

УДК 550.343.6+551.21

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ (КАМЧАТКА) 2015–2020 гг.: РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ НА ОСНОВЕ СОУС'09, ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

© 2022 г. В. А. Салтыков*

*Камчатский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба Российской академии наук”,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия*

**e-mail: saltkam@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 23.08.2022 г.

В последние десятилетия на вулкане Безымянный (Камчатка), являющемся одним из наиболее опасных вулканических объектов России, происходит в среднем 1–2 кратковременных, но сильных explosивно-эффузивных извержений в год. Вероятно, в качестве наиболее надежного источника информации для выявления предвестниковой ситуации для таких извержений следует рассматривать сейсмичность, непрерывные данные о которой обеспечиваются Камчатской системой сейсмического мониторинга. Разработанная ранее автором формализованная методика прогнозирования извержения вулкана Безымянный на основе статистической оценки уровня сейсмичности “СОУС’09” показала свою работоспособность и в режиме реального времени: выявлена подготовка всех восьми извержений вулкана Безымянный в 2015–2020 гг. Перерасчет всех характеристик методики (эффективность, надежность, достоверность) показал их устойчивость при добавлении новых данных. Методика прогнозирования дополнена новым параметром – “заблаговременностью”, позволяющим формально оценить время ожидания реализации прогноза.

Ключевые слова: предвестник, прогноз, землетрясение, извержение, Камчатка, вулкан Безымянный, СОУС’09

DOI: 10.31857/S0203030622060074

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее опасных вулканических объектов России является вулкан Безымянный, относящийся к Ключевской группе камчатских вулканов (рис. 1). 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 [Богоявленская, Кирсанов, 1981; Богоявленская и др., 1991; Малышев, 1997; Belousov et al., 2007 и др.]. По аналогии с предыдущими периодами активизации, с учетом оценок их длительности, предполагается, что современный эруптивный цикл вулкана Безымянный продлится не менее 100–200 лет [Богоявленская, 2006].

В последние десятилетия на вулкане Безымянный происходит в среднем 1–2 кратковременных, но сильных explosивно-эффузивных извержений в год [Малышев, 2000; Thelen et al., 2010; Girina, 2013; West, 2013, Озеров и др., 2020]. С 1999 по 2020 гг. зафиксировано 29 таких извер-

жений. 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.

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 [Гирина, 2012; Иванов, 2013; Сеньюков, 2013; West, 2013 и др.] Однако, применяющиеся в этих работах методики не являются формализованными, и ряд их параметров не только не приводится в публикациях, но даже не определен. Но очевидно, что для создания научно-методической основы технологий прогноза любых опасных геодинамических явлений (землетрясений, извержений вулканов и пр.) необходимы методические разработки по формализа-

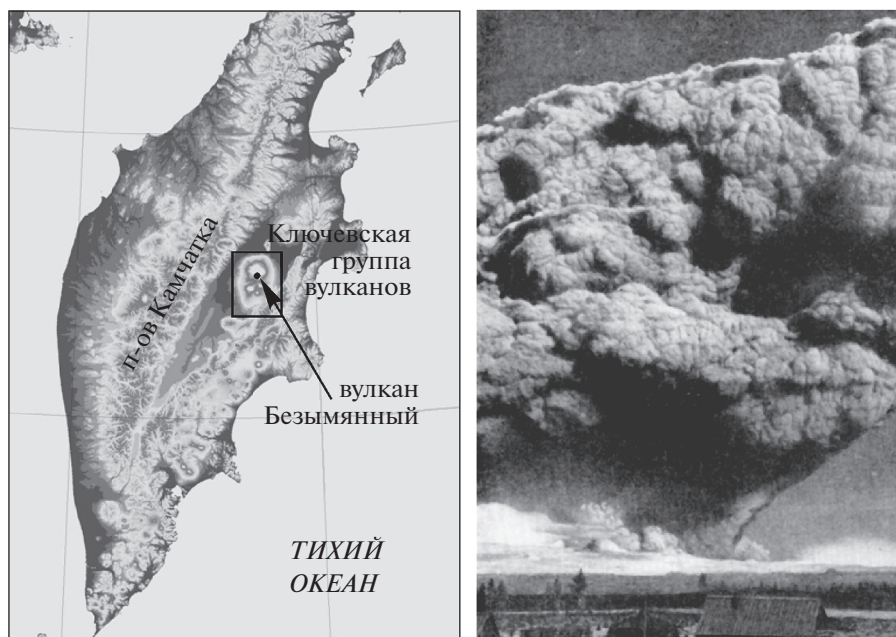


Рис. 1. Местоположение вулкана Безымянный на п-ове Камчатка и его катастрофическое извержение 30.03.1956 г., сопровождавшееся образованием эруптивной тучи высотой 35–40 км. Фото И.В. Ерова.

ции предвестников, оценке их прогностической эффективности и создание алгоритмов вероятностной оценки возникновения ожидаемого события (т.е. реализации прогноза).

Для вулкана Безымянный характерна слабая мелкофокусная сейсмичность, чьи спорадические вспышки, в основном связаны непосредственно с извержениями и/или их подготовкой [Сенюков, 2013]. Поэтому можно предположить, что наиболее надежным источником информации для выявления потенциальной предвестниковой ситуации для вулкана Безымянный является именно сейсмичность, непрерывные данные о которой обеспечиваются Камчатской системой сейсмического мониторинга [Чебров и др., 2013; Чеброва и др., 2020]. Эти данные доступны для анализа в реальном времени и не зависят от возможности проведения визуальных наблюдений, метеоусловий, прозрачности атмосферы, наличия спутников и т.д.

Ранее [Салтыков, 2016] была предложена формализованная методика вероятностного прогноза извержений вулкана Безымянный на основе применения статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 [Салтыков, 2011] и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестниковую ситуацию. Эта методика разработана при ретроспективном анализе сейсмичности вулкана Безымянный в 1999–2014 гг., где за это время произошло 21 извержение [Салтыков, 2016]. Впоследствии данный подход к прогнозированию в оперативном режиме состояния вулкана

Безымянный был внедрен в практику Камчатского филиала ФИЦ “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (Прогностические заключения заблаговременно подавались в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) [Чебров и др., 2011]). За это время (2015–2020 гг.) вулкан Безымянный извергался еще 8 раз. Целью анализа результативности применения рассматриваемой методики, приводимого в данной статье, является не только демонстрация прогностических ситуаций и оценка эффективности и других параметров реальных прогнозов, но и возможная корректировка самой методики с учетом новых данных.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования сейсмических активизаций перед извержениями вулкана Безымянный использован каталог землетрясений Ключевской группы вулканов с 1999 по 2020 гг., зарегистрированных Камчатской региональной сетью сейсмических станций [Чебров и др., 2013; Чеброва и др., 2020]. Для построения оценок уровня сейсмичности из каталога были выбраны землетрясения с эпицентрами в радиусе $R = 6$ км от вершины вулкана Безымянный ($\varphi = 55.972^\circ$ N, $\lambda = 160.595^\circ$ E) с глубинами до $H = 30$ км. Отметим, что ~98% таких сейсмических событий приходится на диапазон глубин до 5 км (рис. 2а). Анализируемый массив данных имеет представительность (уровень надежной регистрации) по энергетическому

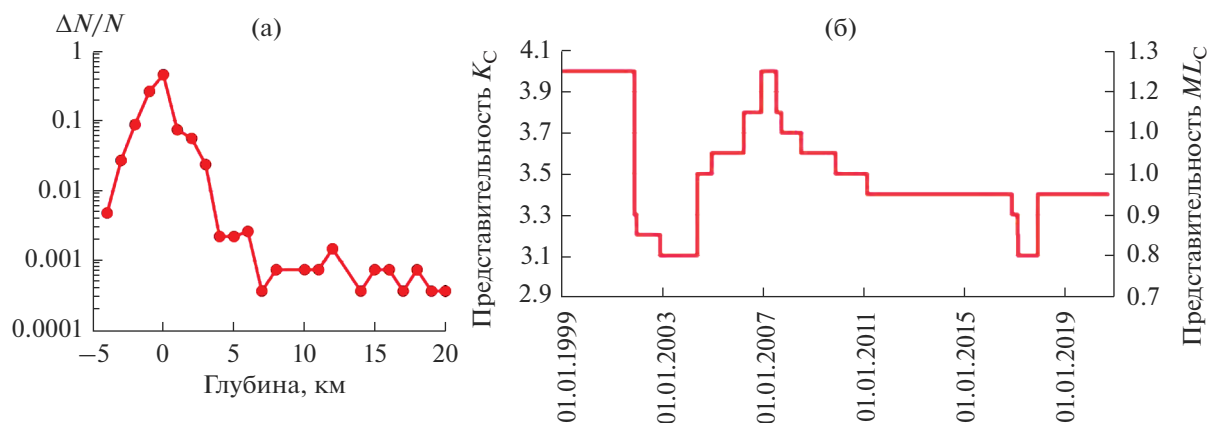


Рис. 2. Распределение землетрясений по глубине в цилиндрической области с радиусом $R = 6$ км от вершины вулкана Безымянный в 1999–2020 гг. ΔN – число землетрясений в единичном интервале глубин, N – общее число землетрясений в выборке (~ 3000) (а). Временной ход уровня надежной регистрации землетрясений по энергетическому классу K_C или по локальной магнитуде ML_C (б).

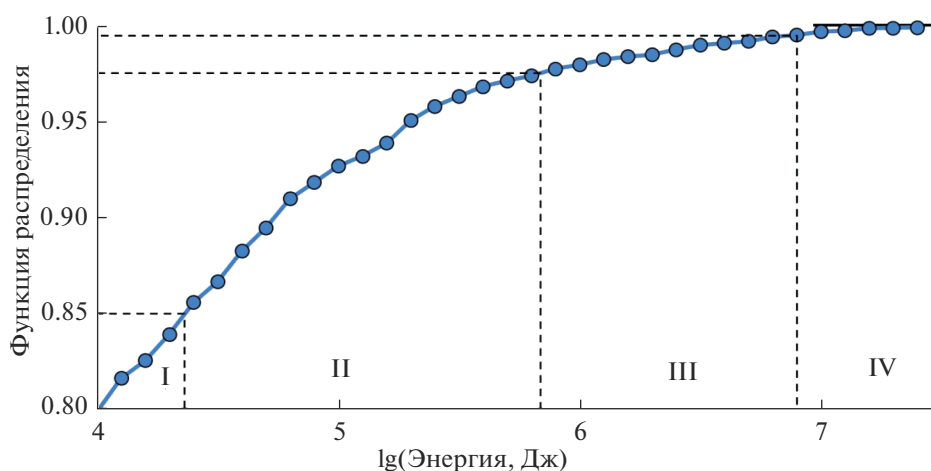


Рис. 3. Функция распределения сейсмической энергии, выделившейся в течение 5 сут. Значение функции распределения определяет уровень сейсмичности по шкале СОУС'09: I – фоновый средний, II – фоновый повышенный, III – высокий, IV – экстремально высокий.

классу (классификация С.А. Федотова [Федотов, 1972]) $K_C = 4.0$, что соответствует локальной магнитуде $ML_C = 1.25$) (см. рис. 26).

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В работе [Салтыков, 2016] предложен формализованный подход к вероятностному прогнозу на основе применения статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестник. Для выявления временных участков подготовки извержения используется функция-индикатор $U(t)$ и пороговый критерий, позволяющие формализовать процедуру выявления предвестника извержения. Принципиальным элементом методики является оценка вероятности реализа-

ции прогноза в зависимости от продолжительности прогноза и величины порогового критерия.

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, используя каталог землетрясений за 1999–2014 гг. (рис. 3).

2. В соответствии со шкалой СОУС'09 временной ход выделившейся сейсмической энергии преобразован во временной ход функции уровня сейсмичности $S(t)$, которая фактически является пересчетом соответствующих по времени t значений функции распределения F в линейный по отношению к шкале СОУС'09 масштаб:

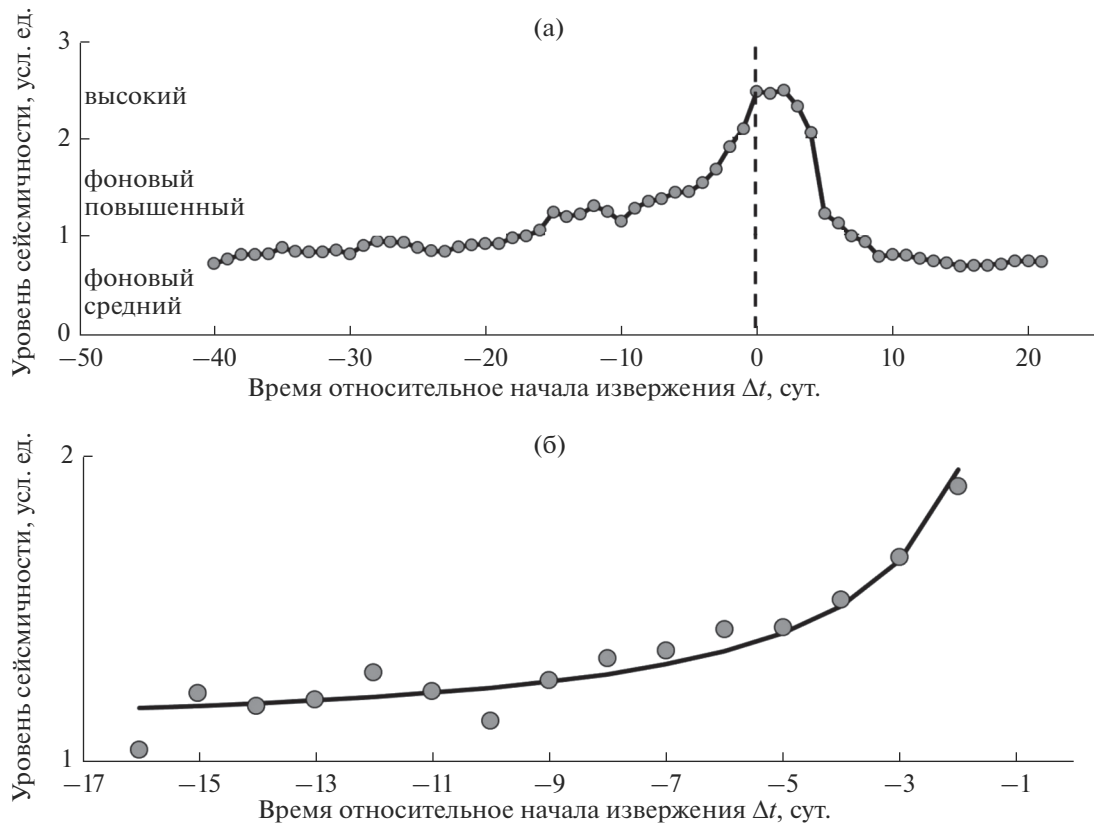


Рис. 4. Осредненное поведение уровня сейсмичности $S(t)$ по шкале СОУС'09 во временной окрестности извержения (а). Участок графика (см. рис. 4а), принятый в качестве осредненного предвестника извержения вулкана Безымянный (б).

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

$F = 0.85 \quad S = 1$ – граница фонового среднего и фонового повышенного уровня,

$F = 0.975 \quad S = 2$ – граница фонового повышенного и высокого уровня,

$F = 0.995 \quad S = 3$ – граница высокого и экстремально высокого уровня.

3. По данным об уровне сейсмичности $S(t)$ при извержениях 1999–2014 гг. был построен осредненный уровень сейсмичности $SS(\Delta t)$ в окрестности начала извержения (рис. 4а):

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

где Δt – время относительно начала i -го извержения t_0^i .

Аппроксимацию участка функции $SS(\Delta t)$ в диапазоне $\Delta t = -16 \dots -2$ сут гиперболой $SS_{hyp}(\Delta t)$ предлагается рассматривать, как эталон поведения уровня сейсмичности перед извержением (см. рис. 4б). Значения $\Delta t = -1-0$ сут являются бесполезными в целях прогноза из-за объективной задержки в получении каталога землетрясений и его анализе, поэтому они исключаются из дальнейшего рассмотрения.

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

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

Это позволяет получить индикатор U (рис. 5), характеризующий в определенном смысле сходство поведения уровня сейсмичности S и предполагаемого предвестника SS_{hyp} .

5. Применяется пороговый критерий: ситуация рассматривается как предвестниковая при превышении индикатором U порога u_i . Именно эти временные интервалы образуют время тревоги. Возможны три варианта взаиморасположения извержения и тревожного интервала.

1) Если извержение попадает в интервал, когда $U \geq u_i$, то оно считается имеющим предвестник. Важным нюансом здесь является отмена тревоги произошедшим извержением, то есть временной интервал непосредственно после извержения не включается во время тревоги, даже если $U \geq u_i$.

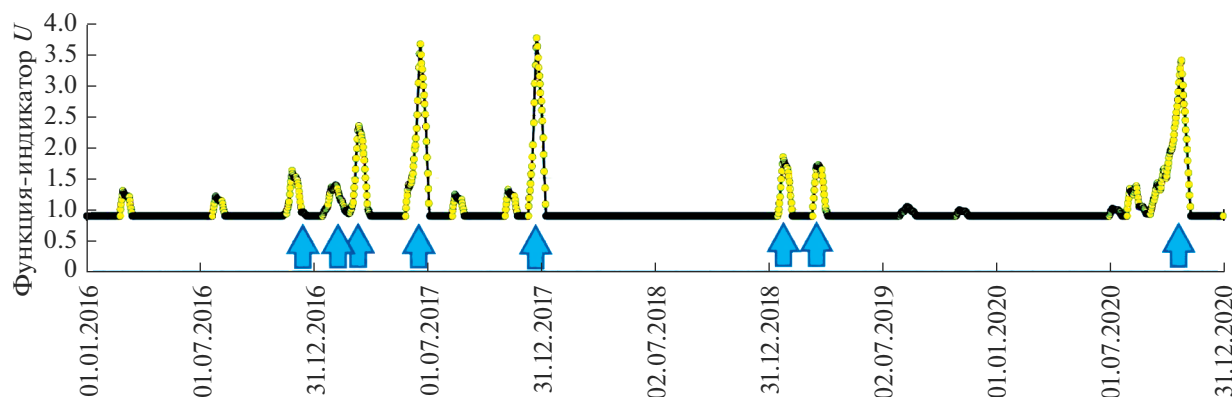


Рис. 5. Временной ход функции-индикатора U в 2015–2020 гг. Стрелками отмечены извержения вулкана Безымянный.

2) Если перед 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 не произошло извержение.

6. Помимо критерия подачи тревоги методика включает также определение таких параметров прогноза, как надежность предвестника (доля извержений “с предвестником” в общем числе извержений), достоверность предвестника (доля предвестников, завершившихся извержением, в общем числе предвестников), эффективность предвестника, вероятность реализации прогноза.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ 2015–2020 гг.

За шесть лет (2015–2020 гг.) произошло 8 извержений вулкана Безымянный (табл. 1, см. рис. 5). Перед всеми извержениями (кроме 11.12.2016, см. табл. 1, № 1) заблаговременно в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений были поданы предупреждения о возможном извержении Безымянного (см. табл. 1). Подготовка извержения 11.12.2016 стала успешным тестом на возможность использования разрабатываемой методики в реальном времени [Салтыков и др., 2018]. На рис. 6 показано отражение развития сейсмической активизации вулкана в превышениях пороговых значений функции-индикатора U . 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 прогнозных заключениях также приводились оценки относительной вероятности (введен термин “контрастность”) в двух вариан-

тах — нормированные на среднюю многолетнюю вероятность извержения и на вероятность извержения в отсутствие предвестника (рис. 7).

ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ

Ниже представлены данные (рис. 8), позволяющие оценить изменения в характеристиках методики в результате появления новых данных. Приведены результаты расчетов для всех имеющихся в настоящий момент данных — для 28 извержений вулкана Безымянный 1999–2020 гг. Для сопоставления приведены оценки по данным 1999–2014 гг., по [Салтыков, 2016].

Надежность предвестника R определяется как отношение числа извержений N_+ , для которых

Таблица 1. Даты извержений вулкана Безымянный и соответствующие 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

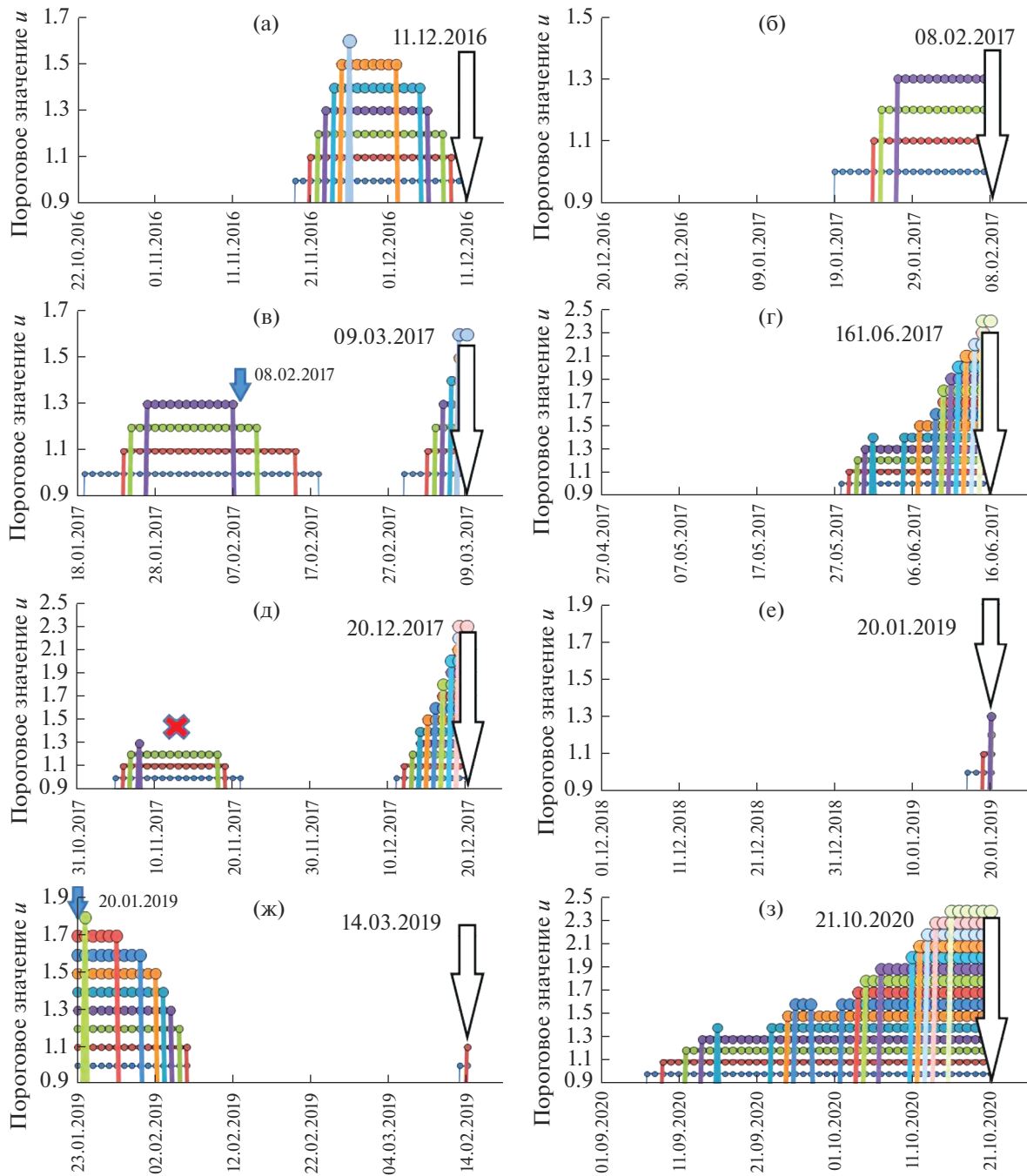


Рис. 6. Участки превышения функцией-индикатором U порогового значения u при подготовке извержений 2015–2020 гг. (см. табл. 1).

Большие стрелки соответствуют дате извержения. Знаком “ \times ” отмечен участок повышенных значений функции-индикатора U , не связанный с извержением (“ложная тревога”) (д). Малыми стрелками (в), (ж) отмечены извержения, соответствующие предыдущим (б), (е).

был выделен предвестник, к числу всех извержений N : $R = N_+/N$. Как показано на рис. 8а, абсолютному большинству извержений предшествует превышение функцией-индикатором U порогового значения $u = 1.0$. Существенное снижение величины R с увеличением вводимого порога u

показывает, что лишь небольшая часть извержений предваряется большими значениями предвестника: не более 1/3 извержений произошло при $U > u = 2.0$. Но относительная редкость больших значений U не означает бесполезность их мониторинга. Скорее, наоборот – этой ситуации со-

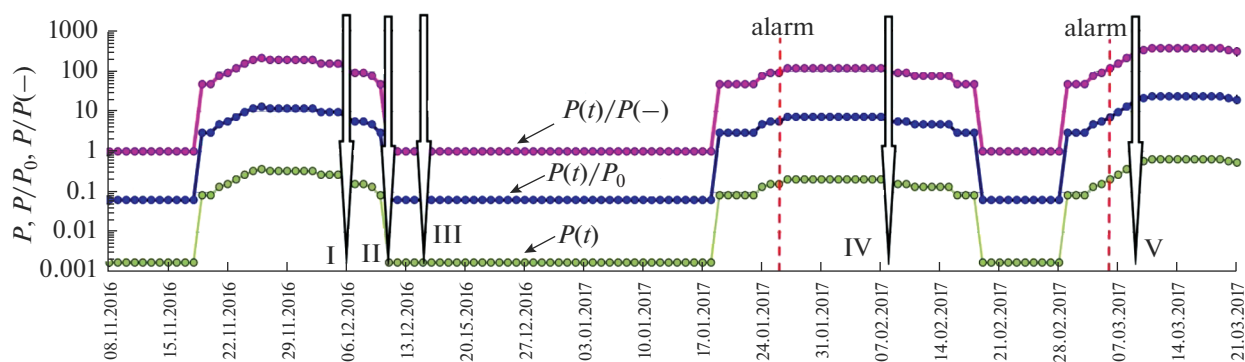


Рис. 7. Предвестниковые ситуации перед извержениями вулкана Безымянный в конце 2016—начале 2017 гг. P — вероятность извержения вулкана в течение 7 сут, P/P_0 — отношение вероятности извержения вулкана P к среднесуточной вероятности извержения в течение 7 сут, $P/P(-)$ — отношение вероятности извержения вулкана P к вероятности извержения в отсутствие рассматриваемого предвестника. Стрелками отмечены характерные стадии извержений: I — экструзивная фаза, II — эффузивная фаза, III — взрывное событие, IV — эффузивная фаза, V — взрывное событие. Пунктиры соответствуют времени подачи предупреждения.

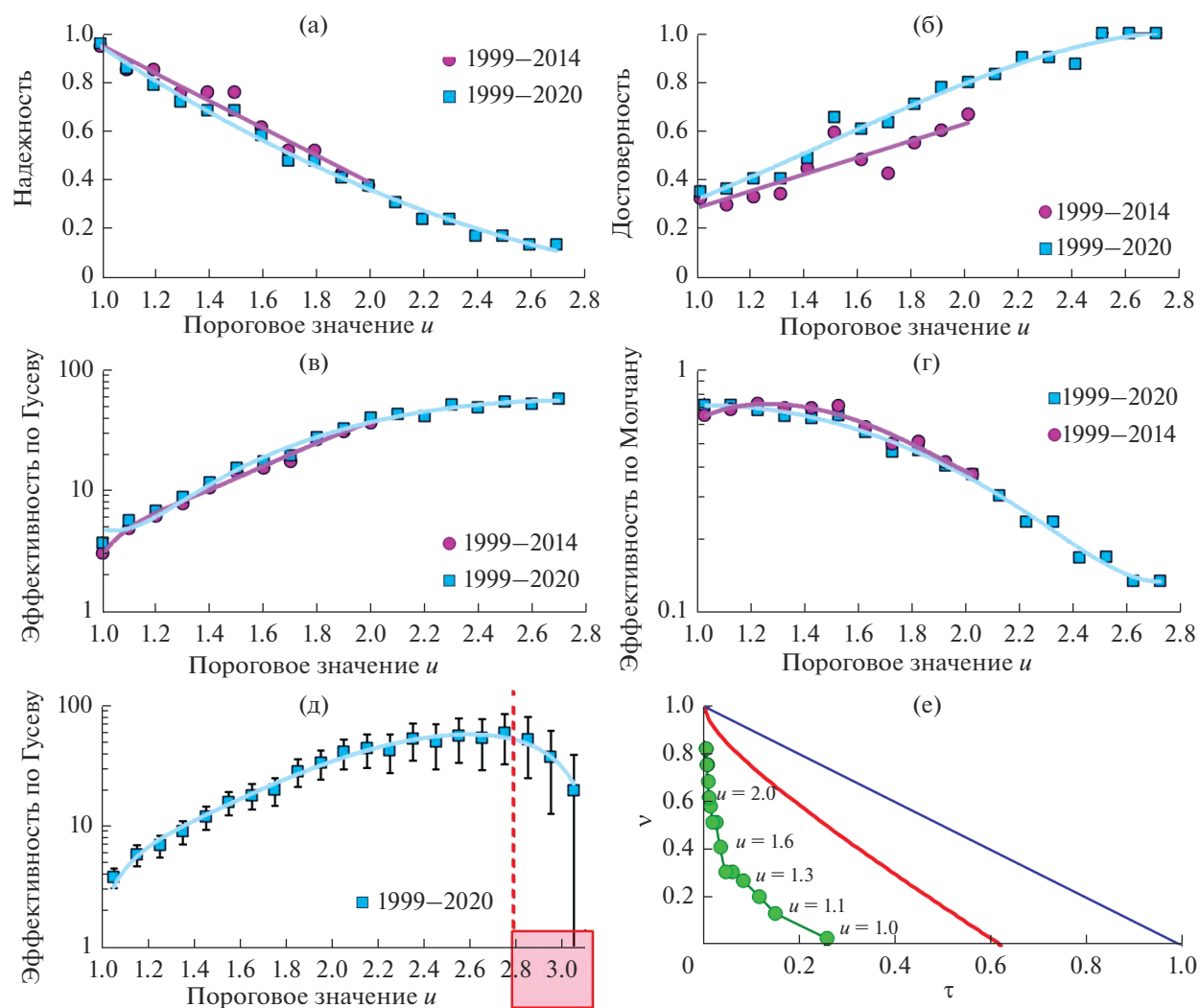


Рис. 8. Параметры методики прогноза извержений вулкана Безымянный. а–г — сопоставление величин параметров методики, полученных для 1999–2014 и 1999–2020 гг.; д — иллюстрация выбора диапазона используемых значений u ; е — диаграмма Молчана. Описание всех графиков см. в тексте.

ответствуют повышенные значения других параметров, как будет показано ниже.

Достоверность предвестника V определена как отношение числа предвестниковых аномалий $N(A_E)$ (т.е., в нашем случае, число участков превышений U порогового значения u_i , сопровождавшихся извержением) к общему числу выделенных аномалий $N(A)$: $V = N(A_E)/N(A)$. Лишь 1/3 предвестников с порогом $u = 1.0$ завершается извержением (см. рис. 8б), но при увеличении порога u величина этого параметра растет: в частности, при превышении предвестником порога $u = 2.0$ в 80% случаев происходит извержение, а при превышении $u = 2.5$ ложных тревог пока не наблюдалось.

Эффективность предвестника по методике А.А. Гусева J_G [Гусев, 1974] определяется для каждого конкретного порогового значения u по формуле:

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

где T – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемой методике; N_+ – количество случаев успешного прогноза за время T_{alarm} ; 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 оценку числа попавших в “тревожное” время случайным образом. При случайном угадывании эффективность J_G равна 1.

На рис. 8д указаны оценки эффективности J_G с их среднеквадратичными отклонениями в зависимости от используемого порога u . Начиная с $u = 2.8$, наблюдается снижение эффективности с одновременным увеличением относительной ошибки ее оценки. Вероятно, это связано не с природой предвестника, а с небольшим размером выборки событий. По этой причине для всех остальных графиков на рис. 8 сделано ограничение $u_{max} = 2.7$. Оценки делались исходя из гипергеометрического распределения N_+ при условии соответствия потока событий (в нашем случае извержений вулкана) распределению Пуассона [Гусев, 1974]. Гипотеза о пуассоновском характере потока извержений 1999–2020 гг. (что эквивалентно экспоненциальному распределению временных интервалов

между ними) не отклоняется при применении статистических критериев Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова [Кобзарь, 2006] на уровне значимости не хуже $\alpha = 0.1$.

Эффективность предвестника по методике Г.М. Молчана. Другим способом оценки эффективности является построение диаграммы Молчана для различных величин порога u . На диаграмме Г.М. Молчана [Molchan, 1990] (см. рис. 8е) абсцисса точки определяется как мера тревоги

$$\tau = \frac{T_{alarm}}{T},$$

а ордината – как доля пропусков 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 представляет интерес только нижняя ветвь этого доверительного интервала (см. рис. 8е, сплошная кривая при $\alpha = 0.01$). Для всего диапазона рассматриваемых значений порога u экспериментальные точки (τ, v) лежат ниже этой ветви, что интерпретируется как высокая степень надежности выявленной связи аномалий (превышение U порогового значения u) с происходящими извержениями вулкана Безымянный.

Эффективность предвестника J_M по методике Г.М. Молчана определяется как $J_M = 1 - v - \tau$. Для случайного прогноза $J_M = 0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) – $J_M = 1$. В контексте данной работы сами значения J_M не используются, ограничиваясь констатацией неслучайности связи рассматриваемого предвестника с извержениями, что иллюстрируется диаграммой Молчана (см. рис. 8е).

При дополнении базовых для прогностической методики исходных данных, соответствующих извержениям вулкана Безымянный 1999–2014 гг., новыми данными за 2015–2020 гг. параметры методики изменились незначительно. Это следует из сопоставления приведенных на рис. 8а–г значений параметров по [Салтыков, 2016] и с учетом более поздних данных. Различие значений достоверности (см. рис. 8б) связано с исправлением непринципиальной методической некорректности расчета в работе [Салтыков, 2016] и не является помехой при дальнейшем использовании методики в ее первоначальном виде почти без внесения изменений. Единственным изменением является расширение диапазона используемых значений порога u с $u = 1.0–2.0$ до $u = 1.0–2.7$.

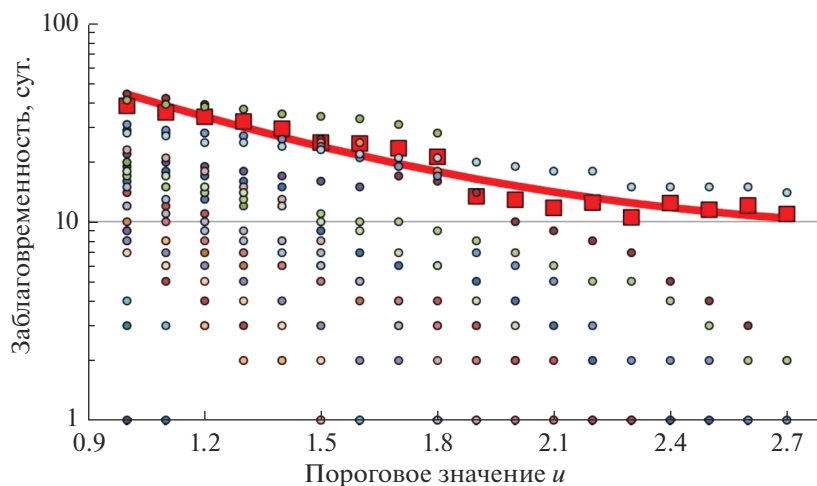


Рис. 9. Заблаговременность предвестника извержения вулкана Безымянный.

Квадраты – значения заблаговременности при достижении предвестником порогового значения u . Точки – длительность предвестника перед извержениями 1999–2020 гг.

Также новые данные не изменяют оценки вероятности реализации прогноза. Рассчитанные значения λ (параметра экспоненциального распределения временных интервалов между извержениями вулкана Безымянный) изменились с $\lambda = 0.0041 \text{ сут}^{-1}$ до $\lambda = 0.0035 \text{ сут}^{-1}$, при этом изменение λ не превышает его стандартного отклонения: $\sigma_\lambda = 0.0007\text{--}0.0009$. Как показано выше, эффективность J_G предвестника также не изменилась в существенной степени. Поэтому расчетные оценки вероятности реализации прогноза в течение времени t при превышении функцией-индикатором U порогового значения u , полученные по формуле $p(n > 0) = 1 - e^{-J_G \lambda t}$ [Салтыков, 2016] также значимо не изменятся.

Заблаговременность предвестника рассматривалась ранее [Салтыков, 2016] лишь в процессе оценки эффективности предвестника. Здесь предлагается дополнить прогностическую методику “заблаговременностью T ” как еще одним параметром, позволяющим оценить время реализации прогноза. Параметр “заблаговременность T ” вводится как временной интервал, начиная с появления предвестника (т.е. начиная с превышения функцией-индикатором U порогового значения u), в течение которого условная (условием здесь является обязательная реализация тревоги извержением) вероятность реализации прогноза p^* составляет 90%. Параметр рассчитывается на основе известных продолжительностей предвестника $t_i(u)$ (для каждого конкретного значения порога u) перед извержениями 1999–2020 гг. (рис. 9). Для значений $u = 1.0\text{--}2.3$, согласно критерию Колмо-

горова-Смирнова, гипотеза об экспоненциальном распределении $t_i(u)$ не отклоняется¹. Тогда, задавая вероятность p^* , можно оценить величину заблаговременности T : $T(u) = \ln(1 - p^*) \overline{t_i(u)}$, где $\overline{t_i(u)}$ – средняя продолжительность предвестника при заданном пороге u . Аппроксимация полученных значений $T(u)$ (кривая, см. рис. 9) формирует номограмму, предполагаемую к использованию при дальнейшем прогнозировании извержений вулкана Безымянный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная ранее [Салтыков, 2016] полностью формализованная методика прогнозирования извержения вулкана Безымянный на основе статистической оценки уровня сейсмичности “СОУС’09” показала свою работоспособность в режиме реального времени: выявлена подготовка всех восьми извержений вулкана Безымянный в 2015–2020 гг.

В 2017–2020 гг. в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений заблаговременно были поданы предупреждения о возможности извержения вулкана Безымянный с указанием вероятности реализа-

¹ Уровень значимости α для порогов u в диапазоне от 1.2 до 2.3 не хуже 0.25, для $u = 1.1$ $\alpha = 0.05$, для $u = 1.0$ $\alpha = 0.01$. Применение критерия для более высоких значений порога в настоящее время проблематично из-за недостаточного количества прецедентов. Снижение значимости при $u = 1.0\text{--}1.1$ связывается с неустойчивостью предвестника при малых величинах порога u .

ции прогноза в зависимости от продолжительности тревоги.

Перерасчет всех характеристик методики показал их устойчивость при добавлении новых данных, что позволяет использовать методику и далее без изменений ключевых параметров.

Методика прогнозирования дополнена новым параметром – заблаговременность T , позволяющим формально оценить время ожидания реализации прогноза.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность рецензентам за доброжелательные отзывы о представленной статье.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

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://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный: новый эруптивный цикл – 50 лет активности // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2006. № 1. Вып. 7. С. 10–13.
- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др.* Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 168–194.
- Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т.* Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянного // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С. 3–13.
- 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. Наука о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 98–119.
- Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
- Малышев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. 262 с.
- Малышев А.И.* Направленный взрыв вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (вопросы интерпретации) // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 46–53.
- Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI в. // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0203030620010058>
- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- 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. <https://doi.org/10.21455/gr2016.3-4>
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Первое применение в режиме реального времени методики вероятностного прогноза извержений вулкана Безымянный // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 49–54. <https://doi.org/10.21455/gr2018.1-4>
- 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. 117 с.
- 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. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке // По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- 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 // Bull. of Volcanology. 2007. V. 69. № 7. P. 701–740.
- Girina O.A.* Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956–2010 // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2013. V. 263. P. 22–41.
- Molchan G.M.* Strategies in strong earthquake prediction // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 61. P. 84–98.
- Thelen W., West M., Senyukov S.* Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezymianny Volcano, Russia // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2010. V. 194. № 4. P. 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.05.010>
- West M.E.* Recent eruptions at Bezymianny volcano – a seismological comparison // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2013. V. 263. P. 42–57.

Forecasting of Bezmyanny Volcano Eruptions (Kamchatka) 2015–2020: Results of Using the Methodology Based on SESL'09, Verification of Parameters

V. A. Saltykov*

*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: saltkam@mail.ru*

One of the most dangerous volcanic objects in Russia is Bezmyanny volcano (Kamchatka). In recent decades, Bezmyanny volcano has experienced an average of 1–2 short-term but strong explosive-effusive eruptions per year. It is likely that the most reliable source of information for identifying a precursor situation for the Bezmyanny volcano is seismicity, continuous data on which are provided by the Kamchatka seismic monitoring system. The formalized methodology for predicting the eruption of Bezmyanny volcano, developed by author earlier, based on the statistical estimation of the level of seismicity “SESL'09”, has shown its operability in real time: the preparation of all eight eruptions of Bezmyanny volcano in 2015–2020 was revealed. The recalculation of all characteristics of the methodology (efficiency, reliability, validity) showed their stability when new data are added. The forecasting technique has been supplemented with a new parameter – “lead time”, which makes it possible to formally estimate the waiting time for the implementation of the forecast.

Keywords: precursor, forecast, earthquake, eruption, Kamchatka, Bezmyanny volcano, SESL'09