

УДК 551.21

## ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА ЭЙЯФЬЯДЛАЙОКУДЛЬ (ИСЛАНДИЯ) ВЕСНОЙ 2010 г. И ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

© 2011 г. А.Я. Салтыковский

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

20 марта 2010 г. на юге Исландии после более чем 200-летнего перерыва началось извержение вулкана Эйяфьядлайокудль. Через три недели – 14 апреля – в леднике, как панцирем покрывающем вулкан, образовалась 500-метровая трещина, через которую изливалась расплавленная лава и одновременно выбрасывалось в атмосферу огромное количество пара, вулканического пепла и токсичных газов. Это привело к появлению гигантской вулканической пепловой тучи, из-за которой на несколько дней было практически полностью парализовано авиасообщение в Европе. Дается описание извержения, состава лавы и газов, приводятся примеры вредоносного влияния вулканического пепла и газов на человека и скот, который в больших количествах содержится в фермерских хозяйствах Исландии.

*Ключевые слова:* вулканизм, извержение, вулканический пепел, вулканические газы.

### Введение

Вулкан Эйяфьядлайокудль (Eyjafjallajökull<sup>1</sup>), расположенный на юге Исландии, активизируется в среднем раз в двести лет. Он находится в одной из самых активных тектонических зон острова – восточной ветви рифтовой неовулканической зоны, с чем и связана его активность. За последнее тысячелетие вулкан вступал в активную фазу 4 раза, последний раз – между 1821 и 1823 гг. К катастрофическим последствиям и разрушениям эти извержения не приводили, несмотря на то, что вулкан расположен в 185 км к востоку от столицы Исландии Рейкьявика. В XIX в. извержения ограничивались выбросами пепла, который, впрочем, был достаточно токсичен из-за высокого содержания в нем серы, фтора, углекислоты и других флюидов.

Вулкан Эйяфьядлайокудль находится между ледниками Эйяфьядлайокудль и Мирдальсйокудль. Это самые крупные ледниковые шапки на юге северной островной страны, покрывающие действующие вулканы. Вулкан Эйяфьядлайокудль представляет собой ледник конической формы, шестой по величине в Исландии. Высота вулкана со-

---

<sup>1</sup> Эйяфьядлайокудль (Eyjafjallajökull) в переводе с исландского языка означает «Остров горных ледников».

ставляет 1666 м. Диаметр кратера 3–4 км, ледниковое покрытие – около 100 км<sup>2</sup>. Поскольку многие вулканы Исландии покрыты ледниками, часто при извержении они подтапливают ледник снизу, в этом и заключается одна из главных опасностей для жителей близлежащих районов. Языки ледников срываются со своих мест, высвобождая миллионы тонн воды и льда, которые сносят все на своем пути. Вулканологи называют их лахарами. Именно из-за этих опасений после пробуждения вулкана Эйяфьядлайокудль весной 2010 г. в Исландии были предприняты столь серьезные меры безопасности. В частности, после его мартовского извержения было прекращено движение по близлежащим автодорогам и эвакуированы жители (рис. 1). (Все фотографии, приводимые в тексте, были присланы автору исландскими вулканологами 20 апреля 2010 г.)

**Рис. 1.** Идеальные автомобильные дороги Исландии в вулканической пыли. Фото Омара Оскарссона



Местные власти опасались, что вулканическая лава растопит ледник и вызовет сильные наводнения. Однако после проведенных исследований специалисты пришли к выводу, что угрозы для местных жителей извержение не представляет. Сообщений об ущербе и человеческих жертвах не поступало, отмечал представитель агентства по гражданской обороне Исландии Видир Рейниссон [Bird, Dominey-Howes, 2010]. Спустя несколько дней после 14 апреля власти разрешили людям вернуться в свои дома (рис. 2).



**Рис. 2.** Пепловая туча. На переднем плане фермерское хозяйство. Фото Хальдора Колбейнса

Вулканологи смогли подойти к кратеру на расстояние нескольких метров и снять извержение на камеру; они увидели, что трещина, из которой изливается лава, имеет протяженность около 500 м (рис. 3). Кроме того, съемки велись и с воздуха.



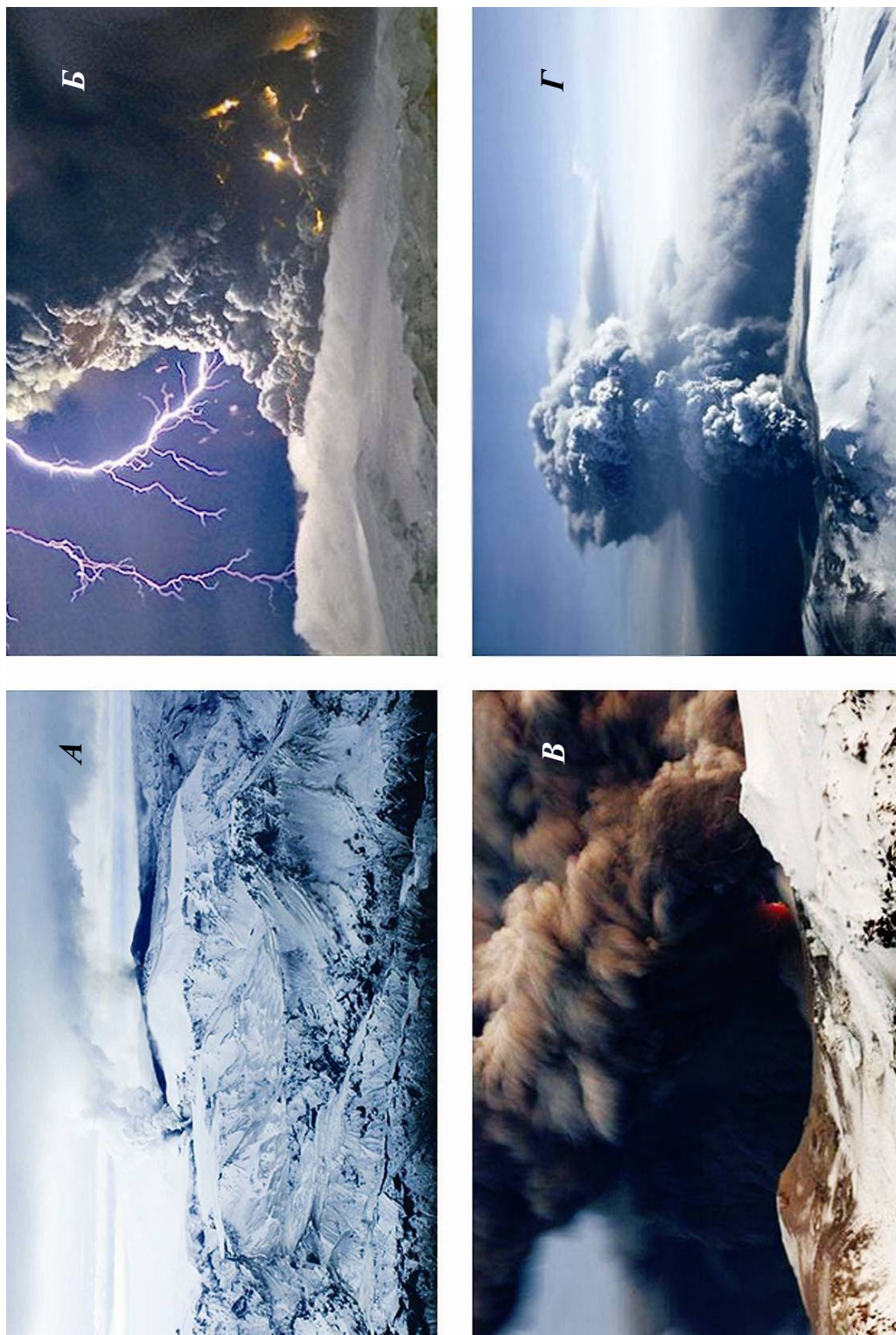
**Рис. 3.** Наблюдения исландских вулканологов из Северного вулканологического института Рейкьявика за начальной стадией извержения вулкана Эйяфьядлайокудль с помощью приборов. Фото Лукаса Джексона, 18 апреля 2010 г.

Исландские ученые долгое время наблюдали за вулканом, отслеживая признаки сейсмической активности. По их мнению, извержение может продлиться еще около года или даже двух.

Последнее извержение вулкана Эйяфьядлайокудль было описано в 1821 г. Тогда оно продлилось вплоть до 1823 г. и вызвало угрожающее таяние ледника. Кроме того, из-за высокого содержания в его выбросах соединений фтора (фторидов) возникла угроза здоровью – костной структуре людей и домашнего скота (рис. 4). Если нынешнее извержение будет продолжаться так же долго, то воздушное пространство над Европой



**Рис. 4.** Исландские фермеры загоняют скот в укрытие. Фото Бреньяра Гаути



**Рис. 5.** Начальная стадия извержения. *А* – туча пара и пепла поднимается над ледником; *Б* – мощные грозовые разряды и молнии над трещиной, через которую поступает лава; *В* – черно-коричневая пепловая туча вместе с поднявшейся тефрой; *Г* – туча пара и пепла сносится к востоку (в сторону Скандинавии и Европы) мощными потоками ветра. Фото Оливии Вандегнистен

придется периодически закрывать, в зависимости от активности вулкана, предупреждает профессор Билл Макгуайр, эксперт Центра по изучению природных катаклизмов при университетском колледже в Лондоне. О том, что вулкан проснется нынешней весной, исландским ученым стало известно еще в конце 2009 г., когда в окрестностях ледника сейсмологи зафиксировали значительное число слабых, неглубоких (с магнитудой  $M \leq 3$ ), землетрясений. В начале марта 2010 г. на леднике Эйяфьядлайокудль было зарегистрировано уже более трех тысяч землетрясений, которые явно свидетельствовали об определенной активизации на глубине. 20 марта 2010 г. вулкан проснулся окончательно и началось первое извержение (рис. 5).

Мощность пароксизма была сравнительно невысокой: местные туристические компании даже стали организовывать вертолетные прогулки к вулкану Эйяфьядлайокудль (рис. 6). Тем не менее из окрестностей ледника эвакуировали около 600 фермеров, а внутренние и международные перелеты в Исландии были приостановлены. К вечеру 21 марта, когда стало известно, что никакой опасности проснувшийся вулкан пока не представляет, все экстренные меры были отменены, а эвакуированным исландским фермерам через несколько дней разрешили вернуться домой. За вулканом установили инструментальные наблюдения. Базальтовая магма начала изливаться из трещины в леднике практически до второго крупного выброса, который произошел 14 апреля. Экспресс-анализ состава лавы ( $\text{SiO}_2$  – 46.99%,  $\text{TiO}_2$  – 3.32 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 15.91 %,  $\text{FeO}$  – 12.12 %,  $\text{MnO}$  – 0.19 %,  $\text{MgO}$  – 6.55 %,  $\text{CaO}$  – 10.28 %,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 3.11 %,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0.64 %, что соответствует щелочному оливиновому базальту) был выполнен Нильсом Оскарсоном 19 апреля 2010 г. методом ICP (Вулканологический институт Рейкьявика).



**Рис. 6.** Шлаковый конус, возникший над трещиной в леднике. Фото Лукаса Джексона

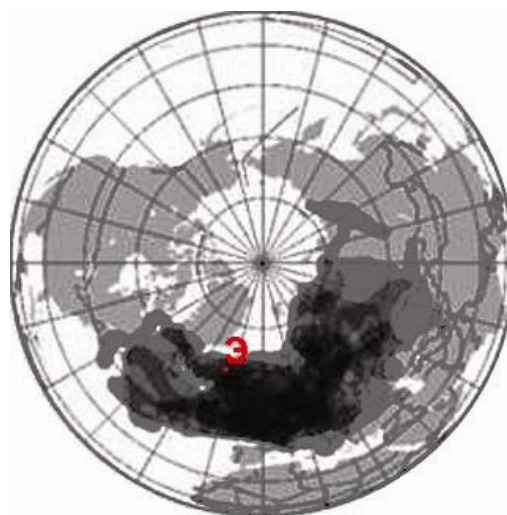
Если первые за 200 лет признаки активности вулкана неподалеку от Рейкьявика прошли практически незамеченными, то второе извержение, свидетелями которого все мы стали весной 2010 г., повлияло на жизнь всей Европы. Во-первых, оно оказалось примерно в двадцать раз мощнее первого. Во-вторых, магма начала извергаться не из нескольких разломов в разных частях ледника, а из одного кратера. Раскаленная порода (ее температура на выходе к поверхности составляла около 1150 °С) растапливала лед и спровоцировала небольшое наводнение в окрестных районах, откуда власти спешно эвакуировали проживающих неподалеку от вулкана людей.

Главной причиной беспокойства стал огромный объем пепла, выброшенный в результате этого извержения в атмосферу (рис. 7).



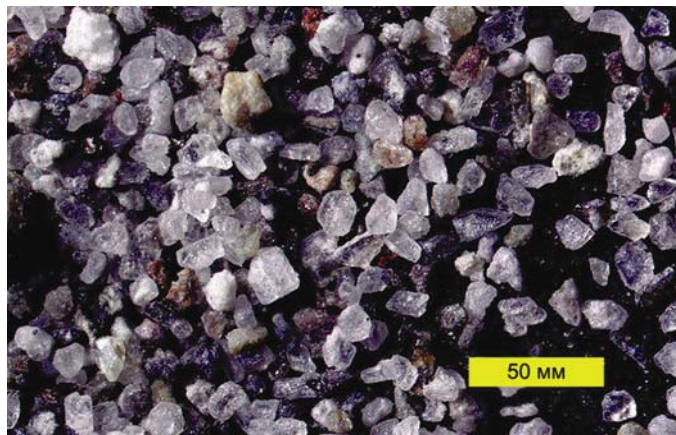
Рис. 7. Облако пара и пепла. Фото Ингофлура Юлиуссона

**Рис. 8.** Схема распространения пепловой тучи над территорией Евразии и, частично, Северной Америки. Э – вулкан Эйяфьядлайокудль



Облако пепла поднялось на высоту более 12 км и благодаря восточному ветру начало быстро распространяться над Великобританией, Шотландией, Данией, скандинавскими странами и странами Балтийского региона (рис. 8). Появление пепла не заставило себя ждать и в России; выпавший пепел был отмечен в окрестностях Санкт-Петербурга, Мурманска и ряда других городов.

Пепел вулкана очень долго оседает (например, вулканическое облако после извержения вулкана Кракатау в Индонезии в 1883 г. осело лишь после того, как дважды обогнуло Землю); пепел представляет большую опасность для турбореактивных самолетов. Как сообщили нам в Центральном аэрогидродинамическом институте им. Н.Е. Жуковского, частички пепла при попадании в двигатели, в условиях высоких температур, расплавляются и образуют так называемые стеклообразные «рубашки» на лопатках ротора, что может привести к их выходу из строя. Кроме того, пепел ухудшает видимость, негативно влияет на устойчивость радиосвязи и может вывести из строя бортовую электронику. Из соображений безопасности полеты в местах его скопления категорически запрещены. Решение об ограничении движения самолетов в Европе было принято сразу после того, как стал очевиден масштаб извержения вулкана Эйяфьядлайокудль. Уже днем 15 апреля в лондонском аэропорту Хитроу были отменены все рейсы, кроме чрезвычайных. Затем последовали отмены и переносы рейсов и в других аэропортах по всей Европе. Франция закрыла 24 аэропорта, к вечеру следующего дня закрылись аэропорты в Берлине и Гамбурге, а затем и в других немецких городах.



**Рис. 9.** Микрофотография пепла вулкана Эйяфьядльйкудль. Видны обломки отдельных минералов базальтов (плаггиоклазы, оливины, пироксены, рудные минералы и остроугольное базальтовое стекло). Фото Нильса Оскарсена

По мере движения облака над Европой следовали все новые отмены рейсов, в том числе перелеты через Атлантический океан и даже в Австралию и Новую Зеландию. Было ограничено воздушное сообщение в Минске; российский «Аэрофлот» отменил около 40 рейсов в европейские города. Аэропорт «Храбово» в Калининграде полностью был закрыт для приема и отправления самолетов; такие же меры были приняты в граничащих с Калининградской областью аэропортах и в Литве. В общей сложности в Европе было отменено около 11 тыс. рейсов. Исключения не сделали даже для первых лиц государств. Так, премьер-министру России В.В. Путину пришлось отменить рабочую поездку в Мурманск.

Российские специалисты в области вулканологии и сейсмологии по-разному оценивают масштаб паники и принимаемые меры в связи с извержением вулкана Эйяфьядльйкудль. Некоторые считают, что нынешнее извержение нельзя рассматривать как катастрофу и СМИ напрасно раздувают панику. Другие эксперты уверены, что закрытие воздушного пространства в Европе было оправдано, так как вулканический пепел крайне опасен тем, что может заглушить двигатель самолета (рис. 9).

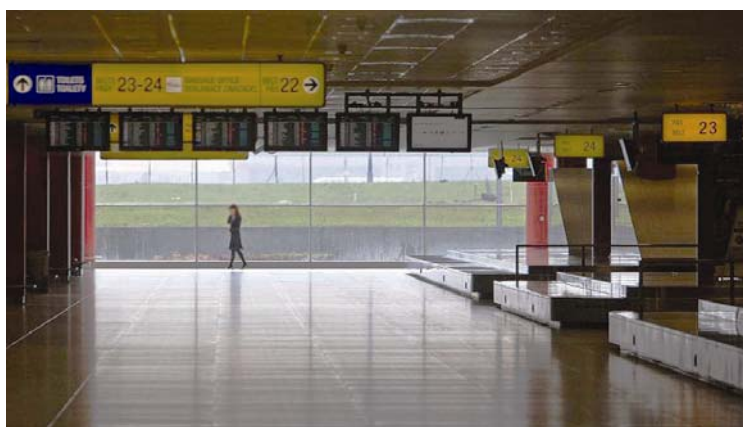
В Центральном институте авиационного моторостроения нам сообщили, что конструкция авиационного двигателя такова, что попадание туда вулканической пыли в больших количествах крайне нежелательно. Лопатки турбины в ходе полета охлаждаются через специальные отверстия маленького диаметра. Эксперты отмечают, что отверстия могут забиваться вулканической пылью и ухудшать характеристики охлаждения. Если температура лопаток повысится до критического уровня, они могут сгореть.

Оценивая потенциальную опасность пепла для здоровья человека, эксперты считают, что она небольшая. Концентрация вулканического вещества должна быть достаточно высокой, чтобы повлиять на здоровье. Пока такой концентрации не наблюдалось, а основная масса пепла находилась в верхних слоях атмосферы – на высоте более 10 км. Эту точку зрения разделяют и европейские вулканологи. Они оценивают извержение вулкана Эйяфьядльйкудль по шкале мощности всего в 1 балл. Например, извержение исландского вулкана Гекла в 2000 г. было оценено в 3 балла. Меры безопасности, которые были предприняты, обусловлены тем, что облако пепла двигалось в сторону густонаселенных районов Европы. Психологи отмечали, что подобного рода природные явления, как правило, сопровождаются общим возбуждением психического состояния людей. Это связано с тем, что люди с тревогой ожидали расширения масштабов катаклизма, но пока все остается спокойно.



**Рис. 10.** Грозовые разряды над кратером вулкана. Фото Лукаса Джексона

Что касается длительности извержения, и тут разные исследователи разошлись в прогнозах. Оценки варьировали от нескольких дней до года. Последние данные показывают, что вулкан Эйфьядлайокудль в настоящий момент спокоен, высота поднимающегося газовой-пылевого облака достигает 100–150 м, а сейсмическая активность значительно ослабла (рис. 10–12).



**Рис. 11.** Так безлюдно в период извержения выглядели многие европейские аэропорты. Фото Агентства REUTERS



**Рис. 12.** Выбросы лавы из трещины 15 апреля 2010 г. Фото Бреньяра Гаути



Есть некоторые опасения, что от активности вулкана Эйяфьядлайокудль может проснуться расположенный рядом (в 20 км восточнее) вулкан Катла, извержение которого будет гораздо мощнее и тогда последствия могут быть более тяжелыми. Остается надеяться, что этого не произойдет.

### Общие черты геологического строения и геофизическая структура Исландии

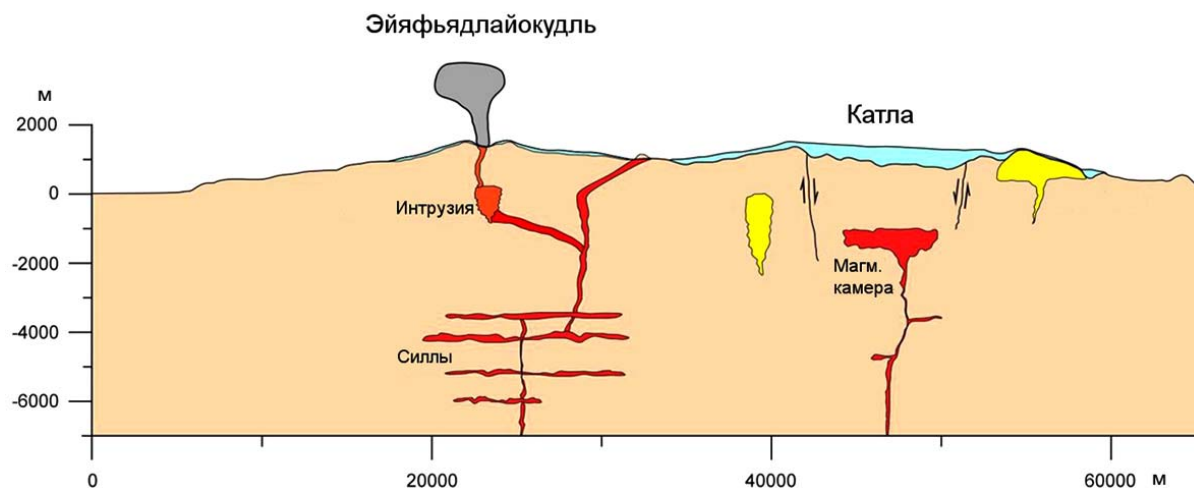
Для того чтобы понять, что же произошло в Исландии и что вызвало авиакатастрофу в Европе, следует в общих чертах представить себе особенности геологического строения этого острова и его глубинную структуру, а также ответить на вопрос, почему именно в Исландии на протяжении многих миллионов лет наблюдается такая сильная вулканическая активность?

Географически Исландия располагается в северной части Атлантического океана, на стыке двух срединных подводных хребтов: Рейкьянес с юга и Колбенсей с севера; это самые молодые океанические структуры с чрезвычайно тонкой земной корой. Многие исследователи полагают, что Исландия представляет собой приподнятую над уровнем океана часть Срединно-Атлантического хребта. Но самым важным отличием Исландии от типичных океанических структур является значительная мощность ее земной коры и существенная доля кислых (до 10–12 %) магматических пород среди их интрузивных и эффузивных разновидностей. Наличие здесь больших объемов контрастных по составу магматических пород – базальтов и риолитов, габбро и гранитоидов – привело почти 150 лет назад известного немецкого ученого Р. Бунзена [Bunzen, 1851] к представлению о двух исходных магмах: основной и кислой. Долгое время господствовало мнение о том, что в земной коре острова должен располагаться сиалический слой (главные его компоненты – Si и Al, отсюда и название), плавлением которого и можно объяснить значительную долю кислых по составу пород. В Исландии нигде не обнаружено пород древнее 16 млн лет, т.е. это действительно очень молодое геологическое образование. Активная вулканическая деятельность исландских вулканов обусловлена положением Исландии на северной оконечности Срединно-Атлантического хребта и двумя рифтовыми неовулканическими зонами, пересекающими территорию острова с юго-запада на северо-восток.



**Рис. 13.** Положение Исландии на Срединно-Атлантическом хребте и неовулканические зоны, пересекающие остров. Треугольники – наиболее активные вулканы.

Хребты: 1 – Колбенсей, 2 – Рейкьянес



**Рис. 14.** Схематический разрез между вулканами Катла и Эйяфьядлайокудль (по Полю Эйнарссону, palli@raunvis.hi.is)

По этим зонам происходит раздвижение океанических плит (Северо-Американской и Евразийской), которые вызывают падение давления в низах земной коры, в результате чего на поверхность устремляется насыщенный флюидами (газами, водяным паром и пр.) магматический расплав (рис. 13).

Как показывают геофизические исследования, под большинством исландских вулканов (например, Геклой, Краблой, Катлой и его соседом – вулканом Эйяфьядлайокудль, извергающимся в настоящее время) магматические резервуары располагаются неглубоко – в пределах нескольких километров (рис. 14).

По всем признакам остров представляет собой молодой наземный рифт, в котором господствуют субгоризонтальные растягивающие напряжения. В лавовых толщах они создают протяженные сбросовые разломы, наиболее эффектные в районе оз. Тингвадлаватн, расположенного в 50 км к востоку от Рейкьявика. В приподнятых восточной и западной частях острова третичные базальтовые покровы рассечены интрузивными жилами, штоками, силлами и различного размера массивами. В 90-х годах прошлого столетия существовало две сейсмические модели строения Исландии. Они различались не по положению глубинных границ и характеристикам выделенных слоев, как это обычно бывает, а по их интерпретации. В результате сейсмических исследований вдоль профилей, пересекающих остров и прилегающую акваторию, в верхней части земных недр уверенно выделялись четыре слоя с последовательным возрастанием скоростей распространения продольных волн в глубину примерно от 2 до 7.4 км/с. Последняя величина совсем не характерна для нормальных пород верхней мантии и превышает обычную скорость в низах земной коры.

Именно этот аномальный по сейсмическим параметрам четвертый слой и стал предметом споров и длительных дискуссий. Исландский геофизик Г. Пальмасон [Palmason, 1971] и другие западные геофизики высказали предположение, что этот слой относится к самой верхней части мантии, где вещество частично расплавлено. На это указывает слой с высокой электропроводностью, расположенный примерно на тех же глубинах (10–20 км). Так в научной литературе появилась «классическая» модель земной коры Исландии; она состоит из трех слоев, а ее общая мощность не превышает 15 км. Однако, согласно появившейся позднее «русской» модели, авторами которой являются геофизики Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта (ИФЗ) С.М. Зверев и др. [Исландия..., 1977], мощность земной коры достигает здесь, по крайней мере, 30 км.

К тому же, в этой модели аномальный четвертый слой также относился к земной коре. Какое же из этих представлений правильно и существуют ли какие-либо вещественные доказательства в пользу той или иной гипотезы? Казалось, что все накопленные к тому времени данные свидетельствовали в пользу маломощной земной коры («классическая» модель). Ведь остров – поистине горячее пятно на поверхности нашей планеты. Исключительно высокие тепловые потоки, обеспечивающие температурный градиент вблизи поверхности до  $160\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ , указывают на возможный разогрев недр до  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глубинах около 15 км. А это уже обычная температура лав, при которой базальтовая магма выплавляется из перидотитового вещества верхней мантии. Как показала практика последних десятилетий, веские доводы в пользу тех или иных идей, господствующих в науках о Земле, дает изучение вещества – глубинных горных пород и минералов. Этими проблемами и сбором материала занимался геологический отряд ИФЗ (в работе которого принимал участие и автор статьи) в составе Советской геолого-геофизической экспедиции АН СССР в Исландии в период 1986–1991 гг.

### Страна вулканов и гейзеров

Опираясь на опыт предыдущих исследований – поисков глубинных включений в щелочных базальтах Монголия, Малого Кавказа, Восточной Европы и пр., в Исландии мы обратили внимание на вулканические центры, где шлаки и лавы по химическому составу относятся к щелочным базальтам. Это, в первую очередь, молодые шлаковые конусы и лавовые потоки на западе (п-ов Снайфедльснес) и юге – на о-вах Вестманнаэйяр и Сюртсей. К этой же группе вулканов относится и вулкан Эйяфьядльйокудль (рис. 15).

Остров Сюртсей является самой молодой сушей, образовавшейся в результате подводного извержения 1963–1967 гг. Свое название остров получил в честь героя норвежской мифологии Сюртура (по преданию, в судный день он должен был зажечь огонь на Земле). В настоящее время на Сюртсее заповедник, так что посещение острова практически запрещено.



**Рис. 15.** Так вулкан Эйяфьядльйокудль выглядел в августе 1991 г.; хорошо видно, что покрывающий его ледник не подает признаков жизни. Фото А.Я. Салтыковского

Исландия славится вулканическими событиями. Самое крупное на Земле лавовое трещинное излияние в южной Исландии – Лаки произошло здесь в конце XVIII в. (1785 г.), когда на поверхность излилось около  $12\text{ км}^3$  лавы, покрывшей около  $600\text{ км}^2$

поверхности в южной части страны (рис. 16). О древности извержения свидетельствует почвенный покров (мох), который образовался более чем за 100 лет. Последствия были ужасающими: мощные выделения сернистого газа, фтористых соединений погубили в округе не только весь урожай, но и растительный покров. Из-за массового падежа скота от голода погибла пятая часть населения острова.

В 1973 г. при извержении вулкана на о. Хэймаэй был засыпан пеплом городок Вестманнаэйяр. Но все его население успели вовремя эвакуировать; позднее он был полностью очищен от вулканического пепла. О произошедшей здесь катастрофе напоминает застывший лавовый поток, дошедший до границы городка, а памятником этому событию служит полуразрушенный дом (маленький ресторанчик) на самом краю потока. Единственным строением, которое не пострадало от извержения, была небольшая кирха в центре города – она даже не была засыпана пеплом.



**Рис. 16.** Шрам, оставшийся после трещинного извержения Лаки в 1785 г. Фото А.Я. Салтыковского, 1989 г.

В таблице собраны все самые значительные извержения исландских вулканов за историческое время (<http://www.eldey.de/English/geology>).

#### Крупнейшие исторические извержения вулканов в Исландии

Вулкан	Высота		Координаты	Время извержения
	метры	футы		
1	2	3	4	5
Аскья	1510		65°01'48" с.ш., 16°45'00" з.д.	1961 г.
Гекла	1491	4892	63° с.ш., 19° з.д.	2000 г.
Ёскьюватн	2119	6952	64° с.ш., 16° з.д.	1875 г.
Катла	1512	4961	63° с.ш., 19° з.д.	1955, 1934, 1918, 1823, 1612 гг.
Керлинг	1538			
Кериз			64° с.ш., 20° з.д.	
Лаки	1725	5606	64° с.ш., 18° з.д.	1785 г.
Снайфедльс	1448	4751	64° с.ш., 23° з.д.	XVIII в.
Сулур	1213		65° с.ш., 18° з.д.	
Суртсей	174		63° с.ш., 20° з.д.	1963 г.

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
Тиндфьяллаёкюдль (Tindfjallajökull)	1463	4800	63° с.ш., 19° з.д.	Голоцен
Торфаёкюдль (Torfajökull)	1259	4131	63° с.ш., 19° з.д.	1477 г.
Тунгафелльсёкюдль (Tungnafellsjökull)	1535	5036	64° с.ш., 17° з.д.	Голоцен
Хенгидль	803	2634	64° с.ш., 21° з.д.	более 2000 лет назад
Хедубрейд (Herðubreið)	1682	5518	65° с.ш., 16° з.д.	Плейстоцен
Хофсйёкюдль	1782	5846	64° с.ш., 19° з.д.	Голоцен
Хверфьядл (Hverfjall)	420	1378	65° с.ш., 16° з.д.	
Эйяфьядлайёкюдль (Eyjafjallajökull)	1666	5466	63° с.ш., 19° з.д.	2010, 1821–1823, 1612 гг.
Эльдфетль	279	915	63° с.ш., 20° з.д.	1973 г.
Эрайвайёкюдль	2109.6			2010 г.

В Исландии периодически происходят грандиозные подледные извержения активно-го вулкана Гримсвётн в северо-западной части крупнейшего европейского ледника Ватнайёкюдль; последнее случилось осенью 1996 г.

Благодаря активной гидротермальной деятельности Исландия считается классической страной гейзеров. Здесь расположен самый крупный на Земле фонтанирующий источник горячей воды – Большой гейзер; природная энергия этого источника в настоящее время почти иссякла (теперь его приходится активизировать с помощью... жидкого мыла, создавая щелочную среду). Зато очень впечатляют оглушительные выбросы воды и водяного пара его младшего спутника Строккура, повторяющиеся каждые 5 мин (рис. 17). Отметим, что свое название – «гейзер» эти выбросы получили благодаря тому, что впервые были детально изучены и описаны вблизи маленького пос. Гейзер в Исландии. После этого все фонтанирующие горячие источники на разных континентах получили название «гейзеры»: в Италии (Флегрейские поля), на Камчатке (Долина гейзеров), в Новой Зеландии и пр.



Рис. 17. Гейзер Строккур. Фото А.Я. Салтыковского, 1991 г.



Рис. 18. Водопад Деттифосс. Фото А.Я. Салтыковского, 1990 г.

Говоря о природных феноменах Исландии, следует упомянуть самый мощный в Европе водопад Деттифосс (рис. 18), расположенный в лавовом ущелье неовулканической зоны и берущий свое начало на одном из ледников в центральной части страны. А вблизи знаменитого вулкана Гекла расположен высочайший водопад – Хауифосс, низвергающийся с высоты 122 м вдоль обрывистой лавовой стенки.

В ходе геологических исследований в Исландии было обнаружено, что однотипные включения пород и минералов отмечались как в щелочно-базальтовых вулканах, так и в толеитовых, для которых кристаллические включения не характерны. Не было обнаружено никаких ультраосновных пород и минералов в виде включений, характеризующих верхнюю мантию. Зато в огромных объемах встречались включения разнообразных по составу габброидов (гранофиров), а также крупные кристаллы кальциевого плагиоклаза, черного пироксена и оливина. Фактически состав найденных минералов и пород почти полностью соответствовал вкрапленникам в лавах.

Авторы работы [Геншафт, Салтыковский, 1999] пришли к выводу, что причина этого – особенности исландского магматизма и сам характер извержений.

Для лав не характерна насыщенность газами, и, по-видимому, вся земная кора пронизана дайками и интрузивными телами, сформировавшимися при спокойном внедрении магматического расплава в верхние горизонты земной коры. Сочетание этих условий никак не способствует выносу на поверхность глубинных пород из верхней мантии или нижних горизонтов земной коры. Сходство минералов включений и пород интрузивных массивов привело к необходимости более тщательного изучения распространенности в Исландии интрузивных образований. Кроме уже известных и закартированных выходов таких массивов на поверхности в различных частях острова, в изобилии были обнаружены гальки габброидов в аллювиальных и русловых отложениях. Это привело к мысли о повсеместном распространении интрузий и их важной роли в строении и составе земной коры этого региона.

### **Земная кора Исландии – четырехслойный пирог**

В результате комплексного и детального изучения включений (как пород, так и минералов) в различных лабораториях удалось получить комплекс минералого-петрохимических и петрофизических характеристик исландских магматических пород, которые

позже были сопоставлены с известными геолого-геофизическими данными. Все образцы были классифицированы на семь групп, из которых наиболее важными оказались три: амфиболизированные габбро и габбро-нориты, рудные габброиды и долериты, кумулятивные включения, образованные при кристаллизации и «слипанию» минералов в магматическом резервуаре. Изучение электрических свойств образцов показало: в недрах Исландии не существует достаточно протяженного и мощного слоя пород кислого состава, т.е. сиалический слой в современной земной коре там, по-видимому, отсутствует. Температура в третьем слое земной коры в среднем составляет 600–800 °С. Эта оценка очень важна для суждения о составе четвертого слоя, с которым и связаны расхождения двух моделей глубинного строения острова – «классической» и «русской», о которых упоминалось выше. Если температура в нем равна или превышает 1200 °С, его не могут образовывать породы «базальтового» состава (габброиды) – они бы полностью расплавились. И в этом случае почти определенно можно было бы утверждать, что четвертый слой относится к верхам мантии. Впрочем, согласно нашим оценкам, для него характерны значительно более низкие температуры и потому там могут существовать твердые габброиды. Изучение упругоплотностных свойств собранных образцов также привело к интересным выводам. Эти данные подтвердили гипотезу о существенно интрузивной природе глубоких горизонтов земной коры Исландии.

В середине 1990-х годов, после окончания наших экспедиционных работ в Исландии, в западной научной литературе появились публикации с новыми данными сейсмических исследований, подтверждающими «русскую» модель строения земной коры острова. Интересно то, что среди их авторов был ярый прежде сторонник «классической» модели исландский геофизик О. Фловенц [Flovenz, Gunnarsson, 1992]. Эти данные свидетельствовали о «холодной» (по сравнению со старыми оценками глубинных температур) земной коре на ее нижней границе – в третьем слое температура не превышает 900 °С. В глубинах четвертого слоя существует сейсмическая отражающая граница на уровне около 25 км, под ней скорости распространения упругих сейсмических волн достигают 7.7 км/с. Что касается петролого-геохимических особенностей, то было показано – кислые расплавы, так широко распространенные в Исландии, скорее всего, формируются при подплавлении габброидов в пределах земной коры. Следовательно, на эволюцию ее состава и строения определяющее влияние должен оказывать ряд процессов: мантийный магматизм (с накоплением толщ интрузивных и излившихся горных пород), образование вблизи поверхности промежуточных магматических очагов (в них происходит дифференциация магмы путем фракционной кристаллизации различных минералов), а также переплавление вещества земной коры на разных глубинах.

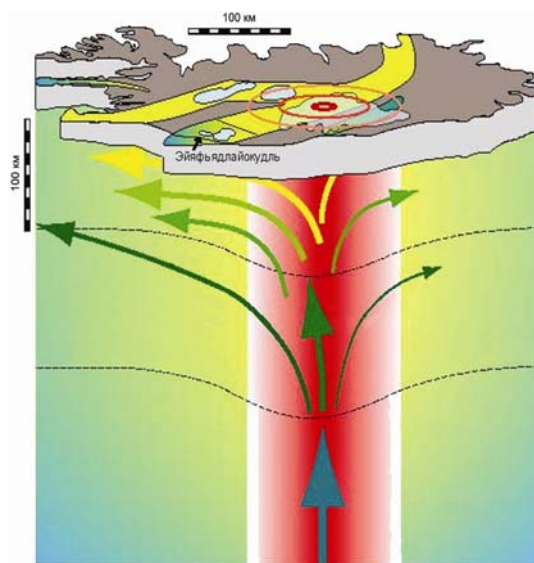
### **Источник активных вулканических процессов в Исландии – мантийный плюм**

Магматические породы Исландии существенно отличаются от пород срединно-океанических хребтов. Это хорошо видно при сравнении изотопного состава тех и других. Вулканы Исландии характеризуются повышенными значениями отношений изотопов стронция, свинца и пониженными – неодима, по сравнению с толеитами близлежащих океанических хребтов.

Магматические породы Исландии, в отличие от последних, обогащены Sr, легкими редкоземельными (La, Sm и пр.) и радиоактивным (Rb, Th, U) элементами. Эти отличия специалисты объясняют тем, что на магматические источники верхней мантии здесь сильно влияют «плюмы» – поднимающиеся из недр Земли (возможно, от границы ядра и нижней мантии) горячие потоки вещества (его состав отличен от древней, обеднен-

ной базальтоидными компонентами мантии). В последние годы плюмы получили геофизическое подтверждение: методами сейсмической томографии в верхней мантии удалось обнаружить столбообразные участки, где скорости распространения упругих волн понижены. Согласно оценкам, вещество плюма должно быть на 150–300 °С горячее материала окружающей мантии.

Геофизические и геохимические данные обосновывают существование исландского плюма. По имеющимся данным, он зародился, скорее всего, в Северной Атлантике, у берегов Гренландии около 65 млн лет назад и постепенно мигрировал в сторону Исландии. Исландский плюм оказал решающее влияние на тектоническую и геологическую историю северной части Атлантического океана. В настоящее время его верхняя часть («головка» плюма) располагается под юго-восточной частью острова. Это подтверждается данными сейсмической томографии, которая показала, что в интервале глубин 150–400 км под Исландией действительно фиксируется структура диаметром около 75 км с четкими боковыми границами (проекция «головки» плюма на поверхность). Именно это его положение и оказывает существенное влияние на всю вулканическую активность Исландии, в особенности ее южной части, где располагаются вулканы Катла, Лаки, Гекла, Эйяфьядлайокудль. Результаты геофизических исследований свидетельствуют, что плюм скорее всего, асимметричен в разрезе, к северу от острова он круто обрывается в сторону океана, не вступая во взаимодействие с породами срединно-океанического хребта Колбенсей (рис. 19).



**Рис. 19.** Предполагаемая схема мантийного плюма, поднимающегося под Исландией (по: [Tronnes, 1990])

О воздействии плюма на окружающую мантию свидетельствует возрастающее вдоль хребта Рейкьянес в сторону острова содержание многих элементов в вулканических породах, в том числе K, Nb, Zr, Sr. Возникает вопрос: а всегда ли в геологической истории этого региона мантийный плюм оказывал влияние на процессы, которые в настоящее время наблюдаются в Исландии? Простейшие петрохимические диаграммы уже наводят на мысль о различиях в глубинных условиях магмогенеза под островом в третичное и четвертичное время. На ранних этапах его формирования условия на глубине были удивительно схожи с условиями, которые существовали под внутриконтинентальными структурами.



Сравнительно давно было показано, что габброиды из различных тектонических структур Земли (складчатых поясов, древних континентальных структур, островодужных систем, океанического дна и т.д.) имеют свое петрохимическое «лицо», т.е. их состав можно использовать для палеотектонической идентификации изучаемых структур. Применительно к породам Исландии этот метод позволил установить определенную этапность тектонической истории острова.

Обобщение собственных наблюдений автора, литературных изотопных и геохимических данных по магматическим породам Исландии показало, что за последние 16 млн. лет характер глубинных магматических источников под Исландией существенно менялся. На первом этапе это был обогащенный радиоактивными редкими элементами мантийный резервуар, характерный для континентальных структур. Затем магматическую активность приобрел мантийный источник, типичный для срединно-океанических хребтов, и уже на последнем этапе влияние на состав источника магм Исландии и хребта Рейкьянес оказало вещество плюма [Салтыковский и др., 1998].

### Что дало изучение Исландии?

Результаты наших исследований отчетливо показали, что простые схемы эволюции земной коры, подобные «чистому» спредингу (растяжению океанического дна), не позволяют многое понять и объяснить в этом регионе. Эти схемы, по-видимому, необходимо «усложнить»: в рассмотрение эндогенных глубинных процессов следует включить взаимодействие разноглубинных оболочек Земли, правильней было бы выделять различные стадии тектогенеза. Продолжающиеся геолого-геофизические работы в Исландии существенно изменили представления о глубинной структуре этого острова и, надо полагать, преподнесут исследователям еще немало сюрпризов, а нам остается надеяться, что вулкан Эйяфьядлайокудль постепенно утихнет и никаких новых катастроф пережить нам не придется.

Когда статья была уже готова, в Исландии (практически примерно через год после извержения вулкана Эйяфьядлайокудль) 21 мая 2011 г. началось извержение одного из крупнейших на острове вулкана Гримсвотн. Этот вулкан находится в той же структурной зоне, что и Эйяфьядлайокудль – Восточной неовулканической зоне Исландии. К особенностям вулкана относится то, что он располагается под самым крупным ледником Европы – Ватнайокудль в юго-восточной части острова. Мощность ледника колеблется от 500 до 1000 м, и чтобы прорвать такую толщу льда, извержение должно было обладать большой энергией. Магматический базальтовый расплав, имеющий температуру около 1250–1300 °С расплавил лед, превратив его в пар, и над вулканом поднялся столб пара высотой около 20 км. Затем начался выброс вулканического пепла, состоящего из мелких частичек раздробленной породы с высоким содержанием железа, магния и других тяжелых элементов. Поэтому пепел быстро оседал, главным образом над Атлантикой, но часть его продвинулась к востоку, захватив Ирландию, Шотландию, частично Норвегию.

В Исландии больше всего пострадали жители районов, находящихся в непосредственной близости от ледника, над которым расположен вулкан. Пепел накрыл города, здания и автомобили. В Исландии прекратил работу главный международный аэропорт, отменены внутренние рейсы. В домах были закрыты окна и двери, везде ощущался сильный запах гари, видимость была практически нулевая. Извержение вулкана Гримсвотн признано сильнейшим за последние 100 лет. В данный момент выбросы дыма и пепла уже не такие интенсивные, воздушное сообщение над Исландией постепенно восстанавливается, однако у жителей оптимизма пока не прибавилось – ведь все прекрасно помнят, что происходило в минувшем году!

## Литература

- Гениафт Ю.С., Салтыковский А.Я. Исландия: глубинное строение, эволюция и интрузивный магматизм. М.: ГЕОС, 1999. 362 с.
- Исландия и срединно-океанический хребет: Глубинное строение, сейсмичность, геотермия / Под ред. В.В. Белоусова, С.М. Зверева. М.: Наука, 1977. 195 с.
- Салтыковский А.Я., Титаева Н.А., Гениафт Ю.С. Изотопия, геохимия базальтов Исландии и мантийный плюм // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 25–40.
- Bird D., Dominey-Howes D. Volcanic risk and tourism in South Iceland // J. Volcanolog. Geotherm. Res. 2010. V. 189. P. 33–48.
- Bunzen R. Über die Prozesse der vulkanischen Gesteinsbildungen Islands // Ann. Physik. 1851. Bd. 83. S. 197–272.
- Flovenz O., Gunnarsson K. Seismic crustal structure in Iceland surrounding area // Tectonophysics. 1991. V. 189, N 1/4. P. 1–17.
- Palmason G. Crustal structure of Iceland from explosion seismology // Visindafelag Isl. Rit. 1971. V. 40. 187 p.
- Tronnes R.G Basaltic melt evolution of the Hengill volcanic system, SW Iceland, and evidence for clinopyroxene assimilation in primitive tholeiitic magmas // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 15893–15910.

### Сведения об авторе

**САЛТЫКОВСКИЙ Артур Яковлевич** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: (499) 254-89-35. E-mail: Saltyk@ifz.ru

## ERUPTION EYJAFYADLAYOKUDL (ICELAND) SPRING 2010 AND POSSIBLE CONSEQUENCES

**A.Ja. Saltykovsky**

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** March 20, 2010 in southern Iceland, after more than 200-year hiatus, began erupting volcano Eyjafyadlayokudl. Three weeks later – April 14, in a glacier, like shell covering the volcano, formed a 500-meter long crack through which molten lava started pouring, with the simultaneous release into the atmosphere huge amounts of steam, ash and toxic gases to form a giant volcanic ash clouds from which caused a few days, it was almost completely paralyzed air traffic over Europe. A description of the eruption of lava and gases, are examples of harmful effects of volcanic ash and gases to humans and livestock, which in large quantities in a farm in Iceland.

*Keywords:* eruption, volcanic ash, volcanic gases.