



УДК 551.21

В. В. Иванов

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

Вулканическое дрожание как предвестник вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке и возможный механизм образования дрожания

С целью поиска предвестников вершинных извержений на гигантском андезибазальтовом Ключевском вулкане в 1994–2010 гг. исследуются: парогазовая активность центрального кратера, интенсивность вулканического дрожания (ВД) и частота взрывных вулканических землетрясений. Полученные результаты могут быть использованы в практике работы экспертных советов по прогнозу вулканических извержений, предложенная концептуальная модель ВД может быть полезна для понимания процессов газовой выделенности в базальтовой (андезибазальтовой) магме.

Введение

В Мире насчитывается 538 вулканов, извергавшихся в историческое время, из них наиболее опасно ~180, в окрестности которых проживает несколько миллионов человек [14]. При подъёме магмы к поверхности земли перед извержением и при снижении давления, в ней происходит выделение растворенных летучих в свободную газовую фазу, расширение газовых пузырьков, их гравитационная дифференциация, объединение в крупные газовые полости («снаряды») и т. д. Это приводит к значительному нарастанию скоростей движения, давления в потоке магмы и, наконец, к разрушению её структуры, порождая опаснейшие вулканические взрывы [9]. Мониторинг сопровождающих эти процессы сейсмических явлений позволяет оценивать время, силу будущего извержения и его опасность, что позволяет снизить вулканический риск, а также изучить порождающие их динамические процессы в магме [1, 2, 10, 11, 16]. Однако вершинные извержения базальтовых и андезибазальтовых вулканов предвидеть удаётся редко, поскольку они не предваряются явно выраженными роями вулканических землетрясений [2, 7]. Для таких вулканов перспективным является изучение предваряющего вулканического дрожания (ВД) и взрывных вулканических землетрясений (событий IV типа) [3, 6, 7]. Здесь и далее типы землетрясений приведены по Токареву [10]. Этому и посвящена настоящая работа, которая основана на материале 17-летних (1994–2010 гг.) сейсмологических и визуальных наблюдений на гигантском андезибазальтовом Ключевском вулкане, который выносит столько же продуктов, сколько остальные 69 действующих вулканов Камчатки и Курильских островов, вместе взятые. Полученные на Ключевском закономерно-

сти могут быть применены для других вулканов с основным составом магм.

Основной поток вещества на вулкане связан с извержениями через вершинный кратер диаметром ~700 м, под которым предполагается наличие *центрального питающего канала*, диаметр которого оценивается в первые сотни метров [4]. Перед вершинными извержениями отмечается мощная парогазовая разгрузка в центральном кратере и отсутствуют рои вулканических землетрясений. В работах [4, 5] на основании аэрофотограмметрических данных было показано, что вершинные извержения на андезибазальтовых Ключевском и Авачинском вулканах начинались из газовых бокк в стенках провалов, предварительно сильно разогретых выделяющимися из них вулканическими газами. Это указывает, что при слабых или умеренных вершинных извержениях Ключевского вулкана не происходит активизации всего объема центрального питающего канала, диаметр которого оценивается в 180–250 м [4]; магма поднимается через жерла относительно малого поперечного сечения. Наличие провалов и обвальных воронок в центральном кратере [4], образующихся при оттоке магмы, свидетельствует о том, что заполняющий центральный питающий канал вулкана материал не консолидирован и может в первом приближении полагаться некоей брекчией. Магма в центральном канале вулкана может не только подниматься, но и опускаться, например, в связи с её оттоком к месту побочного прорыва [13]. Под *извержением вулкана* в данной работе понимается регулярное присутствие над его кратером хотя бы одного из следующих явлений: свечения, пепловых эмиссий, раскалённых бомб, лавовых потоков и фонтанов и т. п. Парогазовые или отдельные пепловые взрывы извержениями не считаются. Пепловые эмиссии отличаются от отдельных пеп-

ловых взрывов продолжительностью — часы, дни и недели или первые минуты, соответственно. Заметим, что шлейфы фумарол и парогазовых взрывов обычно полупрозрачны и плохо просматриваются. Поэтому в качестве меры парогазовой взрывной активности вулкана на фазе подготовки извержения мы используем частоту событий IV типа, которые сопровождают такие взрывы [7].

Признаки близкого вершинного извержения Ключевского вулкана

В 1994–2010 гг. на вулкане произошло 6 вершинных стромболианско-вулканских извержений: 8.IX–2.X.1994 г. (0,9 мес.), IV.2003–I.2004 г. (9,3 мес.), I–IV.2005 г. (2,5 мес.), III–VII.2007 г. (4 мес.), X.2008–I.2009 г. (3,7 мес.), IX.2009–XI.2010 г. (15 мес.) [6, 7]. Субтерминальных или побочных извержений не было. Извержения были одного порядка по энергии (слабые или умеренные) с относительными высотами подъема вулканических шлейфов до 2–3 км над вершинным кратером вулкана (индекс эксплозивной активности $VEI = 1–2$ [16]) и обычно сопровождалось излияниями лавовых потоков. Извержение в 1994 г. завершилось мощной субплинианской фазой: продолжительностью около 12 час, относительная высота шлейфов составляла 7–8 км ($VEI = 3–4$) [8]. По заблаговременности появления сейсмологических предвестников все извержения можно разделить на две группы: а) с краткосрочными (4–7 сут.) предвестниками (два извержения в 1994 и 2005 гг.) и б) со среднесрочными (несколько месяцев) предвестниками (остальные 4 извержения) [7]. Различие заблаговременностей составило 1–1,5 порядка.

Развитие параметров сейсмической активности для двух извержений 8.IX–2.X.1994 г. и X.2008–I.2009 гг., относящихся к разным группам, дано на рис. 1 а и б.

Пример краткосрочных предвестников [7]. Извержение 8.IX–2.X.1994 г. было преимущественно стромболианским с излияниями лавовых потоков на склоны вулкана, длилось ~25 суток и завершилось мощной субплинианской фазой 1.X (рис. 1а). Предвестники его основной стромболианской фазы были следующими (рис. 2): появление ВД «фонового» уровня примерно за два месяца до начала извержения (фаза I), увеличение среднего отношения амплитуды к периоду $(A/T)_{cp}$ ВД по линейному закону примерно за неделю до начала извержения (фаза II). При этом в вершинном кратере отмечалась обычная для этого вулкана фумарольная деятельность. За 12 часов до начала извержения начался быстрый рост параметра $(A/T)_{cp}$ по экспоненциальному закону и впервые было замечено усиление парогазовой активности вершинного кратера (фаза III), после чего, очень резко началось стромболианское вершинное извержение (фаза IV). Следует отметить, что во время подготовки отмечались фоновые количества взрывных вулканических землетрясений IV типа (1–6 соб. в сутки). Таким образом, перед

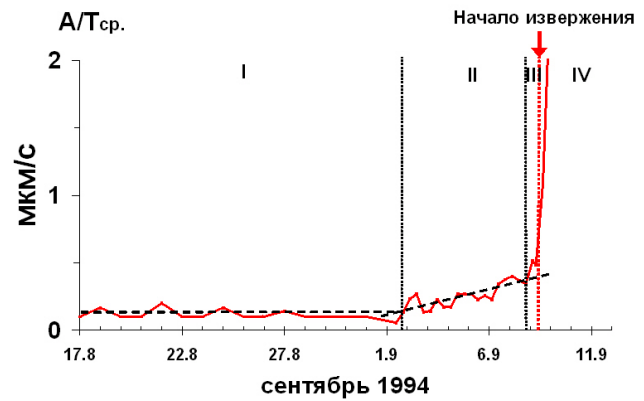


Рис. 2. График изменения параметра $(A/T)_{cp}$ вулканического дрожания перед вершинным извержением Ключевского вулкана, начавшимся 8 сентября 1994 г. Время местное. Длительность сейсмической подготовки — около одной недели. Фазы: I — фонового уровня дрожания, II — роста $(A/T)_{cp}$ по линейному закону, III — роста $(A/T)_{cp}$ по экспоненциальному закону и усиления паро-газовой активности вершинного кратера, IV — извержения. Пунктирными линиями изображены линии, аппроксимирующие данные наблюдений.

извержениями в 1994 и 2005 гг. не происходило заметной дегазации магматической колонны вулкана. Вершинное извержение андезибазальтового Авачинского вулкана в январе 1991 г. также имело весьма кратковременные (~1 сут.) предвестники [5].

Пароксизмальная фаза извержения 1994 г. (1.X) предвлялась следующими явлениями, которые сопровождали усиление эруптивной активности и смену стромболианской активности на субплинианскую (рис. 1а): медленным увеличением $(A/T)_{cp}$ ВД и интенсивности стромболианской активности вершинного кратера в течение сентября 1994 г.; быстрым экспоненциальным ростом $(A/T)_{cp}$ ВД за трое суток до пароксизма. Во время пароксизма этот параметр почти на порядок превышал таковой во время предшествующей стромболианской активности. После окончания пароксизма извержение и ВД быстро прекратились [7, 8].

Пример среднесрочных предвестников [7]. Вершинное извержение X.2008–I.2009 гг. продолжалось около 4 мес. (рис. 1б). Его предвестники существенно отличались от предыдущего случая: в течение 4 мес. до начала извержения происходило плавное экспоненциальное нарастание параметра $(A/T)_{cp}$ ВД и отмечались многочисленные (до 450 соб. в сутки) события IV типа (рис. 3). Частота событий IV типа в начале подготовки нарастала, достигла максимума, а затем снизилась к моменту извержения. Над вершинным кратером отмечалась фумарольная активность и парогазовые взрывы на высоту до 1 км, по времени совпадающие с событиями IV типа, которых за время подготовки произошло более 20 тыс. [6]. Это указывает на мощную дегазацию магмы в поднимающейся перед извержением маг-

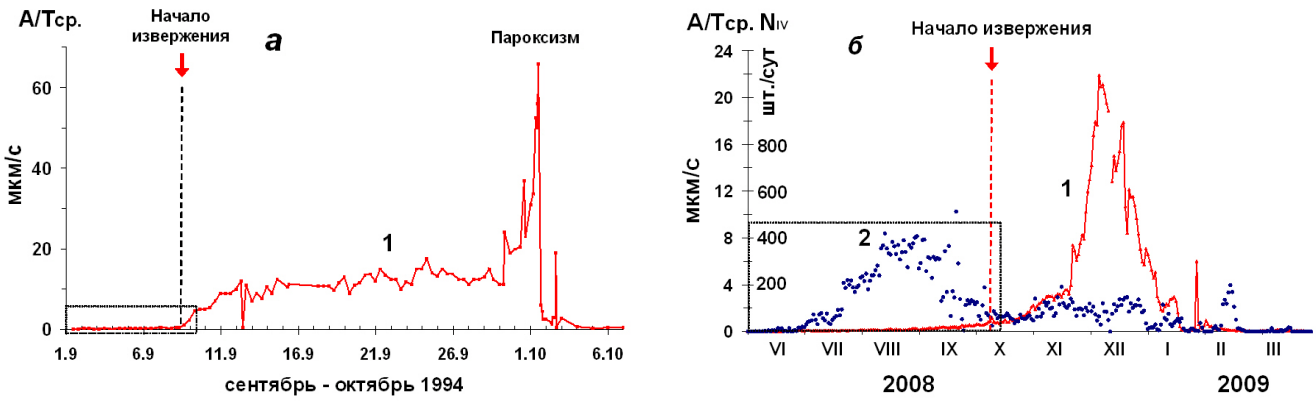


Рис. 1. Изменение интенсивности вулканического дрожания и частоты появления и взрывных вулканических землетрясений IV типа в связи с двумя вершинными эксплозивно-эффузивными извержениями Ключевского вулкана в сентябре – начале октября 1994 г. (а) и октябре 2008 – январе 2009 г. (б). Графики: 1 – средние значения отношения амплитуд к периодам вулканического дрожания $((A/T)_{cp})$, (2) – ежесуточные количества землетрясений IV типа (N_{IV}) . График (а) построен по данным с/ст. «Зелёная» ($\Delta = 12$ км), которые приведены к с/ст. «Цирк» ($\Delta = 8$ км). Графики (б) – по данным с/ст. «Цирк». Прямоугольниками изображены начальные участки кривых, которые детализированы на рис. 2 и 3.

матической колонне вулкана. С началом стромболианской фазы извержения рост параметра $(A/T)_{cp}$ дрожания плавно продолжился по тому же экспоненциальному закону (рис. 3).

Возможная природа дрожания, предвещающего вершинные извержения базальтового (андезибазальтового) вулкана

Дрожание, предвещающее вершинные магматические извержения на Ключевском вулкане имеет две характерные особенности [6, 7].

1. Сейсмическая мощность его источника в среднем на 1–2 порядка превышает этот параметр при газовых гидротермальных извержениях других вулканов (при одинаковой парогазовой активности и близкой тепловой мощности их струй) и достигает уровня во время стромболианских извержений (превышение на 3 порядка). Это указывает, что для возбуждения такого ВД нужен более мощный источник, чем турбулентность в потоке газов.

2. Непременным условием такого ВД является на два порядка более мощная, чем обычно разгрузка вулканических газов в виде фумарол и многочисленных (до нескольких сотен в сутки) парогазовых взрывов в вершинном кратере (рис. 3). Это может быть или при взаимодействии магмы с подземными водами (фреатически) или за счёт дегазации магмы. Фреатическая природа газовой разгрузки, вероятно, не является основной, поскольку в этом случае невозможно объяснить различие до 2 порядков в энергии и времени её проявления перед извержениями одного масштаба и характера (рис. 2 и 3). Поэтому мы полагаем, что основным источником теплоты газовой разгрузки, предвещающей вершинные извержения вулкана, является дегазация его магматической колонны. Наличие мощных источников сопровождающих вибраций (ВД) застав-

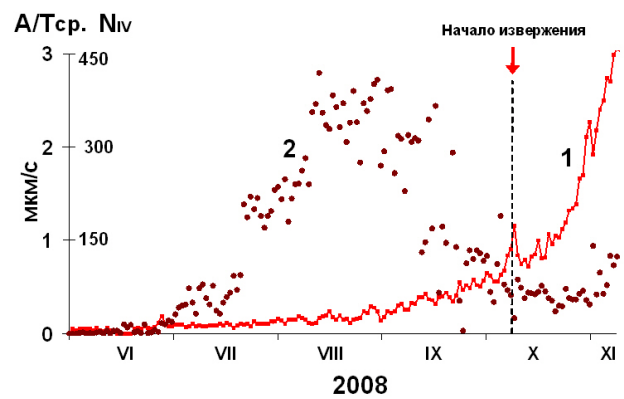


Рис. 3. График изменения ежесуточных величин параметра $((A/T)_{cp})$ вулканического дрожания и частоты (N_{IV}) взрывных вулканических землетрясений IV типа перед вершинным извержением Ключевского вулкана, начавшимся 10 октября 2008 г. Длительность сейсмической подготовки – 4,2 мес.

ляет полагать, что причина дегазации не столько диффузия газов из магмы, сколько процессы барботажа и разрушения её структуры как двух- или трёхфазной смеси [7]. Это предполагает, что магматическая колонна достигла глубины начала газоотделения ($H_{кр}$) и в ней имеется свободная газовая фаза в виде пузырьков или газовых полостей (рис. 4). $H_{кр}$ оценивается в 1,5 км для базальтовой магмы с 2% массовым содержанием воды [7].

Качественно механизм образования ВД перед вершинным извержением Ключевского вулкана можно представить себе следующим образом. Рассмотрим сравнительно маловязкую магму, которая поднимается в брекчии центрального питающего канала, прокладывая жерло (рис. 4). У верхнего фронта магмы на глубине $h \leq H_{кр}$ в давление в ней (и в за-

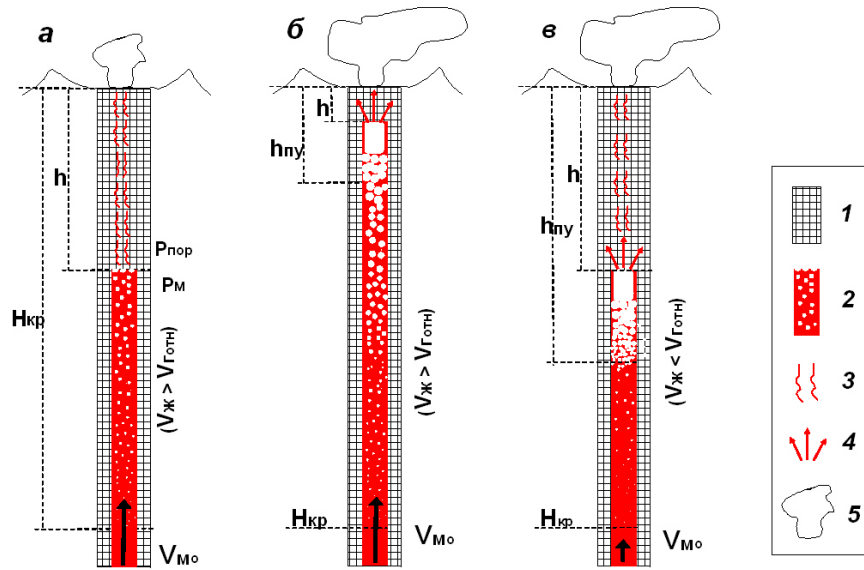


Рис. 4. Схематическое изображение процессов газовой выделении при подъёме базальтовой магмы по центральному питающему каналу Ключевского вулкана перед его вершинным извержением для случаев: относительно быстрого (а, б) и сравнительно медленного подъёма магмы в канале (в). Обозначения: 1 – центральный канал вулкана, заполненный рыхлой проницаемой брекчией, 2 – жерло в канале, по которому поднимается магма, 3 – отделяющиеся от магмы флюиды, 4 – разрушение структуры магмы внутри канала, 5 – парогазовые облака над вершиной вулкана. Скорости: $V_{\text{мо}}$ – магмы в канале до начала газоотделения, $V_{\text{ж}}$ – движения жидкой фазы магмы (расплава), $V_{\text{готн}}$ – движения газовых пузырьков относительно расплава. Глубины: $H_{\text{кр}}$ – начала газоотделения в магме, h – верхнего фронта магмы в канале-дайки, $h_{\text{пу}}$ – образования плотнейшей упаковки газовых пузырей во вспененной магме. $P_{\text{пор}}$ – поровое давление флюидов в брекчии питающего канала, P – давление в магме на глубине h . Глубина отсчитывается от дна вершинного кратера.

ключённых газовых пузырьках) P_M в 1-м приближении можно положить равным литостатическому. Поровое же давление флюидов $P_{\text{пор}}$ в брекчии можно положить равным гидростатическому, т. е. оно существенно меньше. За счёт большой разности давлений у верхнего фронта магмы происходит непрерывный процесс барботажа или разрушения структуры магмы. Освобождающиеся магматические газы фильтруются в поровое пространство брекчии и затем в атмосферу, поэтому в жерле происходит непрерывное восходящее движение магмы как многофазной смеси. Поскольку жидкая и кристаллическая фазы магмы отфильтровываются брекчией и, в основном, остаются в жерле, то верхний фронт магмы поднимается вверх достаточно медленно. Это напоминает процесс кипения поднимающейся магмы. Движение такой смеси возбуждает в ней автоколебания, например по механизму «падающего трения», регистрируемые в окружающей среде как ВД [11]. Разрушение отдельных маленьких пузырьков даёт слабое ВД «фоновое» уровня (рис. 4 а; рис. 2 фаза I). Мощное предваряющее ВД может породиться только при разрушении сравнительно больших газовых пузырьков (полостей), которые образуются при объединении более мелких соприкасающихся пузырьков. Поэтому мы полагаем, что наличие состояния плотнейшей упаковки газовых пузырьков в магме является необходимым условием

генерации мощного предваряющего ВД и вулканических взрывов (событий IV типа). Это позволяет объяснить чрезвычайно малую заблаговременность появления предвестников перед многими вершинными извержениями андезибазальтовых вулканов, например Ключевского в 1994 г. [7] и Авачинского в 1991 г. [5].

В относительно маловязкой базальтовой (андези-базальтовой) магме достижение состояния плотнейшей упаковки газовых пузырьков сильно зависит от возможности их гравитационной дифференциации (всплывания) [7]. Последнее, очевидно, определяется соотношением начальной скорости жидкой фазы магмы $V_{\text{мо}}$ и средней относительной скорости всплывания газовых пузырьков в ней $V_{\text{готн}}$ (рис. 4). Если $V_{\text{готн}} < V_{\text{мо}}$, то свободная газовая фаза не успевает заметно всплыть в расплаве за время подъёма магмы в питающем канале и плотнейшая упаковка и, следовательно, мощное предваряющее ВД и вулканические взрывы в этом случае возникают только при приближении магмы к дну вершинного кратера ($h_{\text{пу}} \sim H_{\text{кр}}/10$) (рис. 4б). Предвестники появляются только перед самым началом извержения, магма к подходу слабо дегазированной и извержение начинается резко (рис. 2, фазы II и III). Обратная картина наблюдается при $V_{\text{готн}} > V_{\text{мо}}$ (рис. 4в и рис. 3).

Заметим, что при определённых условиях (наличие свободной газовой фазы), указанные процессы

дегазации маловязкой базальтовой (андезибазальтовой) магмы могут происходить не только в поднимающейся, но и в неподвижной и в опускающейся магматической колонне, что также порождает ВД и события IV типа. В рамках наших представлений парогазовые (пеплогазовые) взрывы могут порождаться разрушением наиболее крупных газовых или мелкопористых газожидкостных пакетов в магме.

Заключение

Предложенная концептуальная модель образования вулканического дрожания и взрывных вулканических землетрясений, предваряющих вершинные извержения базальтовых (андезибазальтовых) вулканов позволяет качественно объяснить основные наблюдаемые особенности предвестников таких извержений. Эти явления, очевидно, несут важную информацию о процессах газовой выделения в таких магмах. Перспективным направлением дальнейших исследований может быть более детальный анализ таких предвестников и построение их количественных моделей.

Список литературы

1. Гордеев Е. И. Природа сейсмических сигналов на активных вулканах. Автореф. дисс. доктора физ.-мат. наук. М., 1998. 35 с.
2. Горельчик В. И. Сейсмические проявления вулканической деятельности // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, ДВНЦ АН СССР. 1976. С. 89–107.
3. Горельчик В. И., Степанов В. В. Состояние Ключевского и Безымянного вулканов по данным детальных сейсмологических наблюдений в 1971–1973 гг. // Бюлл. вулканол. ст. 1977. № 53. С. 53–60.
4. Двигало В. Н. Кратер и вершинные извержения Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 3–18.
5. Дрознин В. А., Муравьев Я. Д. Энергетический и экологический аспекты извержения вулкана Авачинский на Камчатке (январь 1991 г.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 3. С. 3–19.
6. Иванов В. В. Текущий цикл активности Ключевского вулкана 1995–2008 гг.: развитие по сейсмологическим, фото-, видео- и визуальным данным // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. С. 100–109.
7. Иванов В. В. Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. кандидата геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13 с.
8. Озеров А. Ю., Карпов Г. А., Дрознин В. А. и др. Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября — 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3–16.
9. Сторчеус А. В., Плотников С. П. Сейсмологические исследования эксплозий вулкана Карымский в 2001–2004 гг. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма: К 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный». Петропавловск-Камчатский, 25–30 марта 2006 г. ИВиС ДВО РАН. 2006. С. 106–111.
10. Токарев П. И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
11. Трубников Б. А., Слёзин Ю. Б., Самойленко Б. И., Сторчеус А. В. К теории глубинного вулканического дрожания // ДАН СССР. 1981. Том. 256. № 6. С. 1337–1340.
12. Хренов А. П., Двигало В. Н., Кирсанов и др. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. Том. 1, М.: Наука, 1991. С. 106–145.
13. Широков В. А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48–58.
14. McNutt S. R. Seismic Monitoring // Encyclopedia of volcanoes. 2000. Academic Press. Editor-in-Chief: Sigurdsson H. P. 1095–1119.
15. Newhall C. G., Self S. The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, P. 1231–1238.
16. Sparks R. S. J. Forecasting volcanic eruptions // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 210. P. 1–15.