

# Остров Итуруп: ПО СЛЕДАМ ВУЛКАНИЧЕСКИХ КАТАСТРОФ

*С давних пор вулканы являются источником суеверного страха и объектом почитания для человечества. Но также и причиной, порождающей желание понять сущность вулканизма и научиться если не противостоять, то хотя бы предсказывать катастрофические извержения и предотвращать самые ужасные последствия... Чтобы понять механизмы подобных катастроф, новосибирские исследователи направились в один из самых удаленных уголков нашей страны – на Курильские острова в поисках свидетельств масштабных вулканических извержений недавнего прошлого*

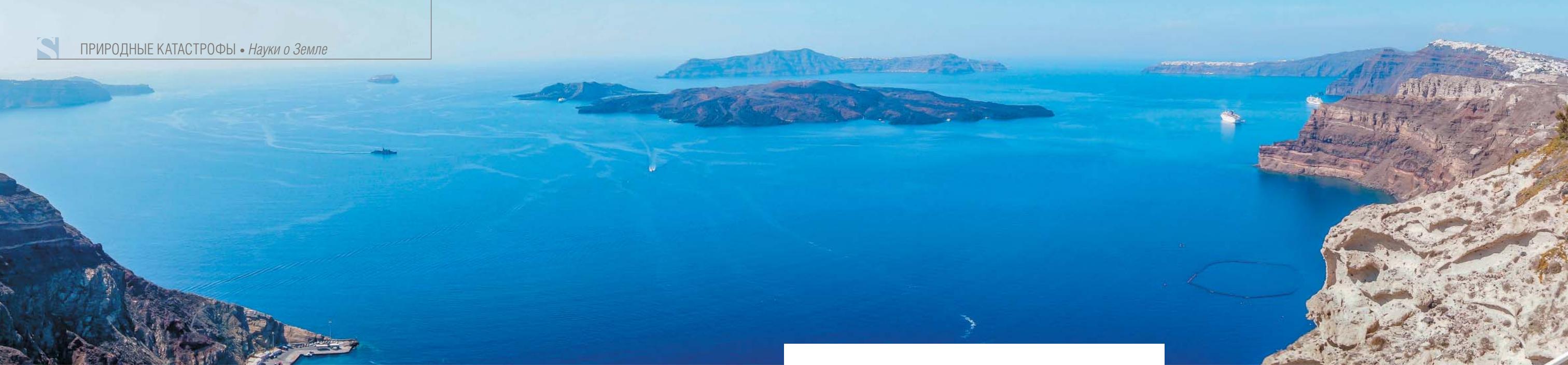
**Ключевые слова:** извержение, вулкан, пемза, кальдера, Белые скалы, остров Итуруп, Курильские острова.

**Key words:** eruption, volcano, pumice, caldera, White Cliffs, Iturup Island, Kuril Islands

СМИРНОВ Сергей Захарович – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), профессор Новосибирского государственного университета, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и минералогии им. А. А. Трофимука СО РАН. Автор и соавтор более 150 научных работ

*В публикации использованы фото автора, Т.Ю. Тиминой и И.А. Максимовича*

© С.З. Смирнов, 2021



*У ученых отсутствует мотив просто сделать что-то «героическое». Совершенно другая цель – найти и изучить.*  
Академик Н.Л. Добрецов

Вулкан на средиземном о. Тира, не выдержав собственного веса, рухнул в опустошенный извержением магматический резервуар, образовав кальдеру и группу островов Санторин в Эгейском море (вверху). © CC BY-SA 2.0/Gabriela Fab

1816 г., после взрыва вулкана Тамбора в 1815 г., стал «годом без лета». Во время этого крупнейшего извержения в истории человечества высота вулкана уменьшилась примерно на треть и образовалась кальдера диаметром 7 км (внизу). © NASA/Christina Koch

**В**улканы и их извержения, как и все явления природы, многообразны. На некоторые активные вулканы даже водят туристов, а к другим стараются не приближаться.

Наиболее строптивым характером обладают вулканы с так называемыми *эксплозивными извержениями* (от фр. *explosive* – взрыв). Вулканические взрывы – явление стремительное. В мгновение ока из жерла в воздух устремляется огромное количество раскаленного пепла, смешанное с вулканическим газом, которое выбрасывается за очень короткое время.

Рядовые взрывы длятся несколько секунд или минут: выброшенные за это время тучи пепла и газа представляют собой захватывающее зрелище, но быстро рассеиваются и не создают значимой угрозы. Если же извержение длится несколько часов, то масса выброшенного материала может достигать сотен мегатонн. Так, относительно небольшой взрыв на о. Райкоке в средней части Курильских островов в 2019 г. длился 10 часов и выбросил в воздух около 400 Мт пирокластического материала (McKee *et al.*, 2021; Smirnov *et al.*, 2021).

Что же случится, если подобное извержение будет длиться несколько дней или даже недель? Объем выброшенных на поверхность земли горных пород будет настолько велик, что в этом месте образуется огромная впадина, чаще всего округлой или эллипсовидной формы.

Впервые ученые обратили внимание на такие вулканические впадины в первой половине XIX в., назвав их *кальдера* (от исп. *caldera* – котел). Уже в то время

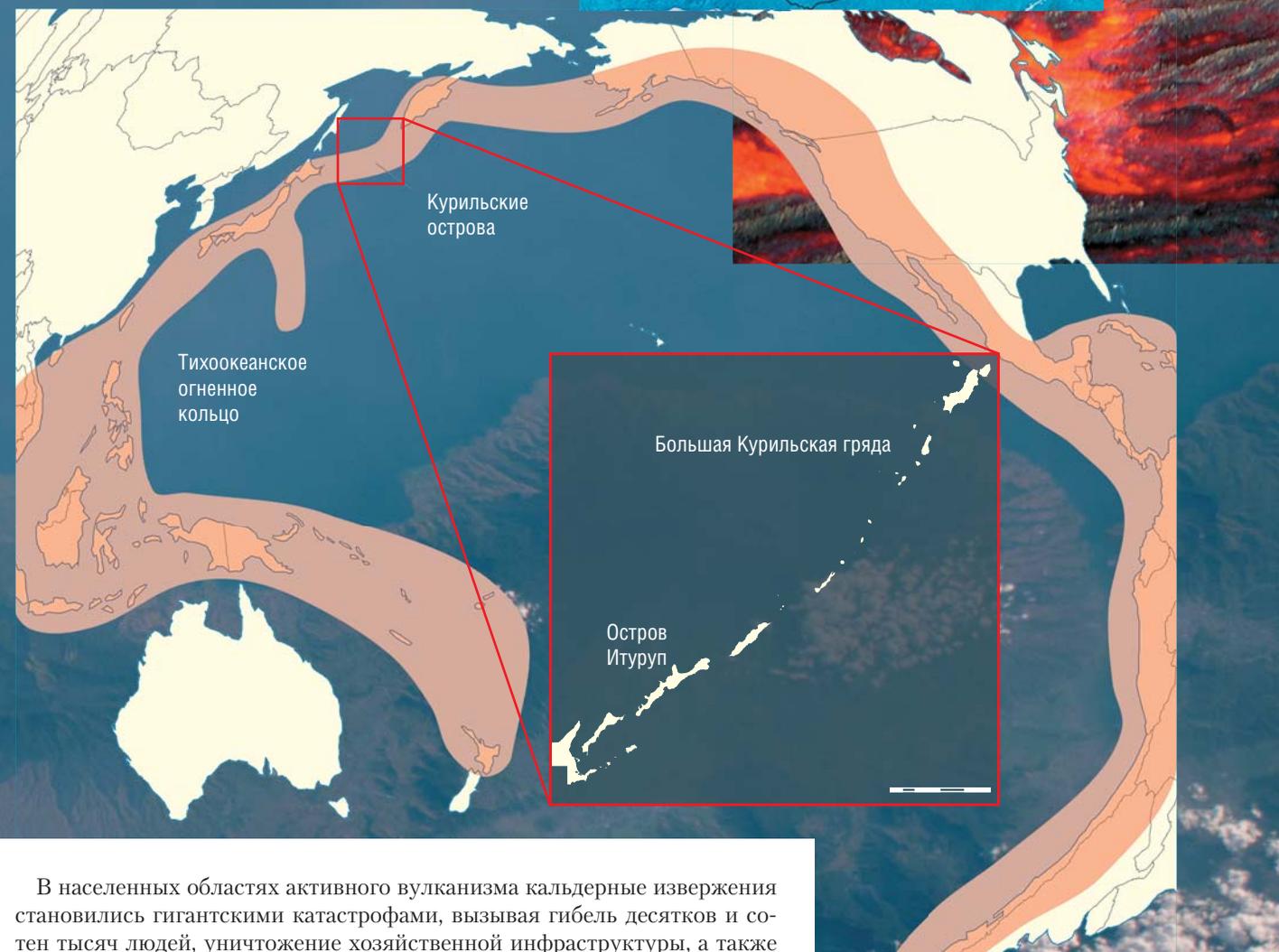
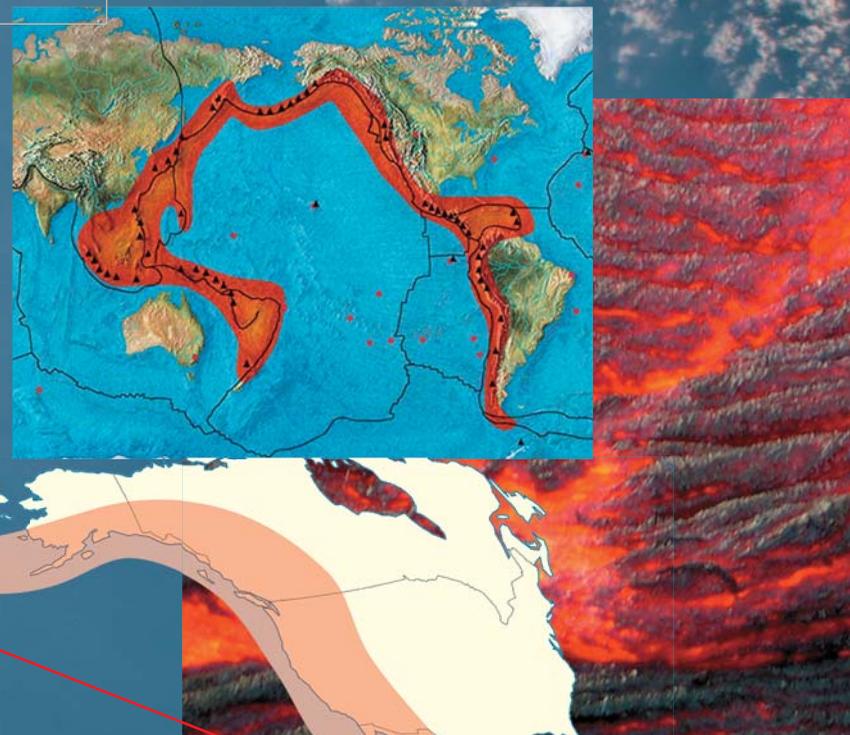
британский ученый Чарльз Лайель, один из основоположников современной геологии, предположил их связь с гигантскими взрывами, но только в 1941 г. американский геолог Хоуэлл Вильямс описал механизм возникновения крупных кальдер. Он доказал, что кальдера – это результат не исполинского взрыва, а опускания блока горных пород, перекрывающего огромный магматический очаг, опустошенный многочисленными взрывами.

Некоторые извержения кальдерных вулканов привели к выбросу из недр сотен и даже тысяч кубических километров магматического материала. Вулканы с такими извержениями называют *супервулканами*. Один из примеров – вулкан Тоба на о. Суматра в Индонезии. Его взрыв 74 тыс. лет назад за несколько дней вынес из недр 7 млн Мт магмы, что по объему сопоставимо с озером Виктория в Африке (Self, Blake, 2008).

Но извержения кальдерных вулканов – явления редкие. За весь период письменной истории на Земле случилось только десять таких извержений, при этом по меньшей мере половина из них привела к глобальным климатическим изменениям. Так, извержение вулкана Тамбора в Зондском архипелаге в 1815 г. повлекло резкое падение летних температур на Евразийском и Северо-Американском континентах. А образование кальдеры вулкана Ринджани в этом же регионе в XIII в., как считают некоторые ученые, внесло свой вклад в резкое глобальное снижение температуры, которое через столетие привело к Малому ледниковому периоду.



Курильские острова входят в так называемое Тихоокеанское огненное кольцо — область протяженностью около 40 тыс. км по периметру Тихого океана, где располагается большинство действующих вулканов и случается множество извержений и землетрясений



Курильские острова включают 56 отдельных островов, образующих две параллельные гряды: Большую Курильскую и Малую Курильскую

В населенных областях активного вулканизма кальдерные извержения становились гигантскими катастрофами, вызывая гибель десятков и сотен тысяч людей, уничтожение хозяйственной инфраструктуры, а также флоры и фауны. Яркий пример — образование кальдеры на месте о. Тира в Эгейском море, известной ныне как вулкан Санторин, что уничтожило минойскую цивилизацию античного мира. Согласно Геродоту, заселение островов, окружающих затопленную морем чашу кальдеры, началось лишь спустя пять веков.

Но какие причины приводят к таким мощным извержениям? Какие последствия сулят колоссальные взрывы? И где ожидать следующий пароксизм?



Белые скалы о. Итуруп

### Скалы из пемзы

Кальдерные извержения могут происходить во всех вулканических областях, расположенных как внутри литосферных плит, так и на их окраинах. В недавнем геологическом прошлом гигантские пароксизмы сотрясали запад Северной и Южной Америки — восточную часть *Тихоокеанского огненного кольца*. Мощные взрывы не раз покрывали острова Зондского архипелага. В России большое количество кальдерных вулканов расположено на Камчатке и Курильских островах, и некоторые из них до сих пор активны.

Большая часть отечественных исследований молодых кальдер проведена на полуострове Камчатка. В то же время Курильские острова — архипелаг, протянувшийся на 1,2 тыс. км от южной оконечности Камчатки до о. Хоккайдо, — оказались практически неизученными. На этих островах расположена 21 хорошо выраженная кальдера, образовавшаяся в период от среднего плейстоцена до голоцена. Больше всего кальдер сосредоточено на Итурупе — самом крупном из островов Большой Курильской гряды.

Изучением причин, порождающих эксплозивные извержения и приводящих к образованию кальдер, на примере вулканов Южных Курил занялись сотрудники лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). И началось все с экспедиции на перешеек Ветровой о. Итуруп в 2015 г.

Остров Итуруп — один из четырех островов гряды, где есть постоянные поселения. Здесь расположен г. Курильск, административный центр Курильского округа. Именно отсюда экспедиционному отряду необходимо добираться до нужных объектов. И хотя вблизи города и других поселений есть дороги, но они не ведут туда, куда нужно геологам. Поэтому приходится договариваться с местными жителями о найме автомобиля, вездехода или моторной лодки.

Один из важнейших и, пожалуй, самый загадочный геологический объект на Итурупе — *пемзовые туфы* перешейка Ветрового. Туфы — это продукт гигантского вулканического взрыва или серии взрывов, которые превращают вязкую магму в пену. Вылетая из жерл, пена мгновенно закаливается и становится пористой *пемзой*. Взрыв Ветрового произошел 20 тыс. лет назад, породив мощную толщу таких туфов. Около 60% объема пемз Ветрового составляют пузырьки и пустое пространство, и это делает их настолько легкими, что они могут плавать в воде.

Выходы туфов в 15 км от п. Рейдово — предмет паломничества туристов со всего мира — носят название Белые скалы. Ветра и дожди, как скульпторы, вырезали в них удивительные по своей ажурности и изяществу кружева ущелий. Белизна скал контрастно подчеркивается черными пляжами, раскинувшимися у их подножия.



Остров Итуруп – крупнейший из островов Большой Курильской гряды. Он является местом, где расположено самое большое количество кальдерных вулканов. На карте острова показаны наиболее крупные из этих вулканов, а также вулканы, образовавшиеся в недавнем геологическом прошлом

В спокойную погоду эта дорога сопоставима с лучшими асфальтовыми шоссе, но такая погода на островах – редкость.

В прилив, при штормовом западном ветре косматые валы Охотского моря яростно накатываются на пляжи и с разбега бьют прямо в белые утесы. В таких условиях проезд по дороге требует исключительного мастерства и мужества. Не раз бушующие волны утаскивали в море заглохшие «Уралы» и КамАЗы, и хорошо, если людям удавалось вовремя выбраться. По этой причине владельцы автомобилей неохотно соглашаются на дальние поездки, а нам нужна именно такая.

Наконец смельчак-водитель найден, условия оговорены, выезжаем. С погодой везет. Местный водитель правильно оценил время, чтобы миновать самые опасные места при отливе. И вот уже грузовик едет мимо великолепных белых утесов с кружевными ущельями. Но мы не столько любимся, сколько пытаемся на ходу оценить петрографию пемзовой толщи.

Вот в вертикальной стенке виден слой из глыбовых пемз диаметром до полуметра. Во время извержения такие куски не вылетают высоко в воздух и не уносятся

Такие пляжи – не просто любопытное явление природы, а месторождение руд, богатых железом, титаном и ванадием. За тысячи лет прибойные волны растерли в пыль белые пемзы, и море унесло легкие песчинки в свои глубины. Но в белых пемзах есть черный тяжелый минерал – *магнетит*, и даже самый сильный шторм не в силах утащить его на глубину. Так этот минерал накапливается на пляжах.

Но любясь красотой Белых скал, нельзя забывать, что курильская природа полна сюрпризов и реальных опасностей. Великолепные пляжи вдоль скал – это единственная дорога, связывающая Рейдово и Курильск с перешейком Ветровым.

далеко от жерла. Значит, оно было где-то рядом и выбросило гигантское количество вспененной магмы за короткий промежуток времени. А массовая скорость истечения магматической пены и других фрагментов из жерла при таких извержениях может достигать от сотен тонн до десятков мегатонн в секунду (Self, Blake, 2008; McKee *et al.*, 2021). Но в том-то и заключается загадка перешейка Ветрового, что до сих пор неизвестно, где находились жерла и каковы очертания кальдеры.

### Цветущие луга Ветрового

Пролетев около 22 км от Рейдово и миновав Белые скалы, машина поворачивает на перешеек Ветровой. Это самое низкое место острова, где ничто не препятствует ветрам, дующим с Тихого океана на север и с Охотского моря на юг. Отсюда и название, которое дали перешейку в 1950-х гг.

Помимо ветров, через перешеек постоянно идут туманы, поэтому это место влажное и все заросло буйной луговой растительностью. Травы могут достигать роста человека. Ближе к горам луга сменяются абсолютно непроходимыми зарослями березок и карликовой ольхи – главным препятствием к детальному изучению отложений катастрофического извержения.

Жемчужина перешейка – пологая Ручарская долина, прорезающая пемзовые толщи в его северо-западной части. Высокая влажность и здесь порождает многообразие растительного мира. Наверняка для ботаников перешеек Ветровой представляет не меньший интерес, чем для геологов. Лето на Курилах короткое, и практически все это время на буйных лугах перешейка

Белые скалы Итурупа – это отложения пемзовых туфов, продукта гигантского вулканического взрыва или серии взрывов, которые превращают вязкую магму в пену. Застывшая пена (пемза) очень пористая и может легко плавать в воде



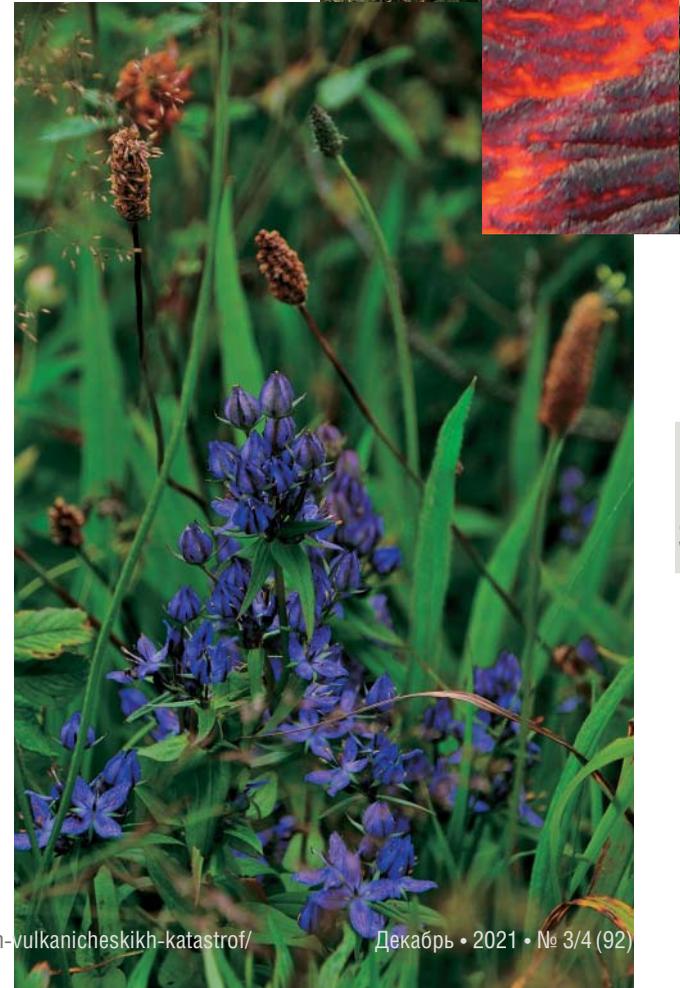
на стр. 32



Добраться до стратовулкана, метко названного Клумбой (на заднем плане), удалось только через три года с помощью вездеходной техники (справа)



Благодаря ветрам с Охотского моря, несущим влагу, и частым туманам луга на перешейке Ветровом и в Ручарской долине отличаются буйным разнотравьем со множеством цветущих растений





и Ручарской долины распускаются дивной красоты цветы: оранжевые, красные, желтые, синие, белые... Саранки, шиповник, лилии, гвоздики и многие другие, нам незнакомые.

«Прямо клумба», – проносится в мозгу, когда наблюдаешь все это величелие. Видимо, поэтому геологи назвали Клумбой небольшой стратовулкан посреди перешейка, образованием которого завершился активный вулканизм в этом месте. Это тоже интересный для нас объект. Но попытка дойти до него пешком, которую мы предпримем позже со стороны Тихого океана, не удастся. Протопав 20 км, мы с грустью вернемся к своим палаткам, переживая неудачу.

Только три года спустя, уже на вездеходе, мы проломились через непроходимые заросли ольхи и все-таки исследуем вулканический конус посреди цветущих лугов Ветрового. Тогда же увидим и тихое, прозрачное озеро Тайное, занимающее одно из поздних вулканических жерл, которые выбросили последние порции пемзы несколько тысяч лет назад.

Пока же наш путь лежит к побережью Тихого океана, где у мыса Конакова мы разобьем временный лагерь и проложим маршруты для изучения разрезов пемзовой толщи. Именно в этом месте она имеет максимальную мощность, что позволяет в деталях изучить древнее извержение.

Только скальные мысы на тихоокеанском побережье могут служить защитой экспедиционному лагерю от бушующего океана

### «Дом» у океана

На перешейке тишина, нарушаемая только ревом двигателя нашего грузовика. Даже ветер, обычный в этих местах, не шумит – сейчас от него защищают прибрежные дюны. Но вот машина выбирается за их линию и спускается к берегу Тихого океана. Несмотря на почти полный штиль, океан ревет. На берег накатываются огромные валы и с грохотом разбиваются в белоснежную пену. Пока отлив, машина может легко проехать по пляжу до места, закрытого от волн и ветра скальным мысом Конакова. Здесь, выше зоны прилива, на луговой траве мы поставим наши палатки.

Водитель торопит нас с разгрузкой, ведь погода может измениться в любой момент, и он хочет пройти опасные места на побережье до начала прилива. Мы остаемся в компании ревающего Тихого океана, низких косматых облаков и белых пемзовых утесов – молчаливых свидетелей недавней геологической катастрофы.

Мощные эксплозивные извержения выбрасывают в воздух и на поверхность земли огромное количество

В любой экспедиции главное дело – установка лагеря. Поставить лагерь – это значит построить дом, стены которого защитят от непогоды, диких зверей, дадут тепло и сухость после тяжелых маршрутов. Крохотный островок, где любая удобная мелочь становится проявлением уюта.

Но экспедиционный дом – это палатки из тонкой ткани, металлических и пластиковых трубок, они не смогут сдержать натиск природной стихии. Поэтому при устройстве лагеря учитываются и возможные направления ураганного ветра, и перспектива затопления паводковыми водами и штормовыми волнами. Правильно установленные палатки – символ безопасности и уверенности в успешном выполнении поставленных задач.

Последний штрих в устройстве лагеря – огонь. Море выбрасывает на берег все, что смыто с кораблей и берегов штормами: бревна и доски, стволы поломанных деревьев. Ветер и солнце высушивают их, превращая в идеальное топливо. Сначала тонкие веточки, затем палочки потолще, а уж затем целые стволы и комли бревен – вот и костер. Дом готов, и мы строим планы будущей работы

пород и застывшие фрагменты магмы, часто превращенные в обломки или раздробленные в мелкую пыль. Образовавшиеся таким образом отложения называют *пирокластическими*, или *вулканокластическими*. Они образуют на поверхности слои, покрывающие горы и долины вокруг вулканического центра.

Объем изверженного материала, сформировавшего туфы перешейка Ветрового, оценивается в 100 км<sup>3</sup>. Это одно из крупнейших извержений, произошедших на Курильских островах в четвертичном периоде, т.е. за последние 2,5 млн лет. Наша задача – определить состав магмы в магматическом очаге и оценить причины его высокой *эксплозивности* (способности производить мощные взрывы).

Очевидно, что перед извержением очаг представлял собой что-то вроде огромной бомбы. Но какое взрывчатое вещество было в нем заключено? Каким был запал? И что привело эту бомбу в действие? Ответ на эти и другие вопросы можно получить, изучая пемзы и слагающие их минералы.

Толщи пирокластических пород позволяют реконструировать состав вулканического очага. При этом





его верхней части будут соответствовать пемзы, лежащие в самом низу разреза, и наоборот. Таким образом, отбирая образцы снизу вверх по разрезу, мы узнаем, как был устроен вулканический очаг перед извержением. Был ли он однородным или содержал различные по составу магмы, а если различные, то как они располагались в очаге? Нам также было интересно узнать, были ли перерывы в образовании пирокластической толщи, для чего требовалось найти прослой почв или продуктов размыва пирокластике реками и ручьями.

Итак, задачи поставлены – в путь.

### Вслед за извержением

Мы идем вверх по узким ущельям с крутыми стенами, промытыми ручьями в пемзовой толще. Чтобы подняться от нижних слоев к верхним, надо залезть либо на крутой склон прямо у устья, либо в верхушку ручья.

Мы выбираем второй путь как менее трудоемкий и опасный. Идти вверх по руслу ручья достаточно легко, но всегда нужно опасаться встречи с хозяином этих мест – бурым медведем. На склонах ущелий спеет ягода, любимое лакомство медведей, и не хотелось бы тревожить их во время трапезы. Идем и шумим максимально громко. Если медведь заранее услышит приближение человека, он, вероятнее всего, постарается скрыться.

Мы поднимаемся между крутых обрывов, тщательно изучая состав

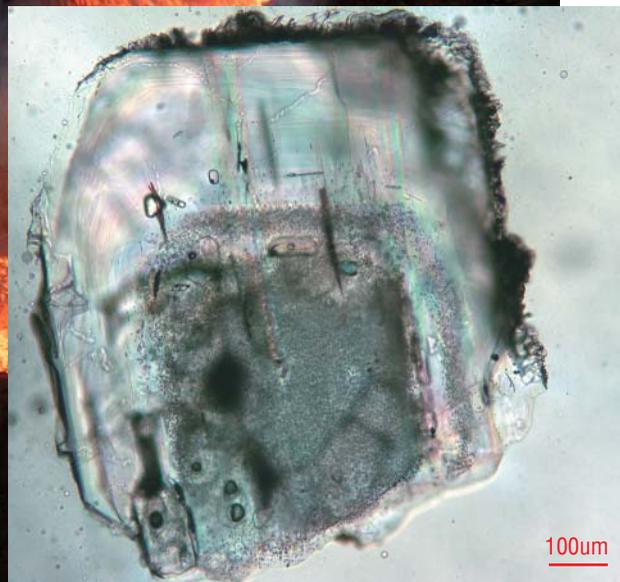
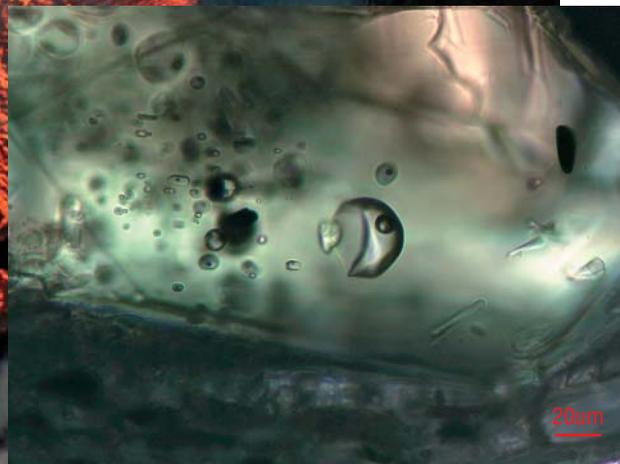
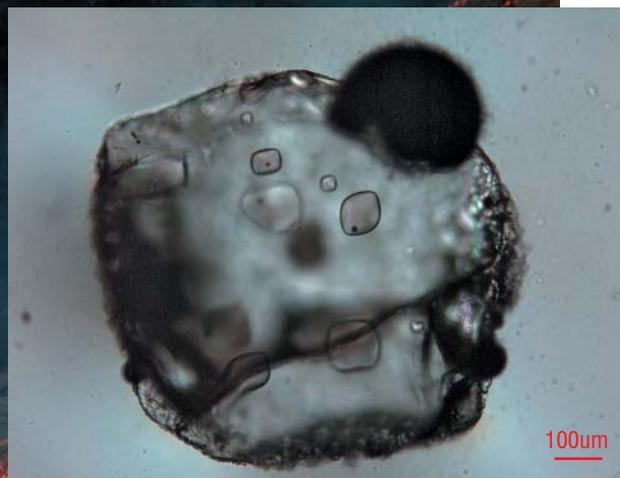


туфов, обнажающихся у русла ручья. Русло постепенно повышается, и мы поднимаемся вверх по разрезу. В верхушках склоны чуть более пологи, по ним можно карабкаться, цепляясь за траву и кусты. Там, где трава не покрывает горные породы, отбираем образцы пемз. С места, где стоит лагерь, мы можем добраться лишь до высоты около 150 м над уровнем моря – выше либо отвесные обрывы, либо непроходимые заросли. Но исследовано уже больше половины видимого разреза.

Сразу становится ясно, что все слои толщи сформировались практически одновременно. Перед нами открывается картина настоящей катастрофы. Множество гигантских взрывов выбрасывает в воздух колоссальное количество пепла и пемзы. Небо затянуло плотными пепловыми тучами, по земле прокатываются лавины раскаленных пемзовых пирокластических потоков. Впереди с огромной скоростью летят горячие, сметающие все на своем пути волны пепла. И все это в кромешной тьме, разрезаемой всполохами молний. Очевидно, что после такого катаклизма территория вокруг современного перешейка Ветрового на сотни, а может быть, и тысячи лет превратилась в мертвую пустыню, по которой тихоокеанские тайфуны гоняли смерчи из вулканического песка.

...Несмотря на неумолкаемый рев океана и штормовые волны, нам везло с погодой. Ни дождей, ни ураганного ветра, туманы и мелкая морось не в счет. Медведи также не беспокоили нас. Только семейка





лис кружила вокруг лагеря, но очень воспитанно наблюдала за всем происходящим издали.

Наконец работы закончены, образцы собраны и упакованы. Теперь главная задача – добраться до лабораторий родного института, где можно уже заняться разгадыванием таинственных процессов, происходивших в вулканическом очаге перед катастрофой.

В назначенный час по освобожденному отливом берегу к нам спешит уже знакомый грузовик. И вновь, подгоняемые нетерпеливым водителем, мы быстро закидываем в кузов потяжелевшие от камней рюкзаки, прыгаем туда сами и уже на ходу прощаемся с белыми утесами и суровыми скалами мыса Конакова, так заботливо укрывавшими нас от волн и ветра, и с ревущим прибоем Тихого океана.

Мы вернемся сюда через три года, чтобы проверить возникшие гипотезы. Убедиться в правоте одних и усомниться в других.



Кристаллы минералов из образцов пемзы, собранной на мысе Конакова, в которых хорошо видны включения расплава, несущие бесценную информацию о подготовке к вулканической катастрофе. Сверху вниз: кварц, пироксен, плагиоклаз

## Незримые свидетели

Еще в древности ученые заметили, что включения в кристаллах несут информацию об истории их образования. Сначала их использовали как средство определения подлинности драгоценных камней. Позже, с появлением сначала оптических, а потом и электронных микроскопов, стало возможным с их помощью реконструировать условия, при которых идет образование минералов в недосыгаемых для прямых наблюдений недрах Земли. Мы также воспользовались крохотными, часто незаметными невооруженному глазу включениями, чтобы расшифровать события, предшествовавшие катастрофе на о. Итуруп.

Растущий кристалл захватывает, помимо других минералов, и мельчайшие капельки расплавов и *флюидов* (газообразных компонентов магмы или обогащенных газами жидких растворов), из которых он формируется. И это очень важно, так как при изучении горных пород прямая информация о том веществе, из которого образуются минералы, как правило, исчезает. Расплавы превращаются в ассоциации минералов, а флюиды уходят по порам и трещинам и рассеиваются в недрах. И только крохотные включения, захваченные минералами, сохраняют эту, казалось бы, навсегда утраченную информацию.

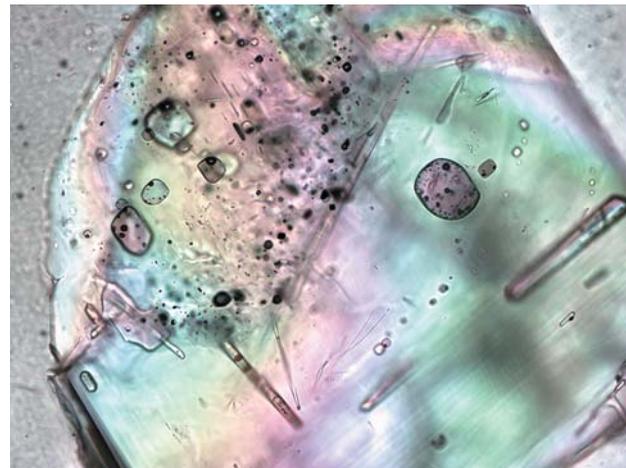
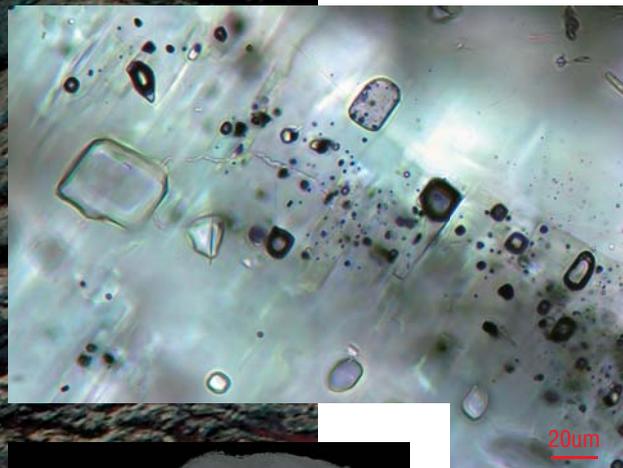
Из привезенных образцов пемзы мы извлекли содержащиеся там минералы – они росли в магме вулканического очага непосредственно перед началом извержения. Обнаруженные в них включения расплавов и флюидов помогли определить температуры, давления и особенности изменения химического состава этих веществ.

Оказалось, что извержение было связано с огромным очагом магмы из различных минералов и расплава, более чем на 70% состоявшего из *кремнезема* (диоксида кремния,  $\text{SiO}_2$ ). Такие расплавы, которые геологи называют *кислыми*, обладают очень высокой вязкостью. Настолько высокой, что, например, при ударе они раскатываются, а не разбрызгиваются, как обычная жидкость. Но в земной коре эти расплавы могут перемещаться только в случае, если они разогреты до высоких температур или содержат разжижающие их летучие компоненты. Именно с последними связывают высокую explosивность извержений кислых магм.

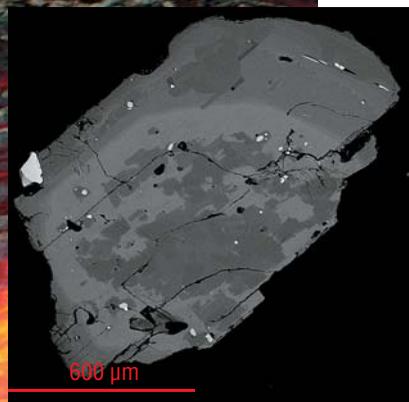
Известно, что, если летучие компоненты содержатся в жидких и легкотекучих расплавах, их выделение приводит к образованию флюидов в виде легко всплывающих пузырьков. Эти пузырьки поднимаются вместе с магмой по подводящим каналам вулканической постройки и либо лопаются на поверхности лавовых озер, либо уходят из расплавов по порам и трещинам в боковые горные породы, появляясь на поверхности уже в составе фумарольных газов.

Совсем другая картина возникает в случае кислого состава расплава. Его высокая вязкость препятствует всплытию пузырьков, которые не могут покинуть расплав и создают в нем очень большое давление. Магма начинает давить на перекрывающие ее горные породы, что порождает вздымание поверхности и образование трещин, через которые вязкая и легкая магма поднимается к поверхности (см. схемы на стр. 40–41).

По мере этого подъема давление горных пород уменьшается, и пузырьки в магме начинают быстро расти, постепенно объединяясь и превращая расплав в настоящую пену. Она расширяет трещины и все быстрее устремляется к поверхности. Как только трещина достигнет поверхности вулкана, рост и образование пузырьков в пене становится лавинообразным – происходит первый взрыв. Он разрушает горные породы вокруг трещины и еще больше уменьшает давление вмещающих пород на магму. Уже не только в трещине, но и в более глубоких частях очага начинают образовываться и расти пузырьки газа, уменьшая плотность магмы и увеличивая ее подвижность.



В кристаллах плагиоклаза можно отчетливо проследить не только включения флюидов и расплава (вверху), но и зоны роста (внизу), чей рисунок зависит от внешних условий, в которых кристалл формировался



Эта смесь с легкостью просачивается в другие трещины и, расширяя их, выходит на поверхность, порождая все новые и новые взрывы. Многочисленные трещины освобождают огромный объем вспенившейся магмы, которая с колоссальной силой вырывается на поверхность, разрушая все на своем пути. Горные породы, перекрывающие освобожденный от магмы очаг, проваливаются вниз, выдавливая дополнительные порции магмы через вновь образованные трещины (см. схемы на стр. 40–41).

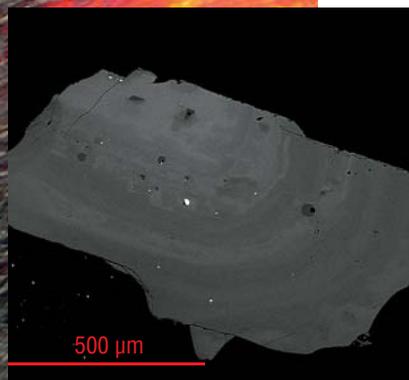
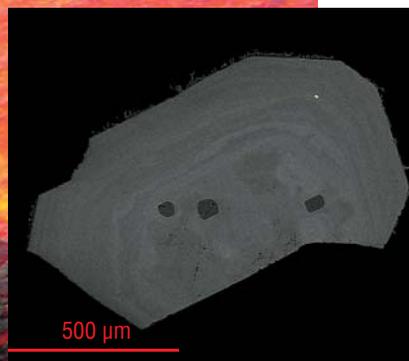
Вот так, как полагают вулканологи, развиваются извержения, порождающие кальдеры.

Привезенные с Итурупа образцы позволили установить, что в магме вулканического очага могли присутствовать пузырьки флюида. Выделяясь из магмы, флюиды ведут себя подобно газу и стремятся увеличиться в объеме, но при недостатке свободного места способствуют росту давления в очаге. Но в данном случае выделение флюидов само по себе не стало причиной взрывов, и сделать такой вывод позволил минерал *плагиоклаз*.

В отличие от других минералов, порожденных магмой с перешейка Ветрового, он имеет зональное строение, при этом каждая зона отвечает определенному времени роста кристалла. Изучая состав и очертания зон роста, мы можем узнать, как изменялись температура, давление и состав материнского расплава, из которого рос плагиоклаз. Если бы выделение флюида привело к взрыву и опустошению очага, рост этого минерала прекратился бы. Однако он продолжался даже после того, как выделение флюида закончилось.

Спусковым механизмом для катастрофического взрыва, по-видимому, явилось накопление выделившихся магматических флюидов, которым не удалось покинуть очаг. Уточнить возможность такого сценария опять помогли крохотные затворники – включения в минералах.

Плагиоклаз содержит включения капелек расплава, превратившегося в стекло, и пузырьки магматических флюидов. Современные методы микроанализа позволяют определить точное содержание почти всех химических элементов буквально в точке – объеме образца, равном  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  мм<sup>3</sup>. С помощью этой новейшей техники удалось установить, что и пузырьки,



и стеклянные капельки содержат воду.

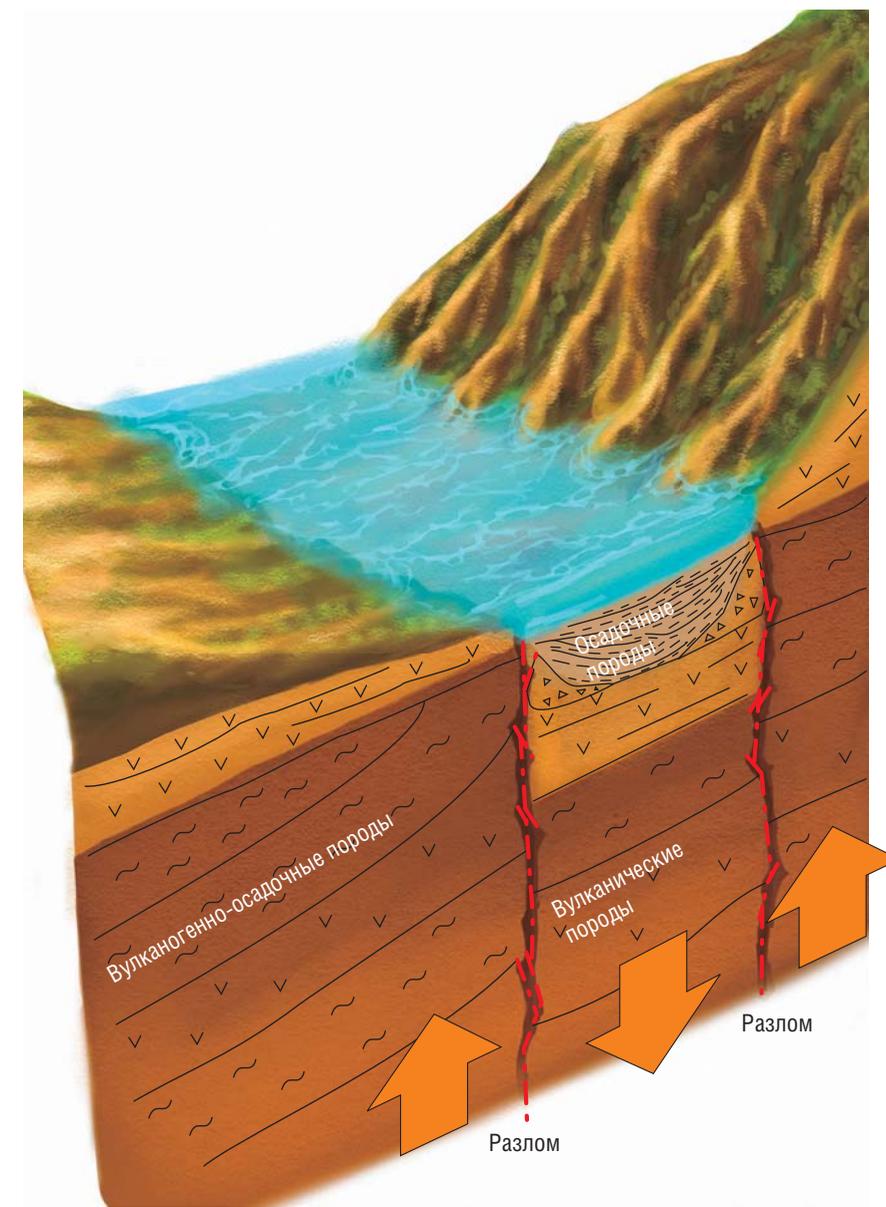
Выяснилось, что магматический расплав в разных участках очага включал от 3 до 6 мас. % воды, а выделявшиеся из него флюиды на 98% состояли из воды и имели плотность 0,22 г/см<sup>3</sup> (Smirnov *et al.*, 2019). На основе этих данных можно оценить давление в момент, когда флюиды выделялись из магмы, и оно будет близко к давлению вышележащих пород, сдерживающих взрывную энергию магмы.

Значение этого показателя оказалось примерно равным 1000 атмосфер, из чего следует, что готовая к извержению часть магматического очага была расположена на глубине около 3 км от земной поверхности. Однако, согласно теоретическим моделям растворения воды в магмах, на таких глубинах расплав должен содержать ее гораздо меньше, чем мы обнаружили. Объяснить этот феномен можно только тем, что в очаге или отдельных его участках давление магмы превышало давление перекрывающих пород. По нашим расчетам, примерно в 2–3 раза.

## Сценарий катастрофы

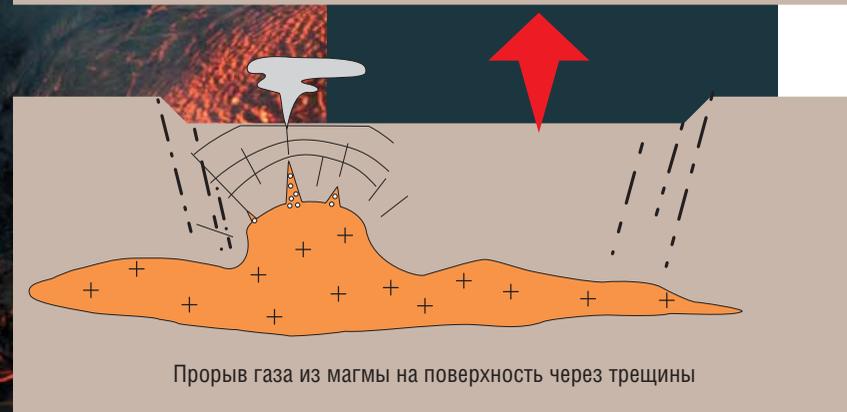
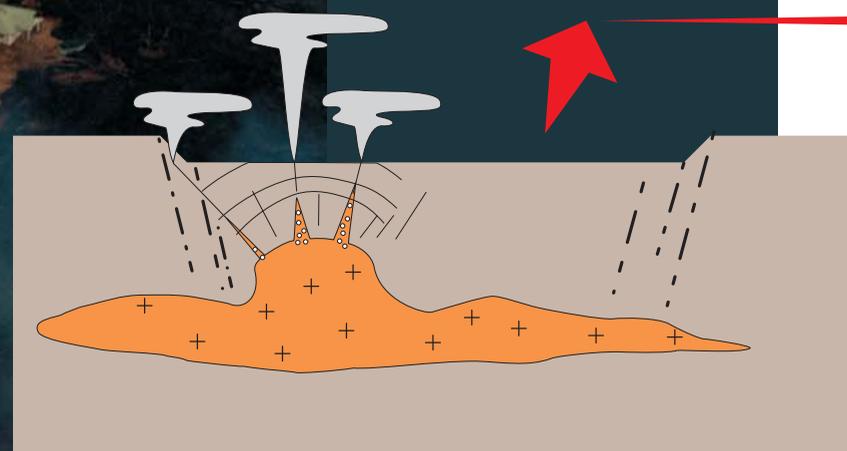
На основе этих данных вырисовывается такой сценарий извержения. Насыщенная водяным паром и другими газами магма, в которой началось выделение пузырьков флюидов, скопилось в верхних частях очага. У нее понизилась плотность и немного уменьшилась вязкость, что способствовало росту давления на перекрывающие очаг твердые горные породы (*кровлю*). Выделение пузырьков магматического флюида и их изоляция внутри все еще достаточно вязкой магмы взвело механизм взрыва – осталось только спустить курок.

Так случилось, что очаг этого извержения сформировался в краевой части опущенного блока земной коры островной дуги – *грабена*.



Грабены ограничены разломами, по которым и шло опускание. Разломы – это участки земной коры, где ослаблена прочность и возможны тектонические перемещения блоков друг относительно друга. Они уходят своими корнями в недосыгаемые недра, по ним происходит подъем к поверхности глубинных магм и флюидов. Тот факт, что наиболее мощная часть толщи пемзовых туфов на перешейке

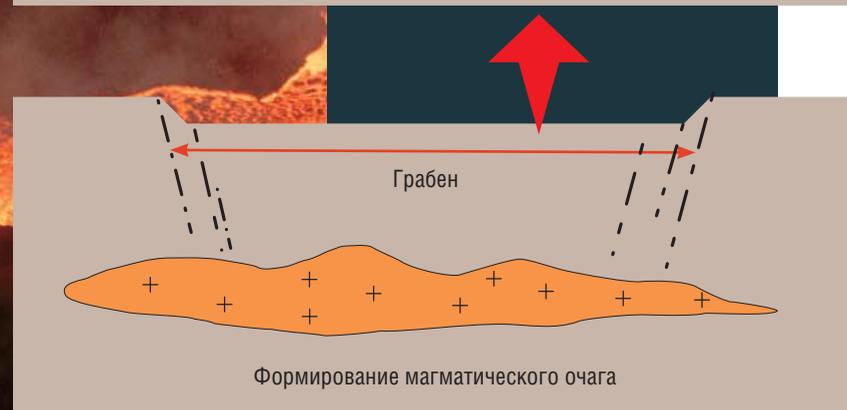
Схема строения грабена перешейка Ветрового, где 20 тыс. лет назад сформировался очаг катастрофического взрывного извержения. Стрелками показаны направления относительного перемещения блоков земной коры. Рис. Е. Халфиной



Прорыв газа из магмы на поверхность через трещины



Подъем магмы, содержащей пузырьки газа



Формирование магматического очага

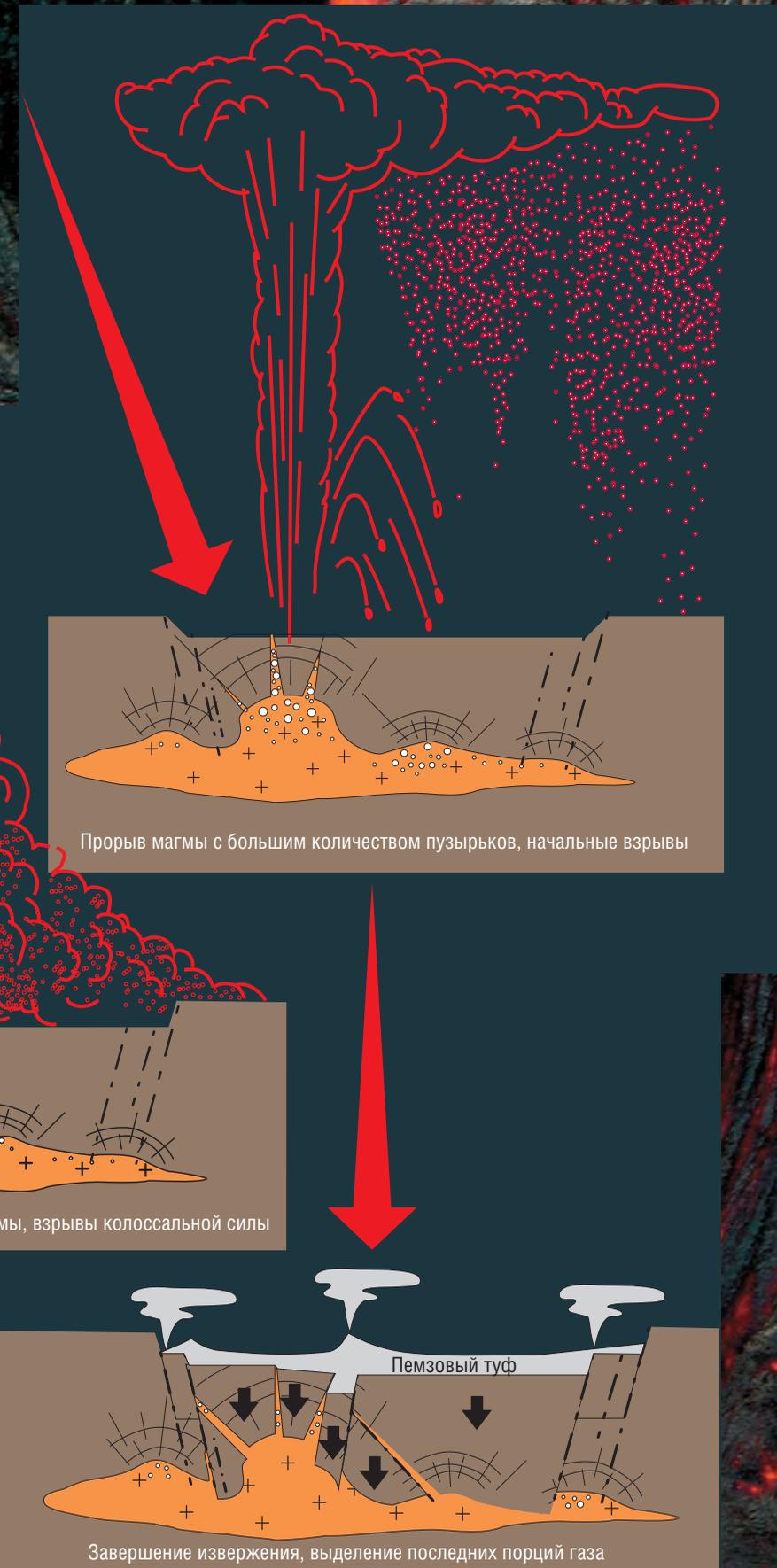
Ветровом проецируется на зону одного из таких разломов, дает основание полагать, что движение по нему и активировало «взрыватель».

Катастрофа, отдельные детали которой стали понятны еще в ходе полевых работ, разразилась на берегу неглубокого морского пролива, разделявшего небольшие острова, вошедшие впоследствии в состав современного Итурупа. Горячие пирокластические потоки практически полностью засыпали пролив, и он сильно обмелел, но благодаря поднятию уровня моря по окончании ледникового периода продолжал существовать еще около 18 тыс. лет. Но тектоника или характерное для таких мощных извержений последующее поднятие поверхности вконец его осушили.

Последние эксплозивные извержения на перешейке имели место около 2 тыс. лет назад, но их сила и масштаб уже не были такими впечатляющими, как главный эпизод образования пемзовых туфов. Вулканическая активность постепенно угасла. Один из последних эпизодов – возникновение небольшого стратовулкана Клуба.

Этот вулкан был рожден магмами с низким содержанием окиси кремния (т. е. не кислыми, а *основными*). Такие магмы зарождаются глубоко в мантии, они менее вязкие и более плотные, чем материнские магмы пемз. Крупный очаг легкой и относительно холодной кислой магмы, существовавший до катастрофического извержения, не пропускал к поверхности горячие и тяжелые основные магмы, породившие Клубу. Но они питали теплом

Стадии подготовки, начала (слева) и финала извержения в грабене перешейка Ветрового, завершившегося катастрофическим взрывом и образованием кальдеры (справа)



Прорыв магмы с большим количеством пузырьков, начальные взрывы

Обрушение кровли, массовый прорыв магмы, взрывы колоссальной силы

Пемзовый туф

Завершение извержения, выделение последних порций газа

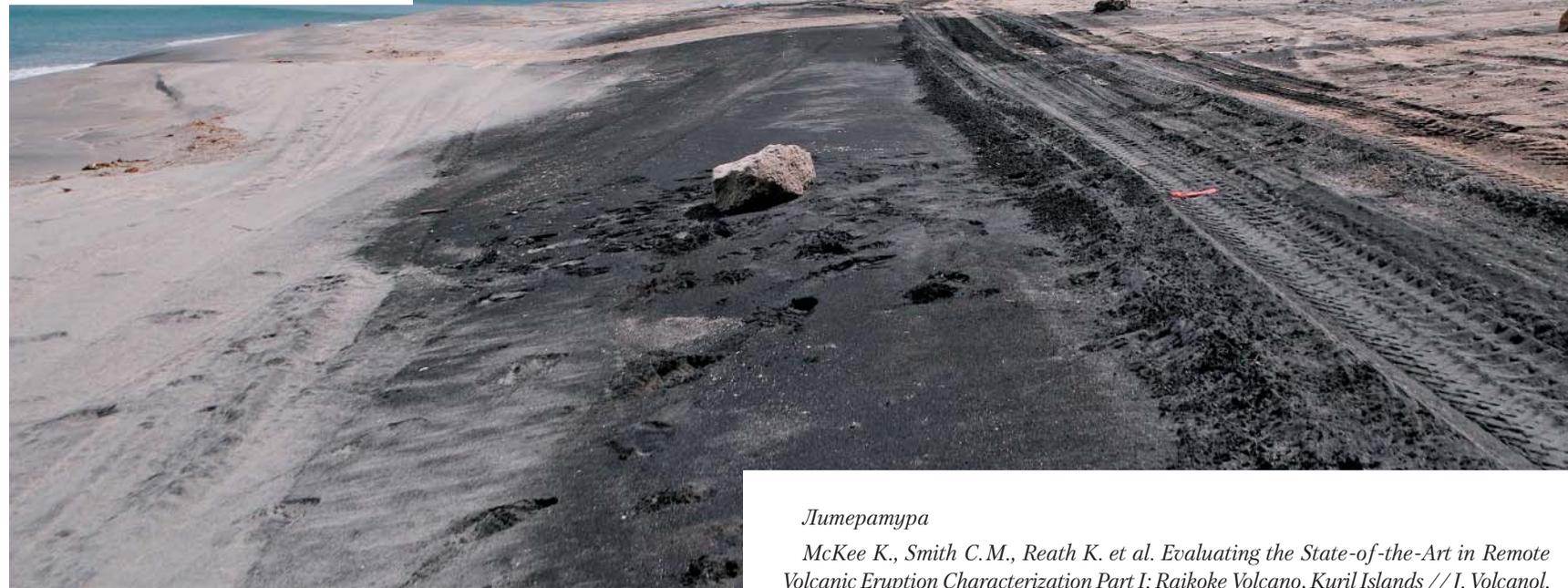
и выделившимися из них флюидами очаг катастрофического извержения, также способствуя увеличению подвижности наполняющей его магмы.

И только после того, как очаг был опустошен, такая магма смогла достичь поверхности и образовать свой собственный вулкан. На этом закончилась вулканическая история перешейка Ветрового, начавшаяся с колоссального взрыва, потрясшего этот курильский регион 20 тыс. лет назад.

**К**огда на месте будущего о. Итуруп разразилось катастрофическое извержение, где-то на просторах Евразии и Северной Америки стояли трескучие морозы последнего ледникового периода. По «сухопутному мосту» Берингии из Сибири на Аляску шла миграция первобытных людей, искавших лучшей доли. Но до активного заселения Курильских островов было еще далеко.

Мы полагаем, что та природная катастрофа не коснулась человеческой популяции. По крайней мере, возраст наиболее древних поселений на Итурупе составляет 8–10 тыс. лет. Но совершенно очевидно, что животный и растительный мир в этой части архипелага в полной мере ощутил на себе губительное дыхание вулкана.

Катастрофическое извержение стало одним из тех событий, которые в дальнейшем привели к образованию крупнейшего из островов Курильской гряды. А у геологов осталось еще очень много вопросов и неразгаданных загадок природы этого дикого, но крайне интересного края Земли.



В экспедициях приняли участие сотрудники ИГМ СО РАН, кандидаты геол.-минерал. наук Д. В. Кузьмин, Т. Ю. Тимина, А. Я. Шевко, а также студенты и аспиранты НГУ И. Р. Низаметдинов, И. А. Максимович, А. А. Котов. Автор благодарит канд. геол.-минерал. наук А. В. Рыбина, заведующего лабораторией вулканизма и вулканопасности ИМГГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск), за поддержку в проведении исследований и экспедиционных работ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 18-05-00819, 16-05-00894) и РНФ (грант 20-17-00075)



#### Литература

McKee K., Smith C. M., Reath K. et al. Evaluating the State-of-the-Art in Remote Volcanic Eruption Characterization Part I: Raikoke Volcano, Kuril Islands // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2021. V. 419. 107354.

Self S., Blake S. Consequences of Explosive Supereruptions // *Elements.* 2008. V. 4. P. 41–46.

Smirnov S. Z., Nizametdinov I. R., Timina T. Yu. et al. High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands); mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2021. V. 418. 107346.

Smirnov S. Z., Rybin A. V., Kruk N. N. et al. Parental Melts and Magma Storage of a Large-volume Dacite Eruption at Vetrovoy Isthmus (Iturup Island, Southern Kuril Islands): Insights into the Genesis of Subduction-zone Dacites // *J. Petrol.* 2019. V. 60(7). P. 1349–1370.