

Прогнозирование извержений вулкана Безымянный на основе методики СОУС'09 в режиме реального времени

Салтыков В.А.

Prediction of Bezmyanny volcano eruptions based on the SESL'09 technique in real time

Saltykov V.A.

*Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: salt@emsd.ru*

Разработанная ранее формализованная методика прогнозирования извержения вулкана Безымянный на основе статистической оценки уровня сейсмичности «СОУС'09» показала свою работоспособность в режиме реального времени: выявлена подготовка всех извержений вулкана Безымянный в 2015-2020 гг. Перерасчет всех характеристик методики показал их устойчивость при добавлении новых данных.

Введение

Для создания научно-методической основы технологий прогноза опасных геодинамических явлений (землетрясений, извержений вулканов и пр.) необходимы методические разработки по формализации предвестников, оценке их прогностической эффективности и созданию алгоритмов вероятностной оценки возникновения ожидаемого события. Ранее [3] была предложена формализованная методика вероятностного прогноза извержений вулкана Безымянный на основе применения статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 [2] и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестниковую ситуацию.

В последние десятилетия на вулкане Безымянный происходит в среднем 1-2 кратковременных, но сильных эксплозивно-эффузивных извержения в год. Так, с 1999 по 2020 гг. зафиксировано 29 таких извержений. Для вулкана Безымянный характерна слабая мелкофокусная сейсмичность, которая, в основном, связана непосредственно с извержениями или предшествует им.

Для исследования сейсмических активизаций перед извержениями вулкана Безымянный использован каталог Ключевской группы вулканов [4].

Схематично процедуру прогнозирования извержения вулкана Безымянный можно представить в виде следующих этапов:

1. Для оценки состояния сейсмичности построена эмпирическая функция распределения F выделившейся сейсмической энергии во временном окне 5 суток.
2. В соответствии со шкалой СОУС'09, временной ход выделившейся сейсмической энергии пересчитан во временной ход функции уровня сейсмичности $S(t)$.
3. По данным об уровне сейсмичности при извержениях 1999-2014 гг. был построен осредненный уровень сейсмичности в окрестности начала извержения (рис. 1):

$$SS(\Delta t) = \sum_{i=1}^n S(t_0^i + \Delta t) / n$$

где Δt – время относительно начала i -го извержения t_0^i . Аппроксимацию участка функции S в диапазоне $\Delta t = -16 - -2$ сут. гиперболой S_{hyp} предлагается рассматривать как эталон поведения уровня сейсмичности перед извержением (рис. 2).

4. Для выявления временных участков подготовки извержения анализируется функция-индикатор $U(t)$, которая представляет собой сглаживание уровня сейсмичности $S(t)$ с использованием весовой функции $SS(\Delta t)$:

$$U(t) = \frac{1}{15} \sum_{k=-16}^{-2} S(t+k+2)SS(k)$$

Это позволяет получить индикатор U , характеризующий в определенном смысле сходство поведения уровня сейсмичности S и предполагаемого предвестника SS .

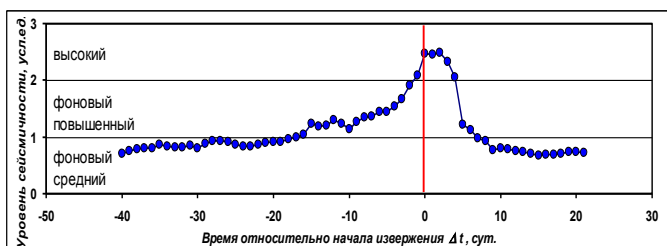


Рис. 1. Осредненное поведение уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 во временной окрестности извержения.

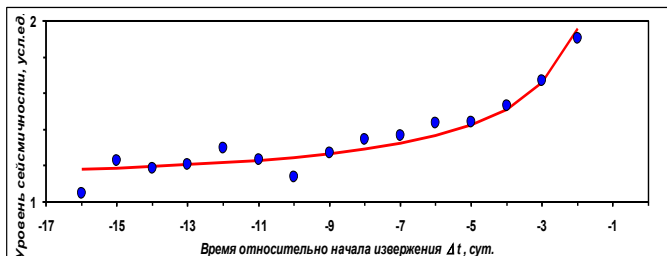


Рис. 2. Участок графика (рис. 1), принятый в качестве осредненного предвестника извержения вулкана Безымянный.

5. Применяется пороговый критерий: при превышении индикатором U порога u ситуация рассматривается как предвестниковая. Именно эти временные интервалы образуют время тревоги.

6. Помимо критерия подачи тревоги, методика включала также определение таких параметров прогноза, как надежность предвестника, достоверность предвестника, эффективность предвестника, вероятность реализации прогноза.

За время применения этой методики в 2015-2020 гг. произошло 8 извержений вулкана Безымянный. Ниже представлены примеры прогнозов, поданных в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС), и их реализации. Также приведены характеристики применяемой прогнозной методики с учетом нового фактического материала.

Извержения вулкана Безымянный 2015-2020 гг.

За последние 6 лет произошло 8 извержений вулкана Безымянный (табл. 1). Перед всеми извержениями (кроме 11.12.2016, № 1 в табл. 1), заблаговременно в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений были поданы предупреждения о возможном извержении Безымянного (табл. 1). Подготовка извержения 11.12.2016 стала успешным тестом на возможность использования разрабатываемой методики в реальном времени. На рис. 3 показано отражение развития сейсмической активизации в районе вулкана в значениях функции-индикатора U (как пример – перед извержением 21.10.2020 г.). В зависимости от наблюдающейся величины функции-индикатора U менялась оценка вероятности реализации прогноза за определенный интервал времени. Поскольку такие оценки вероятности сами по себе достаточно трудны к восприятию, в заключении также приводились оценки относительной вероятности (введен термин «контрастность») в двух вариантах – нормированные на среднюю многолетнюю вероятность извержения и на вероятность извержения в отсутствие предвестника.

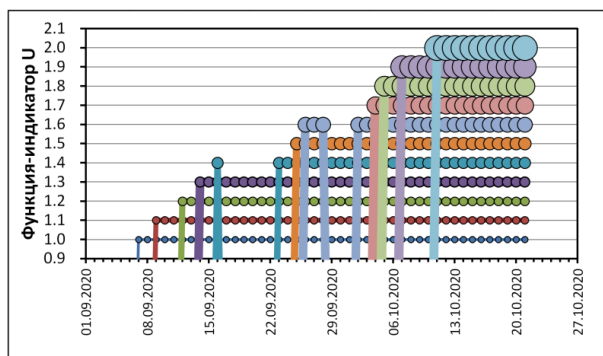


Рис. 3. Временной ход функции-индикатора при подготовке извержения 21.10.2020 г. Превышение функцией-индикатором первого порогового значения $u=1.0$ произошло 08.09.2020.

Таблица 1. Даты подачи прогнозных заключений в Камчатский филиал РЭС в 2015-2020 гг.

№	Дата извержения	Дата подачи заключения в РЭС
1	11.12.2016	
2	8.02.2017	26.01.2017
3	9.03.2017	6.03.2017
4	16.06.2017	16.06.2017
5	20.12.2017	18.12.2017
6	20.01.2019	20.01.2019
7	14.03.2019	14.03.2019
8	21.10.2020	9.10.2020

Верификация параметров прогностической методики

Ниже представлены (табл. 2, 3) характеристики прогностической методики с учетом всех извержений вулкана Безымянный 1999-2020 гг.

Надежность предвестника R определяется как отношение числа извержений N_+ , для которых был выделен предвестник, к числу всех извержений N : $R=N_+/N$.

Достоверность предвестника V определена как отношение числа предвестниковых аномалий $N(A_E)$ (то есть, в нашем случае, число превышений U порогового значения u_i , сопровождавшихся извержением) к общему числу выделенных аномалий $N(A)$: $V=N(A_E)/N(A)$.

Таблица 2. Заблаговременность проявления предвестника перед извержениями вулкана Безымянный в 2015-2020 гг.

№	Дата извержения	Заблаговременность Δt выхода функции-индикатора U на заданный уровень u , сут.					
		$u=1.0$	$u=1.2$	$u=1.4$	$u=1.6$	$u=1.8$	$u=2.0$
1	11.12.2016	22	19	17	15		
2	8.02.2017	20	14				
3	9.03.2017	8	4	2	1	0	
4	16.06.2017	19	17	15	7	6	4
5	20.12.2017	9	7	6	4	3	2
6	20.01.2019	3	0				
7	14.03.2019	1					
8	21.10.2020	44	39	28	25	16	10
Среднее арифметическое		17	13	12	8	5	5
Стандартное отклонение		± 10	± 11	± 10	± 7	± 6	± 5
Медиана		16	10	10	5	3	3

Эффективность по методике А.А. Гусева J_G [1] определяется для каждого конкретного порогового значения u по формуле:

$$J_G = \frac{N_+}{N \cdot \frac{T_{alarm}}{T}}$$

где T – общее время мониторинга сейсмической обстановки по методике, N_+ – количество случаев успешного прогноза за время T , N – общее количество извержений, произошедших за время T ; T_{alarm} – общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга).

Эффективность по методике Г.М. Молчана

Другим способом оценки эффективности является построение диаграммы Молчана для различных величин порога u . На диаграмме Молчана [5] абсцисса точки определяется как мера тревоги $\tau = \frac{T_{alarm}}{T}$, а ордината – как доля пропусков цели ν . $\nu = 1 - \frac{N_+}{N}$. Эффективность предвестника J_M определяется как $J_M = 1 - \nu - \tau$.

Таблица 3. Параметры прогностической методики.

Порог u_i	Время тревоги T_{alarm} , сут.	Число успешных прогнозов N_+	Надежность предвестника R	Достоверность предвестника V	Эффективность по Гусеву J_G	Эффективность по Молчану J_M
1.0	2041	28	0.97	0.35	3.8±0.7	0.71
1.1	1184	25	0.86	0.33	5.8±1.2	0.71
1.2	917	23	0.79	0.34	6.9±1.4	0.68
1.3	642	21	0.72	0.37	9.0±1.9	0.64
1.4	466	20	0.69	0.47	11.9±2.6	0.63
1.5	353	20	0.69	0.63	15.7±3.4	0.65
1.6	263	17	0.59	0.52	17.9±4.2	0.55
1.7	195	14	0.48	0.47	19.8±5.1	0.46
1.8	137	14	0.48	0.58	28±7	0.47
1.9	100	12	0.41	0.67	33±9	0.40
2.0	75	11	0.38	0.73	41±11	0.37

Примечание: Суммарное время мониторинга – $T = 8\,016$ суток (21.01.1999 – 1.01.2021). Общее число извержений – $N = 29$. Время тревоги T_{alarm} рассчитывалось для каждой аномалии (превышение значением U порога u) как временной интервал между сигналом тревоги (начало аномалии) и моментом извержения (для реализовавшегося предвестника) или снятием тревоги (конец аномалии).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://skp-rf.ru/usu/507436/>).

Список литературы

1. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109-119.
2. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
3. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 3. С. 45-59. DOI: 10.21455/gr2016.3-4
4. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40. DOI: 10.7868/S0203030613010021
5. Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction // Physics of the Earth and planetary interiors. 1990. V. 61. № 1-2. P. 84-98. DOI: 10.1016/0031-9201(90)90097-H