

## АППРОКСИМАЦИОННО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗА ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

*Мальшев А.И.*

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, malyshev@igg.uran.ru*

### **Введение**

После первого инструментального изучения сейсмичности и вулканической активности в извержении влк. Усу (Хоккайдо, Япония) японский сейсмолог Фусакичи Омори писал в мае 1911 г.: “Я верю, что проблема прогноза сильных вулканических извержений в некоторых случаях не очень трудна”. Великий японский сейсмолог был прав, хотя его современные последователи спустя столетие уже не столь оптимистичны [15]. Действительно, даже у одного и того же вулканического центра (вулканической зоны) есть извержения, имеющие хорошо выраженную сейсмическую подготовку, и извержения, у которых сейсмическая подготовка практически отсутствует. Так, в конце 1950-х–1960-х гг. все извержения влк. Безымянного (Камчатка) имели сейсмическую подготовку с гиперболическим нарастанием активности [8], тогда как хорошо выраженная деформационная подготовка извержений 1980–1987 гг. практически не отражалась в сейсмической активности [3]. Еще один пример: трещинное извержение 1975–1976 гг. в Толбачинской ареальной зоне имело хорошо выраженную сейсмическую подготовку, тогда как начавшееся в 26 ноября 2012 г. новое трещинное извержение в этой зоне подобной подготовки практически не имело.

Главная особенность вулканического процесса – высокое магматическое давление, накапливающееся перед извержением и реализующееся в его ходе. Изменения давления ведут к деформациям магматического тела и вмещающих пород. При этом возможны как хрупкие (дизъюнктивные), так и пластические (пликативные) деформации. Вулканосейсмические землетрясения – это колебания пород, возникающие в результате хрупких нарушений их сплошности в очаге землетрясения. Пластические деформации такими колебаниями не сопровождаются. Поэтому пластические деформации, предвещающие извержение, не имеют отражения в сейсмической активности; слабые сейсмические свидетельства начавшейся активизации вулкана появляются лишь на финальных стадиях деформационного процесса и обуславливаются обрушением каменных лавин из деформируемой постройки вулкана. Отсюда следует, что было бы ошибочно всецело полагаться на методы сейсмического мониторинга вулканической активности. Как неоднократно подчеркивал автор в совместных работах с Н.А. Жариновым и Ю.В. Демянчуком [6, 9, 10], сейсмический мониторинг должен обязательно сопровождаться мониторингом деформационных изменений в строении потенциально активных вулканических центров и зон. В противном случае проблемы в прогнозе вулканических извержений неизбежны. Однако даже в случае эффективного мониторинга успешность прогноза во многом зависит от используемой методики.

Отправной точкой для разрабатываемой автором методики стали наблюдения за извержениями влк. Безымянного в 1980–1987 гг., где в тот период происходили извержения с преимущественно пликативной подготовкой. В указанный период произошли 10 эксплозивно-эффузивных извержений с выраженной деформационной подготовкой и несколько затяжных экструзивно-эффузивных извержений с близким к стационарному характером развития. Однако за весь этот период в региональном сейсмическом каталоге имеются сведения лишь о 9 землетрясениях, произошедших в районе вулкана и имеющих энергетический класс от 7.5 до 9.3. Выполнявшаяся автором обработка данных ближайшей на то время к вулкану (16 км) с/ст. Апахончич показала, что слабые сейсмические сигналы, связанные с появлением первых обвальных каменных лавин на активизирующемся вулкане, появляются лишь за несколько дней до извержения, тогда как признаки нарастающего пликативного деформационного процесса проявляются более чем за месяц до извержения.

Установленные автором закономерности лавинообразного нарастания деформационно-экструзивного процесса в преддверии эксплозивно-эффузивных кульминаций извержений позволили сделать ряд успешных прогнозов, включая прогноз направленного взрыва вулкана в 1985 г. [3, с. 217–219]. Эти эмпирические закономерности стали для автора отправной точкой для последующего анализа, приведшего, в итоге, к уравнению динамики саморазвивающихся природных процессов (уравнение (1)). Таким образом, в основе разрабатываемой автором методики прогноза лежит опыт

прогнозных работ по извержениям с преимущественно пликативным процессом, тогда как ниже методика и результаты ее применения изложены на примере вулканосейсмических последовательностей, отражающих, прежде всего, дизъюнктивный деформационный процесс.

### Методика прогноза

В данной работе рассматривается возможность оперативного прогноза развития вулканической активности путем выявления и количественной оценки текущих тенденций в развитии вулканической активности и экстраполяции этих тенденций в будущее. В качестве аппроксимационной модели используется предложенное автором [1] уравнение динамики саморазвивающихся природных процессов (далее – уравнение СРП). Уравнение СРП представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка [5]:

$$d^2x/dt^2 = k|(dx/dt)^\lambda - (dx/dt)_0^{\lambda/\alpha}|, \quad (1)$$

где параметр  $x$  – любая неубывающая количественная характеристика, естественным образом отражающая развитие процесса;  $k$  – коэффициент пропорциональности, а показатели степени  $\lambda$  и  $\alpha$  определяют нелинейность развития процесса соответственно в окрестностях стационарного состояния  $((dx/dt) \approx (dx/dt)_0)$  и на значительном от него удалении  $((dx/dt) \gg (dx/dt)_0)$ . Выбор в пользу данной аппроксимационной модели обусловлен тем, что она получена в результате анализа и обобщения закономерностей, установленных первоначально при изучении развития вулканического процесса [2–4] и следует ожидать, что она отражает динамику развития вулканических процессов лучше, чем другие аппроксимационные модели.

Извержения, как правило, соответствуют значительным отклонениям вулканической активности от фонового уровня. Поэтому уравнение СРП логично преобразовать для исследований динамики значительных отклонений процесса от стационарного состояния, что соответствует случаю  $(dx/dt) \gg (dx/dt)_0$ . В этом случае уравнение СРП упрощается до вида

$$d^2x/dt^2 = k|(dx/dt)^\alpha. \quad (2)$$

Для уравнения (2) поиск закономерностей в развитии природных процессов оказывается более простой задачей. В отличие от уравнения (1), решения которого в общем случае не представимы в явном виде и требуют численного интегрирования, уравнение (2) легко решается аналитически. Более того, решения уравнения (2) имеют квазилинейную форму: они представляют собой либо собственно линейную зависимость, либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании. Более подробно методика использования уравнения (2) изложена в [5].

Нетрудно показать, что формально уравнение (2) соответствует уравнению, предложенному Б. Войтом [12] для описания динамики нарастания вулканической активности в преддверии кульминации извержения:

$$\dot{\Omega}^{-\alpha} \ddot{\Omega} - A = 0, \quad (3)$$

где  $\Omega$  – измеряемая величина, например, напряжение, а  $A$  и  $\alpha$  – эмпирические константы. Б. Войт [13, 14] рассматривал уравнение (10), как фундаментальный закон горной механики, описывающий разрушение горных пород в условиях примерного постоянства температуры и давления.

Как можно видеть, уравнения (2) и (3) в авторских вариантах отличаются между собой лишь областью применения. Однако в случае применения уравнения (3) к вулканизму его область действия необходимо расширить, включив в нее, как минимум, помимо процессов хрупкого разрушения пластические деформации и текучесть вещества (полный спектр реологических процессов) и дополнив процессы активизации (для уравнения (3) константа  $A > 0$ ) процессами затухания ( $A < 0$ ) и линейного (стационарного) развития ( $A = 0$ ). В свою очередь, областью применения уравнения (2) является любой саморазвивающийся природный процесс, в том числе и процесс самопроизвольного хрупкого разрушения – уравнение Б. Войта является частным случаем уравнения (2) по области определения. Тем не менее, с учетом этих различий можно утверждать, что в качестве математической модели, используемой для аппроксимации и экстраполяции в будущее количественных характеристик вулканического процесса, в данной работе используется уравнение Б. Войта.

Несмотря на широкую известность используемой модели, значимых практических результатов в прогнозных исследованиях она до сих пор не приносила. В лучшем случае ее использование ограничивалось аппроксимациями вулканической активизации постфактум (см., например, [11]). По мнению автора, это связано с проблемами, возникающими при аппроксимации временных рядов стандартными методами, а именно – с использованием среднеквадратических отклонений в качестве критерия соответствия между наблюдаемым временным рядом и аппроксимирующей его зависимостью. Практика многолетних исследований автора показала, что эти методы не обеспечивают

необходимую для экстраполяции (прогноза) устойчивость характеристик аппроксимирующей зависимости.

Устойчивость аппроксимации и, соответственно, прогноза удалось повысить при использовании в качестве критерия соответствия нестандартной характеристики – коэффициента упорядоченности  $K_{уп}$ , рассчитываемого по формуле следующего вида:

$$K_{уп} = [n \times (x_n - x_1) \times (t_n - t_1) / \Sigma(\Delta x_i \times \Delta t_i)]^{0.5}. \quad (4)$$

Здесь  $n$  – число точек на аппроксимируемом участке фактических данных,  $(x_n - x_1)$  и  $(t_n - t_1)$  – диапазоны изменения фактических данных на этом участке по параметру  $x$  и времени  $t$  соответственно (выполняют функции нормирования обеих координат на диапазон изменений от 0 до 1),  $\Delta x_i$  и  $\Delta t_i$  – отклонения каждой точки фактических данных от расчетной кривой по оси абсцисс и по оси ординат соответственно.

Полосу допустимых ошибок аппроксимации определяет среднее бикоординатное отклонение  $\Delta_{xt}$  – величина, обратная коэффициенту упорядоченности:

$$\Delta_{xt} = 1/K_{уп}. \quad (5)$$

Полоса ошибок рассчитывается и по параметру  $\Delta_x$ , и по времени  $\Delta_t$  в зависимости от текущей скорости изменения параметра  $V_n$  (определяется по аппроксимирующей зависимости в нормированных на единицу координатах):

$$\Delta_x = \Delta_{xt} \times V_n^{0.5} \times (x_n - x_1) / 2 \quad (6)$$

$$\Delta_t = \Delta_{xt} \times (t_n - t_1) / (2 \times V_n^{0.5}). \quad (7)$$

Отсюда искомая полоса ошибок:

$$x_{err} = x \pm \Delta_x \text{ и } t_{err} = t \pm \Delta_t, \quad (8)$$

где  $x$  и  $t$  – рассчитанные по аппроксимирующей зависимости значения параметра и времени. Для прогнозной экстраполяции нормирующие коэффициенты  $(x_n - x_1)$  и  $(t_n - t_1)$  в формулах (6) и (7) трансформируются в вид  $(x_p - x_1)$  и  $(t_p - t_1)$ , где  $x_p$  и  $t_p$  – рассчитанные по аппроксимирующей зависимости прогнозные (экстраполированные) значения параметра и времени.

Значения скорости в реальных координатах  $V$  определяются зависимостями:

$$V = [k(1 - \alpha)(t - T_a)]^{1/(1 - \alpha)} \quad \text{при } \alpha \neq 1 \text{ и } \alpha \neq 2, \quad (9)$$

$$V = k(x_1 - X_a) \exp[k(t - t_1)] \quad \text{при } \alpha = 1, \quad (10)$$

$$V = 1/[k(T_a - t)] \quad \text{при } \alpha = 2, \quad (11)$$

$$V = const \quad \text{при } k = 0. \quad (12)$$

Здесь значения  $X_a$  и  $T_a$  соответствуют горизонтальной и вертикальной асимптотам решений уравнения (2).

Значения скорости в реальных координатах  $V$  (формулы (9)–(12)) связаны с их нормированными величинами  $V_n$  (формулы (6), (7)) соотношением

$$V_n = V \times (t_n - t_1) / (x_n - x_1) \quad (13)$$

в пределах аппроксимационной зависимости и

$$V_n = V \times (t_p - t_1) / (x_p - x_1) \quad (14)$$

при ее экстраполяции в будущее.

Количественная оценка дальности прогноза определяется через величину прогнозной дистанции

$$D_{pr} = \{[(x_p - x_n) / (x_p - x_1)] \times [(t_p - t_n) / (t_p - t_1)]\}^{0.5}, \quad (15)$$

где  $x_p$  и  $t_p$  – значения параметра и времени предельного прогнозируемого события,  $x_n$  и  $t_n$  – соответствующие значения для “текущего” события и  $x_1$  и  $t_1$  – для начального события в опорной для аппроксимации и последующего прогноза последовательности.

При оценке качества прогноза необходимо учитывать, что прогнозная дистанция зависит от ширины полосы допустимых отклонений. В свою очередь, полоса допустимых отклонений задается через среднее бикоординатное отклонение. При этом чем больше среднее бикоординатное отклонение (чем хуже качество используемой для прогноза аппроксимации), тем шире полоса допустимых отклонений, а, следовательно, тем больше может быть величина прогнозной дистанции. Поэтому использовать величину прогнозной дистанции для характеристики качества прогноза не корректно, и для количественной оценки эффективности прогноза используется уровень прогнозируемости  $L_{pr}$  – отношение прогнозной дистанции  $D_{pr}$  к величине среднего бикоординатного отклонения  $\Delta_{xt}$ :  $L_{pr} = D_{pr} / \Delta_{xt}$ .

### Оценки прогнозируемости

В предыдущей работе [5] были приведены результаты оценки прогнозируемости вулканосейсмических последовательностей на примере извержения влк. Шивелуч в 1964 г. В качестве исходного материала для оценки использовался составленный П.И. Токаревым [7] каталог

вулканических землетрясений, сопровождавших подготовку и развитие извержения вулкана Шивелуча в 1964 г. Каталог включает сведения о 587 землетрясениях с энергетическими классами от 5.0 до 12.3, произошедших в районе вулкана в период с 30 декабря 1958 г. по 26 января 1965 г. Каталог анализировался независимо по трем параметрам:  $N$  – суммарному количеству толчков,  $D$  – “накопленным условным деформациям”, представляющим сумму корней квадратных из энергии землетрясений, и  $E$  – суммарной энергии землетрясений.

Ретроспективные прогнозные оценки были выполнены для всех событий в каталоге по всем исследуемым параметрам. Статистика этих оценок приведена в табл. 1. В таблицу включены все оценки с уровнем прогнозируемости  $L_{pr} > 1$ , т.е. все случаи, в которых значение прогнозной дистанции превышает среднюю величину бикоординатного отклонения. Как можно видеть, подобный прогноз возможен для большинства событий каталога по всем проанализированным параметрам, лучше для количества событий ( $N$ ) и условных деформаций ( $D$ ), чуть хуже для суммарной энергии землетрясений ( $E$ ). При этом средневзвешенная по уровню прогнозируемости прогнозная дистанция по времени имеет величину от первых суток (для процесса в режиме активизации) до почти двух месяцев (в режиме затухания активности).

За прошедший год аналогичные оценки были выполнены для извержений влк. Безымянного 1955–1970 гг. Каталог вулканических землетрясений за этот период [7] включает в себя сведения о 5990 событиях с энергетическими классами от 4.2 до 12, произошедшими в районе вулкана за период с 29 сентября 1955 г. по 18 декабря 1970 г. Статистика ретроспективных оценок прогнозируемости для влк. Безымянного приведена в табл. 2. Результаты аналогичны: в 60–70% случаев удается в автоматическом режиме получить значимый ретроспективный прогноз на несколько суток.

Таблица 1. Ретроспективная прогнозируемость сейсмического сопровождения извержения влк. Шивелуч в 1964 г.

Параметр	Режим активности *	$n_{pr}$	$n_{pr}/n$ , %	$L_{pr}$	$\Delta t_{pr}$ , сут
N	активизация	519	88.416	14.549	6.703
	затухание	23	3.918	6.340	55.800
	все режимы	542	92.334	14.200	7.633
D	активизация	429	73.083	19.795	3.434
	затухание	18	3.066	5.046	19.641
	все режимы	447	76.150	19.201	3.606
E	активизация	378	64.395	24.445	1.804
	затухание	9	1.533	4.281	6.348
	все режимы	387	65.928	23.976	1.823

*Примечание.* Здесь и в табл. 2:  $n_{pr}$  – число прогнозных определений,  $n$  – общее число событий в каталоге (587 для влк. Шивелуч, 5990 для влк. Безымянный),  $L_{pr}$  – уровень прогнозируемости (среднее значение по всем прогнозным определениям  $n_{pr}$ ),  $\Delta t_{pr}$  – дистанция прогноза по времени (средневзвешенное значение по всем прогнозным определениям  $n_{pr}$ , в качестве веса используется уровень прогнозируемости каждого из прогнозных определений). \* – участки со стационарным режимом развития активности, которые могли бы иметь прогнозное значение, в данном каталоге не обнаружены ни по одному из исследуемых параметров. Оценки выполнены для полосы допустимых отклонений, соответствующей 3 средним бикоординатным отклонениям базовых аппроксимаций.

Таблица 2. Ретроспективная прогнозируемость сейсмического сопровождения извержений влк. Безымянного в 1955–1970 гг.

Параметр	Режим активности *	$n_{pr}$	$n_{pr}/n$ , %	$L_{pr}$	$\Delta t_{pr}$ , сут
N	активизация	2164	36.127	11.752	1.520
	стационарн.	36	0.601	12.235	0.333
	затухание	1709	28.531	13.919	6.781
	все режимы	3909	65.259	12.704	4.029
D	активизация	1883	31.436	10.611	4.070
	стационарн.	64	1.068	16.708	1.314
	затухание	1861	31.068	18.987	2.297
	все режимы	3808	63.573	14.807	2.907
E	активизация	1547	25.826	11.430	5.771
	стационарн.	46	0.768	37.985	0.638
	затухание	1907	31.836	9.650	7.820
	все режимы	3500	58.431	10.810	6.530

## Вывод

Как можно видеть, увеличение тестового массива обрабатываемых данных на порядок (с 587 до 5990 событий) практически не повлияло на статистику прогнозных оценок. При обработке обоих каталогов для 60–70% входящих в них событий возможен прогноз последующего развития активности на период порядка нескольких дней. Это подтверждает сделанный в предыдущей работе [7] вывод: описанная методика позволяет осуществлять оперативный прогноз вулканической активности. Для перехода от расчетных значений прогнозной активности  $V_p$  к прогнозу реальных вулканических явлений необходимо и достаточно для исследуемого вулкана использовать шкалу соответствия между количественными характеристиками его уровня активности и реальными вулканическими явлениями. В качестве примера можно привести построенную автором [3, рис. 10, с. 27–29] шкалу соответствия между энергетикой вулканического дрожания и реальными процессами на вулкане Безымянном в извержениях 1980-х гг.

Предлагаемый для прогноза “аппроксимационно-экстраполяционный” метод на первый взгляд выглядит примитивным. Но эта кажущаяся примитивность лишь отражает фундаментальную суть метода. Именно эта фундаментальность позволяет позиционировать для прогнозных работ данный метод как первичный, базовый, используемый в первую очередь, и дополняемый другими методами прогноза лишь при необходимости. Как уже отмечалось, изложенная методика применима как для дизъюнктивного, так и для пликативного характера извержений и может быть рекомендована для практического использования. На данном этапе разработку методики для прогноза развития сейсмического (вулкано-сейсмического) процесса в точечном источнике можно считать завершенной и перейти к ее адаптации для пространственного мониторинга сейсмической (вулкано-сейсмической) активности.

Работа выполнена при финансовой поддержке по Программе № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН “Природная среда России: Адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики” (проект 12-П-5-1010).

## Список литературы

1. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.
2. Малышев А.И. Динамика эруптивной активности вулкана Безымянный в 1986–1987 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. №3. С. 16–27.
3. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Изд-во УрО РАН: Екатеринбург, 2000. 262 с. [http://ai-malyshev.narod.ru/VLife\\_Ru.html](http://ai-malyshev.narod.ru/VLife_Ru.html)
4. Малышев А.И. Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с. <http://ai-malyshev.narod.ru/PDF/SeisProc.pdf>
5. Малышев А.И. Оценка прогнозируемости вулканосейсмических последовательностей на примере извержения вулкана Шивелуч в 1964 г. // Ежегодник-2011. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159. 2012. С. 240–246.
6. Малышев А.И., Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. О направлениях дальнейшего развития наземных методов слежения за вулканами Северной группы // Вулканизм и геодинамика: мат-лы V Всеросс. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011. С. 438–442.
7. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
8. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). М.: Наука, 1966. 118 с.
9. Malyshev A.I., Demyanchuk Ju.V. The Deformation Prediction Possibility for Paroxysmal Directed Eruptions (on the Example of Bezymianny Volcano Eruptions) // Cities on Volcanoes 6th, Tenerife 2010. CoV6/1.1/P/57. Puerto de la Cruz: ITER, 2010. P. 33–34.
10. Malyshev A., Zharinov N., Demyanchuk Yu. Lava flows on extrusive domes as a risk factor for the paroxysmal directed eruptions (on examples of Bezymianny 1985 and Shiveluch 2005, 2010 eruptions) and the possibility of deformation prediction // Cities on Volcanoes 7. Colima, Mexico. 2012. Abs. 1P1.1-1.
11. Nishimura T., Iguchi M. Volcanic Earthquakes and Tremor in Japan. Kyoto: Kyoto University Press, 2011. 253 p.
12. Voight B. A method for prediction of volcanic eruptions // Nature. 1988. V. 332. P. 125-130.
13. Voight B. A relation to describe rate-dependent material failure // Science. 1989. V. 243. P. 200-203.
14. Voight B., Orkan N., Young K. Deformation and failure-time prediction in rock mechanics // Rock mechanics as a guide for efficient utilization of natural resources. 1989. Balkema, Rotterdam. P. 919-929.
15. Zobin V. Seismic signals produced by volcanic activity: their hazard and their application for volcano monitoring // Cities on Volcanoes 7. Colima, Mexico. 2012. Abs. 4A1.4-1.