия по данным наблюдений с 1700 г. // *Материалы Пятой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России».* Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2015. С. 306–310.
9. *Широков В.А.* Долгосрочно-краткосрочный прогноз землетрясений района желоба Нанкай (Япония) с $M \geq 8.2$ до 3500 г. со временем тревоги 196 суток // *Труды Шестой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России».* Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2017. С. 201–205.
10. *Gusev A.A., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.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 Volc. Geoph. Res.* Vol. 108. B2.2126. 2003. P. 1-18. doi: 10.1029/ 2001JB000312
11. *Laplace P.S.* Theorie des satellites de Jupiters (suite) // *Memories de Academic Royale des Sciences de Paris.* France. Berlin. 1989. P. 237– 296.
12. *Simkin T., Siebert L.* Volcanoes of the World. Smithsonian Institute. Global Volcanism Program. Geoscience Press. Tucson. Arizona. 1994. 349 p.