



**Лагуна-дель-Мауле** в Чили состоит из кольца риолитов (в центре), выброшенных во время извержений древних вулканов

# СКРЫТЫЙ АД



## ГЕОЛОГИЯ

Под Чили, возможно, зреет супервулкан с холодным нутром, что в корне меняет представление о механизмах запуска сильных извержений

*Шэннон Холл*

**Вертолет Airbus забарахлил** в ледяном воздухе на высоте сотен метров над чилийскими Андами. Каждый раз, когда он кренится на повороте, он ныряет на 20 м вниз — и зубрины горных вершин, кажется, врежутся в борт вертолета Брэда Сингера (Brad Singer) и войдут сквозь зияющую дыру, где снята дверь для удобства фотографирования. Сотрясения и прямая дорога на землю не придают уверенности Сингеру, геологу, привыкшему к ровным площадкам вокруг Висконсинского университета в Мадисоне, хотя он и пристегнут. «Как будто ты на больших американских горках», — так он вспоминает об этом.

## ОБ АВТОРЕ

**Шэннон Холл** (Shannon Hall) — удостоенная награды научная журналистка, проживающая в Скалистых горах. Основные темы — астрономия, геология, окружающая среда.



Однако внушающая благоговейный ужас картина, лежащая далеко внизу и напоминающая об обширной вулканической деятельности, отвлекает его от опасности падения. Однажды Сингер и его коллеги летели над потоком бледно-розовой лавы, разливавшейся на 20 км<sup>2</sup> застывшего ландшафта.

Здесь легко могли бы разместиться 25 вершинных кратеров, как Килауэа. И это была только часть того, что геолог приехал увидеть. В этом вулканическом районе, называемом Лагуна-дель-Мауле, можно наблюдать 50 лавовых потоков и 70 отложений пепла вокруг 54-километрового льдисто-голубого озера. Сингер отмечает, что только сверху можно по-настоящему осознать гигантские размеры этого региона, а он исследует его последние 20 лет. Только так можно понять, что Лагуна-дель-Мауле содержит самую большую в мире коллекцию недавно излившихся риолитов, которые в расплавленном виде могут быть особенно взрывными и опасными.

Геологи считают, что эти потоки и отложения созданы 25–30 различными вулканами в течение последних 20 тыс. лет. И эти памятные черты выглядят устрашающе, как и место под названием

Лонг-Валли в Калифорнии, где в добавление к выбросам того, что Сингер называет «обычными взрывами», громадный вулкан вырвал в земле углубление величиной в 500 км<sup>2</sup> приблизительно 765 тыс. лет назад. Такое геологическое сходство, да еще жуткое вздутие земли в районе Лагуна-дель-Мауле, начавшееся десять лет назад или около того, дает основание предположить, что данный район может стать следующим супервулканом в мире.

Супервулканы обладают одними из самых разрушительных сил на нашей планете. Во время их эксплозии как минимум 1 тыс. км<sup>3</sup> твердых пород и пепла вырывается наружу одновременно, то есть выбрасывается в 2,5 тыс. раз больше материала, чем при грандиозном извержении стратовулкана Сент-Хеленс в 1980 г. Из карт магматического очага Лагуна-дель-Мауле недавно стало известно, что он достаточно вырос, чтобы при случае сразу выбросить такую массу в воздух. Хотя Лагуна-дель-Мауле выпускает пар постепенно, в ходе небольших извержений, но выглядит это как модель древних гигантов.

Надо отметить еще одну важную особенность, которая отсутствовала у других известных супервулканов: формирование происходит на наших глазах. До нынешнего дня все, что геологи знали о подобных «мастодонтах», было результатом аналитической работы над образцами, которые тщательно отбирались по крупницам из древних горных пород, отложений пепла и других остатков, а потом проводилась реконструкция нескольких аспектов извержения. Но Лагуна-дель-Мауле

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

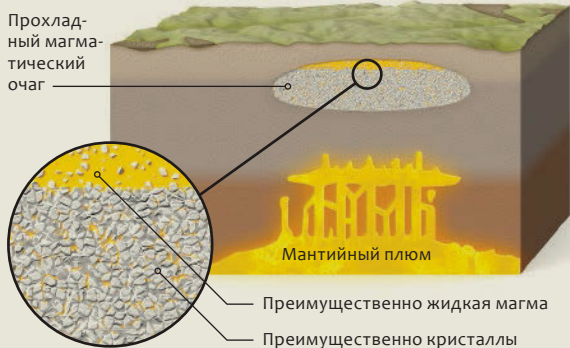
- Мощные разрушительные силы затаились в супервулканах, чьи извержения столь грандиозны, что могут перекрыть континенты.
- Высоко в Андах, в районе Лагуна-дель-Мауле, вырывается вулканическая система, которая может достичь размеров супервулкана на наших глазах. Магматический очаг здесь уже достаточно велик, а следы прошлых извержений говорят о большой мощности.
- Как ни удивительно, эксплозия подобных гигантов происходит в условиях не перегретых расплавов горных пород, а практически твердых масс. Ученые заняты исследованиями пусковых механизмов, которые могут сработать в течение десятилетий.

## Как извергаются супервулканы

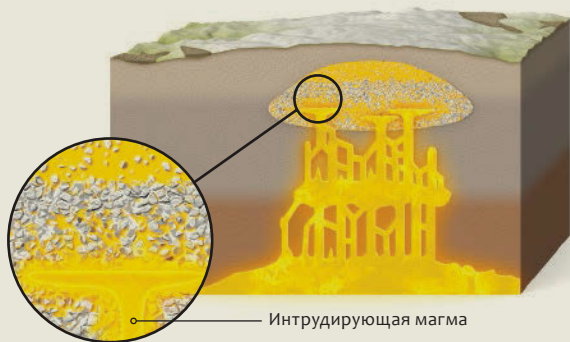
Самые большие вулканы планеты не подпитываются постоянно бурлящим очагом магмы. Согласно последним исследованиям, их основание сложено относительно холодными, почти твердыми горными породами. Теоретически выделены два различных источника пусковых механизмов, которые могли бы быстро разогреть породы до уровня эксплозии.

### Восходящий мантийный плюм

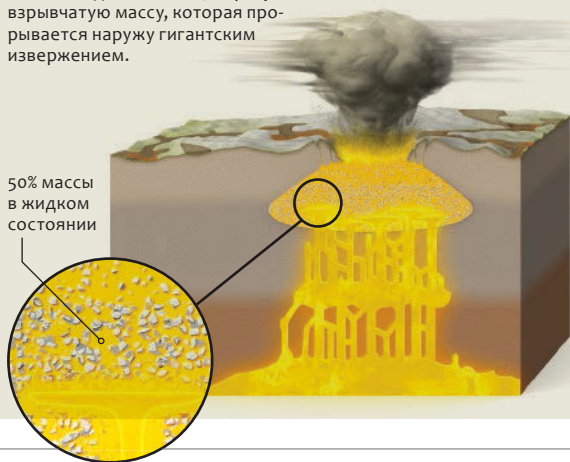
**1** Некоторые супервулканы, например Йеллоустонский, расположены над поднимающимся горячим мантийным потоком. Ближе к поверхности Земли находится очаг прохладнее, главным образом кристаллический, с небольшим количеством горячего жидкого вещества.



**2** Расплавленный материал мантийной струи медленно движется вверх на протяжении сотен лет, подогревая очаг при контакте.

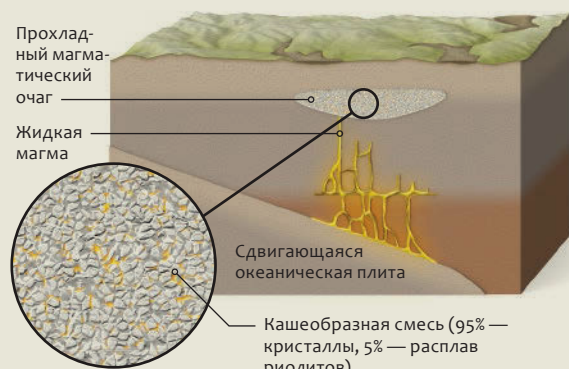


**3** Разогретые кристаллы быстро плавятся, вероятно, в течение десятилетий, образуя взрывчатую массу, которая прорывается наружу гигантским извержением.

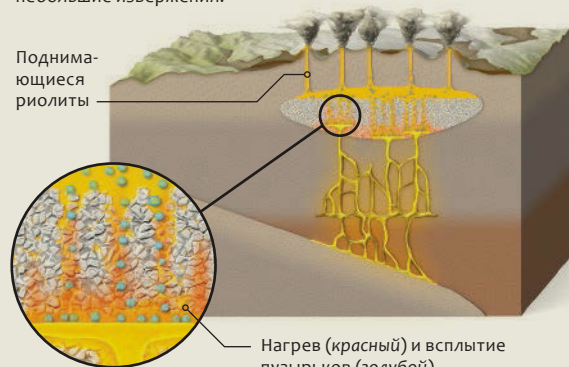


### Бурлящие пузырьки

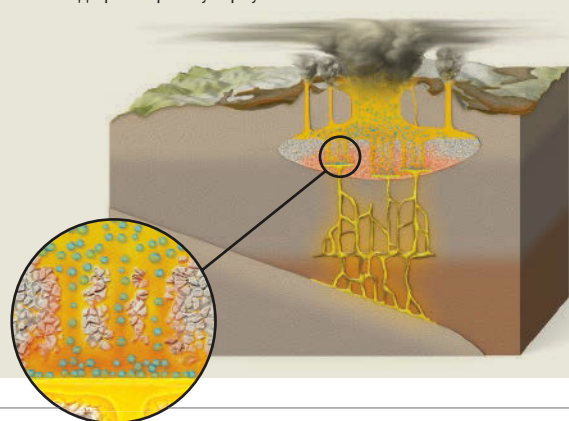
**1** Вулканические зоны лежат поверх двух сталкивающихся литосферных плит, где в глубине Земли образуется раскаленная магма. Вверху очаг с кристаллическим кашеобразным веществом — вязким расплавом риолитов — ждет своего часа.



**2** Магма достигает очага, и кристаллы плавятся под воздействием жара. Расплав поднимается в камеру, освобождая летучую жидкость, состоящую главным образом из пузырьков воды. Продолжительный нагрев и поднимающиеся пузырьки могут провоцировать выталкивание расплава риолитов, создавая небольшие извержения.



**3** Пузырьки собираются у верха очага, выталкивая все больше риолитов в тектонические трещины. Когда расплав достигает вершины, его давление падает, а пузырьки быстро увеличиваются в объеме. Так может возникнуть большое извержение вплоть до размеров супервулкана.



пробуждается прямо сейчас, впервые открывая живой взгляд на развитие катастрофы. «В истории человечества не представлялось случая воочию понаблюдать за мощным извержением супервулканов», — говорит Сингер. (Перспектива подобного испытания вызывает большую озабоченность сотен тысяч жителей близлежащих городов. Извержение супервулкана не предвидится в скором времени, но правительственные учреждения Аргентины и Чили пристально следят за этим регионом.)

Рассматривая Лагуна-дель-Мауле крупным планом и учитывая знания о других, «старших» супервулканах, ученые пришли к неожиданному заключению: гигантские подземные вулканические очаги, подогревающие этих монстров, не представляют собой жаркие бассейны расплавленной лавы, согласно прежним научным взглядам. Напротив, масса настолько прохладна, что часто находится в твердом состоянии. Данное представление ставит вулканологов перед новой загадкой: чтобы произошло извержение, твердая магма должна расплавиться и подняться быстро, за период около десятка лет, поэтому геологам предстоит объяснить, как может произойти резкий переход состояния от холодного к перегретому.

Недавно Сингер и некоторые его коллеги наблюдали признаки того, как прохладный магматический очаг, возможно, был атакован пузырьками горячей воды снизу; наблюдая за другими вулканами, ученые нашли доказательства того, как магма вырвалась из нижней, более раскаленной камеры в верхнюю, что холоднее. Пока ученые стараются собрать воедино все объяснения, настоящие наблюдения в Лагуна-дель-Мауле, вероятно, смогут пролить свет на крупнейшие взрывы планеты.

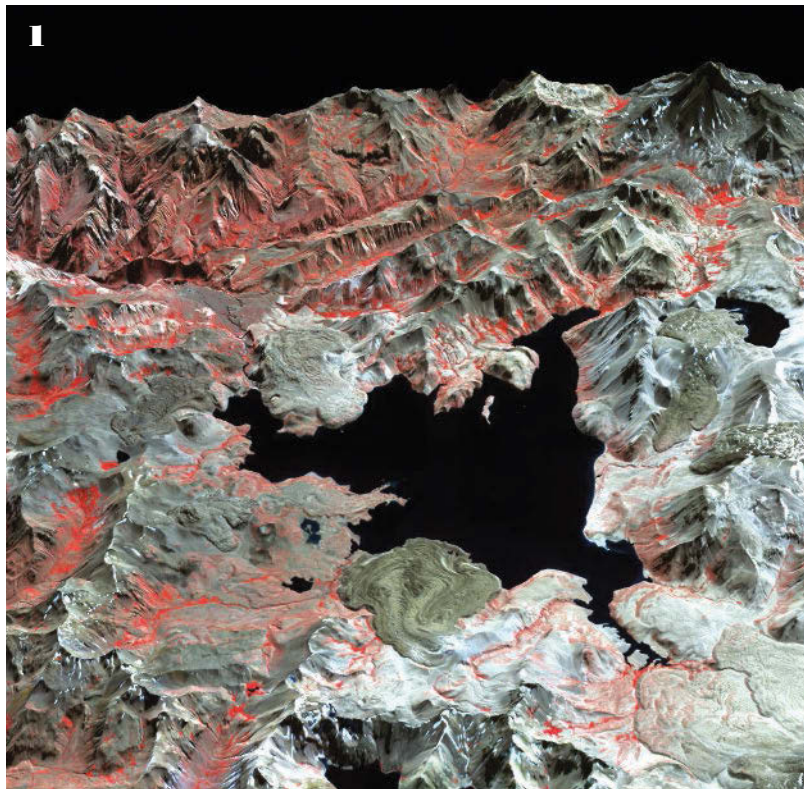
### Растущая мощность

Вырвавшиеся на свободу силы исторических супервулканов были ошеломляющи и неустойчивы. Так, например, приблизительно 631 тыс. лет назад, во время извержения одного из них на территории нынешнего Йеллоустонского национального парка в США, смертоносные волны горячего газа, вулканических обломков, пепла и ядовитой пыли накрыли всю поверхность и изменили ландшафт. Изверженный материал заполнил все долины, и его горячие тяжелые массы спеклись в крутые обрывы, достигшие толщины 200 м, наблюдаемые сегодня. Затем небо потемнело от пепла, который выпал на огромной полосе Северной Америки, остался также слой обломочной породы, образовавшей треугольник, его стороны протянулись от нынешней границы с Канадой до Калифорнии и далее до Мексиканского залива. Порой отголоски деятельности

супервулкана могут дать о себе знать всему миру. Несколько вулканов когда-то образовали столь густые завесы пепла, что, как ученые полагают, они перекрыли солнечный свет и Земля погрузилась в вулканическую зиму.

В новое время ни один из супервулканов не проявлял активности. Но в 2008 г. Мэттью Притчард (Matthew Pritchard), геофизик из Корнеллского университета, просматривая данные, полученные со спутника, заметил необычный сигнал, идущий от чилийских Анд. На экране его компьютера открылись необычные светящиеся кольца. Структуры такого типа характеризуют любое изменение высотных отметок поверхности Земли. Но кольца, подобные этим, как правило, располагаются на вершине отдельного известного вулкана, а здесь эта структура распространялась по обширной территории в 400 км<sup>2</sup>, занятой холмами и плато. Случилось что-то необычное. Просматривая ранние изображения, Притчард выяснил, что поднятие, которое, должно быть, происходило между 2004 и 2007 гг., имело скорость 20 см в год. Это самая большая скорость изменения уровня земной поверхности, когда-либо зарегистрированная в мире, и она в десять раз превышает усиленное поднятие в Йеллоустоне, которое наблюдалось несколько раз за последние несколько лет (потом оно остановилось).

Подвижки в Лагуна-дель-Мауле наряду с данными о районах вулканической активности способствовали в последние годы организации ряда





**Черты вулканического ландшафта** Лагуна-дель-Мауле видны на космическом снимке (1): растительность (красный) и покрытые снегом вершины гор (белый). Геологи устанавливают датчики около озера, чтобы определить поднятие земли (2).

экспедиций с целью определить, на самом ли деле этот район близок к извержениям, и если это так, то как велики они могут быть. В 2013 г. Сингер приступил к выполнению пятилетнего проекта по изучению прошлого и настоящего состояния данной системы. Работая с Национальной службой геологии и горного дела Республики Чили, он со своими коллегами установил около 50 датчиков на земле. Они запустили вертолеты над озером для сканирования земной поверхности. И, взяв в руки лопаты и молотки, они отправились за образцами древних горных пород, которые затем могли бы исследовать в лаборатории.

Все данные свидетельствовали, что под поверхностью Земли назревает что-то очень большое. «Я не хочу быть паникером или кем-то вроде того, но все говорит о том, что происходит развитие очень большого скопления магмы в недрах Лагуна-дель-Мауле», — поясняет Джудит Файрстейн (Judith Fierstein), геолог Калифорнийской вулканической обсерватории в Менло-Парке Геологической службы США. Данные о подземных структурах, собранные по крупицам на основании изучения

колебательных движений, проходящих по ним, а также изменений силы тяжести и электропроводимости различных горных пород, — все указывает на то, что район расположен над бассейном в 450 км<sup>3</sup>, содержащим взрывчатую риолитовую магму. Сингер говорит, что если вся эта масса взлетит на воздух, то она превратится в 1 тыс. км<sup>3</sup> пепла, обломков и лавы, что характеризует минимальную силу извержения супервулкана.

Магма несет опасность не только при одновременном извержении всей массы. При задействовании всего 10% от полного объема данных запасов магмы мощность извержения будет в два раза превышать Кракатау, который, не будучи супервулканом, унес жизни 36 тыс. людей в Индонезии в 1883 г.

### Холодный каменный убийца

Одни ученые измеряют размеры Лагуна-дель-Мауле, а другие в это время более озабочены температурным режимом. В классическом представлении магма бурлит в глубине активного вулкана в жидком виде, а затем поднимается к поверхности

земной коры, как шарик в гелевом светильнике. Однако в 2014 г. Адам Кент (Adam Kent) из Университета штата Орегон и Кари Купер (Kari Cooper) из Калифорнийского университета в Дейвисе сделали потрясающее открытие, которое побудило многих из научного сообщества считать, что некоторые вулканы на самом деле могут иметь холодную природу.

Кент и Купер исследовали крошечные кристаллы, заключенные в изверженных горных породах, которые были отобраны на вулкане Худ в Орегоне. До того как эти кристаллы были извергнуты, они росли в магматическом очаге, наращивая слой за слоем, во многом напоминая рост годичных колец дерева, при этом фиксируя всю историю изменений магмы, в том числе ее состав, давление и температуру. Кристаллы, привезенные с вулкана Худ, например, показали, что магма в течение 99% времени своего образования находилась при температуре, недостаточной для излияния. На самом деле она была не жидкой, а кашеобразной, представляла собой сеть кристаллов с жидкостью между ними. Кент поясняет: «Ну, знаете, как арахисовое масло — когда вы вынимаете его из холодильника и пытаетесь намазать, а оно слишком твердое».

Эти выводы заставили ученых задуматься, а не относится ли это к другим вулканам. По-видимому, следует ожидать положительного ответа. В 2007 г. Купер и ее коллеги провели аналогичные анализы кристаллов, изверженных в Новой Зеландии в вулканической зоне Таупо, расположенной в центре острова Северного, где известны несколько извержений супервулканов. Ученые сделали вывод, что эти кристаллы большую часть времени своего формирования находились в условиях прохладной твердой магмы. В конце 2017 г. Сингер и его коллеги проанализировали вулканические обломки, собранные на супервулкане Лонг-Валли, и пришли к тем же результатам. В магматическом очаге в Йеллоустоне также содержится прохладная кристаллическая смесь.

Хотя Кент и Купер нашли признаки пребывания магмы при немного большей температуре в нескольких местах Северной и Южной Америк, напрашивается вывод, что в целом супервулканы имеют обыкновение быть холодными — и они

остаются таковыми до момента их излияния. Это значит, что горячая магма недолговечна, она разогревается только непосредственно перед извержением. Работа Купер с образцами из Таупо показывает, что данные системы перешли в жидкое состояние только за 40 лет до извержения. В Лонг-Велли разжижение продолжается от десятков до нескольких сотен лет. В Йеллоустоне оно происходит лишь десятилетия. Купер говорит, что эти сроки могут сократиться до нескольких лет, ведь ученые имеют склонность публиковать весьма осторожные, с большим запасом, оценки.

Что можно сказать о Лагуна-дель-Мауле? Скорее всего, это крупное магматическое тело из кашеобразной кристаллической массы. Сингер и его коллеги утверждают, что на 95% оно состо-

ит из кристаллов и только 5% занимает расплав. Кашеобразная масса относительно прохладная — около 800° C; лава, низвергавшаяся каскадом по склонам вулкана Килауэа на острове Гавайи этим летом, была, например, около 1200° C, то есть на 50% горячее. Результаты исследований подкрепляют мнение, что хладнокровные гиганты могут проснуться в одночасье. Натан Андерсен (Nathan Andersen), геолог Орегонского университета, исследовавший мелкие кристаллы, включенные в лаву потоков Лагуна-

дель-Мауле, обнаружил, что в магме они пробыли только от 10 до 100 лет.

### Пробуждение гиганта

Однако при взгляде на эту картину напрашивается вопрос: как эти замороженные системы расплавляются и мобилизуются столь быстро? В Йеллоустоне последнее крупное извержение супервулкана случилось, когда жидкая магма поднялась из недр Земли и ударила наверху в отвердевший очаг, по утверждению Кристи Тилл (Christy Till), геолога из Университета штата Аризона. Ее модель представлена в общих чертах, ведь ни один ученый не снимал точных измерений в то время, но из анализа вулканических обломков следует, что поднимающаяся жидкая магма смешивалась с затвердевшей, расплавляя кристаллы. При этом нагревалась вся вулканическая камера, и добавленный объем жидкого расплава поднимал давление, пока не происходило само излияние на поверхность.

**Супервулканы имеют обыкновение быть холодными — и они остаются таковыми до момента их излияния. Это значит, что горячая магма недолговечна, она разогревается только непосредственно перед извержением**

Однако надо отметить, что в Чили все может происходить по-другому. Тилл поясняет: «Не существует единой модели для всех вулканов». Йеллоустон, например, находится на вершине мантийной струи, а Лагуна-дель-Мауле и Лонг-Валли — нет. В этих местах одна литосферная плита погружается под другую, расплавляя породы и превращая их в магму по мере воздействия. Как объясняет Андерсен, это создает различные условия возникновения извержений: бывает, что нагревается только часть содержимого вулканического очага и происходит интенсивное бурление пузырьков.

Когда Андерсен изучал кристаллы изверженных в прошлом пород, собранные в Лагуна-дель-Мауле, он выяснил, что базальтовая магма, зарождающаяся глубже, не полностью пронизывает вулканическую систему. Магма такого типа застряла в основании верхней камеры Лагуна-дель-Мауле, преимущественно заполненной риолитами. Эти два типа горных пород никогда не смешивались. Базальтовая магма охлаждается при остановке, выделяя тепло, идущее вверх. При этом выделяются также легко испаряющиеся пузырьки водяного пара. Как только тепло и пузырьки начинают подниматься, они расплавляют некоторые из соседних кристаллов, создавая струи, полные пузырьков, устремляющиеся к вершине очага. На этом этапе нагнетается столь большое давление, что струи прорываются сквозь твердую поверхность очага.

Такое положение дел беспокоит Сингера. Если неустойчивые потоки пузырьков постоянно поднимаются в недрах Лагуна-дель-Мауле, то для них нет выхода. Вокруг горного озера не наблюдается никаких характерных элементов гидротермальной деятельности, как, например, вроде гейзера Старый Служака или фумарол, горячих источников, активных участков жерл. Сингер беспокоится: «По-моему, все это говорит о потенциально большей опасности района Лагуна-дель-Мауле по сравнению с другими системами». Если некоторая часть газов имела бы возможность утечь, то рост очага мог бы замедлиться. Сингер продолжает: «Но так как этот магматический бассейн заключен внизу и созревает при определенной температуре, в этих условиях, вероятно, система способна очень сильно вырасти, как в Йеллоустоне перед последним крупным извержением. Это может оказаться переломным моментом. И это станет извержением, какого люди еще никогда не видели».

Итак, хотя магматический бассейн под Лагуна-дель-Мауле едва достигает размеров, присущих супервулканам, но он может даже их превысить за ближайшие столетия. Сегодня опасения Сингера больше имеют гипотетический характер — и механизм извержения тоже. Вполне вероятно, например, что поднимающийся расплав, насыщенный пузырьками, не сможет усилить давление

настолько, чтобы самостоятельно произошел гигантский выброс, для этого понадобится помощь местного землетрясения. Команда Сингера в настоящее время пытается определить возможные источники такого дополнительного «пускового устройства».

Даже при условии, что в районе Лагуна-дель-Мауле имела бы место серия небольших извержений, а следы их работы в прошлом запечатлены в покровах лавы и пепла, последствия все же могут отразиться на всей Южной Америке. Пепел может задерживать воздушные потоки в данном регионе и, возможно, целые годы пагубно воздействовать на сельское хозяйство в Аргентине (где он, скорее всего, и осядет ввиду преобладания восточных ветров). Кроме того, принесенный пепел грозит вывести из строя дамбу близ реки Мауле, вызвав катастрофические паводки, которые могли бы ударить по городу Талька, расположенному в долине реки, население которого насчитывает более 200 тыс. человек.

Команда Сингера сняла свои полевые датчики, но ученые из Чили и Аргентины приняли эстафету, установив новые измерительные приборы для наблюдений над озером. В настоящее время в данном регионе продолжают подъемы на воздушном шаре к облакам, что представляется менее опасным. Но если на озере будут в дальнейшем замечены тревожные знаки, исследователи тотчас же смогут точно предсказать следующее извержение, поскольку сейчас они имеют возможность лучше рассмотреть ту искру, что способна разбудить холодного зверя. ■

**Перевод: В.И. Сидорова**

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Биндеман И. Тайная жизнь супервулканов // ВМН, № 10, 2006.
- Rapid Remobilization of Magmatic Crystals Kept in Cold Storage. Kari M. Cooper and Adam J.R. Kent in *Nature*, Vol. 506, pages 480–483; February 27, 2014.
- Rapid Cooling and Cold Storage in a Silicic Magma Reservoir Recorded in Individual Crystals. Allison E. Rubin et al. in *Science*, Vol. 356, pages 1154–1156; June 16, 2017.
- Incremental Heating of Bishop Tuff Sanidine Reveals Preeruptive Radiogenic Ar and Rapid Remobilization from Cold Storage. Nathan L. Andersen et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 114, No. 47, pages 12, 407–12, 412; November 21, 2017.
- Petrochronologic Perspective on Rhyolite Volcano Unrest at Laguna del Maule, Chile. Nathan L. Andersen et al. in *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 493, pages 57–70; July 1, 2018.