

УДК 551.1

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ: ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

© 2020 г. Е. В. Шарков*

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия*

**e-mail: sharkov@igem.ru*

Поступила в редакцию 15.08.2019 г.

После доработки 16.01.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Одной из главных природных катастроф являются взрывные извержения вулканов, нередко длящиеся 2–4 мес. Очевидно, что такие извержения вулканов связаны с одновременным массовым выделением газовых пузырьков из расплавов их малоглубинных периферических очагов, что должно приводить к резкому увеличению объема содержащегося в них материала, т.е. к взрывам. Показано, что основной предпосылкой для взрывного извержения является известное из экспериментальных данных резкое уменьшение растворимости воды в расплавах при давлениях меньше 1 кбар, соответствующих глубине 3.5 км [Шилобреева и др., 1991]. Поэтому поднимающиеся водонасыщенные расплавы, характерные для надсубдукционных (конвергентных) обстановок, достигая глубин 3–4 км, автоматически становятся пересыщенными водой и представляют собой своеобразную “гремучую смесь”, готовую взорваться в любой момент. Однако выделение зародышей газовых пузырьков является весьма энергетически затратным процессом и само по себе не начнется. Мы полагаем, что триггером для катастрофического взрыва может служить одно из землетрясений, предшествующих извержению, которое входит в резонанс с автоколебаниями в периферическом очаге вулкана. Это многократно увеличивает мощность импульса и способствует преодолению энергетического барьера. Показано, что необходимыми и достаточными условиями для появления катастрофического извержения являются: 1) существование малоглубинного очага пересыщенного водой магматического расплава; присутствие других летучих (CO_2 , SO_3 и др.) здесь существенной роли не играет; 2) наличие триггера – землетрясения, которое входит в резонанс с автоколебаниями в этом очаге; и 3) наличие непрерывной подпитки периферического очага под действующим вулканом новыми порциями расплава, обеспечивающей длительность извержения.

Ключевые слова: малоглубинный вулканический очаг, водонасыщенный расплав, ретроградное кипение, землетрясение, сейсмический резонанс, взрывные явления

DOI: 10.31857/S0203030620040045

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных типов природных катастроф являются взрывные извержения вулканов. Помимо огромных человеческих жертв и материального ущерба, такие извержения могут приводить к долговременным климатическим изменениям, связанным с выбросом в стратосферу значительного количества вулканической пыли и газа.

Всего лишь несколько примеров. Так, сравнительно небольшой взрыв вулкана Сант-Хеленс на северо-западе США в 1980 г. опустошил площадь в радиусе 29 км от вулкана, вызвав пепловые тучи, оползни, грязевые потоки и наводнения; извержение продолжалось 2 мес. При взрыве вулкана Кракатау (Индонезийская дуга) в 1883 г. в атмосферу было выброшено 20 км³ пемзы и пепла.

Еще большие масштабы имело извержение вулкана Тамбора в той же дуге в 1815 г., когда в атмосферу было выброшено 150–180 км³ пирокластики [Френсис, Селф, 1984]. Извержения этих вулканов вследствие выброса в стратосферу большого количества пыли и газа привели к существенному, на 0.5–0.8°C, понижению средней температуры воздуха на Земле в течение 1–1.5 лет. Как показало изучение извержения вулкана Эль-Чичон в Мексике в 1982 г. [Рампино, Селф, 1984], в продуктах подобных взрывов может присутствовать большое количество серы, окисляющейся до серной кислоты и способной образовать долгоживущую туманную пелену. Подобные аэрозоли также оказывают экранирующее влияние на солнечную радиацию, приводя к снижению средней температуры на 0.2°C. При взрыве вулкана Пинатубо (Филиппины)

в 1991 г. в воздух взлетело около 7 км^3 пирокластики риолит-дацитового состава, а количество извергнутого SO_3 оценивается в 19 млн т [Bernard et al., 1991]. Таким образом, подобные вулканы (как правило, приуроченные к конвергентным границам плит) существенно влияют на атмосферные процессы и представляют наибольшую опасность для человека. Поэтому изучение механизма катастрофических взрывов является одной из наиболее важных задач вулканологии. При этом требуется объяснить как катастрофический масштаб взрывов, так и продолжительность самого взрывного процесса, длящегося нередко 2–4 мес.

Для объяснения феномена катастрофических извержений предложено множество гипотез, но до сих пор эта проблема остается дискуссионной. Большинство исследователей связывают возникновение таких извержений с резким увеличением объема магмы за счет ее дегазации в малоглубинном очаге. Однако имеющиеся на этот счет представления: взрыв в результате проникновения в магматический очаг грунтовых вод, взрыв в результате обрушения вулканического конуса, внедрение газонасыщенной базальтовой магмы в дацитовый очаг, вскрытие магматического очага трещинами-каналами, резким увеличением объема магмы при ее подъеме с глубин более 10 км, накоплением газов под кровлей магматического очага и т.д. обычно связывают этот процесс со случайными явлениями, нарушающими стабильность системы, оставляя проблему дискуссионной [Влодавец, 1973; Макдональд, 1975; Рампино, Селф, 1984; Френсис, Селф, 1984, 1987; Oppenheimer, 2011; The Encyclopaedia ..., 2015; Polacci et al., 2019; и др.]. Ближе всех к решению вопроса о возникновении катастрофических извержений подошел Ю.В. Слезин [1987]. Согласно его модели, в процессе стационарного истечения газопирокластического материала может возникнуть неустойчивость процесса, приводящая к скачкообразному возрастанию его масштабов на 2–3 порядка в зависимости от глубины очага и свойств магмы. Длительность извержений им связывается с периодической закупоркой канала в результате обрушения стенок. Прекращение извержения объясняется снижением давления в очаге, однако и здесь механизм массового образования пузырьков газа остался неясным.

Таким образом, существующие гипотезы рассматривают извержения сами по себе и опираются на факторы, которые могут оказывать определенное влияние на ход конкретных извержений, однако не в состоянии обеспечить их катастрофический масштаб и продолжительность. Поэтому нам представляется важным рассмотреть физический смысл событий, происходящих при катастрофических извержениях вулканов, и именно этому посвящена данная работа.

РЕТРОГРАДНОЕ КИПЕНИЕ МАГМ КАК ГЛАВНАЯ ПРИЧИНА ОБРАЗОВАНИЯ ВЗРЫВОВ

Очевидно, что катастрофические извержения вулканов связаны с одновременным массовым выделением газовых пузырьков из расплава, приводящим к резкому увеличению объема материала в магматической камере, т.е. к взрыву. Известно, что спонтанное выделение газовой фазы в форме пузырьков, т.е. его ретроградное, или резургентное кипение, происходит из-за уменьшения растворимости газов в расплавах при снижении температуры и, особенно, давления. Масштаб этого процесса зависит от исходного содержания флюидов в расплаве. Если содержания флюида в расплаве невелико, то ретроградное кипение при декомпрессии играет ограниченную роль, приводя к появлению пузыристых лав, шлаков и пемз. Однако в случае пересыщенных летучими расплавами, например, надсубдукционных, такое кипение может приобрести катастрофические масштабы.

Но суть проблемы заключается в том, что образование новой поверхности при фазовых переходах (кристаллизации, плавлении и ретроградном кипении), в данном случае – образовании пузырьков, требует значительных энергетических затрат [Фролов, 1989; Ерошенко, Шарков, 1989; Шарков, 2004 и др.]. Вследствие этого массовое образование зародышей новой фазы (кристаллов, газовых пузырьков, зародышей плавления) в ранней гомогенной среде возможно только после преодоления определенного энергетического барьера. Обычно после этого процесс развивается быстро, так как идет уже в поле устойчивости новой фазы.

Образование единичных зародышей в результате флуктуаций проблемы не решает, поскольку энергетически выгоднее наращивать уже имеющуюся поверхность, чем создавать новую [Ерошенко, Шарков, 1989]. Поэтому в результате локального уменьшения давления, например при возникновении трещин в кровле магматического очага, в лучшем случае образуется растущий газовый пузырь, пакет пузырей или произойдет локальное вспенивание порции магмы при заполнении ею этой трещины. Однако ожидать здесь массовой дегазации нет никаких оснований, так как весь остальной объем расплава остается в тех же условиях.

Эффекты, связанные с образованием газовых пузырей, хорошо видны на примере кайнозойских внутриплитных базальтов, связанных с подъемом мантийных плюмов. Эти базальты формируют крупные изверженные провинции, где образуют щитовые вулканы или огромные лавовые плато [Ernst, 2014]. Вулканы центрального типа здесь редки, зато широко развиты цепочки небольших



Рис. 1. Четвертичное базальтовое плато Харрат-Аш-Самах (Harrat Ash Shamah) с пирокластическими и шлаковыми куполами на поверхности. Юго-западная Сирия, возвышенность Джебель-Друз. Фото Е.В. Шаркова.



Рис. 2. Извержение вулкана Толбачик, Камчатка, 1976 г. Фото А.П. Хренова.

шлаковых или пирокластических куполов в несколько сотен метров в поперечнике и 100–200 м высотой, нередко содержащих мантийные ксенолиты (рис. 1).

Происхождение таких куполов, скорее всего, связано с образованием под кровлей зон адиабатического плавления в головных частях мантийных плюмов крупных газовых пузырей, периодически прорывавшихся на поверхность, прихватывая фрагменты этой кровли. Изучение флюидных фаз внутриплитных базальтов показало, что газы здесь представлены в основном CO_2 , меньше H_2O , а также существенными количествами Cl и F [Коваленко и др., 2000]. Катастрофические извержения для вулканов этого типа не характерны.

Большинство же катастрофических взрывов вулканов связано с расплавами известково-щелочной и шошонит-латитовой серий, характерных для тектонических зон конвергенции (островных дуг, активных континентальных окраин, а также континентальной коллизии) (рис. 2, 3а). В них газовая фаза представлена, главным образом, водой с подчиненным количеством CO_2 , привнесенных в зону плавления водонасыщенными породами субдущированной океанической плиты [Коваленко и др., 2000; и др.] или блоками осадочных пород, затянутых в зону форланда при континентальной коллизии [Sharkov, 2019]. Из этого следует, что характер извержений вулканов в значительной мере зависит от состава растворенных в магме флюидов, что, в свою очередь, определяется тектонической позицией магматической системы.

Согласно экспериментальным данным [Шилобреева и др., 1991; Papale et al., 2006; Stable et al., 2018; и др.], растворимость воды в расплавах, содержащих воду и двуокись углерода, является незначительное изменение концентрации H_2O в

широкой области давления (см. рис. 3б). Содержания воды в расплавах остаются практически постоянными вплоть до давлений ниже 1 кбар, где ее концентрация резко снижается, предопределяя возможность взрыва. В отличие от воды, растворимость CO_2 при снижении давления уменьшается равномерно, причем исходное соотношение $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ практически не влияет на эту зависимость, как, по-видимому и содержания других летучих (SO_3 , HCl , HF и др.).

При этом растворимость CO_2 в значительной мере зависит от состава расплава: она минимальна в магмах кислого и среднего составов, которые и характерны для катастрофических извержений. Иными словами, газовая фаза в риолитах и дацитах должна иметь преимущественно водный состав, как это и наблюдается в природе, где большинство кальдер, оставшихся после катастрофических извержений, образовано риолит-дацитовыми туфами (рис. 4).

ВОЗМОЖНЫЙ ТРИГГЕР (“ДЕТОНАТОР”) КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Из приведенных данных следует, что по мере подъема расплава из области генерации магм в периферические очаги вулканов на глубины меньше 3–4 км, он, вследствие резкого падения растворимости, может становиться пересыщенным H_2O . В этом случае расплав в такой малоглубинной магматической камере по существу представляет собой своего рода “гремящую смесь”, готовую в любой момент взорваться в результате быстрой дегазации. Как показывают сейсмические наблюдения, периферические очаги большинства вулканов конвергентных тектонических обстановок располагаются именно на таких глу-

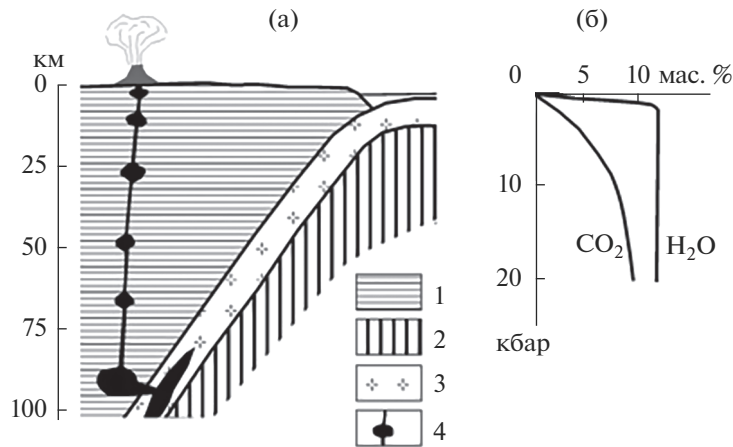


Рис. 3. Особенности магматических процессов в зоне конвергенции.

а — схема, иллюстрирующая строение магматической системы, связанной с зоной субдукции на активной континентальной окраине: 1 — континентальная литосфера, 2 — океаническая литосфера, 3 — субдуцируемая плита, 4 — магматические очаги; б — зависимость растворимости H_2O и CO_2 в силикатном надсубдукционном расплаве от давления, по [Шилобреева и др., 1991] с упрощениями.

бинах (2–5 км, часто прослеживаясь до глубин 5–16 км, при радиусе 4–13 км) [Макдональд, 1975; Злобин и др., 1997; Гурбанов и др., 2008; Федотов и др., 2010; Лемзиков, 2014; Chen et al., 2018; Zellmer et al., 2019; и др.], так что эта предпосылка в природе реализуется.



Рис. 4. Кальдера вулкана Немрут, образованная переслаиванием туфов дацит-риолитового состава; слоистость туфов свидетельствует о множестве взрывов при формировании кальдеры. Восточная Анатолия, Турция. Турецкий вулканолог М. Кескин (M. Keskin) демонстрирует автору ситуацию. Фото В.А. Лебедева.

Однако, как уже указывалось, массовое образование пузырьков газа требует значительного энергетического импульса, без чего будет происходить постепенная дегазация очага, приводящая к формированию гидротермальных систем. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, из которых следует, что даже пересыщенный водой расплав сам по себе вскипать не будет. Для того чтобы началось выделение пузырьков газа, необходимо резко подвергнуть его давлению (сжать) [Stolper, 1982; Pyle, Stolper, 1991], т.е. для инициации взрыва требуется ударная волна. В таком случае образование пузырьков начинается сразу во всем объеме.

По нашему мнению, этот механизм применим и к катастрофическим извержениям вулканов. Наиболее вероятным триггером катастрофического извержения, способным привести к одновременному массовому образованию зародышей пузырьков газа в магматической камере, скорее всего, является одно из серии землетрясений, предшествующих извержению, ударная волна которого входит в резонанс с автоколебаниями в конкретном магматическом очаге. Это скачкообразно повышает мощность ударной волны, что позволяет преодолеть любой энергетический барьер; соответственно, при ударе пересыщенный водой расплав в магматическом очаге под вулканом мгновенно “вскипает” и происходит взрыв.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ДЛИТЕЛЬНОСТИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Как уже указывалось, одной из проблем катастрофических извержений является их продолжительность, достигающая до 2–4 мес. Мы полага-

ем, что это может быть связано с особенностями строения малоглубинных периферических очагов под вулканами, извергающими существенно кислые лавы.

Из многочисленных данных сейсмических исследований магматических систем вулканов зон конвергенции литосферных плит известно, что расплав из зон магмообразования проходит через серию промежуточных очагов, верхние из которых или верхние части более протяженных очагов могут располагаться на глубине 2–5 км (см. выше). Магматический расплав в верхних частях этих очагов при давлениях меньше 1 кбар, должен быть пересыщен водой, а расплав на более глубоких уровнях (глубже 3–4 км) оставаться насыщенным или даже недосыщенным. Поэтому по приходе сейсмической ударной волны, взорвется только самая верхняя часть очага, расположенная выше изобары 1 кбар.

Так как вулканические постройки при взрывах постепенно уничтожаются, давление в периферических очагах под действующими вулканами также постепенно снижается, и изобара 1 кбар углубляется. В результате в верхних частях этих очагов все время формируются новые порции пересыщенного водой взрывоопасного материала, которые сразу же вовлекаются во взрывные процессы вследствие детонации от происходящих выше взрывов, обеспечивая пролонгацию извержений. Новые взрывы раз за разом опустошают магматический очаг, вероятно, вплоть до глубин 3–4 км, поскольку на таких глубинах и ниже расплав уже будет оставаться недосыщенным H_2O , и процесс ретроградного кипения, питающего взрывы, станет невозможным.

Судя по длительности извержений, такой очаг постоянно подпитывался новыми порциями свежего расплава, восполнявшими потери материала. При этом уровень верхней кромки очага мог снова подниматься в область низких давлений (меньше 1 кбар), сам расплав становится пересыщенным водой, что способствовало пролонгации извержения, устанавливая динамическое равновесие между потерями расплава при взрывах и поступлением новых порций.

Извержение, по-видимому, закончится, когда прекратится подток новых порций свежего расплава, необходимый для взрыва. Магматический очаг превратится в затвердевающий интрузив, питающий гидротермальные системы, о чем можно судить, например, по кальдерам Йеллоустон в США и Узон на Камчатке (рис. 5).

В результате опустошения очага обычно возникает просадочная депрессия (кальдера), и вулкан безопасен вплоть до возникновения нового очага в результате возобновления подтока водонасыщенного расплава, после чего все может снова повториться. Однако чаще всего этого не



Рис. 5. Кальдера Узон на Камчатке.

происходит. Последующие порции магмы, поступающие после периода затишья, обычно являются уже менее водонасыщенными, и дело завершается формированием в кальдере нового конуса типа Соммы-Везувия или Кимени на о. Санторин [Влодавец, 1973; Макдональд, 1975; Oppenheimer, 2011; и др.].

Объем пемзы и пепла, изверженных в процессе образования кальдер, пересчитанный на объем непористой магмы в кальдере, почти всегда оказывается значительно меньше, чем объем самой кальдеры [Макдональд, 1975]. Например, объем выбросов, связанных с кальдерой Шикоцу на о. Хоккайдо (Япония), составил около 50 км^3 , а объем самой кальдеры 79 км^3 . По-видимому, это свидетельствует о том, что значительная часть выброшенного взрывами материала была представлена тонким вулканическим пеплом и аэрозолями, унесенными атмосферными течениями на большие расстояния от вулкана и рассеянными на большой площади.

Таким образом, подводя итог, можно сказать, что необходимыми и достаточными условиями для появления катастрофического извержения являются:

- 1) существование малоглубинного очага пересыщенного водой существенно кислого магматического расплава;
- 2) наличием триггера — землетрясения, которое входит в резонанс с автоколебаниями в этом очаге; присутствие других летучих (CO_2 , SO_3 и др.) существенной роли не играет;
- 3) непрерывной подпитки магматического очага новыми порциями расплава, обеспечивающей аномальную длительность извержения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Катастрофические извержения в основном характерны для вулканов конвергентных тектонических обстановок (островные дуги, активные континентальные окраины и зоны континенталь-

ной коллизии), где широко развиты водосодержащие лавы. Такие извержения не типичны для областей внутриплитного магматизма, связанного с подъемом мантийных плюмов, где среди летучих преобладает CO_2 .

2. Согласно экспериментальным данным, особенностью H_2O является резкое уменьшение его растворимости в расплавах при давлениях ниже 1 кбар. Поэтому поднимающийся водосодержащий расплав среднего-кислого состава, типичного для конвергентных обстановок, может стать пересыщенным водой, что создает предпосылки для вулканического взрыва.

3. Сам взрыв, по-видимому, связан с одновременным массовым выделением пузырьков газа в пересыщенном водой расплаве малоглубинного периферического очага под действующим вулканом, своеобразной разновидностью ретроградного кипения. Однако сам по себе такой расплав взорваться не может, т.к. образование пузырьков газа является энергетически затратным процессом и для преодоления энергетического барьера требуется дополнительный импульс.

4. Таким импульсом (триггером) может служить одно из землетрясений, предшествовавших взрыву, которое способно войти в резонанс с автоколебаниями в периферическом очаге вулкана. Это многократно увеличивает мощность импульса и его возможности для преодоления энергетического барьера, приводя к первому взрыву; дальнейшая пролонгация извержения поддерживается детонацией от взрывов.

5. Поскольку вытянутые периферические очаги надсубдукционных вулканов часто располагаются на глубинах от 2 до 15 км, мы полагаем, что их верхние части, находящиеся при давлении ниже 1 кбар, скорее всего, и являются источниками взрывов при катастрофических извержениях вулканов.

6. Так как вулканическая постройка взрывами постепенно уничтожается, давление в очаге также постепенно снижается, и изобара 1 кбар углубляется. В результате в верхней части периферического очага под действующим вулканом все время образуются новые порции пересыщенного водой взрывоопасного материала, которые сразу же вовлекаются во взрывные процессы вследствие детонации от предшествующих взрывов. Новые взрывы раз за разом опустошают верхнюю часть магматического очага вплоть до глубин 3–4 км, где расплав уже находится при давлении больше 1 кбар, не пересыщен H_2O и, соответственно, не является взрывоопасным.

7. Длительность катастрофических извержений, нередко достигающая 2–4 мес., по-видимому, обеспечивается непрерывной подпиткой магматического очага новыми порциями расплава, который, достигая малых глубин, становится пе-

ресыщенным водой и, соответственно, вовлекался во взрывные процессы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор очень признателен члену-корреспонденту РАН А.Л. Собисевичу за ценные замечания, которые способствовали улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Влодавец В.И.* Вулканы Земли. М.: Наука, 1973. 168 с.
- Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Шарков Е.В., Газеев В.М., Лексин А.Б.* Новейший магматизм северной части трансконтинентального Восточно-Африканского–Транскавказского рифтового пояса // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. II. Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата / Под ред. В.И. Коваленко, В.В. Ярмолюка, О.А. Богатикова. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 188–205.
- Ерошенко В.А., Шарков Е.В.* Термодинамика сложных систем и магматические процессы Земли // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 11. С. 3–25.
- Злобин Т.К., Абдрахманов Л.И., Злобина Л.М.* Глубинные сейсмические исследования вулкана Менделеева на Южных Курилах // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 4. С. 79–87.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А.* Летучие компоненты (H_2O , CO_2 , Cl, F, S) в базитовых магмах различных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол // Петрология. 2000. Т. 8. № 2. С. 151–164.
- Лемзиков В.К.* Применение моделей очаговых спектров тектонических землетрясений к некоторым типам тектонических (на примере вулкана Ключевский) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 2. С. 65–76.
- Макдональд Г.А.* Вулканы. М.: Мир, 1975. (*Macdonald G.A. Volcanoes* // Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1972).
- Рампино М.Р., Селф С.* Воздействие Эль-Чичона на атмосферу // В мире науки. 1984. № 3. С. 16–26.
- Слезин Ю.Б.* Механизм опустошения очага при образовании кальдер // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 3–15.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
- Френсис П., Селф С.* Извержение Кракатау // В мире науки. 1984. № 1. С. 68–79.
- Френсис П., Селф С.* Обрушение вулканов // В мире науки. 1987. № 8. С. 42–51.
- Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. М.: Изд-во “Химия”, 1989. 230 с.
- Шарков Е.В.* Роль энергии образования поверхности в процессах плавления и ретроградного кипения // Геохимия. 2004. № 10. С. 1081–1095.

- Шилобреева С.Н., Кадик А.А., Луканин О.А.* Растворимость летучих компонентов в силикатных расплавах // Флюиды и окислительно-восстановительные реакции в магматических системах / Под ред. А.А. Кадика. М.: Наука, 1991. С. 6–56.
- Bernard A., Demaiffe D., Mattielli N., Punongbayan R.S.* Anhydrite-bearing pumice from Mt. Pinatubo eruption, new evidence of a sulfur-rich silicic magma // *Nature*. 1991. V. 354. P. 139–140.
- Chen K.-X., Gung Y., Kuo B.-Y., Huang T.-Y.* Crustal magmatism and deformation fabrics in northeast Japan revealed by ambient noise tomography // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2018. V. 123. P. 8891–8906. <https://doi.org/10.1029/2017JB015209>
- Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014. 653 p.
- Oppenheimer C.* Eruptions that shook the World. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. 346 p.
- Papale P., Moretti R., Barbato D.* The compositional dependence of the saturation surface of H₂O + CO₂ fluids in silicate melts // *Chemical Geology*. 2006. V. 229. P. 78–95.
- Polacci M., Andronico D., de' Michieli Vitturi M., Taddeucci J., Cristaldi A.* Mechanisms of Ash Generation at Basaltic Volcanoes: The Case of Mount Etna, Italy // *Front. Earth Sci*. 2019. V. 7. № 193. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00193>
- Pyle D.M., Stolper E.M.* Experimental constraints of degassing: the nucleation and growth of bubbles in rhyolitic magma // XX General Assembly IUGG, IAVCEI Abstr. Vienna. 1991. P. 15.
- Sharkov E.V.* Caucasian-Arabian Syntaxis, The Alpine-Himalayan Continental Collisional Zone: IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development / Eds F. Rossetti et al. // *The Structural Geology Contribution to the Africa-Eurasia Geology: Basement and Reservoir Structure, Ore Mineralisation and Tectonic Modelling. Advances in Science, Technology & Innovation*. 2019. P. 311–314. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01455-1_68
- Stabile P., Radica F., Bello M., Behrens H., Carroll M.R., Paris E., Giuli G.* H₂O solubility in pantelleritic melts: pressure and alkali effects // *N. Jb. Miner. Abh. (J. Min. Geochem.)*. 2018. V. 195. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1127/njma/2017/0060>
- Stolper E.* The Speciation of Water in Silicate Melts // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1982. V. 46. P. 2609–2620.
- The Encyclopaedia of Volcanoes* / Eds H. Sigurdsson, B. Houghton, H. Rymer, J. Stix. Cambridge: Academic Press, 2015.
- Zellmer G.F., Chen K.-X., Gung Y., Kuo B.-Y., Yoshida T.* Magma Transfer Processes in the NE Japan Arc: Insights From Crustal Ambient Noise Tomography Combined With Volcanic Eruption Records // *Front. Earth Sci*. 2019. V. 7. № 40. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00040>

Catastrophical Volcanic Eruptions: Reasons and Mechanisms

E. V. Sharkov*

Institute of ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) of the Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: sharkov@igem.ru

One of the main natural disasters is explosive volcanic eruptions, often lasting 2–4 months. It is obvious that such volcanic eruptions are associated with the simultaneous mass release of gas bubbles from the melts of their shallow peripheral foci, which should lead to a sharp increase in the volume of material contained in them, i.e., to explosions. It is shown that the main prerequisite for an explosive eruption is a sharp decrease in the solubility of water in melts known from experimental data at pressures less than 1 kbar corresponding to a depth of 3.5 km [Shilobreeva et al., 1991]. Therefore, rising water-saturated melts, characteristic of super-subduction (convergent) environments, reaching depths of 3–4 km, automatically become supersaturated with water and are a kind of “rattling mixture”, ready to explode at any moment. However, the release of gas bubble germs is a very energy-consuming process, and will not begin by itself. We believe that the trigger for a catastrophic explosion can be one of the earthquakes preceding the eruption, which resonates with self-oscillations in the peripheral focus of the volcano. This greatly increases the power of the pulse and helps to overcome the energy barrier. It is shown that the necessary and sufficient conditions for the appearance of a catastrophic eruption are: 1) the existence of a small – depth focus of a water-supersaturated magmatic melt, the presence of other volatiles (CO₂, SO₃ etc.) does not play a significant role here, 2) the presence of a trigger-an earthquake that resonates with self-oscillations in this focus, and 3) the presence of continuous feeding of the peripheral focus under the active volcano with new portions of the melt, ensuring the duration of the eruption

Keywords: small-depth volcanic hearth, water-saturated melt, retrograde boiling, earthquake, seismic resonance, explosive phenomena