

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ИСЛАНДСКИХ ВУЛКАНОВ

В.В. Шувалов, В.М. Хазинс, И.А. Трубецкая

Рассматривается извержение исландского вулкана Эйяфьятлайокудль в апреле 2010 года, приводятся результаты численного моделирования распространения пыли над Европой после этого извержения, анализируется статистика всех вулканических извержений в Исландии с $VEI \geq 3$ за последние 200 лет, анализируется вероятность повторения сбоев в работе авиатранспорта, если подобное событие произойдет в ближайшее время.

Введение

В апреле 2010 года произошло относительно слабое ($VEI = 4$) извержение вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии, которое вызвало беспрецедентные последствия. Вулканический индекс – VEI (volcanic explosivity index) определяется по формуле:

$$VEI = \log_{10} (\text{объем изверженной магмы, м}^3) - 4,0$$

т.е. $VEI = 4$ соответствует выбросу $0,1 \text{ км}^3$. В течение недели большинство аэропортов Европы были парализованы из-за опасности повреждения двигателей самолетов выброшенной вулканом пылью. Согласно [Wall and Flottau, 2010] было отменено более 100 000 рейсов. Общие потери авиаотрасли от простоя оцениваются в \$2 млрд. Отметим, что такие или более мощные извержения происходят на Земле почти каждый год (7 за предыдущие 10 лет), однако никогда ранее их последствия не были столь серьезными для авиации. В этой статье мы попробуем разобраться, в чем причина столь необычного (или обычного) явления. С этой целью мы рассмотрим механизм извержения вулкана Эйяфьятлайокудль, проанализируем другие извержения исландских вулканов за последние 100 лет, приведем результаты численного моделирования распространения пылевого облака после извержения

2010 года, оценим влияние конкретных погодных условий на последствия этого извержения. В заключение обсудим дальнейшее возможное развитие событий.

Извержения вулкана Эйяфьятлайокудль в апреле 2010

В марте 2010 Исландская метеорологическая служба зарегистрировала начало извержения вулкана Эйяфьятлайокудль, это первое извержение после 1823 года. С 20 марта по 12 апреля в течение первой фазы извержения лава вытекала из нескольких жерл, расположенных вдоль трещины в 9 км к востоку от вершины вулкана. Трещина была частично покрыта снегом, но была расположена вне зоны, покрытой постоянными ледниковыми шапками. Потоки лавы стекали по склону, время от времени вызывая образование небольших плюмов, если на пути попадались значительные объемы воды или снега (<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1702-02=&volpage=var>).

Вторая, взрывная, фаза извержения вулкана Эйяфьятлайокудль началась 14 апреля в кальдере, покрытой ледником. Ей предшествовала серия землетрясений в период с 23.00 13 апреля до 01.00 14 апреля. В 07.00 14 апреля из-под ледяной шапки появилась вода. Позднее тем же утром появился плюм (эруптивная колонка). При этом кратер был полностью закрыт облаками, поэтому нет никакой информации о том, что в нем происходило. 15 апреля на изображениях, полученных с помощью радара, видна серия взрывных извержений вдоль трещины длиной около двух километров.

Механизм формирования плюмов определялся взаимодействием расплавленной лавы с водой, образовавшейся при таянии ледника, заполнявшего кальдеру. Взаимодействие протекало в виде серии фреатических взрывов в местах соприкосновения воды и магмы. В процессе фреатических взрывов образовывались облака, состоящие из пара и мелких (порядка 1–100 мкм) частиц магмы. Облака, имеющие среднюю плотность меньше воздушной, поднимались вверх и объединялись, образуя единую eruptивную колонку.

15 апреля содержащая пепел eruptивная колонка (плюм) поднялась на высоту более 8 км. Достигнув высоты зависания, пылевое облако начинало двигаться в направлении на восток. Интенсивное взрывное извержение продолжалось трое суток. Всего за первые 72 часа было выброшено около 140 миллионов кубических метров пепла, что соответствует VEI = 4. Распределение частиц в облаке по размерам было измерено на расстоянии 50 км от вулкана: 24% – частицы размером менее 10 мкм, 33% – частицы размером 10–50 мкм, 20% – частицы размером 50–146 мкм, 23% – частицы размером 146–294 мкм. Интенсивная фаза извержения закончилась после того, как растаял весь снег/лед, находившийся в кальдере.

Статистика вулканической деятельности в Исландии за последние 100–200 лет

Исландия является областью повышенной вулканической активности. Значительная часть вулканов покрыта ледниками. При взаимодействии горячей магмы со льдом последний тает, что часто приводит к локальным наводнениям. Если извержение достаточно мощное и/или ледник не очень толстый, то он проплавляється насквозь, и пепел и пары воды, образующиеся при взаимодействии магмы со льдом, выбрасываются в атмосферу [Parfitt and Wilson, 2008]. Обычно это бывает при $VEI \geq 3$. Всего за последние 100 лет в Исландии произошли только два (кро-

ме рассматриваемого) извержения с VEI = 4. Это извержение вулкана Катла (Katla) в 1918 году (также покрытого ледником) и взрывное извержение вулкана Гекла (Hekla) в 1947 году. Про второе извержение известно, что эруптивная колонка поднималась на высоту до 20–30 км, а выпадения пепла обнаружены даже в России, масса выброшенного пепла составляла более 200 миллионов кубических метров. Никаких данных о нарушении авиapolетов нет. Еще четыре достаточно мощных извержения вулкана Гекла с VEI = 3 наблюдались в 1970, 1980, 1991 и 2000 годах. Во всех случаях облако пепла поднималось на высоты порядка 10 км, но его масса была на 1–2 порядка меньше, чем в 1947 году, никаких сведений об отмене авиарейсов, связанной с этими извержениями нет.

Всего за последние сто лет в Исландии зафиксированы 9 извержений с VEI = 3. Трижды за последние 15 лет происходили извержения вулкана Гримсвотн с VEI = 3. Во всех случаях образовывалась эруптивная колонка высотой до 10 км. В 1998 году Лондонский Центр Исследования Пепла (VAAC) предупреждал авиакomпанию о повышенной концентрации пыли, но полеты не отменялись.

За период с 1810 по 1910 годы в Исландии зафиксированы четыре извержения с VEI = 4 и одно извержение с VEI = 5. Все они сопровождались выбросом пепла на большие высоты (порядка 10 км и выше). Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что извержения, аналогичные извержению вулкана Эйяфьятлайокудль, происходят в среднем один раз в 20–30 лет. Примерно раз в 10 лет происходят извержения с VEI = 3, которые также выбрасывают пыль на высоты, где летают самолеты.

Численное моделирование распространения пыли, выброшенной в атмосферу при извержения вулкана Эйяфьятлайокудль в апреле 2010

Для изучения динамики аэрозольного облака была разработана модель, с помощью которой исследовано загрязнение неба над Европой вулканической пылью, выброшенной в атмосферу при извержении исландского вулкана Эйяфьятлайокудль. Начальные параметры (высота подъема пылевого облака и количество выбрасываемого в атмосферу вещества) задавались на основе данных Смитсоновского Института (<http://www.volcano.si.edu>).

В модели учитывалось реальное распределение ветров в атмосфере на разных высотах в течение 14–17 апреля 2010 года (по данным <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncer.reanalysis.pressure.html>), осаждение частиц в поле тяжести и турбулентная диффузия. Поле ветров задавалось в виде таблицы с шагом по времени 6 часов, шагами по долготе и широте 2,5 градуса, шагом по высоте (неравномерном) около 1 км.

Обычно в численных моделях вулканических извержений конденсированные частицы рассматриваются как непрерывная среда (квaзигаз) с нулевым давлением, которая течет сквозь газ и обменивается с ним импульсом и энергией. Движение этой среды описывается теми же разностными уравнениями, что и движение обычного газа. Для частиц каждого размера вводится свой «квaзигаз». Такой подход достаточно прост, но имеет ряд недостатков. Один из них связан с тем, что при рассмотрении широкого спектра размеров частиц приходится вводить много «квaзигазов». Другой недостаток связан с тем, что все частицы одного размера, расположенные в одной расчетной ячейке, обязаны иметь одинаковую скорость. В данной работе используется другой подход, основанный на решении уравнений движения для некоторого числа (10^6 – 10^8) отдельных частиц-представителей [Shuvalov, 1999].

Каждая из частиц-представителей описывает движение большого числа (10^5 – 10^{10}) реальных частиц, имеющих тот же размер и близкие скорости, координаты, температуры и т.д. Метод Монте-Карло используется для расчета диффузии конденсированных частиц. На каждом временном шаге τ частица смещается на расстояние $dx = \sqrt{D\tau}$ в случайном направлении. Здесь D – коэффициент диффузии. Коэффициенты турбулентной диффузии брались из работы [Нерушев, Крамчанинова, 2007].

В качестве начальных данных задавалось цилиндрическое облако аэрозольных частиц диаметром 20 км и высотой 2 км. В это облако постоянно поступали пепловые частицы ($5 \cdot 10^9$ кг/час), которые в дальнейшем двигались под действием ветра и силы тяжести и рассеивались в процессе турбулентной диффузии. Распределение частиц по размерам задавалось в соответствии с данными на 15 апреля, упомянутыми выше.

В результате расчетов получены распределения концентрации пыли в небе над Европой в различные моменты времени и на разных высотах (рис. 1). Первыми загрязнение атмосферы почувствовали жители Великобритании и скандинавских стран, затем пылевое облако стало распространяться в южном и западном направлениях. Максимальная концентрация пыли достигается на высотах зависания облака и составляет несколько миллиграмм на кубический метр. На большие расстояния улетают частицы размером менее 10–50 мкм, более крупные оседают вблизи вулкана. Даже при постоянном поступлении пыли от фиксированного источника параметры загрязненной области над Европой все время изменяются в соответствии с изменением поля ветра.

Полученные распределения неплохо коррелируют с данными по отменам авиарейсов в европейских аэропортах. По некоторым сведениям, одной из причин запрета авиаполетов в апреле 2010 года были результаты численной реконструкции динамики пеплового облака, проведенной в Лондонском исследовательском центре вулканического пепла – Volcanic Ash Advisory Center (VAAC). Рекомендации VAAC основываются как на наблюдениях со спутников, самолетов, лидарных наблюдениях и т.д., так и на расчетах по одной из дисперсионных моделей переноса примесей. На рис. 2 демонстрируются зоны, представляющие риск для полетов 17 и 18 апреля. Контур со сплошной границей относится к высоте 7 км, а с пунктирной – к 11 км. Концентрация пепла внутри контуров не известна. Так как наши расчеты и расчеты, выполненные VAAC, проведены по различным методам, не известны начальные данные и характеристики поля ветра, использованные VAAC, то сопоставление возможно лишь на качественном уровне. В этом смысле можно говорить о неплохом согласии наших результатов с расчетами VAAC.

Легко предположить, что при другом распределении ветров (например, при постоянном юго-восточном ветре) небо над Европой осталось бы чистым. Для того, чтобы оценить типичность или нетипичность погодных условий в апреле 2010 года и их влияние на распространение пыли от исландского извержения, мы провели серию численных экспериментов, показывающих, какой была бы загрязненная область, если бы рассматриваемое извержение произошло бы в других месяцах того же 2010 года и, для определенности, в тех же числах. При этом использовались реальные распределения ветров в соответствующие периоды времени. Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показывают, что во всех случаях кроме одного (соответствующего извержению в январе) пылевое облако оказывается над Европой. Такая «кучность» результатов позволяет говорить уже о тенденции и о возможных ограничениях для авиаперелетов подобных тем, которые вызвало извержение вулкана Эйяфьятлайокудль, при повторении подобных событий в будущем.

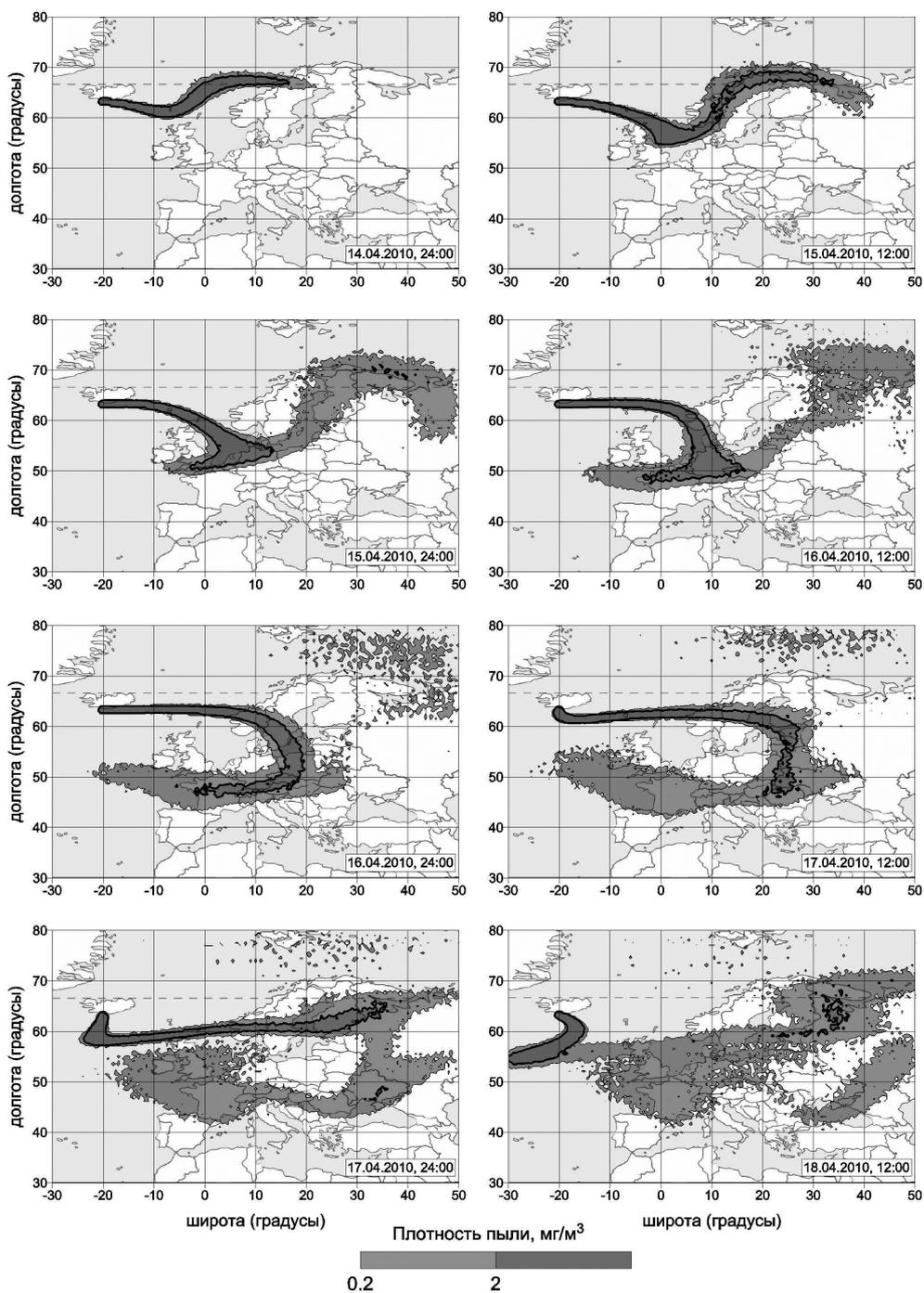


Рис. 1. Распределение пыли в небе над Европой на высоте 9 км в период с 14 по 18 апреля 2010 г. Толстая черная линия ограничивает область с концентрацией пыли более $2 \text{ мг}/\text{м}^3$, тонкая черная линия – $0,2 \text{ мг}/\text{м}^3$.

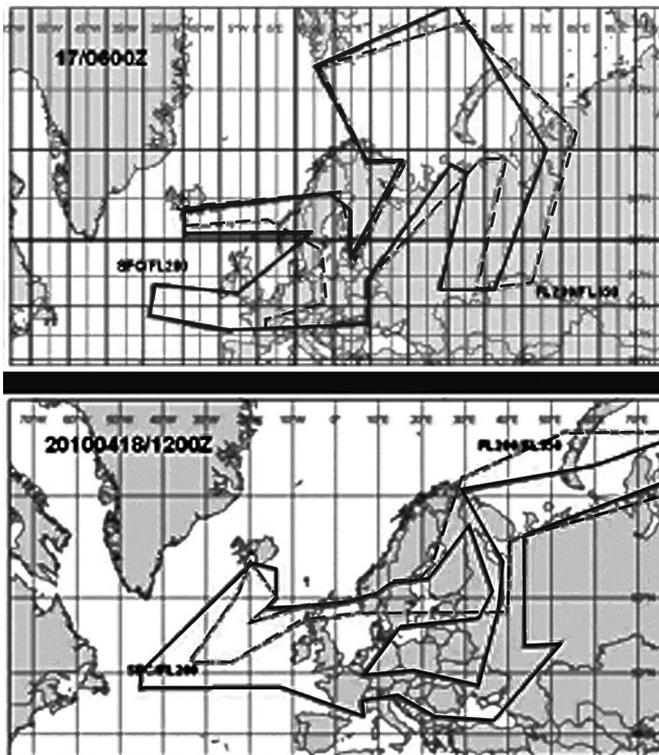


Рис. 2. Опасные для полетов зоны 17 и 18 апреля 2010 г. по данным ВААС.

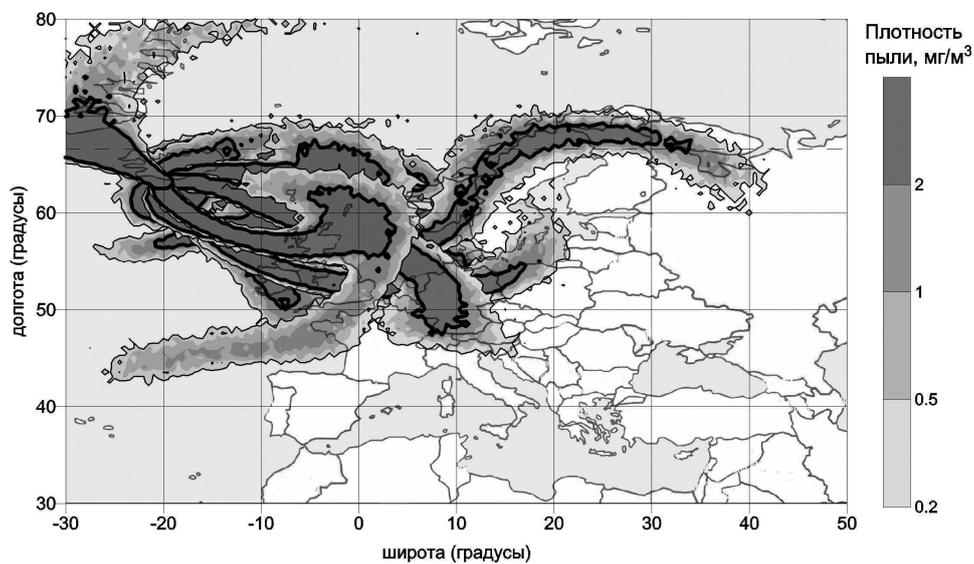


Рис. 3. Распределение пыли в небе над Европой на высоте 9 км через 24 часа после начала извержения.

Показаны результаты расчета для 12 вариантов, в которых при одних и тех же начальных данных (соответствующих выбросу пыли вулканом Эйяфьятлайокудль) использовались распределения ветров для 14 января, 14 февраля, ..., 14 декабря 2010 года. Толстые черная линии ограничивают область с концентрацией пыли более 2 мг/м^3 , тонкие черные линии – $0,2 \text{ мг/м}^3$.

Обсуждение

Проведенный анализ показывает, что за прошедшие 80–90 лет (время регулярных авиаперевозок) произошло только одно извержение вулкана в Исландии, сравнимое по мощности с извержением вулкана Эйяфьятлайокудль в апреле 2010 года. Это извержение Геклы в 1947 году. Никаких данных об отмене полетов, вызванной этим извержением нет. Возможно, это связано с тем, что в момент извержения преобладали восточные ветры с переходом южной компоненты на северную, которые уносили пылевое облако в сторону Гренландии. Выше в одном из вариантов показано, что такие ситуации реально реализуются. К тому же в то время летали другие (винтовые) самолеты и на других высотах. С другой стороны статистика за 200 лет показывает, что в среднем извержения с VEI = 4 происходят в Исландии раз в 20–30 лет. Поэтому вероятность повторения в ближайшие годы велика, и, как следует из рис. 3, в случае аналогичного извержения с большой вероятностью пылевое облако окажется над Европой.

С другой стороны непонятно, насколько обоснованы были запреты полетов в европейском небе в период извержения вулкана Эйяфьятлайокудль. Во-первых, нет никаких официально подтвержденных данных о каких-либо повреждениях двигателей самолетов в этот период. Во-вторых, неизвестны реальные концентрации пыли в разных районах. В-третьих, в описываемый момент (апрель 2010 года) в Европе не были установлены предельно допустимые концентрации пыли в атмосфере. Только вскоре после апрельского кризиса была установлена предельная норма в 2 мг/м^3 (мы

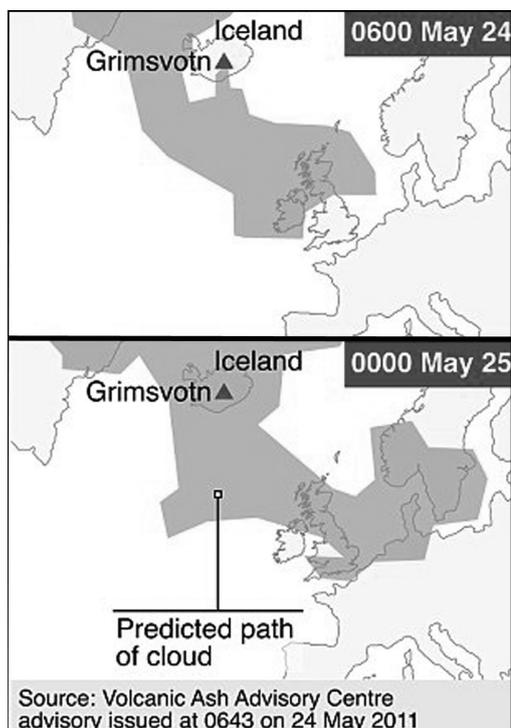


Рис. 4. Опасные для полетов зоны 24 и 25 мая 2010 г. по данным ВААС на 24 мая.

использовали это значение при построении рис. 1, 3). Согласно недавно опубликованным данным германского аэрокосмического центра этот порог ни разу не был превышен в апреле 2010 года. А после 19 апреля концентрация пыли не превышала $0,2 \text{ мг/м}^3$ (одной десятой порогового значения). Эти данные противоречат некоторым другим оценкам и измерениям в других районах, в том числе и нашим расчетам. Таким образом, мы приходим к следующим выводам: повторение экологической ситуации апреля 2010 года в европейском небе вполне вероятно в ближайшие 10–30 лет. Для ослабления последствий таких извержений необходимо уточнить значения предельно допустимых концентраций пыли для разных видов самолетов и разработать эффективные методы измерения концентраций пыли в атмосфере, методы краткосрочного прогноза изменения пылевой обстановки.

После написания статьи, 21.05.2011, в Исландии началось очередное извержение вулкана Гримсвотн, выбросив-

шего пепел на высоты до 20 км. Вулкан Гримсвотн расположен под одним из самых мощных ледников в Европе. Поэтому извержение, как и в случае с вулканом Эйяфьятлайокудль, является фреатомагматическим. Предсказанная в статье тенденция сохранилась – рекомендации ВААС по ограничению авиаперевозок охватывают практически те же области, что и в случае вулкана Эйяфьятлайокудль (рис. 4).

В заключении отметим, что итальянские вулканы также могут повлиять на авиационные перевозки в Европе. За последние 200 лет там было зарегистрировано только одно извержение мощностью VEI = 4 (Везувий, 1906 год), но произошло несколько десятков извержений мощностью VEI = 3, которые при определенных условиях тоже могут быть опасными.

Работа выполнена в рамках Программы №4 Президиума РАН.

Литература

Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К., Соловьев В.И. Определение характеристик атмосферных движений по данным многоволнового зондирования из космоса // Известия РАН, ФАО. 2007. Т. 3. № 4. С. 442–450.

Parfitt E.A. and Wilson L. Fundamentals of Physical Volcanology. Oxford: Blackwell. 2008. 256 p.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect. // Shock Waves. 1999. V. 9. No. 6. P. 381–390.

Wall R., and Flottau J. 2010. Out of the ashes: Rising losses and recriminations rattle Europe's air transport sector // Aviation Week & Space Technology. 2010 V. 172. No. 16. P. 23–25.