



УДК 551.21

В. В. Иванов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683 006; e-mail: victor@kscnet.ru*

## **Кратко — и среднесрочные сейсмологические предвестники катастрофических извержений вулканов Безымянный и Шивелуч на Камчатке**

В работе проанализированы сейсмологические предвестники для трёх существенно различных извержений андезитовых вулканов на Камчатке: двух самых больших и опасных извержений Шивелуча и Безымянного в XX столетии, а также для умеренного извержения Шивелуча в 2001 г. Показано, что основные характерные особенности предвестников этих трёх извержений принципиально различны и вероятно представляют собой три различных класса поведения подобного рода систем. Дается возможное объяснение наблюдаемым особенностям сейсмичности и возможному механизму её образования для указанных различных типов. Показано, что определение моментов начала внезапных пароксизмальных фаз больших извержений андезитовых вулканов, вызванных обрушениями их построек, в настоящее время по сейсмологическим данным проблематично. Предлагается один из возможных сейсмологических критериев различения подготовки больших от умеренных извержений андезитовых вулканов. Намечаются пути совершенствования методик прогнозирования умеренных извержений андезитовых вулканов.

### **Введение**

**Проблема прогноза вулканических извержений и опасность извержений с «кислым» составом вулканических продуктов.** Несмотря на развитие в последние годы новых видов и систем наблюдения, обработки данных, изучения глубинного строения, свойств горных пород, моделирования процессов и отдельные успехи, прогнозирование вулканических извержений и сейчас — серьезная научная и техническая проблема, пока являющаяся нерешенной, как в мире (Sparks, 2003), так и на Камчатке (Иванов, 2013). Особенно это касается крупных взрывных извержений вулканов с кислым составом продуктов, которые наиболее опасны. Вязкость кислых магм обычно на несколько порядков больше, чем вязкость основных магм. При малом газосодержании такие магмы на поверхности земли образуют огромные экструзивные купола, состоящие из блоков, реже короткие, мощные лавовые потоки. Напротив, при большом содержании газов такие магмы у поверхности земли ведут себя наподобие взрывчатых веществ, поскольку в силу большой вязкости при их подъёме к поверхности земли способны сохранять в пузырьках выделившихся из них магматических газов огромные избыточные давления, характерные для глубин первые километры. В напряженной ячеистой структуре высоковязкой магмы с большим избыточным давлением газов в ячейках, при сбросе давления могут развиваться волны дробления, в определенном смысле напоминающие волны детонации в химическом взрывчатом веществе (Алидибиров, 1987). Образующиеся

при разрушении магмы продукты формируют высокие плинианские колонны, протяжённые пирокластические потоки и др. проявления эксплозивного вулканизма, представляющие значительную опасность для населения и авиации (Алидибиров, 1987; Горшков, Богоявленская, 1965).

Подъём высоковязких кислых магм по магматическим каналам перед извержением порождает во вмещающей среде значительные избыточные напряжения, которые вызывают растрескивание горных пород. Возникают предваряющие вулканические землетрясения, которые являются главным индикатором внедрения магм, что широко используется для прогнозирования (Токарев, 1966; McNutt, 1996). Крупные внедрения таких магм при определённых топографических и тектонических условиях могут вызывать потерю устойчивости постройки вулкана и её внезапное обрушение (Мелекесцев, Брайцева, 1984). Мы полагаем, что этому способствует пониженная прочность таких построек, поскольку они обычно являются совокупностью экструзивных куполов, каждый из которых состоит из отдельных блоков, а также из свежей, неконсолидированной пирокластике. Такие обрушения представляют значительную опасность. С другой стороны, обрушение постройки вулкана вызывает уменьшение мощности покрывающих магму вышележащих горных пород и снижение избыточного давления в магматической системе. Быстрая декомпрессия поднимающейся газонасыщенной вязкой магмы вызывает развитие в ней волн дробления, т. е. пароксизмальный взрыв (Алидибиров, 1987).

Вот почему крупные извержения кислых вулканов наиболее опасны, а развитие систем и методов их прогнозирования представляет собой важную практическую задачу.

Краткосрочное прогнозирование извержений предполагает выявление их предвестников в различных геофизических, геохимических, геодинамических и т. д. полях и надёжных закономерностей в их поведении, что является основой для создания соответствующих методик. Главным методом мониторинга и прогноза таких извержений является всепогодный дистанционный сейсмологический метод (Токарев, 1977; McNutt, 1996). Тем не менее, внутренне присущая неопределённость в поведении магматических систем, создаёт значительные трудности в их прогнозировании (Sparks, 2003). Особенно это касается неопределённости моментов пароксизмальных фаз извержений, инициированных крупномасштабными обрушениями построек вулканов, которые происходят внезапно.

В XX столетии на Камчатке произошло два больших (с объёмом изверженных продуктов  $1 < V < 10 \text{ км}^3$ ) пароксизмальных извержения андезитовых вулканов, которые изучались инструментальными методами — Безымянного в 1955–1956 гг. и Шивелуча в 1964 г. Кроме этого, имели место более двух десятков более слабых межпароксизмальных извержений Безымянного, Шивелуча, Карымского и Кизимена. В данной работе мы ограничились анализом сейсмологических предвестников всего трёх извержений — двух упомянутых пароксизмальных и межпароксизмального извержения Шивелуча, начавшегося в 2001 г. Мы полагаем, что они дают представление о трёх основных типах извержений таких вулканов и трёх классов их сейсмологических предвестников. Извержение Шивелуча в 2001 г. было успешно спрогнозировано, его предвестники хорошо изучены, что позволяет, на наш взгляд, по — новому проинтерпретировать полученный ранее материал.

**Описание извержений.** Упомянутые извержения андезитовых вулканов существенно различались как по характеру, так и по масштабу. Большие извержения Безымянного 1955–1956 гг. и Шивелуча и Шивелуча 12 ноября 1964 г. включали пароксизмальные фазы с образованием крупномасштабных обломочных лавин и пирокластических потоков (Белоусов, Белоусова, 1995 и 1998; Горшков, Богоявленская, 1965; Горшков, Дубик, 1969). Шлейфы извержений достигали абсолютных высот 35 и 15 км, соответственно, что соответствует классу катастрофических извержений с эксплозивным индексом VEI = 5 и 3–4, соответственно (Newhall, Self, 1982). Извержение Безымянного в 1955–1956 гг. произошло после почти тысячелетнего интервала покоя. Оно включало длительную (четырёхмесячную) начальную экструзивно — эксплозивную фазу и пароксизмальный, очень резкий, кратковременный «направленный взрыв» 30.III.1956 (Горшков, Бого-

явленская, 1975), вызванный крупномасштабным обрушением постройки вулкана (Белоусов, Белоусова, 1998; Богоявленская и др., 1985). Почти сразу после взрыва в образовавшемся крупном кратере начался рост экструзивного лавового купола (Горшков, Богоявленская, 1975). Напротив, извержение Шивелуча 12 ноября 1964 г. произошло после примерно 20 летнего интервала покоя. Хотя оно также было инициировано крупномасштабным обрушением постройки (Белоусов, Белоусова, 1995; Богоявленская и др., 1985), однако произошло без предваряющей экструзивной или эксплозивной фаз и включало в себя лишь короткое (около 70 мин.) пароксизмальное извержение (Токарев, 1967). В отличие от извержения Безымянного, извержение Шивелуча начиналось плавно (Токарев, 1967; Фирстов, 1996). После окончания извержения активность в образовавшемся огромном кратере не возобновлялась в течение 16 лет, вплоть до 1980 г.

Умеренное извержение Шивелуча, начавшееся в 2001 г. было примерно на порядок меньше по массе изверженных продуктов, чем описываемые выше извержения. Начальная, преимущественно экструзивная фаза продолжалась около 20 — суток. Последовавшая за ней сильная взрывная фаза 19–21 мая 2001 г. включала главное извержение 19 мая с VEI = 3–4, которое развивалось плавно и продолжалось около 6 час. В этом принципиальное отличие её от пароксизмальных фаз упомянутых двух катастрофических извержений. Мы полагаем, что эта фаза была вызвана подходом к поверхности земли большой порции газонасыщенной магмы, она не была инициирована обрушениями постройки вулкана (Иванов, 2013).

**Обзор результатов изучения сейсмичности в связи с рассматриваемыми извержениями.** На основании изучения сейсмичности и активности вулкана Г. С. Горшков выделил основные фазы для извержения вулкана Безымянного в 1955–1956 гг. и привёл описание его пароксизмальной фазы 30 марта 1956 г. (Горшков, Богоявленская, 1975). Самое сильное событие роя вулканических землетрясений произошло на спаде сейсмической активности и по времени совпало с пароксизмальным «направленным взрывом» 30 марта. Более детальное изучение предвестников этого и последующих более слабых извержений Безымянного было проведено П. И. Токаревым (1966, 1981; Tokarev, 1985). Им было показано, что условные деформации перед этими извержениями нарастали по экспоненциальному закону. Для определения времени начала взрывных фаз слабых и умеренных извержений в 1959–1961 гг. он аппроксимировал условные деформации обратным степенным (гиперболическим) законом, поскольку последний имеет вертикальную асимптоту, что позволяет оценивать время начала извержения. Однако, по нашему мнению, применение этого удобного приема затушевывало физическую природу подготовки такого рода извержений. Кстати, в от-

личие от первых умеренных извержений вулкана, условные деформации для его последующих извержений не показывали чётких закономерностей и указанные аппроксимации для них применить было невозможно. Поэтому в настоящее время речь идёт не о методике, а лишь об «алгоритме» прогноза умеренных извержений этого вулкана (Сенюков, 2013).

Сейсмологические предвестники пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 12.XI.1964 приведены в работе П. И. Токарева (1967). Предваряющий рой землетрясений начался за 10,5 мес. до извержения, причём основные события произошли в последние 10 суток до его начала, а самое сильное событие роя по времени совпало с началом извержения. Нарастание условных деформаций для землетрясений происходило по гиперболическому закону. После окончания извержения сейсмичность быстро снизилась до фонового уровня. Судя по графику амплитуд сопровождающего вулканического дрожания, извержение продолжалось около 70 минут, оно начиналось плавно, перед самым концом его интенсивность достигла максимума и затем извержение прекратилось. Важно, что в интервале времени  $\pm 1,5$  мес. от начала извержения в районе северной группы вулканов Камчатки на глубинах 70–100 и более километров в радиусе до 300 км от вулкана было зафиксировано 8 сильных землетрясений с максимальным энергетическим классом  $K_S = 12$  ( $M \sim 5$ ). Это указывает на значительную активизацию тектонических процессов в верхней мантии Камчатки, связанную с этим извержением. Реконструкция динамики этого извержения по сейсмологическим и акустическим данным приведена в работе П. П. Фирстова (1996).

В работе (Хубуная и др., 1995) исследованы сейсмологические предвестники умеренного извержения вулкана Шивелуч в 1993–1994 гг. Эти данные послужили основой для успешного краткосрочного прогноза по сейсмологическим данным следующего умеренного извержения этого вулкана, которое началось в 2001 г. Описание этого извержения и его сейсмичности дано в работах (Федотов и др., 2001; Иванов, 2013).

В работе В. М. Зобина были даны оценки магнитуд и механизмов очагов для самых сильных вулканических землетрясений вулкана Шивелуч в 1964 г. (1979). В книге этого же автора дан обзор сейсмичности ряда больших и умеренных извержений вулканов Безымянного, Шивелуча и др. андезитовых вулканов (2013). Однако там не приведён критический анализ представленных материалов.

Детальное сопоставление сейсмологических предвестников указанных трёх извержений андезитовых вулканов на Камчатке позволит, по нашему мнению, выявить новые закономерности, которые могут быть полезны для понимания процессов подъёма магм и прогнозирования опасных вулканических проявлений. Это является целью данной работы. Ра-

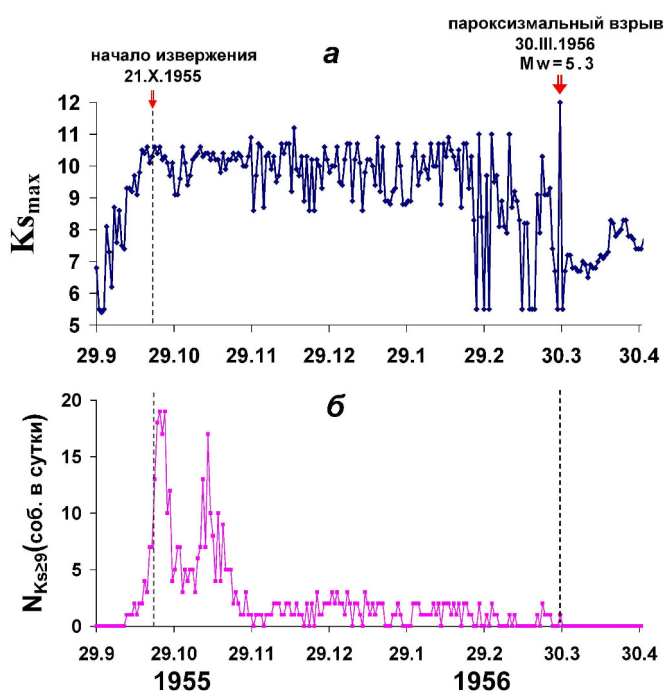
нее подобная работа для извержений андезитовых вулканов разного масштаба и характера на Камчатке не проводилась.

### **Сейсмологические предвестники извержений вулканов Безымянного в 1955–1956 гг. и Шивелуча (1964, 2001 гг.)**

**Типы вулканических землетрясений и исходные данные.** Все три извержения предварялись и сопровождалась роями вулканических землетрясений I–III типов по классификации П. И. Токарева (Горшков, Богоявленская, 1965; Иванов, 2013; Токарев, 1981). Эти землетрясения следует отнести к т.н. «сдвиговым событиям», что объясняется следующими соображениями. Наиболее сильные землетрясения предваряющих роев вулканических землетрясений обычно имеют квадрантное распределение первых вступлений объёмных волн. В записях большинства землетрясений такого рода имеются явно выраженные S-волны. Поэтому можно полагать, что в их очагах значительный вклад имеют сдвиговые компоненты (Зобин, 1979). Многие вулканические землетрясения по форме записи неразличимы от обычных тектонических землетрясений; Г. С. Горшков называл такие события «вулкано-тектоническими». В этом их принципиальное отличие от вулканических землетрясений IV типа и вулканического дрожания в классификации П. И. Токарева, которые связаны с вулканическими взрывами, образованием пирокластических потоков и т. д. (1966). В данной работе будут анализироваться лишь землетрясения I–III типов. Для изучения предвестников привлекались данные из каталогов вулканических землетрясений (Токарев, 1981), а также из каталогов КФ ГС РАН, в которых для характеристики сейсмической энергии событий используется энергетический класс по S-волнам  $K_S$  (Федотов, 1972). Магнитуды самых сильных землетрясений брались из работы (Зобин, 2011).

**Сейсмичность в связи с извержением вулкана Безымянного в 1955–1956 гг.** имела следующие характерные особенности (рис. 1). Явный рой вулканических землетрясений начался примерно за месяц до начала извержения. Частота и максимальный за сутки энергетический класс событий быстро нарастали и достигли максимума в конце октября (Горшков и Богоявленская, 1965). С началом извержения 21 октября 1955 г. (его пепловой фазы) частота землетрясений уменьшалась нерегулярным образом, что вероятно отражало снижение избыточного давления в магматической системе вулкана вследствие её частичного открытия. Время здесь и далее мировое

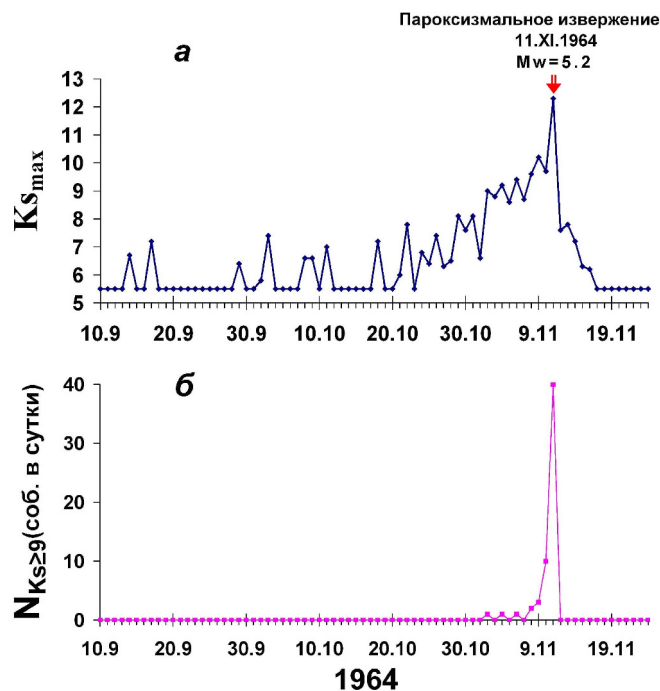
(UTC = местное – 12 час). К моменту предполагаемого появления первой лавы (началу роста экстрезивного лавового купола) ежедневная частота землетрясений резко (примерно на порядок) уменьшилась по сравнению с её максимальным значением (рис. 1б). По данным (Горшков, Богоявленская, 1956) рост купола начался в конце ноября 1955 г. Веро-



**Рис. 1.** Ежесуточные параметры сейсмичности на вулкане Безымянный в 1955–1956 гг.: а) максимальный энергетический класс вулканических землетрясений II–III типов ( $K_{S_{max}}$ ), б) число землетрясений с  $K_S \geq 9,0$ . Время UTC = местное – 12 час.

ятно, снижение произошло вследствие облегчения подъёма свежей андезитовой магмы в центральном питающем канале вулкана (полного открытия его магматической системы) в результате образования большого взрывного кратера на вершине вулкана (Горшков, Богоявленская, 1965). Впрочем, максимальный за сутки энергетический класс событий оставался по – прежнему высоким (рис. 1а). Распределение месячных чисел вулканических землетрясений роя с  $K_S \geq 9,0$  было следующим: с 20 октября – по 20 ноября 1955 г. – 280 событий, в декабре 1955 г. – феврале 1957 г. от 36 до 42 событий в месяц, с 1 по 29 марта 1956 г. – всего 13 событий. т. о. пароксизмальная фаза извержения 30 марта 1956 г. произошла на постепенном спаде сейсмической активности. Тем не менее, несмотря на сравнительно низкий уровень сейсмической активности, на этом фоне 30 марта 1956 г. произошло самое сильное землетрясение роя с  $M_w = 5,3$ . Его энергия составила около 20% от суммарной энергии всех остальных событий роя. После пароксизмального взрыва на вулкане отмечались многочисленные более слабые землетрясения II–III типов с  $K_S \leq 8,5$ , которые очевидно сопровождали рост нового экструзивного лавового купола в огромном обвальном-взрывном кратере, образовавшемся 30 марта (рис. 1).

**Сейсмичность в связи с извержением Шивелуча в 1964 г.** Напротив, перед пароксизмальным извержением вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. (время

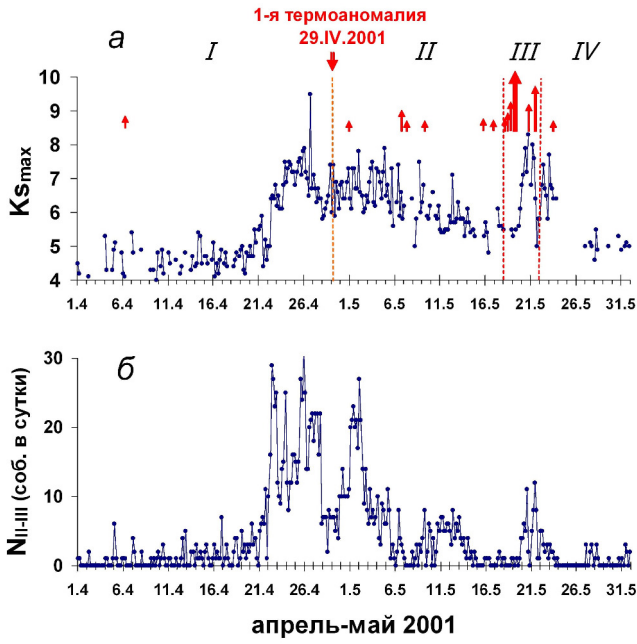


**Рис. 2.** Ежесуточные параметры сейсмичности на вулкане Шивелуч в сентябре – ноябре 1964 г. Время UTC = местное – 12 час.

UTC) ежесуточные величины энергетических классов и чисел вулканических землетрясений быстро нарастали, причём с ускорением. Из 58 событий с  $K_S \geq 9,0$  предваряющего роя 50 землетрясений произошло в течение двух суток до извержения (рис. 2). После извержения вулканическая активность и вулканические землетрясения полностью прекратились, что вероятно отражало полную разгрузку магматической системы вулкана, вызванную извержением.

**Сейсмичность в связи с извержением Шивелуча в 2001 г.** Сейсмический режим в связи с извержением Шивелуча, начавшимся 29 апреля 2001 г., показан на рис. 3. Его особенности в целом повторяли особенности режима вулкана Безымянный в 1955–1956 гг. Отличия от случая Безымянного были следующими: а) на 2 порядка меньшая энергия землетрясений роя и в несколько раз меньшая его продолжительность; б) плавное развитие извержений главной взрывной фазы 19–21 мая 2001 г., причём в начальной их части, как правило, не отмечалось сильных вулкано-тектонических землетрясений.

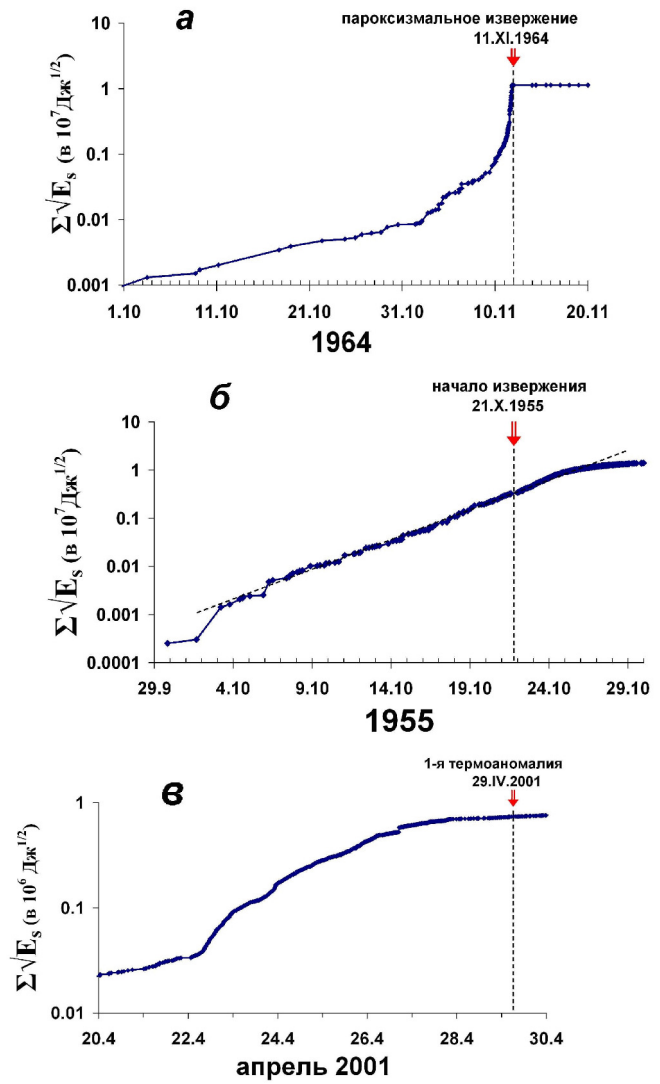
**Сравнение условных деформаций для вулканических землетрясений, предварявших извержения.** На рис. 4 приведены графики развития условных деформаций, связанных с землетрясениями трёх роев: предварявших пароксизмальное извержение Шивелуча 12 ноября 1964 г., умеренное пепловое извержение Безымянного, начавшееся 21.X. 1956 и уме-



**Рис. 3.** Сейсмический режим вулкана Шивелуч в апреле — мае 2001 г.: а и б — максимальный энергетический класс вулканических землетрясений II-III типов ( $K_{S,max}$ ) (а) и их количества ( $N_{II-III}$ ) по четырехчасовым интервалам (б). Фазы: I — подготовклизвержения, II — начальная экструзивная, III — главная эксплозивная, IV — умеренного экструзивно-эксплозивного извержения. Стрелками показаны отдельные взрывы или взрывные извержения. Появление термоаномалии 29 апреля 2001 г. по спутниковым данным считалось началом экструзивного этапа извержения. Время UTC = камчатское летнее -13 час. Построено по данным каталога землетрясений КФ ГС РАН.

ренное извержение вулкана Шивелуч в 2001 г. Перед пароксизмальным извержением вулкана Шивелуч условные деформации вначале увеличивались по экспоненциальному закону, который в полулогарифмическом масштабе аппроксимируется линейной функцией (рис. 4а). С 4 ноября 1964 г. они нарастали катастрофическим образом, который можно аппроксимировать обратным степенным (гиперболическим) законом с асимптотой, совпадающей с моментом извержения 11 ноября 1956 г. Анализируя в оперативном варианте параметры сейсмического режима для такого вида извержений можно прогнозировать время их начала (Токарев, 1967). После пароксизмального извержения график застабилизировался, что отражает резкое уменьшение сейсмичности, очевидно, в результате полной разгрузки магматической системы, вызванной извержением.

Напротив, условные деформации перед началом пепловой фазы извержения вулкана Безымянный 21 октября 1955 г. нарастали значительно медленнее по экспоненциальному закону, который сменился на монотонно нарастающий более слабый закон в связи с общей тенденцией снижения уровня сейсмичности. Поскольку экспоненциальная функция



**Рис. 4.** Графики условных деформаций землетрясений, предвалявших извержения вулканов Шивелуча в 1964 г. (а), Безымянного в 1956 г. (б) и Шивелуча в 2001 г. (в). Время UTC. Стрелками на графиках показаны начала извержений: пароксизмального Шивелуча 11 ноября 1964 г., начальной пепловой фазы Безымянного 21 октября 1955 г. и начальной экструзивной фазы Шивелуча 29 апреля 2001 г., определённой по появлению на нём термоаномалии.

неограниченно нарастает и не имеет асимптоты, прогнозирование времени начала таких извержений путём анализа графика условных деформаций невозможно.

Самое медленное, примерно по линейному закону нарастание условных деформаций имело место перед началом умеренного извержения вулкана Шивелуч в 2001 г. В полулогарифмическом масштабе оно имело вид выполаживающейся кривой (рис. 4в). Величины условных деформаций для этого извержения были примерно на порядок меньше, чем для пароксизмальных извержений.



### Выводы и возможная интерпретация сейсмологических данных

1. Пароксизмальные взрывы на Безымянном 30.III.1956 и Шивелуче 12.XI.1964 были связаны с крупномасштабными внедрениями свежей газонасыщенной магмы и инициированы крупными обрушениями их построек, что привело к снижению нагрузки, уменьшению избыточного давления в их магматических питающих системах, развитию в них волн дробления и к пароксизмальным взрывам. В свою очередь, обрушения построек вулканов были спровоцированы нарушением их сплошности в результате растрескивания из — за указанный внедрений, что сопровождалось самыми сильными вулcano-тектоническими землетрясениями с магнитудами  $M_w = 5,2 - 5,3$ . Радиус очагов таких землетрясений оценивается в первые километры (Зобин, 1979; Токарев, 1967). В силу случайности моментов обрушения крупных построек андезитовых вулканов, прогнозирование вызванных ими сильных взрывных или пароксизмальных фаз пока не представляется возможным. Поэтому в пределах определённых зон вокруг вулканов такие извержения представляют большую опасность.

2. Вид графиков условных деформаций, предвещающих вулканических землетрясений для рассмотренных трёх извержений был принципиально разным. Самое «агрессивное», гиперболическое поведение было связано с подготовкой кратковременного извержения Шивелуча 12.XI.1964. Менее «агрессивно», по экспоненциальному закону нарастали условные деформации перед началом пеплового извержения Шивелуча 21 октября 1955 г. Достаточно спокойно, по линейному закону происходил рост условных деформаций перед началом экстремальной фазы умеренного извержения Шивелуча в 2001 г. Отсюда можно сделать вывод, что скорость «сеймотектонического движения» перед указанными тремя извержениями также нарастала принципиально по-разному. Можно предположить, что такое различие было связано с различным массовым расходом интрузий магмы для этих извержений — максимальной для вулкана Шивелуч в 1964 г., умеренной для Безымянного в 1955 г. и сравнительно небольшой перед извержением Шивелуча в 2001 г.

3. На основании вышесказанного можно полагать, что большие (с объёмом изверженных продуктов  $1 < V < 10 \text{ км}^3$ ) извержения на андезитовых вулканах Камчатки будут предвещаться мощными роями вулканических землетрясений I–III типов. Оперативный анализ характера нарастания условных деформаций землетрясений может быть полезен для решения вопросов: а) следует ли ожидать большое извержение или нет?; б) следует ли ожидать начальную экстремально-эксплозивную фазу или сразу пароксизмальный взрыв?

4. Самое сильное вулканическое землетрясение на Безымянном вулкане 30.III.1956 произошло после значительного спада активности роя, что представ-

ляется нелогичным. Можно предположить, что это землетрясение было вызвано снижением прочности вмещающих магму горных пород в результате их насыщения летучими, отделившимися от более свежих и более газонасыщенных порций магмы, которые поступили в этот момент к поверхности земли. Эти порции сменили дегазированные порции, сформировавшие новый экстремальный купол, образовавшийся на вершине вулкана в интервале 20.XI.1955–29.III.1956.

5. В отличие от случая Безымянного 30.III.1956, обрушение постройки и пароксизмальный взрыв на Шивелуче 12.XI.1964 произошёл, минуя начальную экстремально-эксплозивную фазу. Можно предположить, что это произошло вследствие чрезвычайно высокого массового расхода магматических внедрений, что сравнительно быстро привело к катастрофическому разрушению постройки вулкана, её обрушению, быстрой декомпрессии газонасыщенной магмы и к взрыву. Можно полагать, что такое беспрецедентное внедрение было вызвано аномальными тектоническими условиями, что выразилось в значительной сейсмической активизации в верхней мантии в районе северной группы вулканов в радиусе до 300 км от вулкана (Токарев, 1967).

6. Постепенное снижение со временем уровня сейсмической активности перед катастрофическим направленным взрывом на Безымянном 30.III.1956 и главной взрывной фазой на Шивелуче 19.V.2001, по нашему мнению, можно объяснить влиянием следующих двух факторов: а) улучшением путей поступления магмы к поверхности земли, т. е. постепенным открытием магматических систем, что приводило к снижению избыточного давления в них; б) снижением нагрузки на вмещающую среду в результате поступления более горячих и менее вязких порций магмы.

7. Значительную опасность в настоящее время на Шивелуче представляют сильные взрывные или обвально-взрывные фазы его умеренных извержений. В отличие от извержения 2001 г., которое произошло после сравнительно длительного (7 летнего) интервала покоя, рост внутрикратерного купола вулкана сейчас происходит почти постоянно, без больших перерывов. Поэтому на поверхность земли поступают сравнительно горячие и, следовательно, относительно маловязкие порции магмы. Продвижение таких порций по центральному питающему каналу вулкана обычно не сопровождается явными роями вулканических землетрясений. Прогнозировать такие извержения пока не удаётся. Особенно опасны обвально — взрывные извержения, поскольку с увеличением высоты купола вероятность таких извержений значительно увеличилась и они происходят достаточно часто. Одним из возможных путей прогнозирования таких событий, по нашему мнению, является мониторинг вулканических землетрясений IV типа и вулканического дрожания. Рои вулканических землетрясений I–III типов

на Шивелуче происходят достаточно часто, что отражает интрузивные или экструзивные процессы, постоянно идущие на этом одном из крупнейших магматических центров планеты. Однако их появление, увы, не может служить предвестником сильных взрывных фаз на Шивелуче, связанных с его умеренными извержениями. Необходимы дальнейшие исследования по поиску предвестников таких извержений.

Автор выражает признательность В. Т. Гарбузовой, О. А. Гириной, В. Н. Двигало, Ю. В. Демянчуку, В. А. Дроздину, И. В. Мелекесцеву, П. П. Фирстову и В. А. Широкову за полезные обсуждения рассматриваемых в статье вопросов.

#### Список литературы

1. Аллидибиров М. А. Модель высвобождения энергии при вулканических взрывах вулканического типа // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 50–58.
2. Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) — плининское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 116–126.
3. Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) — плининское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 116–126.
4. Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка): отложения обломочной лавины // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 25–40.
5. Белоусов А. Б., Белоусова М. Г. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка): отложения обломочной лавины // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 25–40.
6. Богоявленская Г. Е., Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Кирьянов В. Ю., Миллер С. Д. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–26.
7. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.
8. Горшков Г. С., Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
9. Зобин В. М. Динамика очага вулканических землетрясений. М. Наука. 1979. 91 с.
10. Иванов В. В. Средне — и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956–2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2(22). С. 98–118.
11. Мелекесцев И. В., Брайцева О. А. Гигантские обвалы на вулканах // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 14–23.
12. Сенюков С. Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 144 с.
13. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
14. Токарев П. И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11–22.
15. Токарев П. И. К методике прогноза извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим данным // Бюлл. вулканол. ст. 1977. № 53. С. 38–45.
16. Токарев П. И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
17. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
18. Федотов С. А., Двигало В. Н., Жаринов Н. А., Иванов В. В. и др. Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 3–15.
19. Фирстов П. П. Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 48–63.
20. Хубуная С. А., Жаринов Н. А., Муравьев Я. Д., Иванов В. В. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3–19.
21. McNutt, S.R. Seismic monitoring of volcanoes: A review of the state-of-the-art and recent trends // Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards // Ed. by Scarpa, R., R. Tilling, Chapter 3, Springer-Verlag. Berlin. 1996. P. 99–146.
22. Newhall C.A., Self S. The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. Issue C2. P. 1231–1238.
23. Sparks R.S.J. Forecasting volcanic eruptions // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 210. P. 1–15.
24. Tokarev P.I. The prediction of large explosions of andesitic volcanoes // Journal of geodynamics. 1985. Vol. 3. P. 219–244.
25. Zobin V.M. Introduction to volcanic seismology. Elsevier. Amsterdam. 2011. 474 p. ISBN: 9780 444 563 750.