

УДК 550.34, 551.21

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ (КАМЧАТКА) НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ

© 2016 г. В.А. Салтыков

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Предложена формализованная методика вероятностного прогноза на основе статистической оценки уровня сейсмичности и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестниковую ситуацию. Возможности методики проиллюстрированы на примере сейсмических активизаций перед извержениями вулкана Безымянный (Камчатка, Ключевская группа вулканов).

В качестве исходных использованы данные из каталога землетрясений Ключевской группы вулканов за 1999–2014 гг., созданного Камчатским филиалом Геофизической службы РАН; в указанный период произошло 21 извержение вулкана Безымянный. Предвестник извержения определен как превышение порогового значения функции, связанной с текущим уровнем сейсмичности и его характерным видом перед извержением.

Приведены значения ряда параметров, характеризующих предвестник, включая достоверность, надежность и эффективность, рассчитанную двумя способами. Показано, что с увеличением пороговых значений надежность предвестника уменьшается, а достоверность растет. При прогнозировании извержений надежность составляет 0.38–0.95, т.е. в зависимости от задаваемого порогового значения от 38 % до 95 % извержений имели предвестник. Достоверность при этом составляет 0.3–0.6, т.е. также в зависимости от используемого порога реализованными оказываются от 30 % до 60 % выявленных предвестников. Значения эффективности подтверждают неслучайный характер появления предвестника.

Методика включает определение параметра "вероятность реализации прогноза". Создана номограмма вероятности в зависимости от длительности прогноза и значения предвестника.

Ключевые слова: предвестник, прогноз, землетрясение, извержение, Камчатка, вулкан Безымянный.

Введение

Одним из наиболее опасных вулканических объектов России является вулкан Безымянный, относящийся к Ключевской группе камчатских вулканов (рис. 1, а). Этот вулкан знаменит катастрофическим извержением 1955–1956 гг., кульминация которого связана с направленным взрывом 30.03.1956 г., уничтожившим часть постройки вулкана, при этом гигантское эруптивное облако поднялось на высоту 35–40 км (см., например, [Богоявленская, Курсанов, 1981; Богоявленская и др., 1991; Малышев, 1997; Belousov, Voight, Belousova, 2007] и др.).

С 1977 по 2012 гг. на вулкане Безымянный ежегодно происходило 1–2 кратковременных, но сильных эксплозивно-эффузивных извержения [Малышев, 2000; Thelen, West, Senyukov, 2010; Girina, 2013; West, 2013]. Подобные извержения представляют существенную опасность для авиации, так как высота пепловых выбросов достигает 10–15 км, а длина пепловых шлейфов может составлять несколько сотен километров. С сентября 2012 г. по февраль 2016 г. вулкан Безымянный находился в состоянии парогазовой и фумарольной активности. В кратере вулкана происходило выжимание купола

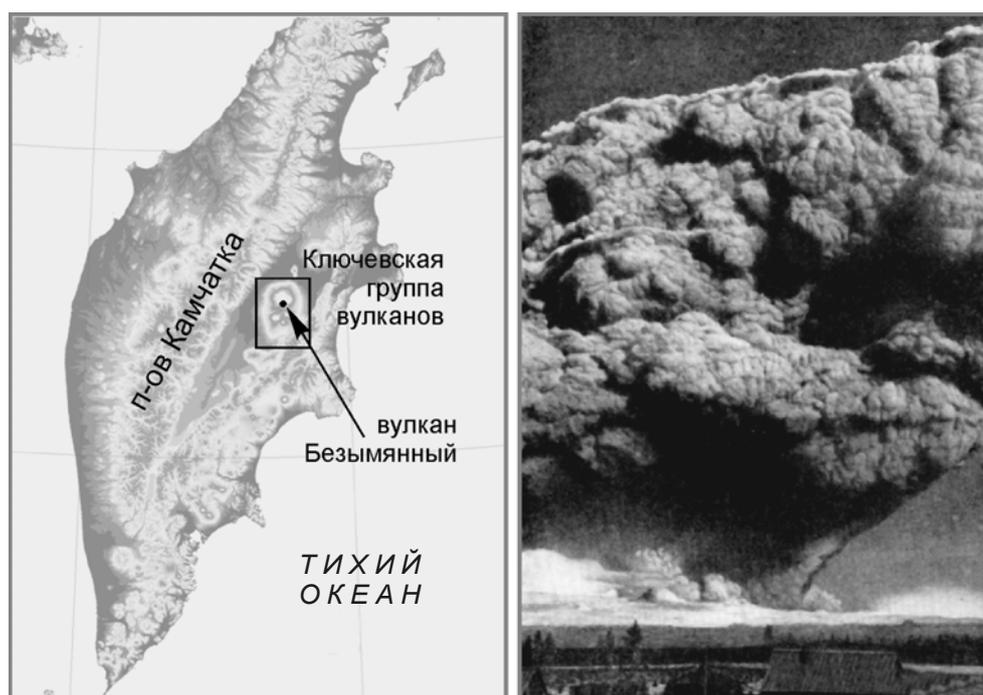


Рис. 1. Положение вулкана Безымянный на п-ове Камчатка (а) и фотография его катастрофического извержения 30.03.1956 г., сопровождавшегося образованием эруптивной тучи высотой 35–40 км (б). Автор фотографии И.В. Еров

вязкой лавы, начавшееся после взрыва 1956 г. По аналогии с предыдущими периодами активизации с учетом оценок их длительности предполагается, что современный эруптивный цикл вулкана Безымянный продлится еще не менее 100–200 лет [Богоявленская, Гирина, 2006].

Наиболее надежным источником информации для выявления потенциальной предвестниковой ситуации для вулкана является сейсмичность. Сейсмичность, регистрируемая на вулкане Безымянный, носит характер спорадических вспышек, связанных с извержениями и их подготовкой. В основном это достаточно слабые ($4.0 \leq K_S \leq 8.8$) мелкофокусные ($H < 10$ км) сейсмические события. Непрерывные данные о сейсмичности вулкана обеспечиваются сетью сейсмологических наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы РАН [Чебров и др., 2013], которые доступны для анализа в реальном времени и не зависят от возможности визуальных наблюдений, метеословий, прозрачности атмосферы, наличия спутников и т.д.

Учитывая опасность вулкана для авиации и оценку длительности текущего цикла его эруптивной активности, разработка методик прогноза извержений вулкана Безымянный представляется актуальной задачей. Отметим, что в настоящее время имеется значительный опыт выявления различных предвестников извержений этого вулкана, а также ряд успешных прогнозов его эруптивной деятельности (см., например, [Гирина, 2012; Иванов, 2013; Сеньюков, 2013; West, 2013] и др.). Однако, в соответствии с современными требованиями к прогнозу, методика обнаружения предвестника должна быть формализована, а среди прогностических параметров обязательно присутствие эффективности предвестника, позволяющей оценить вероятность реализации прогноза.

В данной работе автором предлагается формализованный подход вероятностного прогноза на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 [Салтыков, 2011] и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестниковую ситуацию.

Возможности методики проиллюстрированы на примере сейсмических активизаций перед извержениями вулкана Безымянный (Ключевская группа вулканов, Камчатка) в 1999–2014 гг.

Исходные данные

Традиционное представление сейсмичности – это каталоги землетрясений. Однако для выявления каких-либо вариаций в ее ходе необходимо определиться с выбором параметра, который, с одной стороны, характеризовал бы сейсмичность, а, с другой, был бы чувствителен к ее изменениям в интересующем исследователя диапазоне энергии и временных интервалов. В последние годы в Камчатском филиале ГС РАН для этих целей применяется шкала уровня сейсмичности СОУС'09, использующая в качестве базового параметра статистическую функцию распределения выделившейся сейсмической энергии в заданном пространственно-временном интервале, обозначаемую как F .

Для описания состояния сейсмичности введены понятия, определяющие пять основных качественных уровней – экстремально высокий, высокий, фоновый, низкий, экстремально низкий. При таком разбиении 95 % времени сейсмичность пребывает на фоновом уровне ($F=0.025–0.975$), по 2 % времени приходится на высокий ($F=0.975–0.995$) и низкий ($F=0.005–0.025$) уровни и по 0.5 % – на экстремально высокий ($F=0.995–1.0$) и экстремально низкий ($F=0.0–0.005$). Для повышения детальности оценки фоновый уровень разделяется на три подуровня – фоновый повышенный ($F=0.85–0.975$), фоновый средний ($F=0.15–0.85$), фоновый пониженный ($F=0.025–0.15$). В настоящее время методика СОУС'09 внедрена и используется в Камчатском филиале ГС РАН для мониторинга Камчатской сейсмоактивной зоны и ее подзон, а также для ежегодной оценки уровня сейсмичности регионов России и вулканических областей, в частности, вулканов Ключевской группы. Программная реализация методики [Воропаев, Салтыков, 2013] существенно повышает оперативность ее применения при названных исследованиях.

В работе использован каталог землетрясений Ключевской группы вулканов за 1999–2014 гг., полученный по данным радиотелеметрических сейсмических станций Камчатской региональной сети, расположенных в районе этой вулканической структуры. Каталог содержит данные об основных параметрах локальных тектонических и вулкано-тектонических землетрясений с глубиной очага до 40 км.

Для построения оценок уровня сейсмичности из каталога были выбраны землетрясения, зафиксированные в радиусе 6 км от вершины вулкана Безымянный. Отметим, что очаги почти 98 % сейсмических событий сосредоточены в диапазоне глубин до 5 км. Анализируемый массив данных включает 1226 землетрясений с максимальным классом $K_S=8.8$; уровень надежной регистрации $K_S=4.0$ по энергетической классификации С.А. Федотова [1972].

Активизации сейсмичности перед извержениями в параметрах СОУС'09

Для оценки состояния сейсмичности исследуемого сейсмоактивного объема построены эмпирические функции распределения выделившейся сейсмической энергии во временных окнах 5, 7, 15, 30 и 90 сут (рис. 2). При построении функций распределения F из анализа исключались временные интервалы, в которые сейсмический мониторинг вулкана Безымянный был невозможен из-за сильного вулканического дрожания при активизациях Ключевского вулкана, а также периоды пропуска данных по техническим причинам.

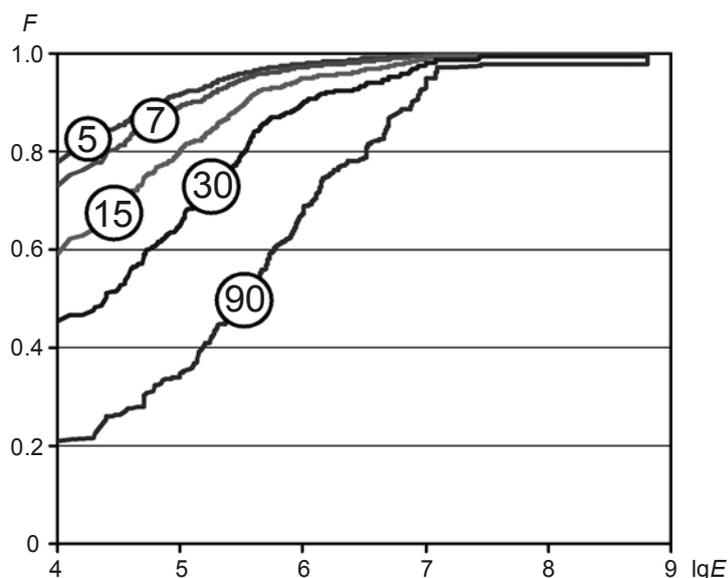


Рис. 2. Функции распределения сейсмической энергии во временных окнах 5, 7, 15, 30 и 90 сут для вулкана Безымянный. Длительность окна указана в кружках возле графиков

Низкий, экстремально низкий и фоновый пониженный уровни сейсмичности для рассматриваемого массива данных статистически не определены.

Фоновый средний уровень имеет смысл рассматривать во временных окнах более 5 сут. Эти ограничения статистических оценок связаны с тем, что имеются продолжительные временные интервалы, в которых не были зарегистрированы землетрясения представительного класса. Такой подход формализует понятие “сейсмический фон” для вулкана Безымянный (табл. 1). Следует отметить, что отсутствие землетрясений ($E=0$ Дж) на уровне представительного класса также является фоновым уровнем сейсмичности вулкана Безымянный.

Таблица 1. Параметры сейсмического фона для вулкана Безымянный для разных временных окон

Уровень сейсмичности	LgE	
	окно 5 сут	окно 30 сут
фоновый	≤ 5.9	≤ 7.0
фоновый средний	≤ 4.5	≤ 5.7

С одной стороны, для прогноза более предпочтительно использование небольшого расчетного временного окна, обеспечивающего лучшую временную привязку параметра. С другой, как уже отмечалось, временные окна длительностью менее 5 сут для рассматриваемого объекта неприемлемы при используемой методике. Поэтому временной ход уровня сейсмичности рассчитывался далее во временном окне шириной 5 сут с шагом 1 сут – таким образом имитировался ежедневный мониторинг состояния сейсмичности.

В 1999–2014 гг. произошло 21 извержение вулкана Безымянный (табл. 2). В двух случаях (11.05.2007 г. и 31.05.2010 г.) сейсмический мониторинг был затруднен из-за высокого уровня вулканического дрожания, связанного с активностью расположенного примерно в 10 км Ключевского вулкана. Поэтому каталог, пригодный для статистического анализа, имеется только для 19 извержений.

Таблица 2. Заблаговременность проявления предвестника перед извержениями вулкана Безымянный в 1999–2014 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	24.02.1999 г.	7	5	3			
2	13.03.2000 г.	28	25	24	22	21	19
3	30.10.2000 г.	12	10	8	5	1	
4	06.08.2001 г.	18	15	12	9	6	3
5	15.12.2001 г.	23	18	13	5	2	0
6	25.12.2002 г.	15	9	7	0		
7	26.07.2003 г.	12	3	2	0	0	
8	13.01.2004 г.	4	3	2	1	0	
9	18.06.2004 г.	8	6	4	2	1	1
10	11.01.2005 г.	17	14	12	10	9	7
11	30.11.2005 г.	12	8	6	5	3	1
12	09.05.2006 г.	31	28	26	21	8	6
13	24.12.2006 г.	29	28	26	4	1	
14	11.05.2007 г.	17					
15	14.10.2007 г.	9	0				
16	19.08.2008 г.	41	38	35	11		
17	16.12.2009 г.	14	8	6	5	4	2
18	31.05.2010 г.	Отсутствие предвестника в условиях сильного дрожания					
19	13.04.2011 г.	16	4				
20	08.03.2012 г.	10	3				
21	01.09.2012 г.	18	15	8	5	3	2
Среднее арифметическое		17	13	12	7	5	5
Стандартное отклонение		± 9	± 11	± 10	± 7	± 6	± 6
Медиана		16	9	8	5	3	2

Указанное в таблице $\Delta t=0$ означает, что выход U на пороговый уровень произошел непосредственно в день извержения, т.е. формально не является предвестником и не может использоваться при прогнозировании. Выделенное в таблице серой заливкой извержение 31.05.2010 г. произошло на фоне сильного вулканического дрожания расположенного на близком расстоянии вулкана Ключевской, что сделало невозможным проведение стандартной обработки локальных землетрясений. С точки зрения прогнозирования, необнаружение предвестника по такой причине должно рассматриваться как ”пропуск цели”.

Перед большинством извержений вулкана Безымянный в 2000–2014 гг. в [Кугаенко, Воропаев, 2015] выявлены статистически значимые переходы сейсмичности с фонового среднего уровня на фоновый повышенный, а затем на высокий (экстремально высокий); из 19 рассматриваемых извержений лишь перед тремя (14.10.2007 г., 13.04.2011 г., 08.03.2012 г.) не наблюдалось уверенных вариаций уровня сейсмичности. По данным об уровне сейсмичности при всех 19 извержениях, произошедших в 1999–2014 гг. ($n=19$), осредненный уровень сейсмичности SS во временной окрестности начала извержения был рассчитан по формуле $SS(\Delta t) = \sum_{i=1}^n S(t_0^i + \Delta t) / n$, где Δt – время относительно начала i -го извержения t_0^i . Поведение уровня сейсмичности иллюстрирует рис. 3.

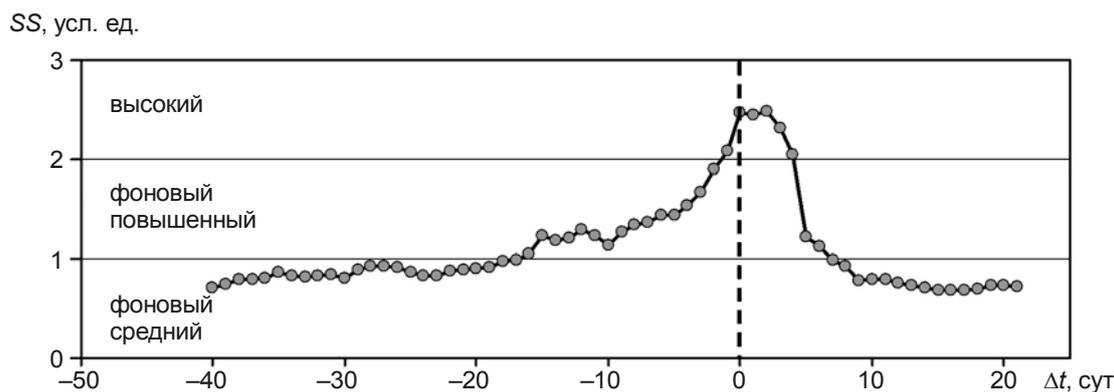


Рис. 3. Поведение уровня сейсмичности $SS(t)$ во временной окрестности извержения ($\Delta t=0$ – время извержения). Пояснения см. в тексте

Используемая в приведенной выше формуле функция $S(\dots)$ соответствует функции распределения F , пересчитанной в линейный по отношению к шкале СОУС'09 масштаб:

$$F = 0.5, \quad S = 0$$

$$F = 0.85, \quad S = 1 \text{ – граница между средним и повышенным уровнями;}$$

$$F = 0.975, \quad S = 2 \text{ – граница между повышенным и высоким уровнями;}$$

$$F = 0.995, \quad S = 3 \text{ – граница между высоким и экстремально высоким уровнями;}$$

$$F = 1, \quad S = 4.$$

В контексте решаемой задачи, определяемой как прогноз извержений и определение предвестника, для нас интерес представляет участок функции SS , ограниченный слева значением $\Delta t = -16$ сут (время перехода SS с фонового среднего уровня на фоновый повышенный) и справа $\Delta t = -2$ сут (очевидное требование $\Delta t \leq -1$ сут, связанное с минимальной заблаговременностью прогноза, усугубляется задержкой в 1 сут в обработке текущих землетрясений и составлении оперативного каталога).

Аппроксимацию участка функции SS в диапазоне $\Delta t = -16 \dots -2$ сут гиперболой S_{hyp} предлагается рассматривать как эталон поведения уровня сейсмичности перед извержением (рис. 4), с которым следует сопоставлять текущие значения S для выявления временных участков подготовки извержения.

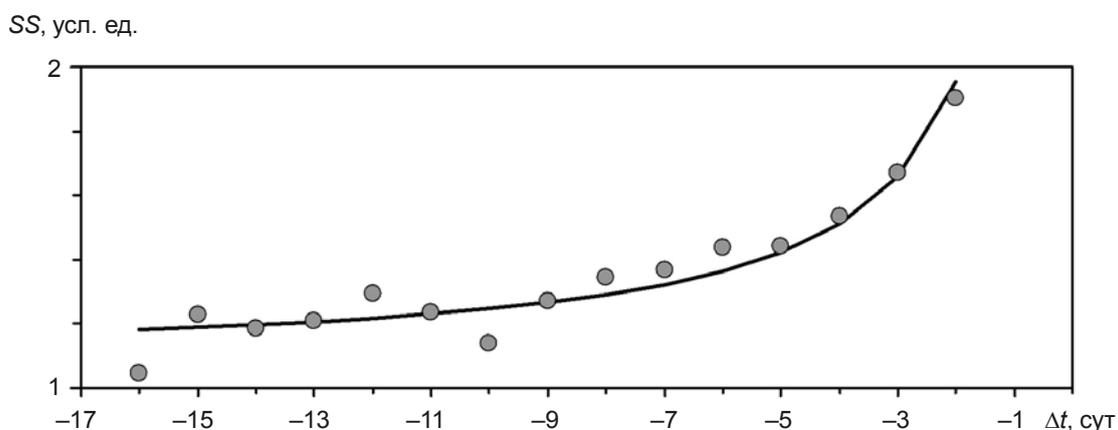


Рис. 4. Участок приведенного на рис. 3 графика, принятый в качестве осредненного предвестника извержения вулкана Безымянный. Сплошная линия – гипербола, аппроксимирующая рассматриваемый участок

Для сопоставления используется функция-индикатор

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

представляющая собой сглаживание уровня сейсмичности $S(t)$ в скользящем временном окне шириной 15 сут с использованием весовой функции $SS(\Delta t)$. Эта процедура сглаживания похожа на расчет корреляции, но в отличие от нее проводится без предварительного центрирования рядов S и SS . Такое преобразование позволяет получить ряды U , характеризующие в определенном смысле сходство поведения уровня сейсмичности S и предполагаемого предвестника SS . Отметим, что в таком представлении можно говорить о предвестниковом увеличении функции-индикатора U перед извержениями 2000–2014 гг., включая произошедшие 14.10.2007, 13.04.2011 и 08.03.2012 гг. (рис. 5), перед которыми увеличение непосредственно уровня сейсмичности не было очевидным [Кугаенко, Воропаев, 2015].

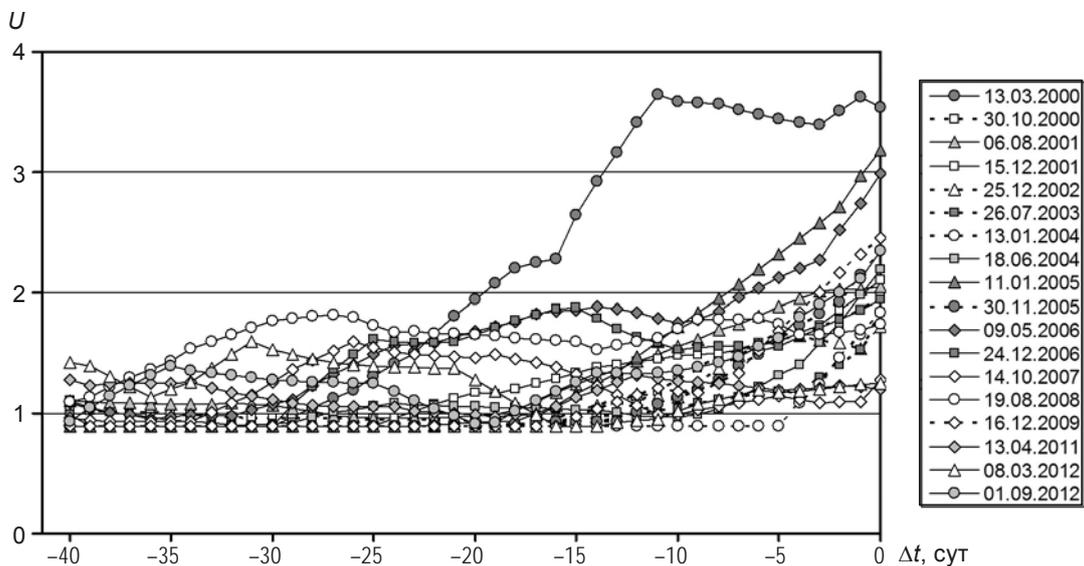


Рис. 5. Примеры временного хода функции-индикатора U перед извержениями вулкана Безымянный, произошедшими в 2000–2014 гг.

Для практического использования предлагаемого подхода к прогнозированию извержений вулкана необходимо ответить на следующие важнейшие вопросы.

1. Что является критерием для подачи тревоги (прогнозного заключения)?
2. Что является критерием для снятия тревоги?
3. Какова вероятность реализации прогноза?
4. Какова вероятность пропуска извержения?
5. Каковы достоверность, надежность и эффективность предлагаемого предвестника?

Предлагается использовать пороговый критерий: ситуация рассматривается как предвестниковая, когда значение функции-индикатора U превышает некоторое пороговое значение u (далее $u_{\text{пор}}$). С учетом поведения функции U (см. рис. 5) ниже будет рассмотрен набор пороговых значений u_i от 1 до 2 с шагом 0.1. Первичная обработка включала определение временных интервалов в течение 1999–2014 гг., на которых $U \geq u_i$. Именно эти интервалы образуют время тревоги T_{alarm} . Возможны три варианта взаимного расположения извержения и тревожного интервала.

1. Если извержение попадает в интервал, в котором $U \geq u_i$, то считается, что оно имеет предвестник. Важным нюансом здесь является отмена тревоги произошедшим извержением, т.е. временной интервал непосредственно после извержения не включается во время тревоги, даже если $U \geq u_i$.

2. Если перед произошедшим извержением $U < u_i$, то такая ситуация квалифицируется как “пропуск цели”, т.е. извержение не имеет идентифицированного по рассматриваемой методике предвестника и не может быть предсказано.

3. Тревожный интервал рассматривается как “ложная тревога”, если в его пределах извержение не произошло.

Эти варианты рассматриваются на примере двух извержений вулкана Безымянный (рис. 6).

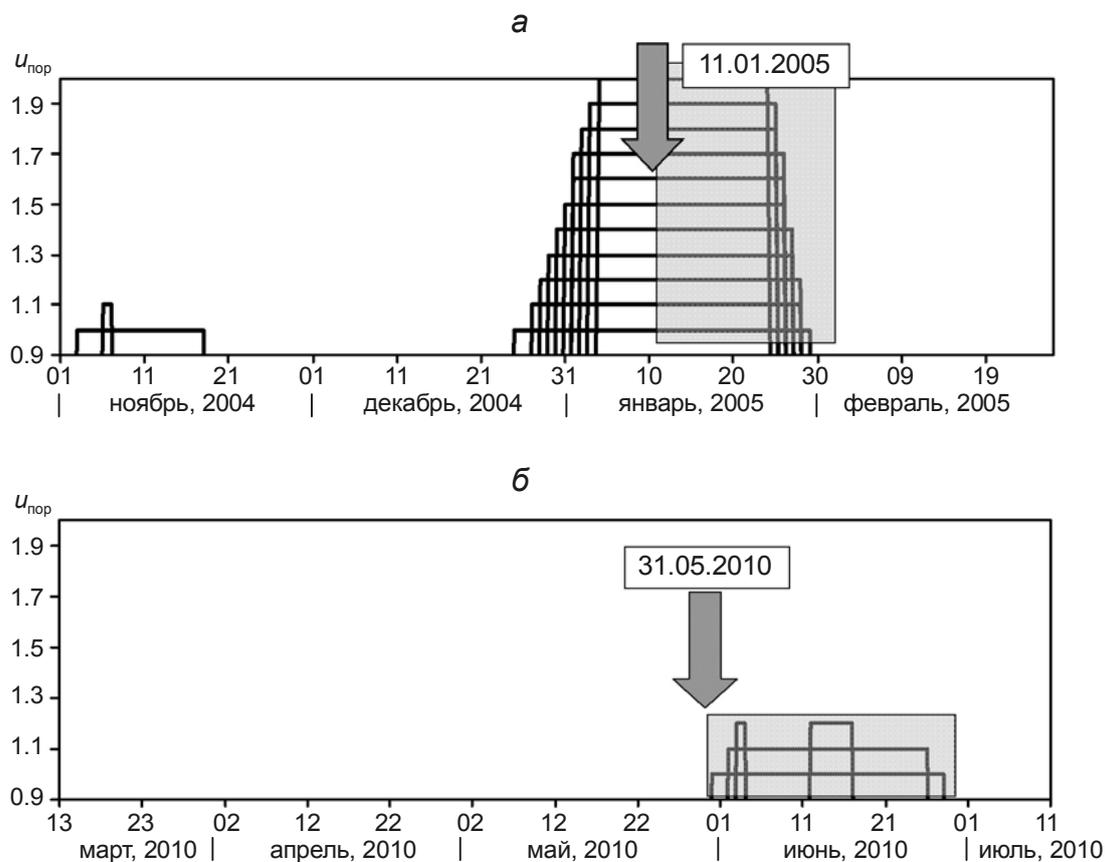


Рис. 6. Схематическое представление поведения функции-индикатора U в окрестности извержения на примере извержений вулкана Безымянный 11.01.2005 г. и 31.05.2010 г. Представлены случаи реализованного прогноза (11.01.2005 г.), ложной тревоги (3–17.11.2004 г.), пропуска цели (31.05.2010 г.). Пояснения см. в тексте

Белые прямоугольники на рис. 6 соответствуют временным участкам, на которых функция-индикатор U превышает заданные значения $u_{пор}$; высота каждого прямоугольника отображает значение используемого $u_{пор}$. Серый прямоугольник отмечает отмену тревоги после извержения.

Данные о заблаговременности (Δt) появления предвестника перед всеми извержениями вулкана Безымянный в 1999–2014 гг. в зависимости от величины использованного $u_{пор}$ содержатся в вышеприведенной табл. 2. В табл. 3 представлены данные о суммарной длительности тревоги, числе реализованных прогнозов и других расчетных

Таблица 3. Параметры прогностической методики

Порог $u_{\text{пор}}$	Время тревоги T_{alarm} , сут	Число успешных прогнозов N_+	Надежность предвестника R	Достоверность предвестника V	Эффективность по Гусеву $J_G \pm \sigma$	Эффективность по Молчану J_M
1.0	1764	20	0.95	0.32	3.1±0.7	0.65
1.1	992	18	0.86	0.30	5.0±1.2	0.68
1.2	778	18	0.86	0.33	6.3±1.5	0.72
1.3	548	16	0.76	0.34	8±2	0.67
1.4	405	16	0.76	0.44	11±3	0.69
1.5	304	16	0.76	0.59	14±4	0.71
1.6	228	13	0.62	0.48	16±4	0.58
1.7	169	11	0.52	0.42	18±5	0.49
1.8	112	11	0.52	0.55	27±8	0.50
1.9	79	9	0.43	0.60	31±10	0.41
2.0	58	8	0.38	0.58	38±12	0.37

Примечание. Приведенные для эффективности по Гусеву значения $\pm\sigma$ соответствуют среднеквадратичному отклонению.

параметрах прогнозной методики. Суммарное время мониторинга, охватывающее период 1.01.1999–4.10.2014 гг., – $T=5755$ сут; общее число извержений за это время – $N=21$. Время тревоги T_{alarm} для каждой аномалии (превышение значением U порога $u_{\text{пор}}$) рассчитывалось как временной интервал между сигналом тревоги (начало аномалии) и моментом извержения (для реализовавшегося предвестника) или снятием тревоги (конец аномалии).

Оценка прогностических свойств предвестника

Надежность предвестника определяется как отношение числа извержений, для которых был выделен предвестник (число успешных прогнозов N_+), к числу всех извержений N :

$$R = \frac{N_+}{N}.$$

Меняя значение $u_{\text{пор}}$, используемое при выявлении предвестника, и посчитав для него соответствующие значения N_+ (табл. 3, рис. 7, а), была получена зависимость надежности R от порога u . Согласно расчетам, надежность предвестника для низких значений $u_{\text{пор}}$ существенно больше, чем для более высоких. Это означает, что перед большинством (95 %) извержений наблюдается превышение рядом U порогового значения, равного 1.0, но превышение бóльших порогов с их увеличением становится все более редким, что с неизбежностью ведет к увеличению числа пропусков цели; так, в среднем только перед одним из трех извержений U достигает аномального значения 2.0.

Достоверность предвестника V (рис. 7, б) определена как отношение числа предвестниковых аномалий $N(A_E)$ (в нашем случае – числа превышений U значения $u_{\text{пор}}$, сопровождавшихся извержением) к общему числу выделенных аномалий $N(A)$:

$$V = \frac{N(A_E)}{N(A)}.$$

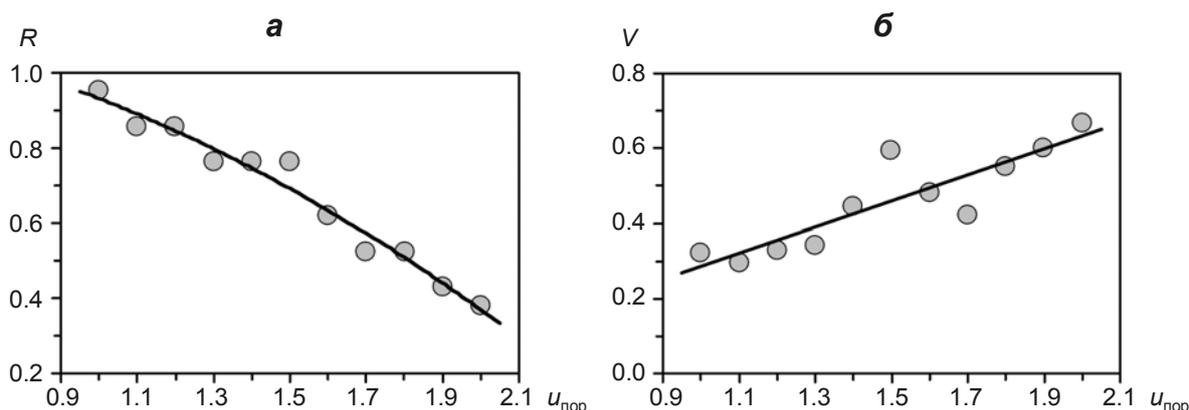


Рис. 7. Зависимость надежности (а) и достоверности (б) предвестника от значения $u_{\text{пор}}$. Сплошные линии отображают общую тенденцию в поведении параметра с изменением порогового значения

Согласно табл. 3 и рис. 7, б, две трети наиболее выраженных аномалий (с превышением U порога в 2.0) завершаются извержением и могут рассматриваться как реализовавшийся предвестник. При снижении порога достоверность снижается, и в среднем лишь каждая третья аномалия завершается извержением при пороге $u=1.0$.

Для оценки эффективности рассматриваемого предвестника были использованы два подхода – подход А.А. Гусева [1974] и подход Г.М. Молчана [1990], использующие одинаковые входные данные, но в разных комбинациях (рис. 8). Поскольку выбор комбинаций определяется авторскими взглядами на решаемую проблему, их следует рассматривать независимо, без сопоставления между собой.

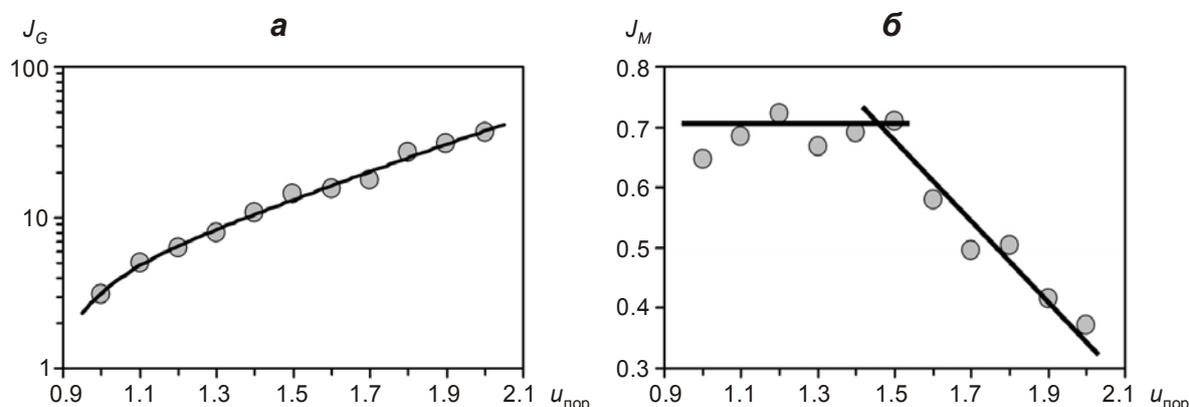


Рис. 8. Зависимость эффективности предвестника, рассчитанной по методикам А.А. Гусева (а) и Г.М. Молчана (б), от величины $u_{\text{пор}}$. Сплошной линией показана тенденция в поведении эффективности предвестника с изменением $u_{\text{пор}}$

Определение эффективности предвестника по методике А.А. Гусева. Эффективность рассматриваемой методики обнаружения предвестника извержения J_G определяется для каждого конкретного порогового значения u по формуле

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

где T – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемой методике; N_+ – количество извержений, соответствующих успешному прогнозу 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). Знаменатель дроби отражает среднее число возникновения извержений за время T_{alarm} в случае отсутствия связи прогнозов с извержениями. Соответственно, эффективность J_G показывает, во сколько раз количество спрогнозированных извержений превышает число попавших в “тревожное” время случайным образом. При случайном угадывании эффективность J_G равна 1.

Для рассматриваемых данных эффективность J_G меняется в значительной степени – на порядок при изменении $u_{пор}$ от 1.0 до 2.0 (рис. 8, а, табл. 3).

Определение эффективности предвестника по методике Г.М. Молчана. На рис. 9 представлены диаграммы Молчана для разных значений $u_{пор}$. На диаграмме Молчана абсцисса точки определяется как мера тревоги τ : $\tau = \frac{T_{alarm}}{T}$, а ордината – как доля про-

пусков цели v : $v = 1 - \frac{N_+}{N}$. Диагональ диаграммы Молчана $\tau + v = 1$, соединяющая точки (0; 1) (точка “оптимиста”) и (1;0) (точка “пессимиста”) соответствует “случайному” прогнозу. Для этой диагонали можно построить доверительный интервал с заданной значимостью α . В нашем случае интерес представляет только нижняя граница этого интервала, отмеченная на рис. 9 штриховой линией ($\alpha=0.01$).

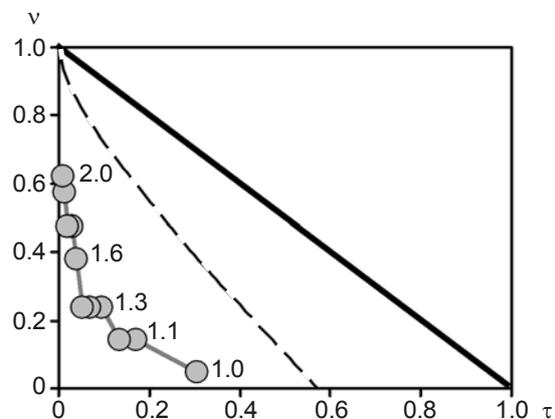


Рис. 9. Диаграмма Молчана для разных значений $u_{пор}$. Пояснения см. в тексте

Как следует из рис. 9, для всех случаев экспериментальные точки (τ, v) лежат ниже границы с $\alpha=0.01$, что интерпретируется как высокая степень надежности выявленной связи аномалий (превышение U порогового значения u) с происходящими извержениями.

Эффективность предвестника J_M определяется как $J_M = 1 - v - \tau$. Для “случайного” прогноза $J_M=0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) – $J_M=1$. Для рассматриваемых вариантов значений $u_{пор}$ значения эффективности приведены в табл. 3 и на рис. 8, б. Отмечается, что для значений $u_{пор}$ в диапазоне 1.0–1.5 эффективность существенно не меняется. Но при дальнейшем увеличении $u_{пор}$ до 2.0, она уменьшается вдвое, оставаясь при этом статистически высокозначимой.

Оценка вероятности реализации предвестника. Для оценки вероятности прогноза предлагается следующий алгоритм.

1. С учетом пуассоновского характера распределения извержений оценивается вероятность хотя бы одного извержения в течение заданного времени t :

$$p(n > 0) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность пуассоновского потока. Предварительно проверяется соответствие распределения извержений распределению Пуассона. С этой целью для рассматриваемых выше данных была сделана проверка экспоненциальности распределения временных интервалов между землетрясениями, которая не дала оснований для исключения гипотезы о пуассоновском распределении извержений.

2. Исходя из смысла параметра эффективности J_G , определяемого по методике Гусева (см. выше), ожидаемая вероятность появления хотя бы одного извержения за время t после идентификации предвестника будет равна

$$p_e(n > 0) = 1 - e^{-J_G \lambda t}.$$

Номограмма вероятностей реализации прогноза землетрясением для предвестника “Превышение величиной U заданного порогового значения u ” для различных времени тревоги t и пороговых значений u представлена на рис. 10.

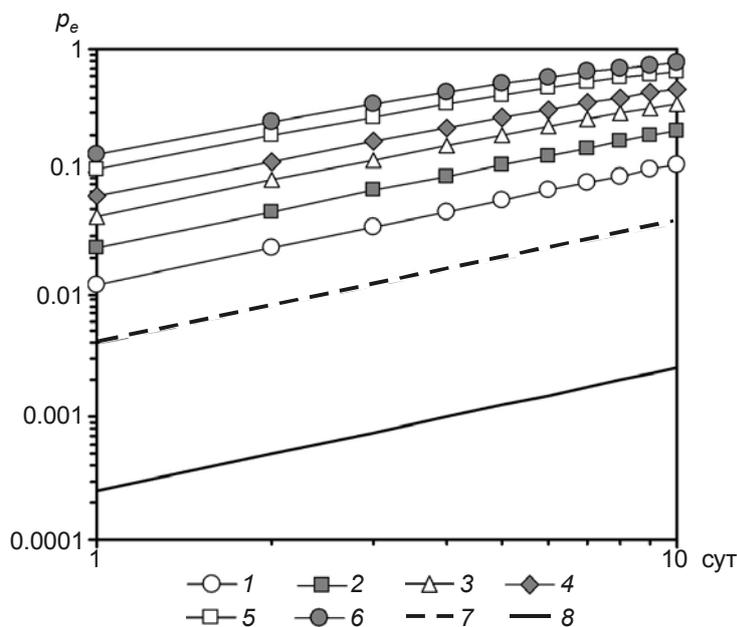


Рис. 10. Номограмма вероятности реализации прогноза p_e в зависимости от длительности тревоги t при различных значениях $u_{\text{пор}}$ (1 – 1.0; 2 – 1.2; 3 – 1.4; 4 – 1.6; 5 – 1.8; 6 – 2.0). Для сравнения приведена средняя многолетняя вероятность извержения (7), а также вероятность извержения в отсутствие предвестника (8)

3. Учитывая, что при ретроспективном анализе обнаружено извержение, не имевшее рассматриваемого предвестника (в таких случаях используется термин “пропуск цели”), представляется возможной оценка вероятности извержения в отсутствие предвестника. Предлагается использовать распределение Пуассона, основываясь на том, что за известное время мониторинга сейсмичности в отсутствие предвестника произошло известное число извержений (в нашем случае одно извержение примерно за 4 000 сут). Естественно, вероятность извержения в отсутствие предвестника (см. рис. 10) существенно меньше, чем средняя многолетняя вероятность возникновения извержения, не говоря уже о сопоставлении с вероятностью извержения при наличии предвестника.

Характеристика прогностической методики

В этом разделе характеристика разработанной методики прогнозирования приводится в терминах общей прогностики [Прогностика..., 1978]. Методика является поис-

ковой и направлена на определение возможного положения явления (извержения вулкана Безымянный) в будущем. Разрабатываемый прогноз рассматривается как вероятностный. Объектом прогнозирования является извержение вулкана Безымянный. При прогнозировании применяется метод экстраполяции – распространение выявленных закономерностей развития объекта прогнозирования на будущее в предположении, что выявленная закономерность, выступающая в качестве базы прогнозирования, сохраняется и в дальнейшем.

1. *Предвестник*: превышение значением ряда U , рассчитанного на основе данных об уровне сейсмичности вулкана Безымянный (в радиусе 6 км от вершины) по шкале СОУС'09, определенного порогового уровня u в отсутствие извержения. Продолжающееся во время извержения превышение U над u не является предвестником.

2. *Момент подачи тревоги* (прогнозного заключения): момент выявления предвестника.

3. *Параметры ожидаемого события*: прогнозируются извержения вулкана Безымянный.

4. *Период упреждения прогноза* (промежуток времени, на который разрабатывается прогноз): прогноз дается первоначально на 2 недели с возможной пролонгацией.

5. *Снятие тревоги при отсутствии ожидаемого извержения* (ложная тревога): при снижении текущего значения U ниже пороговой величины u .

6. *Успешный (оправдавшийся) прогноз*: извержение вулкана Безымянный во временном интервале, объявленном тревогой.

7. *Снятие тревоги после оправдавшегося прогноза*: произошедшее извержение отменяет состояние тревоги (снимает прогноз досрочно) независимо от уровня сейсмичности.

8. *Вероятность извержения*: прогноз носит вероятностный характер, определяемый номограммой в условиях наличия/отсутствия предвестника.

Выводы

В рамках разработки технологии краткосрочного прогноза природных катастроф на базе ретроспективного анализа результатов регистрации в 1999–2014 гг. землетрясений в окрестности вулкана Безымянный проведена разработка прогностической методики, основанной на мониторинге расчетного параметра U , связанного со значениями уровня сейсмичности по шкале СОУС'09.

Предложен формализованный предвестник извержения; формализована процедура снятия состояния тревоги.

Методика включает оценку параметра вероятности реализации прогноза. Создана номограмма вероятности в зависимости от времени прогноза и значения прогностического параметра.

На основе данных о сейсмичности вулкана Безымянный в 1999–2014 гг. оценена надежность и достоверность предвестника. Показано, что с увеличением пороговых значений надежность предвестника уменьшается, а достоверность растет. При прогнозировании извержений надежность составляет 0.38–0.95, т.е. от 38 % до 95 % извержений в зависимости от задаваемого порогового значения имели предвестник, а достоверность – 0.3–0.6, т.е. реализованы от 30 % до 60 % выявленных предвестников также в зависимости от используемого порога.

Проведена оценка эффективности предвестника двумя способами. Показано, что результаты применения прогностической методики статистически значимо отличаются от случайного угадывания и дают по сравнению с ним выигрыш в 3–30 раз.

Представленные оценки получены по данным каталога землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН за 1999–2014 гг., в течение которых произошло 21 извержение вулкана Безымянный.

Литература

- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Максимов А.П., Иванов Б.В.* Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С.168–194.
- Богоявленская Г.Е., Гирина О.А.* Вулкан Безымянный: 50 лет активности // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный) / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С.11–17.
- Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т.* Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянного // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С.3–13.
- Воропаев П.В., Салтыков В.А.* Вычислительная система оценки уровня сейсмичности // Геология и геофизика Юга России. 2013. № 2. С.18–25.
- Гирина О.А.* О предвестнике извержений вулканов Камчатки, основанном на данных спутникового мониторинга // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С.14–22.
- 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.
- Иванов В.В.* Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956–2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 22. № 2. С.98–119.
- Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Вариации статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09: вулкан Безымянный (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. Вып. 25. № 1. С.31–40.
- Мальшев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 262 с.
- Мальшев А.И.* Направленный взрыв вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (вопросы интерпретации) // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С.46–53.
- Прогностика. Терминология. М.: Наука, 1978. Вып. 92. 32 с.
- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С.53–59.
- Сенюков С.Л.* Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 152 с.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С.18–40.
- Belousov A., Voight B., Belousova M.* Directed blasts and blast-currents: a comparison of the Bezymianny 1956, Mount St Helens 1980, and Soufriere Hills, Montserrat 1997 eruptions and deposits // Bulletin of Volcanology. 2007. V. 69, N 7. P.701–740.
- Girina O.A.* Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956–2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P.22–41.
- Molchan G.M.* Strategies in strong earthquake prediction // Phys. Earth. Planet. Inter. 1990. V. 61. P.84–98.
- Thelen W., West M., Senyukov S.* Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezymianny Volcano, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 194, N 4. P.201–213. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.05.010.
- West M.E.* Recent eruptions at Bezymianny volcano – a seismological comparison // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P.42–57.

Сведения об авторе

САЛТЫКОВ Вадим Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Геофизическая служба РАН, Камчатский филиал. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: +7(961) 960-29-61. E-mail: salt@emsd.ru

FORMALIZED TECHNIQUE OF BEZYMIANNY VOLCANO (KAMCHATKA) ERUPTION FORECASTING BASED ON THE STATISTICAL ESTIMATION OF SEISMICITY LEVEL

V.A. Saltykov

Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. The paper proposes a formalized technique of probabilistic forecast by applying statistical estimation of seismicity level and a number of additional functions that characterize the predictive situation. The possibilities of this method are illustrated by the example of seismic activation before the eruptions of the Bezymianny Volcano (Klyuchevskaya group, Kamchatka).

The initial data is the catalog of earthquakes of the Klyuchevskaya group of volcanoes during 1999-2014, compiled by the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, RAS. During this time there were 21 eruptions of the Bezymianny Volcano. The precursor is defined as a threshold function associated with the current seismicity level and its characteristic form before the eruption.

The values of parameters characterizing the precursor are given including validity, reliability and efficiency, calculated by two methods. It is shown that the reliability of the precursor decreases with the increase in threshold values, and its validity increases.

The reliability of the method is 0.38–0.95, i.e., from 38 % to 95 % of eruptions had the precursor depending on the threshold level; and the validity is 0.3–0.6, i.e., from 30 % to 60 % of the identified precursors are realized also depending on the threshold level. Values of efficiency confirm the non-random nature of the precursor appearance.

The method includes determination of the probability of the forecast realization. The nomogram for probabilities depending on the duration of the forecast and the values of the prognostic parameter is designed.

Keywords: precursor, forecasting, earthquake, eruption, Kamchatka, Bezymianny Volcano.