



СТРОМБОЛИ — вулкан с горячим сицилийским характером



Фото Б. Бенке

Ключевые слова: вулкан Стромболи, извержение, сейсмическая томография, магматические каналы.

Key words: Stromboli volcano, eruption, seismic tomography, magma conduits

Вид со склона Стромболи на прибрежный городок у подножия вулкана (справа вверху)

И. Ю. КУЛАКОВ, Л. СКАФРИ



КУЛАКОВ Иван Юрьевич – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе и заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 200 научных работ



СКАРФИ Лючиано – научный сотрудник филиала Национального института геофизики и вулканологии (INGV) (Катания, Сицилия, Италия). Занимается тектоническими исследованиями в центральной части Средиземноморья с использованием данных сейсмологии. Автор и соавтор более 90 научных работ

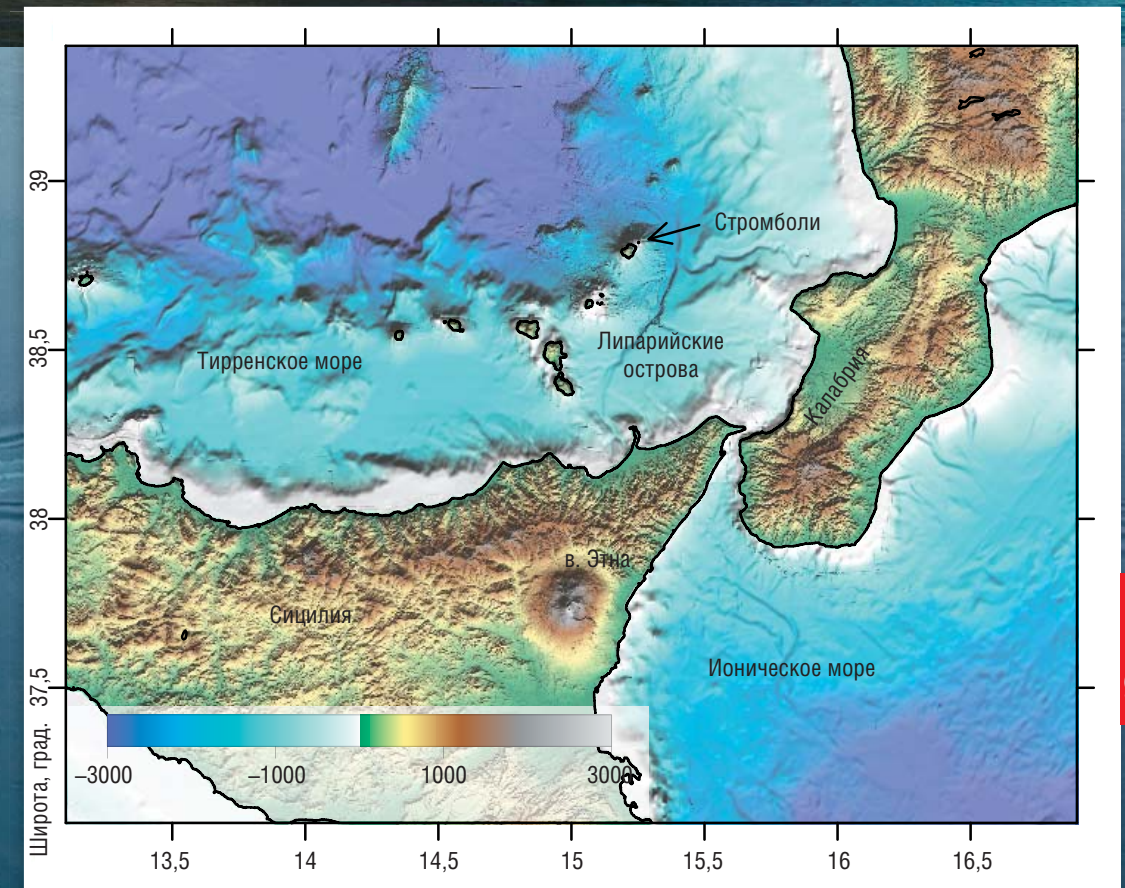
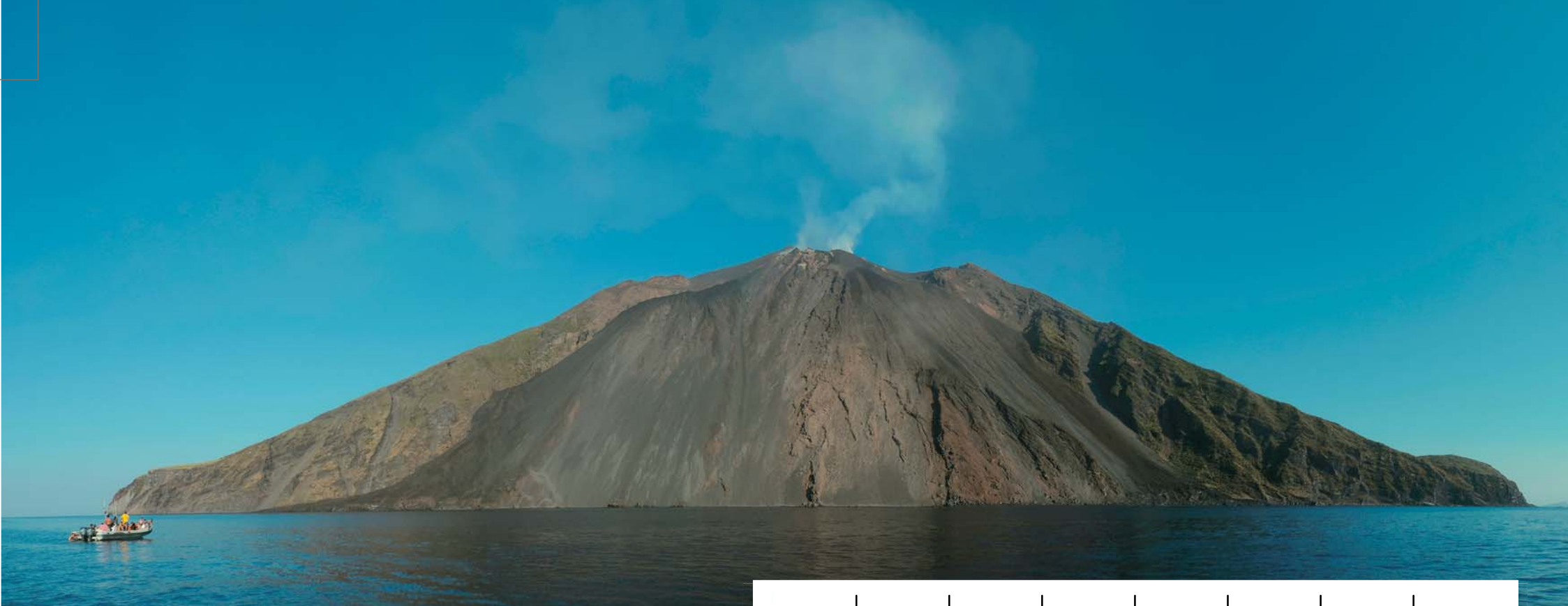
© И. Ю. Кулаков, Л. Скафри, 2019

Стромболи – это маленький вулканический остров, расположенный в Средиземном море недалеко от берегов Сицилии. Его диаметр составляет всего около 4 км, при этом сам вулкан возвышается над уровнем моря почти на километр. Но на самом деле этот вулкан намного больше, так как основная его часть скрыта под водой: высота вулкана над средней поверхностью морского дна достигает 3 км. Стромболи – один из самых активных вулканов в мире: он извергается, практически в непрерывном режиме, уже на протяжении тысячелетий

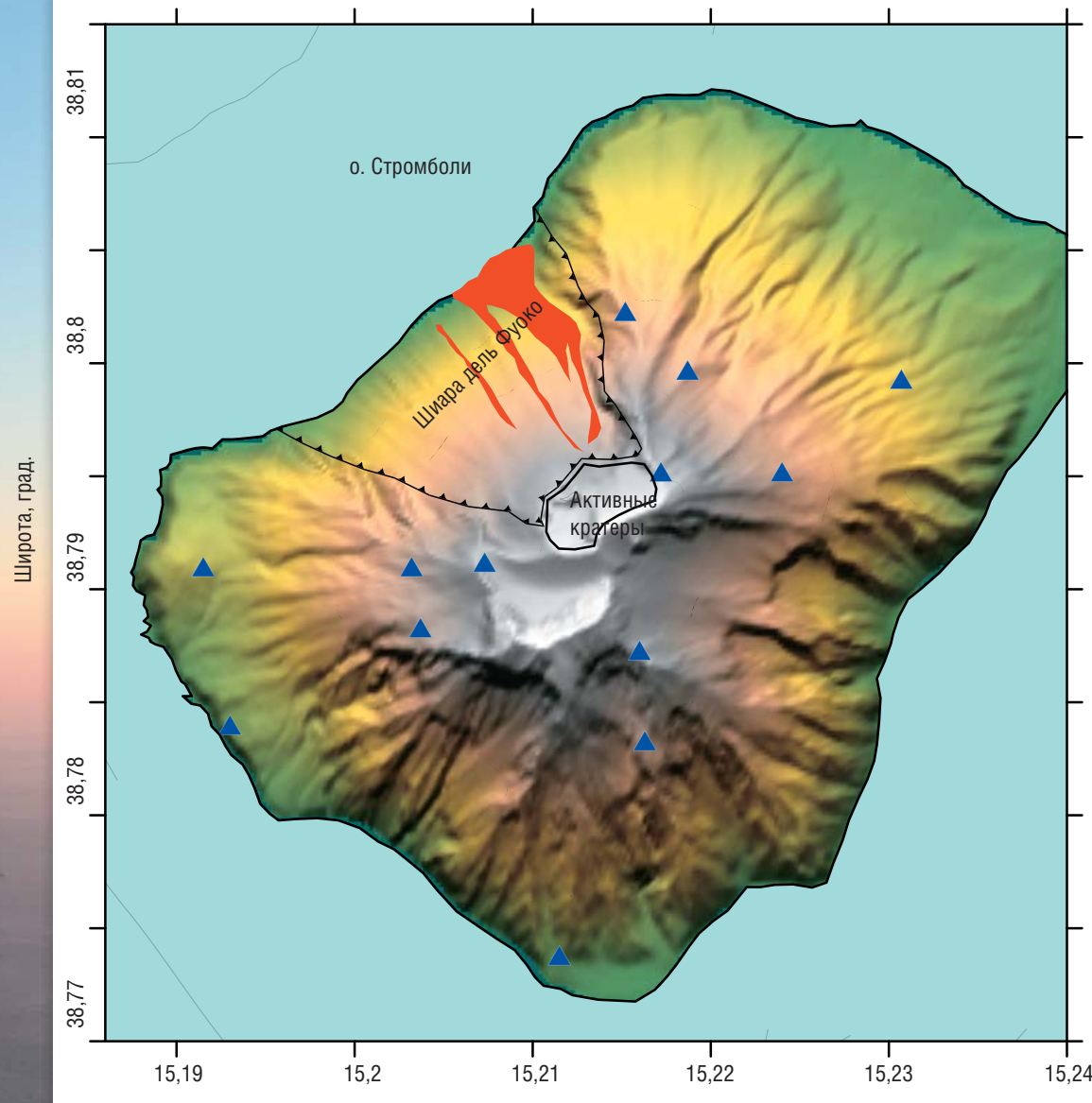
Природным феноменом Стромболи восхищались еще древние греки. И использовали огненные факелы постоянных извержений в качестве своеобразного маяка для навигации в море. В наши дни остров Стромболи – это любимое место отдыха туристов, где традиционный пляжный отдых можно совместить с увлекательными походами на вершину активного вулкана. Ежедневно туда устремляются сотни туристов, и вулкан гарантированно устраивает для них незабываемые шоу из фонтанов лавы, вырывающихся сразу из нескольких жерл в кратере.

Знойным днем 3 июля 2019 г. сотни туристов готовились к вечернему восхождению на гору. Внезапно остров сотряс мощный взрыв, ознаменовавший начало извержения – одного из наиболее сильных за последние десятилетия. За несколько десятков минут огромная туча пепла затянула все небо, повергнув людей в панику. К счастью, вулкан оказался не слишком «кровожадным»: жертвой извержения стал лишь один турист, который «дикарем», в одиночку пробрался к вершине. Случись извержение на пару часов позже, когда к кратеру по вечерней прохладе устремились бы многочисленные туристические группы, число пострадавших было бы намного больше.

Кстати, это не первый случай, когда вулкан пугает, не принося значительного вреда. Так, 30 декабря 2002 г. извержение вызвало крупный оползень на одном из склонов, что привело к образованию гигантской волны высотой 10 м, которая уничтожила все прибрежные строения в городке на противоположном



Остров Стромболи расположен в Тирренском море. Фото Б. Бенке



На карте о. Стромболи указаны сейсмические станции (синие треугольники) и лавовые потоки извержения 2007 г. (красным цветом)

Особую опасность представляет склон Шиара дель Фуоко на юго-западной части острова, куда летят вулканические бомбы и происходят прорывы лавовых потоков. Склон очень неустойчив, что приводит к высокому риску больших оползней

краю острова. К счастью, в этот момент там находились только местные жители, дома которых построены на некотором возвышении, поэтому никто серьезно не пострадал. Но если бы такое извержение случилось в разгар туристического сезона, человеческих жертв было бы не миновать.

Новосибирский ученый и автор настоящей статьи оказался на Стромболи за неделю до последнего извержения. Вместе с коллегой, доктором Лючиано Скарфи из института INGV (г. Катания, Сицилия), он занимался изучением строения этого вулкана методом сейсмической томографии и особенностей работы магматической системы под ним.



Заглянуть внутрь вулкана

Стромболи – один из немногих вулканов на Земле, который извергается практически непрерывно. Большую часть времени из нескольких кратеров возле вершины, с частотой от 5 до 15 раз в час, вырываются фонтаны лавы, высота которых может достигать до 300 м. Эти извержения не представляют почти никакой опасности для населения острова, но служат прекрасным аттракционом для множества туристов.

Вместе с тем, время от времени, с периодичностью нескольких лет, на Стромболи происходят крупные извержения, сопровождающиеся излияниями лавы и оползнями, и гораздо реже – мощными взрывами, как это случилось при последнем извержении. И вот такие извержения могут представлять серьезную опасность как для населения острова, так и для прибрежных районов континентальной Италии и Сицилии.

Особые опасения вызывает склон на юго-западной части острова, называемый Шиара дель Фуоко. Именно туда летят вулканические бомбы извержений, именно там происходят прорывы лавовых потоков. В результате склон представляет собой крутую осыпь из шлака и камней, переслоенную застывшими потоками лавы. Все это делает его очень неустойчивым и увеличивает риск возникновения крупных оползней, аналогичных тому, который произошел в 2002 г. и привел к образованию гигантской волны.

Несмотря на постоянную «долгоиграющую» вулканическую деятельность, сейсмическая активность под островом почти не наблюдается, что для такого типа вулканов очень нетипично. Однако еще до начала инструментальных наблюдений, по свидетельству местных жителей, на Стромболи

На о. Стромболи туристы совмещают традиционный пляжный отдых с походами на вершину активного вулкана

Стромболи извергается практически непрерывно. Большую часть времени из нескольких кратеров возле вершины, с частотой от 5 до 15 раз в час, вырываются фонтаны лавы, высота которых может достигать до 300 м





Как известно, при каждом землетрясении генерируются сейсмические волны, которые при прохождении через земные недра «накапливают» информацию об их строении. Эту информацию можно расшифровать и на ее основе построить трехмерное распределение сейсмических скоростей с помощью метода *сейсмической томографии*. Один из авторов этой статьи, И. Ю. Кулаков, разработал собственный алгоритм томографии, названный *LOTOS* (Koulakov, 2009). Этот алгоритм сейчас активно используется многими отечественными и зарубежными специалистами для изучения различных геологических структур. Излюбленными объектами для самого Кулакова являются вулканы, для которых характерны высокая изменчивость сейсмических свойств, в том числе и во времени. Именно этот инструмент был применен при изучении системы питания вулкана Стромболи

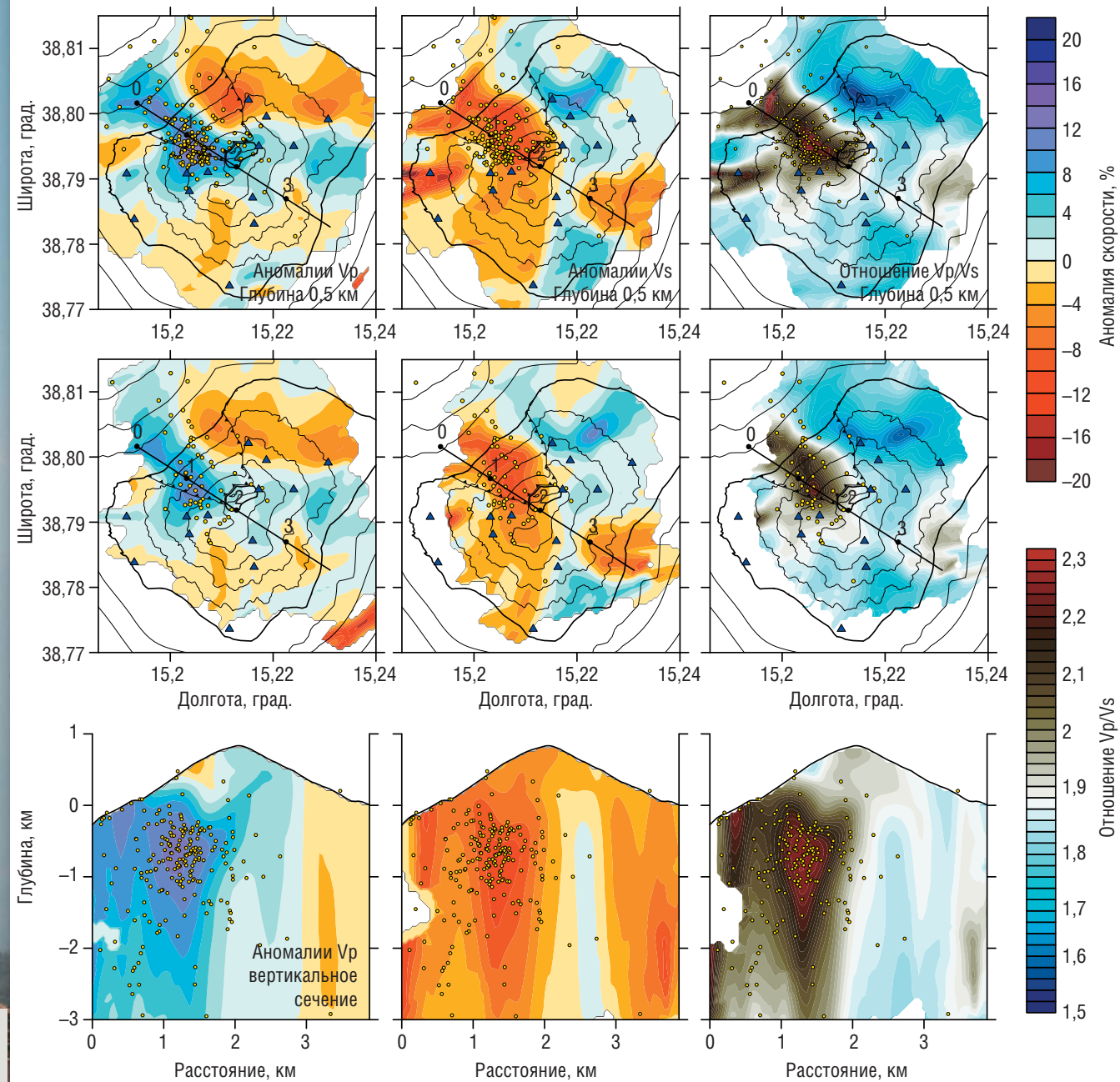


происходили достаточно мощные землетрясения, предвосхищавшие крупные извержения.

Месяцы активной сейсмической подготовки предшествовали и одному из крупнейших недавних извержений, которое произошло в начале 2007 г. (Patane *et al.*, 2007). Первые излияния лавы из вершинных кратеров были зафиксированы 27 февраля. После этого на склоне Шиара дель Фуоко образовалась трещина, из которой на высотах 400 и 600 м над уровнем моря начали изливаться два мощных лавовых потока. 9 марта открылась еще одна трещина на высоте 500 м, породившая третий лавовый поток, а спустя шесть дней в районе кратера произошел мощный взрыв. Далее извержение пошло на спад и к 2 апреля полностью прекратилось.

В период, предшествовавший извержению, на острове работало достаточно много сейсмических станций, которые зарегистрировали сотни землетрясений (Scarfi *et al.*, 2010). Эта информация была использована для построения так называемой *томографической модели* вулкана.

Каждый вечер сотни туристов устремляются к вершине Стромболи, чтобы полюбоваться незабываемым шоу из фонтанов лавы, вырывающихся из кратера вулкана



Томографическая модель вулкана Стромболи. Значения аномалий V_p , V_s и отношения V_p/V_s даны на двух горизонтальных сечениях и одном вертикальном профиле. Проекции землетрясений на сечения отмечены желтыми точками. Рельеф показан изолиниями через 200 м

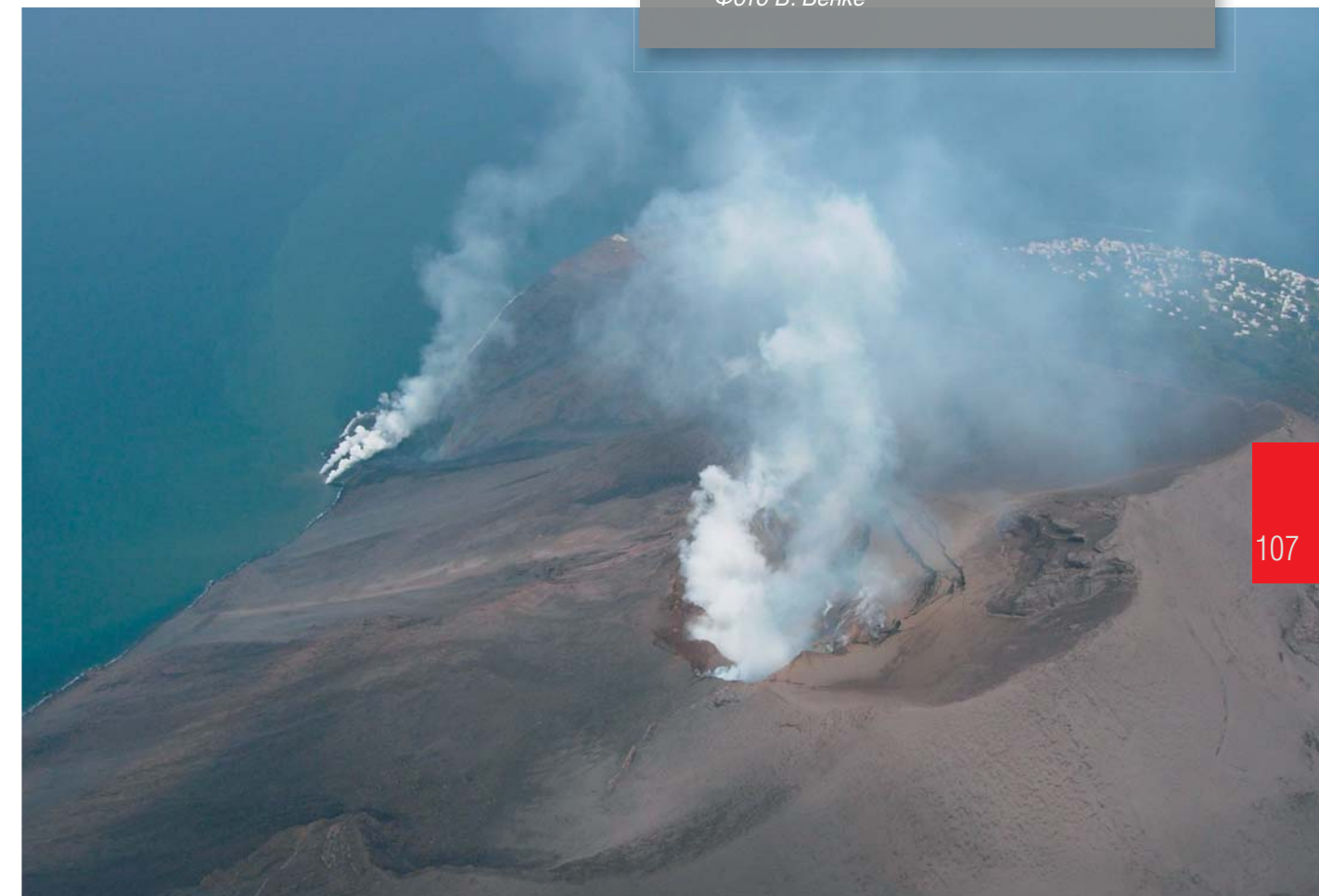
В сейсмической томографии очень важно использовать два типа сейсмических волн: *продольные* и *поперечные*. Эти волны распространяются в среде с разными скоростями и несут информацию о различных характеристиках горных пород. Так, скорости продольных волн (V_p) наиболее чувствительны к составу породы. Поэтому в местах, куда внедряется магма, пришедшая с больших глубин, скорости V_p , как правило, повышенные. Скорости же поперечных волн (V_s) наиболее «чувствительны» к наличию жидкости, в случае вулканов представленной либо расплавленной магмой, либо магматическими флюидами. Их наличие приводит к понижению V_s . Наиболее информативным сейсмическим параметром при изучении магматических систем является отношение скоростей продольных и поперечных волн (V_p/V_s). В большинстве случаев активные магматические очаги ассоциируются с повышенными значениями этого показателя, что позволяет определять их конфигурацию в трехмерном пространстве.

В этом смысле вулкан Стромболи не стал исключением. Под юго-западной частью горы в районе склона Шиара дель Фуоко, где происходят наиболее интенсивные

извержения, была обнаружена резко контрастная аномалия с беспрецедентно высоким отношением V_p/V_s , достигающим до 2,3. Такой показатель маркирует внедрение внутрь вулкана глубинной базальтовой частично расплавленной магмы. На томографической модели видно, что это магматическое тело примыкает как раз к тому месту на склоне вулкана, где в марте 2007 г. образовались трещины и начали извергаться лавовые потоки.

Нужно отметить, что практически все землетрясения, предшествовавшие этому извержению, были локализованы внутри аномалии, маркирующей магматическое тело. Это не стало сюрпризом, поскольку аналогичные «рои землетрясений» наблюдаются в магматических очагах и других вулканов. При этом закономерно возникает вопрос: если магматическая камера состоит из горячих, частично расплавленных пород, то как там происходят землетрясения, представляющие собой разрывы хрупких пород? Есть ли объяснение этому противоречию?

Извержение Стромболи в марте 2007 г. Фото Б. Бенке

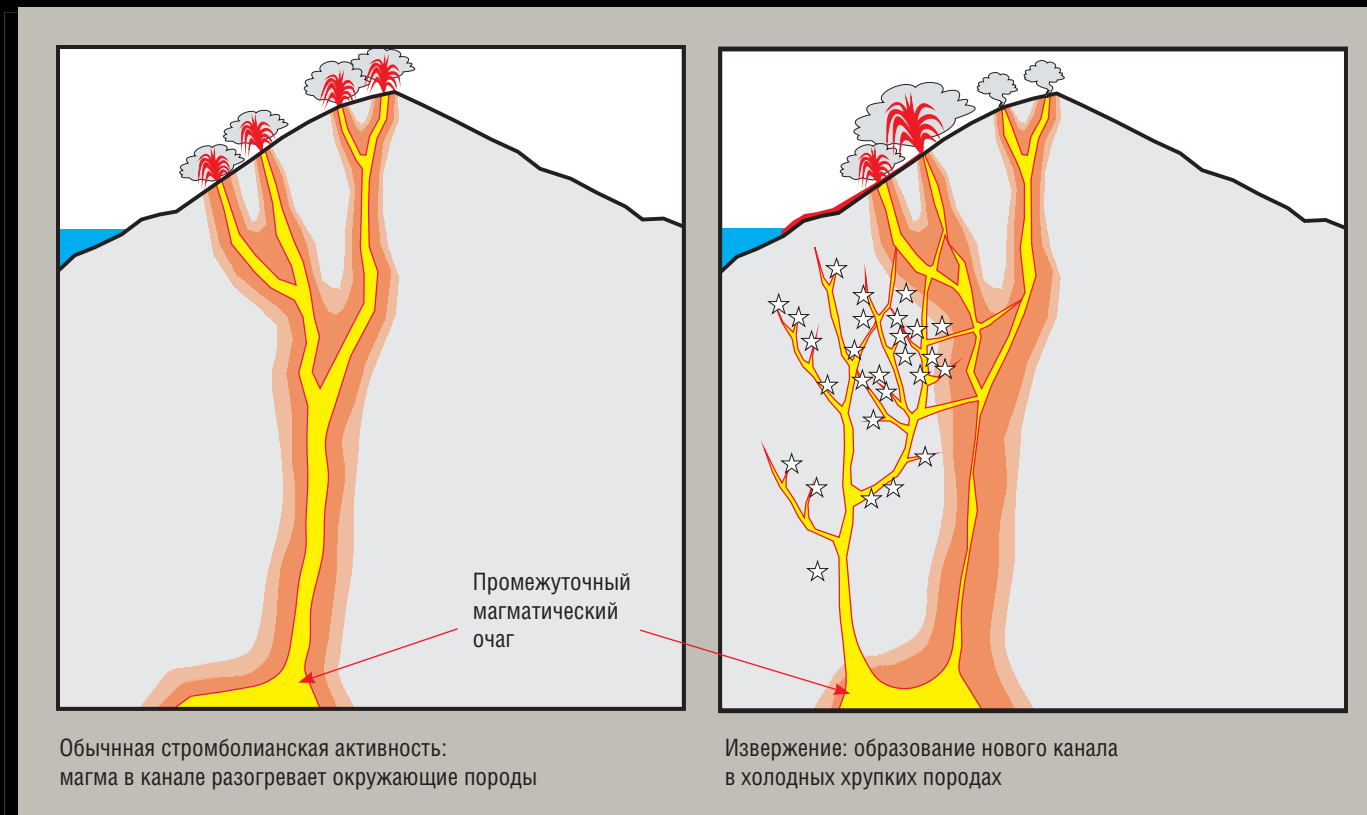




Как отмечено выше, в случае Стромболи большую часть времени под вулканом никакой сейсмичности не наблюдается, несмотря на постоянную вулканическую активность. Это может говорить о том, что под вулканом сформирована достаточно эффективная система каналов, беспрепятственно доставляющих расплавленную магму из глубинных источников к поверхности. Большую часть времени эти «трубы» успешно справляются с поступающим притоком магматического материала. Однако со временем стенки каналов нагреваются и превращаются в вязкую, липкую субстанцию. И стоит давлению магмы в какой-то момент уменьшиться, эти каналы сжимаются и склеиваются под действием литостатического давления.

Надо отметить, что процесс этот односторонний: склеившиеся стенки канала уже невозможно «расклеить», даже если давление поступающей снизу магмы вновь вырастет. Как это ни парадоксально звучит, но жидкости гораздо сложнее пройти через мягкий пластичный материал, чем через прочные и при этом хрупкие породы, где достаточно легко образуются трещины гидроразрыва. В результате магма ищет (и находит!) низкотемпературные участки на некотором удалении от разогретого активного канала, где породы ведут себя хрупким образом. Там образуется новая система трещин, что сопровождается характерной сейсмичностью, которую

Хотя Стромболи извергается почти непрерывно, крупные извержения с мощными излияниями лавы и оползнями случаются с периодичностью в несколько лет



Схематическое изображение сценария образования нового магматического канала на Стромболи. Показаны активные магматические каналы (желтым цветом) и области разогрева (красным). Звездами отмечены землетрясения, вызванные гидроразрывом при раскрытии новых каналов



можно регистрировать на поверхности с помощью сейсмостанций.

В конце концов трещины объединяются в новый единый канал, который заменяет старый. Естественно, сразу же после образования нового канала, когда давление магмы еще аномально высокое, происходит крупное извержение, выражающееся в излиянии лавовых потоков, либо в мощных взрывах. После образования нового канала старая система постепенно остывает. Спустя некоторое время породы и там могут вновь стать хрупкими, что делает возможным в дальнейшем возвращение питающей системы на старое место.

Как показывает геологическое изучение *батолитов* – древних магматических камер, оказавшихся на поверхности, они имеют достаточно сложную структуру, пронизаны каналами и резервуарами сложной формы. В томографической же модели область питания вулкана представлена как единое тело. Сейсмическая томография имеет ограниченное разрешение и не позволяет разделить холодные и горячие области в магматическом очаге, поэтому представляет интегральные характеристики пород, осредненные в большом объеме.

Вместе с тем новые результаты впервые позволили определить границы магматического очага, что является важным шагом для понимания сценариев активности вулкана Стромболи. Предложенный механизм реализации землетрясений внутри очага может оказаться универсальным и применимым для объяснения аналогичных процессов на других вулканах мира.

В публикации использованы фото И. Кулакова



Склон Шиара дель Фуоко во время извержения Стромболи. Март 2007 г. Фото Ф. Чианчитто

Литература

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2009. V. 99 (1). P. 194–214.

Patanè D., Mattia M., Di Grazia G., et al. Insights into the dynamic processes of the 2007 Stromboli eruption and possible meteorological influences on the magmatic system // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. N. 22. doi:10.1029/2007GL031730.

Scarfi L., Zuccarello L., and Patanè D. Magma dynamics of 2007 Stromboli effusive eruption as revealed by high precision location of seismic events // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2010. V. 198(3–4). P. 405–415.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-55-52003