

## О повторяемости извержений Ключевского вулкана в историческое время и их геологическом эффекте

**В.В. Иванов**

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

### Введение

Изучение повторяемости извержений Ключевского вулкана, как крупнейшего базальтового магматического центра Камчатки, важно как для понимания фундаментальных вопросов вулканизма и его контроля, так и для количественной оценки вулканических опасностей. Изучению цикличности извержений Ключевского вулкана посвящены работы [1, 3, 4, 7]. Б.И. Пийп [4] обнаружил, что извержения Ключевского вулкана образуют серии (группы) быстро следующих друг за другом извержений, разделенных сравнительно длительными паузами. Эти серии он назвал эруптивными циклами. Распределение активизаций (извержений) Ключевского вулкана по размерам на основании длительности эпизодов сопровождающего вулканического дрожания рассматривалось в работе [9]. Глубинному строению земной коры в районе Ключевского вулкана посвящены работы Гонтовой (2004), Горельчик, Гарбузовой, Сторчеуса (2004), а также [6]. В статье [6] утверждается, что в переходном слое от коры к мантии и в нижних частях земной коры под Ключевским вулканом на глубинах 40-25 км располагается область промежуточных магматических очагов, в которых накапливается и дифференцирует основная и ультраосновная магма, и находится вероятный источник эксцентрических извержений. К настоящему времени объем данных по извержениям Ключевского вулкана значительно увеличился. Возникает необходимость оценить статистическими методами основные количественные характеристики потока извержений вулкана Ключевского в историческое время и сделать некоторые выводы о механизме поступления порций магмы, питающих его отдельные извержения (*цель настоящей работы*). Оценка объемов или масс изверженных продуктов для Ключевского вулкана встречает значительные трудности: большая высота вулкана и его недоступность, наличие глубокого вершинного кратера, размеры и параметры заполнения которого обычно неизвестны, распространение лав в эрозионно-тектонических желобах, постоянно меняющих свою конфигурацию, поглощение лавовых потоков ледниками и т.д. Поэтому нам пришлось ограничиться анализом только взрывных магнитуд исторических извержений, причем полученных полуколичественным методом (*вулканический эксплозивный индекс (VEI)*) [10].

### Исходные данные и методика их обработки

Даты начала извержений и величины их *VEI* для Ключевского вулкана выбирались из каталога извержений мира Смитсоновского института с 1697 по 2016 гг. [8]. Зная *VEI* извержения, объем выброшенной им пирокластики ( $V_p$ ) можно приближенно оценить лишь с точностью до десятичного порядка  $10^{(VEI+4)} < V_p, m^3 \leq 10^{(VEI+5)}$  [10]. Поэтому для извержения с данным *VEI* мы принимали объем выброшенной им пирокластики ( $V_p$ ), отвечающий среднему значению магнитуды (*VEI* + 4.5) соответствующего диапазона по формуле:

$$V_p, m^3 \approx 10^{(VEI + 4.5)} \quad (VEI \geq 2) \quad (1)$$

Извержения вулкана рассматривались как поток событий во времени, которые характеризуются временем начала, взрывной магнитудой *VEI* и объемом пирокластики, рассчитанным по формуле (1). Для исторических извержений строились *кумулятивные графики числа извержений*, на основе которых выделялись представительные временные интервалы. Для этих интервалов строились *кумулятивные графики объемов пирокластики*, на основе чего оценивался геологический эффект взрывного вулканизма

Ключевского, а также частотно-магнитудные распределения, в которых частоты нормировались на один и тот же временной интервал, равный 1000 лет. Это позволяло рассчитать средние интервалы повторяемости извержений различных  $VEI$ . Распределения интервалов времени между началами извержений строились на основе составленного автором каталога с 1915 по 2010 гг. [2].

### Геологический эффект взрывной активности Ключевского вулкана в историческое время

На рисунке 1 (слева) показано распределение извержений Ключевского вулкана с 1697 по 2016 гг. и кумулятивный график выброшенной ими пирокластики (справа). Кумулятивный график экспоненциально нарастает со временем, что отражает повышение детальности каталога извержений со временем. Временной интервал с 1905 по 2016 гг. (111 лет) соответствует примерной линейности графика и выбран в качестве представительного для оценки продуктивности. На этом интервале средняя взрывная продуктивность вулкана оценивается примерно в  $12 \text{ км}^3$  пирокластики за 1000 лет.

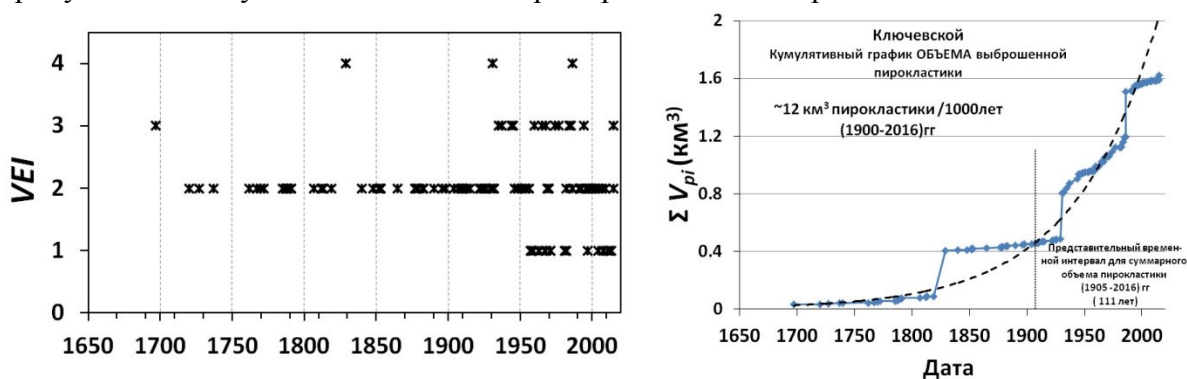


Рис. 1. Распределение извержений Ключевского вулкана с 1697 по 2016 гг. (слева) и кумулятивный график вынесенной ими пирокластики (справа).

### Частотно-магнитудное распределение извержений Ключевского вулкана в историческое время

На рисунке 2 показаны кумулятивные графики числа извержений с  $VEI=2$  и с  $VEI=3$ . На основе этих графиков представительные временные интервалы для анализа частот встречаемости извержений выбраны для  $VEI=2$  (1875-2016 гг.) и для  $VEI=3$  (1935-2016 гг.). В каталоге было всего три извержения с  $VEI=4$ , и для них в качестве представительного принят весь интервал с 1697 по 2016 гг.

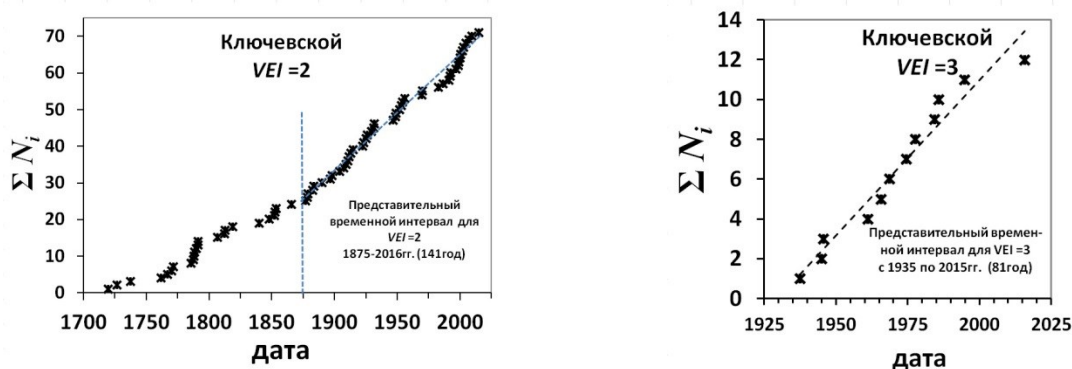


Рис. 2. Кумулятивные графики числа извержений с  $VEI=2$  и  $VEI=3$ .

Частотно-магнитудное распределение извержений Ключевского вулкана показано на рисунке 3.

Данные на рисунке 3 аппроксимируются следующей регрессионной зависимостью:

$$\log_{10} \tilde{N} = \log_{10} N_0 - \gamma_{\text{diff}} VEI \quad (2)$$

где  $\tilde{N}$  – прогнозируемое количество извержений для данного  $VEI$  за 1000 лет,  $N_0$  – начальное значение,  $b_{diff}$  – коэффициент регрессии, равный для исторических извержений 0.6 (рис. 3). Отсюда получаются средние интервалы между извержениями, представленные в Таблице.

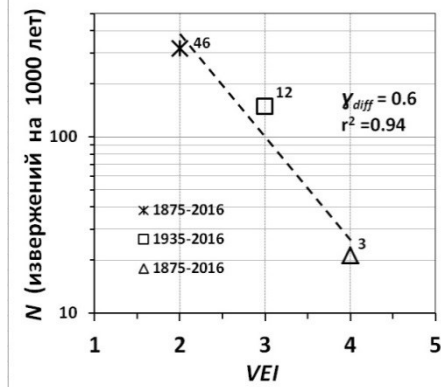


Рис. 3. Дифференциальный график частотного распределения взрывной магнитуды извержений ( $VEI$ ) Ключевского вулкана за историческое время. Цифры у точек обозначают количества извержений в выборках для соответствующих, заранее выбранных представительных временных интервалов. Числа извержений  $N$  нормировались на один и тот же 1000-летний интервал.  $Y_{diff}$  – тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой.  $r^2$  – степень надежности аппроксимации.

Таблица. Средние интервалы времени между извержениями Авачинского вулкана для магнитуд  $VEI = 2-4$  за историческое время

$VEI$	Число извержений на 1000 лет ( $\tilde{N}$ )	Средний интервал между извержениями (лет)	Примеры извержений
2	400	2.5	..2005, 2007, 2009 гг. ...
3	100	10	..1945, 1994 гг.
4	25	40	1829, 1931, 1986 гг.

Мы полагаем величины средних интервалов между извержениями заниженными, что связано с низкой точностью оценок взрывных магнитуд  $VEI$ .

### Распределение интервалов времени между началами извержений Ключевского вулкана в XX – начале XXI века

На рисунке 4 (слева) показано распределение во времени интервалов времени ( $\tau$ ) между началами всех извержений вулкана с 1915 по 2010 гг. по данным [2]. На рисунке справа представлено частотное распределение интервала  $\tau$ , полученное на этом временном отрезке. Там же пунктиром показана экспоненциальная плотность распределения, имеющая место для стационарного пуассоновского процесса вида

$$p, \text{ год}^{-1} = \Lambda \exp(-\Lambda \tau), \quad (3)$$

где  $p$  – плотность вероятности распределения интервала ( $\tau$ ), а  $\Lambda$  – экспериментальный параметр – средняя интенсивность потока извержений на указанном 95-летнем отрезке, равная 0.45 события в год. Из рисунка 4 видно, что распределение интервала времени между началами всех извержений Ключевского вулкана бимодальное и не подчиняется экспоненциальному распределению.

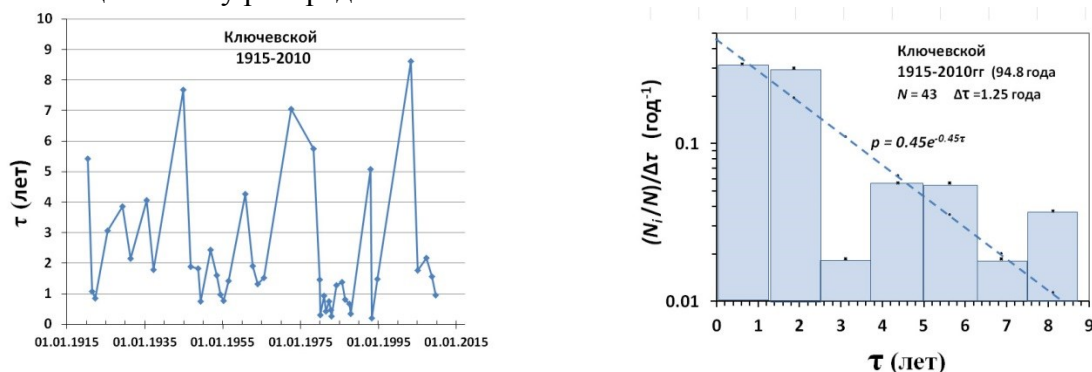


Рис. 4. Слева: распределение во времени интервалов ( $\tau$ ) между извержениями вулкана с 1915 по 2010 гг. Справа: частотное распределение ( $\tau$ ) на этом временном отрезке и его аппроксимация экспонентой.

Следовательно, поток извержений вулкана Ключевского не является стационарным пуассоновским процессом. Извержения образуют группы близко отстоящих по времени событий, разделенных сравнительно длительными интервалами покоя. Это подтверждает выводы работ [1, 3, 4, 7].

### **Выводы**

1) Ключевской вулкан в среднем за историческое время выбрасывал примерно 12 млн м<sup>3</sup> пирокластики в год (для извержений с  $VEI=2-4$ ). Это согласуется с величиной общей продуктивности этого вулкана, равной 60 млн. т магмы в год [5].

2) Средние интервалы времени между извержениями вулкана оцениваются следующим образом: извержения с  $VEI=2$  (объемы пирокластики от 1 до 10 млн м<sup>3</sup>), наподобие ряда последних извержений вулкана, происходят в среднем примерно 1 раз в 2.5 года. Извержения с  $VEI=3$  (объемы пирокластики от 10 до 100 млн м<sup>3</sup>), наподобие извержений в 1945 и 1993 гг., происходят с интервалом одно извержение примерно в 10 лет. А извержения с  $VEI=4$ , наподобие извержений в 1829, 1931, 1986 гг., происходят с интервалом примерно в 40 лет. Реальные интервалы между извержениями будут иметь значительный случайный разброс, как вследствие внутренне присущей магматическим системам случайности, так и влияния общепланетарных и космических факторов [3] (рис. 4, справа).

3) Распределение интервала времени между началами всех извержений Ключевского вулкана бимодальное и не подчиняется экспоненциальному распределению. Следовательно, поток извержений вулкана Ключевского не является стационарным пуассоновским процессом. Извержения образуют группы близко отстоящих по времени событий, разделенных сравнительно длительными интервалами покоя, что подтверждает выводы работ [3, 4].

### **Список литературы**

1. *Жданова Е.Ю., Рудаков В.П.* Проявления ритмичности в эруптивной деятельности вулканов Ключевской группы и Шивелуча (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 1994. № 3. С. 20-34.
2. *Иванов В.В.* Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. кандидата геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13 с.
3. *Иванов В.В., Пономарев Г.П.* Ритмика извержений Ключевского вулкана и вопросы прогноза его активности // Вестник КРАУНЦ. № 2(6). 2005. С. 48-61.
4. *Пийп Б.И.* Особенности извержений Ключевского вулкана // Тр. лаб. вулканологии АН СССР, Вып. 13. М.: Изд-во АН СССР. 1958. С. 99-119.
5. *Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В.* К оценке энергетического эффекта новейшего вулканизма островных дуг // Геотектоника. 1979. № 1. С. 36-47.
6. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3-42.
7. *Широков В.А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48-57.
8. Global Volcanism Program. URL: [http://volcano.si.edu/search\\_eruption\\_results.cfm](http://volcano.si.edu/search_eruption_results.cfm) (дата обращения 19.08.2019).
9. *Ivanov V.V.* Power Law Distribution of Volcanic Eruptions in Size, a Mechanism of Magma Accumulation in the Earth's Lithosphere and Hazards Prediction // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья (Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons). 2018. № 5. P. 43-51. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2018-10507>.
10. *Newhall C.A., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism. Journal Geophys. Res. 1982. 87 (C2). P. 1231-1238.