

## Тайная жизнь супервулканов

Илья Биндеман

Микроскопические кристаллы вулканического пепла служат свидетельством самых разрушительных в мире извержений



На территории Калифорнии и Вайоминга глубоко под землей спят два вулкана, извержения которых на протяжении прошедших двух миллионов лет происходили четырежды. Если бы сейчас они проснулись, то в течение нескольких часов западные области США покрылись бы слоем пепла толщиной в несколько сантиметров. Похожие гигантские вулканы тлеют под Индонезией и Новой Зеландией. Извержение супервулканов по разрушительной силе сопоставимо со столкновением с Землей небольшого астероида, а выбросы раскаленной лавы, газов и пепла приводят к изменению климата. Ученые стремятся понять, что вызывает пробуждение огнедышащих гигантов, и

предсказать, когда они снова начнут действовать и какие проблемы из-за этого могут возникнуть в будущем.

### БОЛЬШИЕ, САМЫЕ БОЛЬШИЕ И ОГРОМНЫЕ

Супервулканы (оранжевые и голубые) разбрасывают пепел на гораздо большие расстояния, чем крупные вулканы (желтый и фиолетовый)



Исследования микроскопических кристаллов, взятых из отложений пепла, помогли ответить на некоторые вопросы. Их результаты, наряду с современными методами контроля возможных катастроф, позволяют надеяться, что вскоре можно будет выявлять признаки грядущей опасности задолго до следующих серьезных извержений.

### Ранние катастрофические извержения

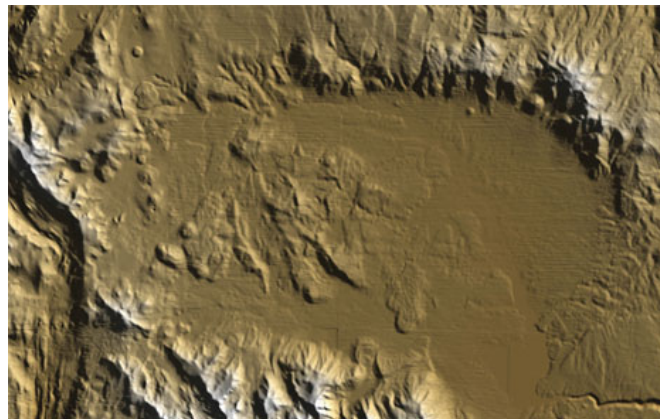
В 1950 гг. геологи обнаружили огромные округлые впадины (60–70 км в диаметре и несколько километров в глубину), напоминающие кальдеры самых известных вулканов планеты, образующиеся, когда высвобождающаяся магма вызывает обрушение кровли. Впадины находятся вблизи самых больших вулканических отложений, образовавшихся вследствие одного и того же извержения. Поэтому исследователи пришли к заключению, что они обнаружили остатки вулканов в сотни или даже тысячи раз более крупных, чем знаменитый Сент-Хеленс в шт. Вашингтон.

Поскольку толща континентальной коры велика, а высокотемпературные источники тепла, способные создать такие большие вулканические очаги, встречаются редко, то супервулканы — явление не частое. На протяжении прошедших 2 млн. лет как минимум  $750 \text{ км}^3$  магмы были внезапно извергнуты всего лишь в четырех регионах: Йеллоустонский национальный парк в штате Вайоминг, Лонг-Велли в Калифорнии, Тоба на острове Суматра и Таупо в Новой Зеландии. Поиск аналогичных крупных извержений продолжается и в других регионах, включая Запад Южной Америки и Дальний Восток России.

К середине 1970 гг. геологи, занимающиеся историческими исследованиями, раскрыли несколько сценариев формирования опасных вулканических очагов. В Йеллоустонском регионе Северо-Американская тектоническая плита движется поверх расплавленного вещества, поднимающегося из мантии, имеющей толщину до 2900 км. В этой «горячей зоне» подогрев земной коры привел к катастрофическим извержениям, происходившим в течение 16 млн. лет. Механизм образования вулканического очага Тоба был иным. Здесь находится зона субдукции, где одна тектоническая плита скользит под другую, что вызывает нагрев по всей ширине схождения, главным образом за счет частичного плавления вещества мантии над опускающейся плитой.

Независимо от источника тепла под громадным весом вышележащей плиты, давление в очаге растет по мере накопления магмы. Суперизвержение происходит тогда, когда сдавленная магма поднимает вышележащий слой земной коры настолько, что могут образовываться вертикальные трещины, достигающие поверхности планеты.

По ним магма устремляется вверх, образуя кольцо извержений. При их слиянии теряется опора массивного цилиндра земли внутри кольца. Кровля твердой скальной породы погружается вниз в магму подобно тому, как падает крыша дома, когда расходятся стены. Такое обрушение вызывает дополнительный выброс лавы и газа.



У спящих супервулканов, например, в Лонг-Велли (шт. Калифорния), нет характерных конусообразных вершин, как у вулкана Сент-Хеленс (шт. Вашингтон). Для них характерны громадные кальдеры — впадины, образующиеся, когда поверхностный слой обрушивается в подземные очаги

### По следам извержений

Исследователи пришли к выводу, что не всегда образование крупного вулканического очага ведет к катастрофе. Например, в Йеллоустоне три из самых молодых супервулканических кальдер сформировались 2,1 млн., 1,3 млн. и 640 тыс. лет назад, и каждая выростала внутри предыдущей. А в промежутках между извержениями приблизительно одинаковые объемы магмы выливались из общего очага медленно и спокойно. Почему же иногда магма так лениво вытекает на поверхность?

Частичный ответ на этот вопрос дает анализ состава крошечных кристаллов, найденных в лаве и пепле в Йеллоустоне. На протяжении долгого времени геологи считали, что магма в течение миллионов лет находилась в жидком состоянии, и каждый раз, когда часть ее выливалась на поверхность, из глубины сразу же поднималась новая порция, заполняя собой освободившееся пространство. Если бы теория была верна, то можно было бы ожидать гораздо больше катастрофических извержений, потому что не существует ни механических, ни термических условий для удержания внутри земной коры гигантских объемов магмы.

Подобные представления были в значительной степени основаны на анализе

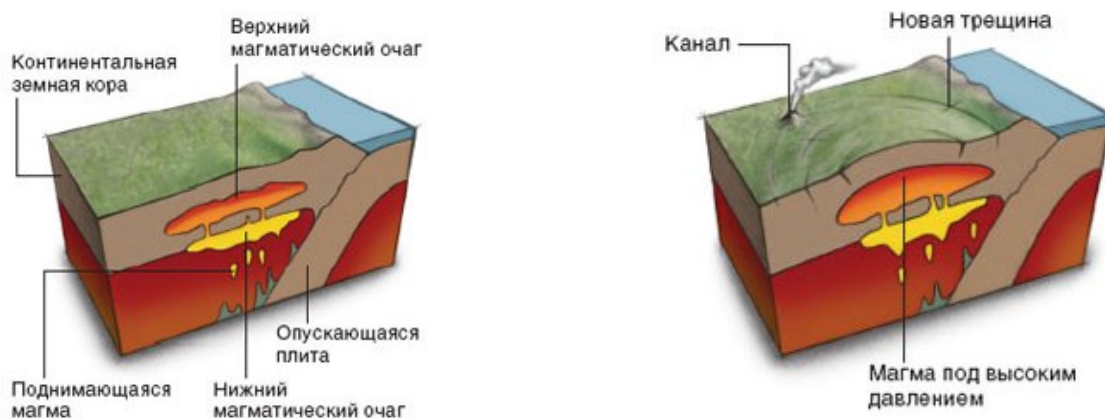
скальных пород в целом, когда набор химических данных получали по каждому найденному образцу вулканической породы. Результаты таких исследований давали общее представление об эволюции магмы, но не позволяли определить возраст извергнутой магмы и глубину, на которой она сформировалась.

Образцы горной породы состоят из тысяч крошечных кристаллов, каждый из которых имеет свой возраст, состав и историю. Поэтому точный анализ отдельных кристаллов, проведенный в конце 1980-х гг., позволил установить, что некоторые из них (а значит, и магма, в которой они образовались) возникли намного раньше других, и что одни сформировались на большой глубине, а другие – близко к поверхности Земли.

Джон Вэлли (John W. Valley) из Висконсинского университета в Мадисоне использовал один из долговечных видов вулканических кристаллов, циркон, способный выдерживать воздействие высокой температуры и давления без изменения первоначального состава, при изучении ранней стадии развития земной коры (см: Вэлли Д. История юной Земли // ВМН, №1, 2006). В 1998 г. группа Вэлли провела исследование породившей йеллоустонский циркон магмы.

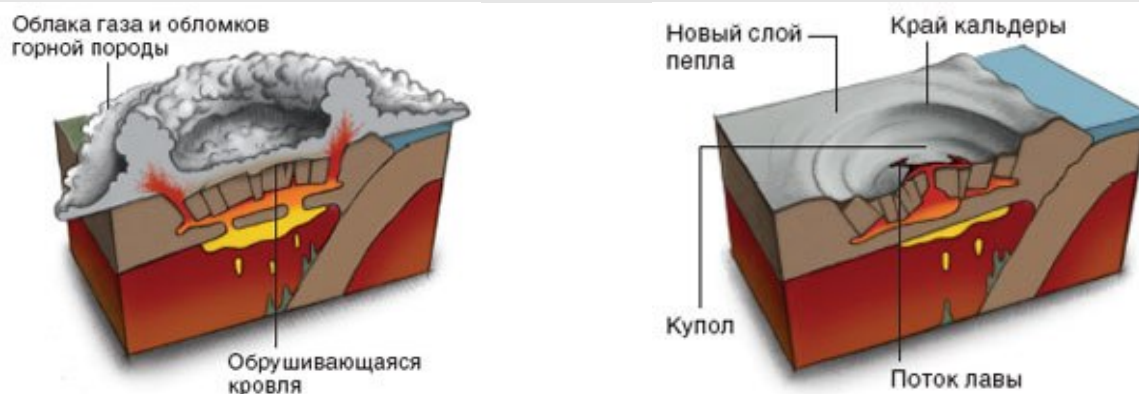
На первом этапе измерялось соотношение различных форм кислорода в цирконах самого молодого йеллоустонского грандиозного извержения, произошедшего 640 тыс. лет назад. Мы с Вэлли обнаружили, что кислородный состав цирконов не соответствовал предположению о происхождении из глубинной горячей мантии. Дело в том, что цирконы магмы отличаются высоким содержанием кислорода 18, а изучавшиеся нами содержали его в мизерных количествах, что характерно только для кристаллов, включенных в породы, подвергшиеся воздействию дождя или снега. Тогда мы предположили, что обрушенные скальные породы одного из древнейших йеллоустонских супервулканов расплавились во время более поздних извержений. Выдвинутая нами гипотеза получила подтверждение, когда выяснилось, что древние цирконы, формировавшиеся на протяжении 2 млн. лет, можно было обнаружить в молодом пепле только в том случае, если они образовались в выброшенном во время самых древних извержений материале, который позднее обрушился и повторно расплавился, а затем излился на поверхность во время последующих извержений.

Наши открытия позволяют определеннее прогнозировать поведение йеллоустонского супервулкана, а возможно, и других вулканов. Если в Йеллоустоне начнется новый цикл слабых извержений-предвестников, изотопный анализ кислорода и определение возраста цирконов в лаве должны указать, какая магма находится в



1 При частичном сплавлении вещества мантии над опускающейся плитой океанической земной коры образуется магма, поднимающаяся к основанию континентальной коры и скапливающаяся там. Она расплавляет часть материковой земной коры, имеющей более низкую температуру плавления по сравнению с ниже расположенными слоями. Некоторая часть магмы также поднимается по узким вертикальным проходам между двумя очагами

2 По мере роста очага земля над ним деформируется и растрескивается. Высокое содержание кремния в его магме и более низкая температура по сравнению с магмой мантии делает ее вязкой, и она с трудом пропускает воду. Поэтому, когда сгусток магмы внезапно прорывается по вертикальной трещине к поверхности, оставшийся под высоким давлением материал может медленно вытекать



3 Деформированная поверхность Земли в конечном счете обрушивается, когда новые подводящие каналы образуют кольцо по периметру магматического очага. Обрушенные обломки горной породы вытесняют новые объемы магмы. После внезапного высвобождения магмы образуются колоссального размера облака газа и обломков горной породы, которые уничтожают буквально все на своем пути

4 После извержения над частично излившимся очагом образуется впадина, называемая кальдерой. Со временем обрушенная кровля начинает плавиться, и в центре кальдеры формируется купол. Текущая лава может многократно медленно изливаться до тех пор, пока ее не накопилось достаточно для следующего суперизвержения

**Суперциклы:** Извержения гигантских вулканов носят циклический характер. На рисунках показаны четыре основные стадии, начиная с формирования подземного очага в зоне субдукции до образования кальдер

подземном очаге. Если обнаружится нехватка кислорода 18, весьма вероятно, что подпитка идет за счет остатков кашеобразной кристаллической массы, которая не

способна взорваться. Если в новой лаве будут обнаружены следы свежей магмы из мантии, а не древнего циркона, то, вероятно, начнется новый цикл вулканической активности, и недавно заполненный магмой очаг будет готов к извержению.

#### Сразу после извержения

Вулканические туфы толщиной в десятки и даже сотни метров, выходящие на поверхность Земли в виде вулканического плато в восточной Калифорнии, — вот то, что осталось от 750 км<sup>3</sup> магмы, извергнутой супервулканами в Лонг-Велли приблизительно 760 тыс. лет назад.

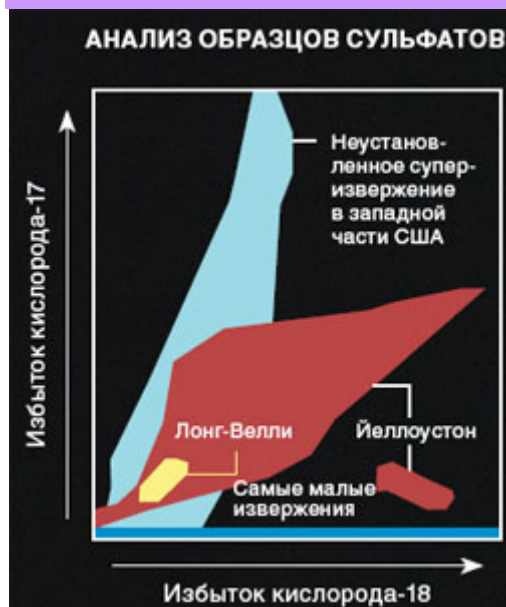
Геологи считали, что обширные туфовые пространства появились в результате серии извержений, происходивших миллионы лет назад. Однако исследования заполненных магмой микроскопических пузырьков внутри крошечных кристаллов кварца говорят о другом. Скорость, с которой изливается магма, зависит в основном от ее вязкости и от разности давлений в подземном очаге и на поверхности Земли. Поскольку давление внутри пузырьков соответствует давлению в очаге, где формировалась магма, пузырьки могут служить моделью самого очага.

Группа Альфреда Андерсона (Alfred Anderson) из Чикагского университета изучала пузырьки под микроскопом, чтобы определить время излияния магмы. Результаты этих и других исследований, а также данные полевых наблюдений, проводившихся начиная с 1990 г., показали, что данные туфы, а возможно, и большая часть других вулканических пород выбросов были извергнуты одновременно за 10–100 часов. Поэтому специалисты вынуждены были внести коррективы в свою реконструкцию супервулканических извержений.

Вместо обычного медленного истечения раскаленной лавы выброс из супервулканов раскаленного пенящегося газа и пепла, чей столб уходил в стратосферу на высоту 50 км, происходил со сверхзвуковой скоростью. При обрушении земной коры над очагом огромные серые облака, агрегатное состояние которых занимало промежуточное положение между лавой и пеплом, расходились вокруг горизонтально. Их скорость достигала 400 км/ч, а температура — 600–700 °С, и они выжигали все на десятки километров вокруг. В течение нескольких дней или недель после извержения на землю падал бледно-серый пепел, толщина слоя которого даже в 300 км от источника могла достигать полуметра. На расстоянии до 200 км от кальдеры проникновение солнечного света было ограничено, и в полуденном небе царили сумерки. Дома, люди и животные были раздавлены и покрыты золой.

Постепенно дождь (ставший кислым от вулканических газов) смыл следы катастрофы, и основные водные пути оказались заблокированы вулканическим материалом. Недавно при бурении в Мексиканском заливе вблизи дельты Миссисипи более в чем 1,5 тыс. км от супервулкана в Йеллоустоне был обнаружен толстый слой вулканических наносов, которые могли накопиться только при сплаве их вниз по реке.

#### Разрушение озонового слоя



На снимках из космоса верхних слоев атмосферы (фон) вредные газы, извергнутые Пинатубо на Филиппинах в 1991 г., обозначены разными цветами. Согласно последним исследованиям, такие газы, выбрасываемые супервулканами, могут заметно разрушить защитный озоновый слой планеты до того, как они выпадут в виде кислотных дождей или смешаются с пеплом, после чего образуются сульфаты. Образцы сульфатов из отложений четырех супервулканов содержат необычно высокие концентрации

кислорода-17 (окрашенные области неправильной формы на графике отражают результаты измерений). Такой избыток изотопа характерен только для соединений, которые захватили редко встречающиеся атомы во время реакций с отдельными газами, вероятнее всего, с озоном, в верхних слоях атмосферы. В соединениях, образовавшихся на Земле, например, в продуктах малых извержений, такой аномалии не наблюдается (синяя линия)

#### Долговременные последствия

Извержения супервулканов сопровождались выбросом в верхнюю часть атмосферы больших объемов газа, что нанесло большой вред окружающей среде.

Один из вулканических газов, двуокись серы ( $\text{SO}_2$ ), реагирует с кислородом и водой, в результате чего образуются крошечные капельки серной кислоты, препятствующие проникновению солнечного света, что стало причиной похолодания.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , осаждаясь из загрязненной атмосферы, долго сохраняется в снегу и во льду. В 1996 г. при исследовании ледяных кернов Гренландии и Антарктиды была обнаружена

крайне высокая концентрация серной кислоты, соответствующая времени сразу после суперизвержения Тоба. Вулкан выбросил 74 тыс. лет назад  $2800 \text{ км}^3$  лавы и пепла, а глобальное понижение температуры составило в среднем от 5 до  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Последствия такого похолодания были, несомненно, серьезны, но они длились не десятилетиями или столетиями, как считали ранее, а значительно меньше: серная кислота в ледяном керне исчезла через шесть лет (см.: Голицын Г.С. Предвидеть будущее // ВМН, № 8, 2006).

Современные методы изучения состава атомов кислорода в кислотном дожде вулканического происхождения свидетельствуют о долгосрочном влиянии двуокиси серы на атмосферу. Превращение  $\text{SO}_2$  в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  происходит при окислении, другими словами, двуокись серы должна отнять 2 атома кислорода у других соединений, уже находящихся в атмосфере. Однако какое из них играет ключевую роль? В 2003 г. мы с Джоном Эйлером (John M. Eiler) из Калифорнийского технологического института занялись изучением образцов пепла доисторических извержений в Йеллоустоне и Лонг-Велли. Мы начали свои исследования с очень сильного окислителя — озона, который известен своей способностью не пропускать на Землю опасное ультрафиолетовое излучение Солнца и отличается аномальным, так называемым не зависящим от массы изотопным составом атомов кислорода, т.е. избытком кислорода 17. Когда озон взаимодействует в стратосфере с  $\text{SO}_2$ , он оставляет в образовавшейся кислоте свой изотопный след (аномальную концентрацию кислорода 17), который был обнаружен геохимиками Калифорнийского университета в Сан-Диего в кислородных атомах кислоты, содержащейся в каплях дождя, и в сульфатах, образующихся на Земле при реакции кислотных дождей с пеплом.

Избыток кислорода 17 и другие данные, полученные на основании изучения образцов пепла из Йеллоустона и Лонг-Велли, свидетельствуют о том, что в этих регионах в реакциях с вулканическими газами были потрачены значительные объемы озона стратосферы. Исследователи, изучающие кислотные осадки в Антарктиде, также подтвердили вероятность разрушения озона стратосферы в результате этих извержений. Однако все, что можно сказать о последствиях самых катастрофических извержений, носит в лучшем случае умозрительный характер.

После извержения вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. наблюдения из космоса показали, что озоновый слой сократился на 3–8%. А что произошло бы после



извержения в 100 раз более мощного, установить пока невозможно. Тем не менее, сегодня специалисты знают достаточно о локализации возможных извержений и могут сказать, что в ближайшем будущем великих вулканических катастроф не ожидается.

(Scientific American)

От редакции: описанную в статье гипотезу не следует принимать как истину в последней инстанции. Много ученых относится к изложенным утверждениям весьма скептически – и не без оснований: уровень доказательного материала не совсем соответствует серьезности сделанных выводов. Сам термин «супервулкан» официально не является общепризнанным. Его широкому распространению мы обязаны журналистам телекомпании ВВС.