

Вулканомеханика

А.А.Бармин, Е.И.Гордеев, О.Э.Мельник

Чтобы понять функционирование любой сложной природной системы (климата, океана, очага землетрясения или извергающегося вулкана), необходимо привлекать специалистов из разных областей знания и применять различные подходы, основанные на натуральных измерениях, лабораторных экспериментах и математическом моделировании. Для исследования вулканических извержений последнее играет первостепенную роль, поскольку никакими прямыми методами невозможно получить информацию о процессах, происходящих при подъеме магмы к поверхности. Однако существуют и успешно используются методы гидромеханики и теории упругости для изучения и прогноза вулканической активности.

Проявления вулканизма и магматический расплав

Вулканическое извержение — один из наиболее опасных типов природных катастроф. Так, извержение Везувия (79 г. н.э.) разрушило города Помпеи и Геркуланум, вулкан Санторин (1650 г. до н.э.) уничтожил минойскую культуру, а при извержении Кракатау (1883 г.) было выброшено около 50 км³ вулканического вещества (шум этого извержения слышался на расстоянии в несколько тысяч ки-



Алексей Алексеевич Бармин (1934–2010), доктор физико-математических наук, профессор. Лауреат Государственной премии (2004), премии им.С.А.Чаплыгина и премии им.М.В.Ломоносова (2008). Неоднократно публиковался в «Природе».



Евгений Ильич Гордеев, академик, доктор физико-математических наук, член Президиума ДВО РАН, директор Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Область научных интересов — геодинамика, сейсмология и вулканология.



Олег Эдуардович Мельник, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией НИИ механики при МГУ им.М.В.Ломоносова. Занимается приложениями методов механики многофазных сред к исследованию динамики вулканических извержений. Награжден медалью им.Л.Р.Вейджера Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли (IAVCEI).

лометров, а цунами, вызванное обрушением вулканической постройки, обогнуло весь земной шар). Самое крупное известное извержение произошло на вул-

кане Йеллоустон (США) около 2.2 млн лет назад. Объем извергнутого материала оценивается в 2500 км³, а последствия катастрофы сравнимы с последствия-

ми столкновения Земли с крупным небесным телом.

Проявления вулканизма разнообразны: от медленного выдавливания лавовых куполов со скоростями в несколько сантиметров в секунду до гигантских взрывных извержений, когда из жерла вулкана со сверхзвуковой скоростью вырывается газопепловая струя. Столь же разнообразны и свойства магмы и состояния, в которых она может пребывать.

Магматические расплавы возникают на значительной глубине в зонах субдукции, где океаническая кора погружается под континентальные окраины, и в зонах спрединга в срединно-океанических хребтах, где непрерывно рождается новая кора, слагающая дно океанов. Вулканы также приурочены к горячим точкам, связанным с огромными восходящими потоками в мантии — плюмами, и к системам глубинных разломов, расчленяющих континенты и приводящих к образованию новых морей и океанов.

Магма начинает свой (тернистый) путь к поверхности, просачиваясь сквозь частично расплавленную мантию, и перед извержением обычно собирается в приповерхностных очагах, расположенных в земной коре. По мере подъема к поверхности однородный магматический расплав превращается в многофазную среду, содержащую жидкий расплав, кристаллы и пузырьки газа. Условия формирования магмы и ее путешествия к поверхности сильно влияют на ее свойства и характер извержения.

Например, вязкость базальтов (магм с низким содержанием оксида кремния, SiO_2) при высокой температуре может опускаться до $10 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (сравнимо с медом или сахарным сиропом), в то же время типичная вязкость кислых магм ($\text{SiO}_2 > 54\%$) достигает 10^6 – $10^8 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Вулканы континентальных окраин поставляют лаву, богатую растворенными газами

(в основном парами воды, углекислым газом, сероводородом, фтором, хлором и др.). Растворимость газов в магме зависит в основном от давления и состава. Наиболее газонасыщенные кимберлитовые магмы выносят из глубин астеносферы алмазы. Они могут содержать десятки весовых процентов растворенного углекислого газа. Их извержение приводит к образованию знаменитых кимберлитовых трубок и воронок, заполненных раздробившимся и спекшимся материалом.

Другой важный компонент магматического расплава, определяющий режим извержения, — кристаллы. Некоторые из них зарождаются в магматических очагах перед извержением и вырастают при медленном остывании магматического расплава до размеров в несколько миллиметров и даже сантиметров (фенокристаллы). Кристаллы существенно меньшего размера — от нескольких микрометров до нескольких сотен микрометров (микролиты) — возникают в магме при подъеме из очага к поверхности. Обычно магмы, которые поднимаются быстро и извергаются взрывным образом, содержат небольшое количество микролитов, а формирующие лавовые купола и высоковязкие лавовые потоки могут содержать их до 40–50 объемных %. Общее же содержание кристаллов иногда достигает 70–85% (по объему). При больших концентрациях кристаллов эффективная вязкость магмы существенно возрастает, и она проявляет неньютоновские свойства (т.е. наступает предел текучести, наблюдается сильная зависимость вязкости от скорости деформации, появляется упругость). При некоторых извержениях происходит выдавливание лавовых обелисков, которые движутся практически как твердое тело (в конце извержения Маунт Пеле на о.Мартиника в 1902 г. высота обелиска достигла 300 м).

Режимы вулканических извержений

В зависимости от химического состава магмы, скорости ее подъема и геометрии вулканической системы извержение может происходить как в виде относительно медленного истечения лавы (эффузивный тип), так и в виде дискретных или квазистационарных газопепловых потоков (эксплозивный тип). Однако в процессе одного извержения его режим может меняться с эффузивного до eksploзивного и обратно без изменения химического состава магмы.

В маловязких базальтовых магмах по мере подъема происходит интенсивное всплывание пузырей, а затем их слияние с образованием газовых снарядов, подъем которых на поверхность приводит к дискретным взрывам, выбрасывающим фрагменты магмы на высоты до нескольких сотен метров. Характерный пример такого типа — вулкан Стромболи в Италии. Истечение лавовых потоков часто сопровождается величественными лавовыми фонтанами (вулкан Килауэа на Гавайях).

В кислых вязких магмах движения газа за счет выделения пузырьков практически не происходит. Если магма поднимается достаточно быстро, то объемная доля пузырьков может достигать 60–80%, и сплошность жидкой фазы нарушается (происходит фрагментация магмы). При этом ламинарное течение высоковязкой пузырьковой жидкости сменяется турбулентным течением газозвеси, а вязкость несущей среды уменьшается на 10–12 порядков. При медленном подъеме пузырьки объединяются в подвижную пористую среду, в которой происходит опережающее фильтрационное движение газа. Возникает ситуация, что при одних и тех же параметрах магмы в очаге возможны два режима извержения: медленное истечение дегазирующейся магмы и высокоинтенсивное — га-

зовой взвеси. Переход между ними происходит скачкообразно и сопровождается изменением расхода магмы во многие десятилетия.

Механические модели извержений

Эксплозивные извержения. Первые попытки приложения методов гидромеханики к описанию таких извержений относятся к концу 70-х годов XX в. В ранних работах [1] для описания течения газозвеси использовался интеграл Бернулли. Канал считался абсолютно податливым, так что его форма определялась из равенства давления в газозвеси и окружающих породах. Впоследствии этот подход развития не получил. В современных моделях канал вулкана считается абсолютно жестким, хотя в последнее время делаются попытки более аккуратно учесть податливость его стенок [2]. Пионерские работы фи-

зика Ю.Б.Слезина [3] объяснили, почему одна и та же магма может извергаться как эксплозивным, так и эффузивным образом, и выявили условия перехода между режимами (рис.1). Модель, основанная на законах сохранения массы и импульса для жидкой и газовой компонент, описывает течение в канале вулкана с учетом фильтрации газа сквозь магму.

Результаты Слезина были впоследствии уточнены и развиты в наших работах в сотрудничестве с вулканологами из Бристольского университета [4]. Выяснилось, что в высоковязкой магме расширение пузырьков при подъеме идет очень медленно и давление в них оказывается существенно большим, чем в окружающей их магме. При некоторых условиях стенки пузырьков не выдерживают давления газа, происходит дробление магмы с высвобождением энергии сжатых газов [5]. Мы исследовали процесс развития извержения, вызванного разрушени-

ем лавовой пробки в жерле вулкана (рис.2) [6]. На вулкане Суффриер на о.Монтсеррат в Карибском море при одних и тех же параметрах магмы и интенсивном отделении газа из расплава в пузырьки длительность извержения составляла около 1 ч, а в случае слабого газовыделения — всего 2 мин. Объем выброшенного материала в первом случае на порядок выше. Эффективность дегазации магмы во многом определяется количеством пузырьков в единице ее объема, которое, в свою очередь, сложным образом зависит от условий подъема магмы перед взрывным процессом. Поскольку измерять данный параметр при подготовке извержения невозможно, то и предсказать силу последнего крайне трудно.

Хороший обзор моделей эксплозивных извержений можно найти в статье Д.Сахаджиана [7], предвещающей специальный выпуск «Journal of Volcanology and Geothermal Research». Этому выпуску предшествовало «соревнование» различных математических моделей (в том числе и двух, представленных нами). Участникам при заданных параметрах вулканической системы и магмы необходимо было предсказать интенсивность извержения и некоторые другие его характеристики. Интересно, что, несмотря на существенные различия в самих моделях, предсказанные расходы магмы отличались меньше чем на порядок, причем они соответствовали параметрам извержения вулкана Сент-Хеленс (1980), которые использовались в качестве определяющих. Это означает, что модели в целом правильно описывают основные механизмы эксплозивных извержений.

Экструзивные извержения. Существует зависимость между расходом магмы и количеством кристаллов в ней: чем меньше расход, тем больше кристаллов в магме содержится [8]. Кристаллизация происходит в канале вулкана при подъеме магмы, падении давления в ней

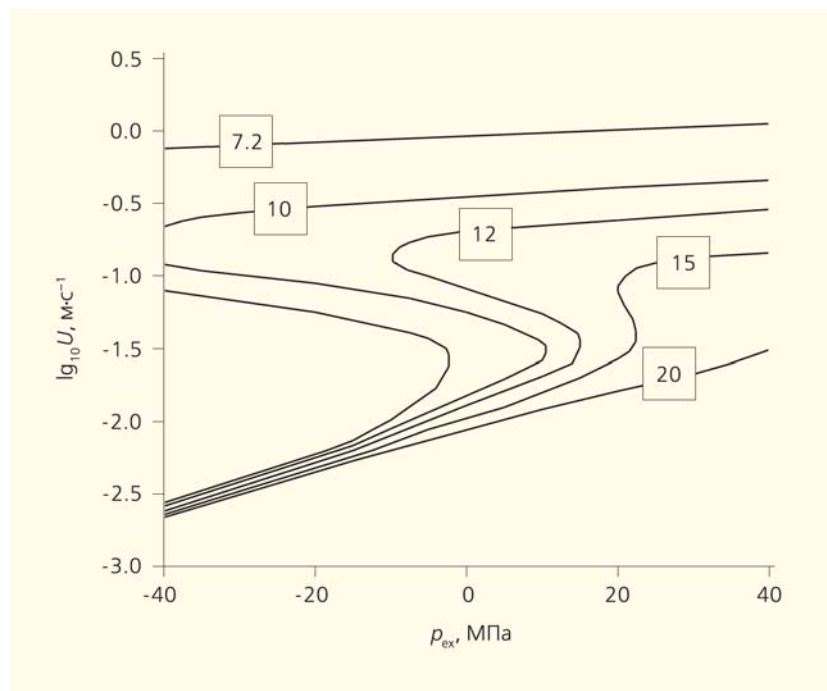


Рис.1. Зависимость скорости подъема магмы (U) от избыточного над литостатическим давления в очаге. Цифры на кривых — глубина очага. Нижние режимы соответствуют экструзивному типу извержения, верхние — эксплозивному. Переход между ними может осуществляться при изменении давления в очаге.

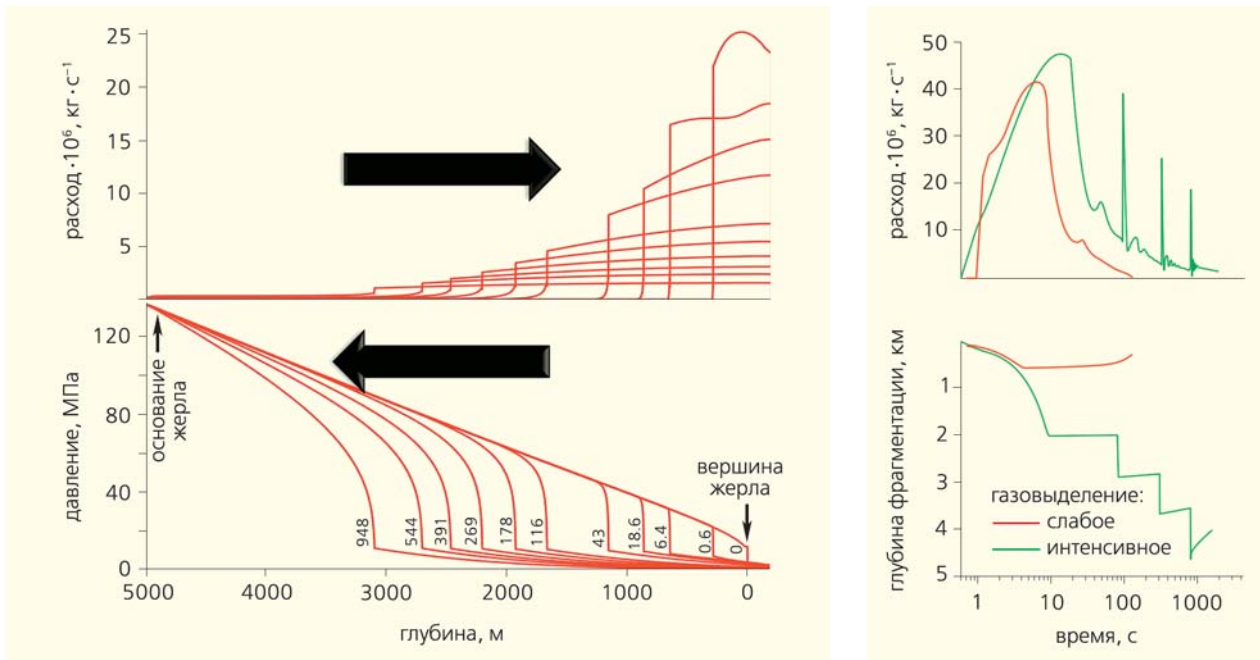


Рис.2. Развитие взрывного извержения при прорыве лавовой пробки в жерле вулкана. Слева — профили давления и расхода в канале вулкана в различные моменты времени. Внутрь канала распространяется волна разрежения, в которой происходит фрагментация магмы. Раздробленный материал выносится на поверхность. Справа — зависимость расхода магмы на выходе и глубины уровня ее фрагментации для интенсивного и слабого газоотделения. Время дано в логарифмическом масштабе.

и оттоке растворенного газа. Мы впервые провели адекватный учет влияния кинетики кристаллизации на режим извержения [9]. При медленном подъеме канал занят сильновязкой закристиализовавшейся магмой, а при быстром концентрация кристаллов относительно невелика. В случае постоянной подпитки очага извержения свежей магмой возможны циклические режимы извержения (рис.3), связанные с переходами между различными стационарными режимами [10, 11].

Наблюдения и интерпретация

Заглянуть в земные недра действующего вулкана невозможно. Тем не менее, используя методы механики сплошной среды, можно изучать деформации поверхности вблизи вулканов, вызванные миграцией магмы в земной коре. Наиболее простым представляется использование

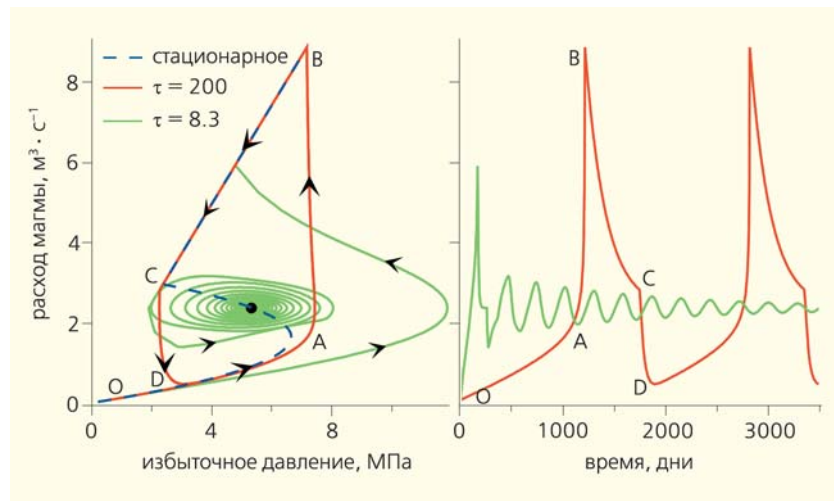


Рис.3. Зависимость расхода магмы от давления в очаге и от времени. Пунктирной кривой показано стационарное решение. Параметр τ обратно пропорционален объему очага. Для больших очагов возможны циклические режимы извержения.

аналитического решения Моги, которое соответствует точечному источнику давления, расположенному под плоской поверхностью. Изменение характеристик источника интерпретируется как движение магмы.

Подобный упрощенный подход, откалиброванный для конкретных вулканов, позволяет предсказывать начало извержения, однако не позволяет реконструировать структуру питающей системы.

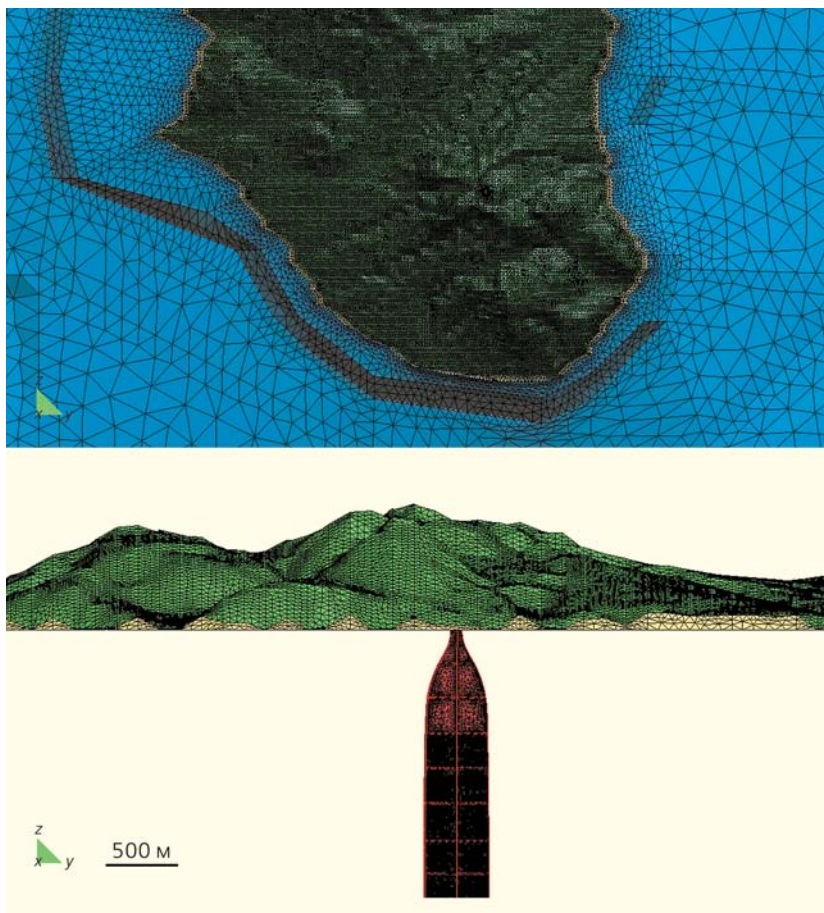


Рис.4. Трехмерная модель о.Монтсеррат в Карибском море с вулканическим каналом в виде дайки, переходящей в цилиндрический канал.

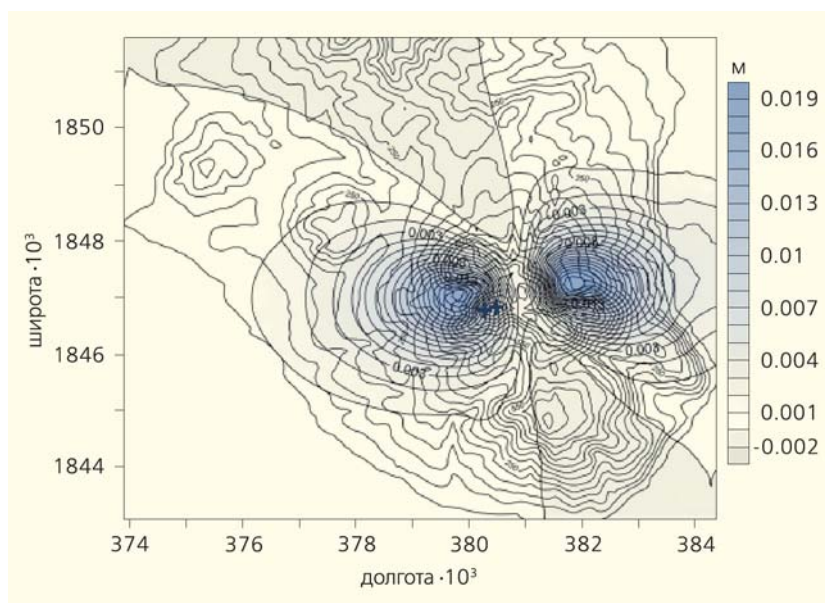


Рис.5. Поле вертикальных деформаций на о.Монтсеррат, вызванное увеличением давления в канале вулкана. Схема приведена в системе координат УТМ. Цветная шкала — вертикальные перемещения.

Более аккуратные модели основаны на решении трехмерных уравнений линейной упругости (или вязкоупругости) [12] с учетом топографии земной поверхности, неоднородности упругих свойств пород, наличия разломов. Была построена модель извержения вулкана Суфриер [13]. Распределение давления в магматическом канале рассчитывалось для течения магмы в дайке (трещине), переходящей в цилиндрический канал [14]. Учитывались реальная трехмерная топография о.Монтсеррат и увеличение модуля Юнга с глубиной. Минимизация отклонения расчетных и измеренных деформаций позволили построить адекватную модель для этого вулкана (рис.4, 5).

Активизация вулканических процессов меняет поле напряжений в породах, приводит к возникновению и росту разрывов в твердой среде. Такие разрывы образуются при обычных тектонических землетрясениях, называемых вулкано-тектоническими. Максимальная их магнитуда не превышает 4.5—5.0. Развитие во времени роев вулкано-тектонических землетрясений принципиально отличается от развития афтершоковых процессов для сильных тектонических землетрясений, когда основные напряжения, накопленные за длительное время, реализуются в результате одного или нескольких сильных событий. Рои вулкано-тектонических землетрясений могут продолжаться месяцами, а иногда и годами.

Определение параметров источника землетрясения по измерениям на поверхности — классическая обратная задача механики. Решая уравнения линейной теории упругости с учетом неоднородности среды, удалось получить искусственные сейсмограммы, которые затем сравнивались с результатами наблюдений [15].

При извержении газонасыщенных магм регистрируются

низкочастотные землетрясения, сейсмические сигналы от взрывов в кратере и вулканическое дрожание, которые связаны с движением газа в магме [16]. Энергия сейсмических сигналов, возникающих при дегазации магмы, пропорциональна объему выделенного в атмосферу газа. Взрывные извержения сопровождаются распространением акустических волн, интенсивность которых связана с величиной избыточного давления в магматическом расплаве. Отношение энергий акустических и сейсмических волн зависит от содержания газовой компоненты в магматическом расплаве [17]. По спектральному составу сейсмического сигнала можно оценить эффективную вязкость и объемную упругость магмы [18].

Моделирование вулканической опасности

Создание карт опасности для конкретных вулканов базируется во многом на решении задач механики. Одни из самых разрушительных вулканических явлений — пирокластические потоки (горячие пепло-каменные лавины). Они возникают как за счет гравитационного обрушения вулканических колонн, так и за счет направленных взрывов лавовых куполов, связанных с накоплением избыточного давления вулканических газов. Такой поток в 1902 г. разрушил городок Сент-Пьер на о.Мартиника, где в течение нескольких минут погибло более 28 тыс. жителей.

При моделировании пирокластических потоков решаются

уравнения мелкой воды с учетом внутреннего трения в самом потоке и трения о подстилающую поверхность. Рассматривается и реальная топография вулканических склонов. Наиболее известная программа расчетов TITAN2D разработана в Университете Баффало (США) [19]. Для построения карт вулканической опасности производятся вычисления, в которых входные параметры (масса оползня, его координаты, гранулометрический состав и др.) выбираются случайно методом Монте-Карло. Далее оценивается вероятность поражения местности пирокластическим потоком.

Распространение туч от вулканических взрывов в прижерловой области моделируется на основе решений трехмерных многофазных (газ и частицы



Рис.6. Форма вулканической колонны на Везувии. На переднем плане — схема Неаполя. На ней показаны кварталы, которые будут подвергнуты разрушениям.

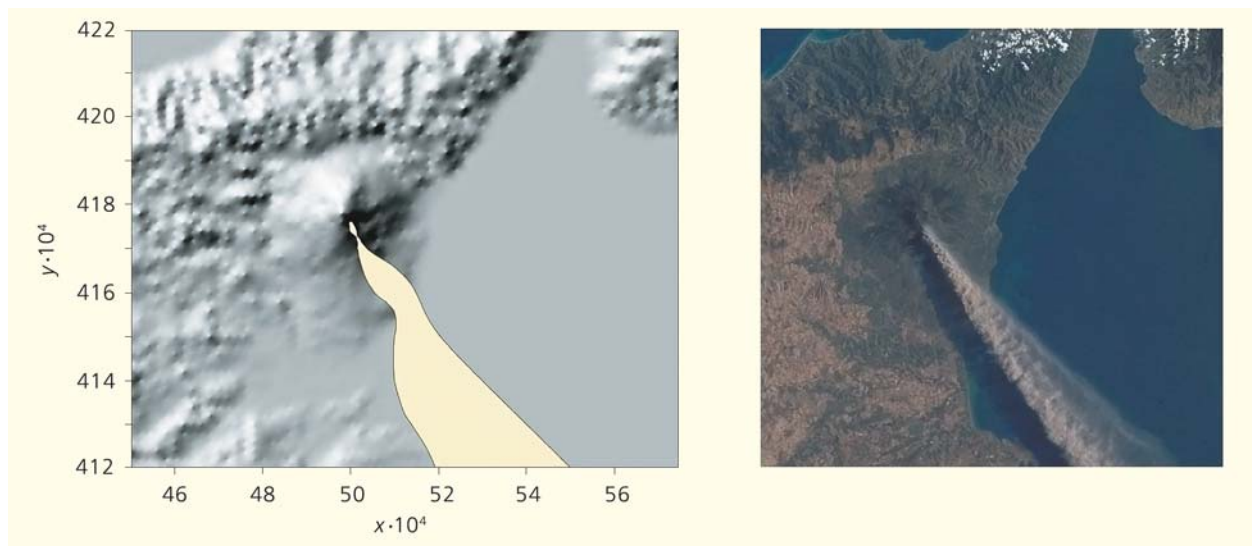


Рис.7. Моделирование распространения вулканической тучи при извержении Этны. Слева — результаты расчетов, справа — данные спутникового наблюдения. Схема приведена в системе координат UTM.

различных размеров) неизотермических уравнений Навье—Стокса с учетом межфазного взаимодействия. Впервые трехмерная модель вулканической струи в атмосфере была представлена для монодисперсной газовой взвеси [20]. Авторы исследовали эволюцию формы струи со временем при непрерывном истечении из жерла вулкана.

Группой А.Нери в Пизанском университете проводится моделирование возможных извержений Везувия для составления эвакуационных планов в Неаполе (рис.6). В модели используются законы сохранения массы,

импульса и энергии для несущей газовой фазы и пяти типов дисперсных частиц [21].

Вулканические тучи от крупных извержений распространяются вокруг земного шара и представляют большую опасность для авиации. При моделировании их распространения в реальном времени необходимо решать трехмерные уравнения адвекции—диффузии для концентрации пепла с учетом оседания частиц. Поля скоростей и турбулентных коэффициентов диффузии получают из расчетов по мезомасштабным атмосферным моделям. Параметры источника задают по данным телемет-

рических наблюдений. Далее производят расчеты полей концентрации пепла, которые направляют авиадиспетчерам. Система функционирует в автоматическом режиме. Наиболее известные программы PUFF [22] и FALL3D [23] уже несколько лет используются при моделировании пепловых туч (рис.7).

Для выяснения уязвимости инфраструктуры к воздействию лавовых потоков также применяется математическое моделирование на основе неизотермических уравнений мелкой воды с учетом реальной топографии подстилающей поверхности. Примером могут служить расчеты распространения лавового потока на вулкане Этна [24]. Сравнение с реальными извержениями в этом случае позволяет оценить вязкость лавы для дальнейшего использования в ансамблевых моделях. Уникальны полностью трехмерные расчеты течения лавы с учетом не-ньютоновской реологии и образования корки при остывании [25]. Данные полевых наблюдений показали, что рассчитанная область лавового потока с точностью $\pm 10\%$ соответствует измеренной (рис.8). С ростом производительности суперкомпьютеров подобные расчеты станут

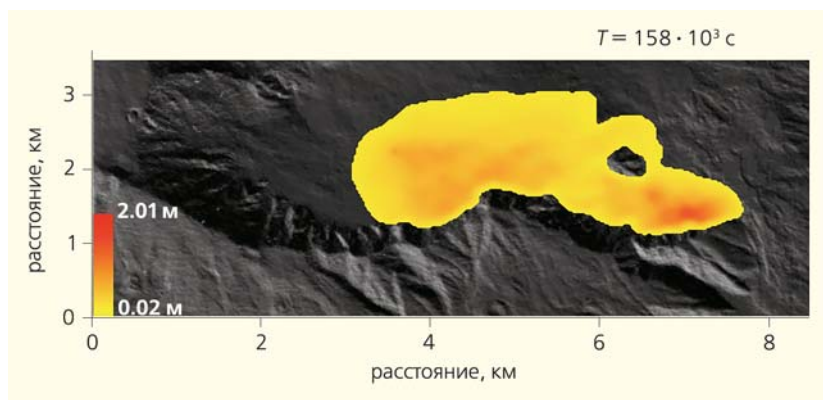


Рис.8. Моделирование распространения лавового потока на вулкане Этна. Цветная шкала — мощность лавового потока.

рутинной процедурой для вулканологических обсерваторий.

* * *

Приведенные примеры показывают, что методы механики сплошной среды играют ключевую роль как для понимания физики вулканических систем,

так и для интерпретации данных мониторинга и прогноза вулканической опасности. Во всем мире происходит тесное взаимодействие сотрудников вулканологических обсерваторий, ученых-механиков и экспериментаторов, занимающихся исследованием физи-

ческих свойств магмы. Подобные группы существуют в США, Италии, Японии и других странах с повышенной вулканической опасностью. Создание подобных структур — важная задача для повышения качества прогнозов вулканической опасности и в нашей стране. ■

Литература

1. *Wilson L., Sparks R.S.J., Walker G.P.L.* Explosive volcanic eruptions. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behavior // *Geophys. J. of the Royal Astronomy Society*. 1980. V.63. P.117–148.
2. *Costa A., Gottsmann J., Melnik O., Sparks R.S.J.* A stress-controlled mechanism for the intensity of very large magnitude explosive eruptions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V.310. P.161–166.
3. *Слезин Ю.Б.* Механизм вулканических извержений // *Природа*. 1998. №6. С.80–89.
4. *Melnik O., Barmin A.A., Sparks R.S.J.* Dynamics of magma flow inside volcanic conduits with bubble overpressure buildup and gas loss through permeable magma // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2005. V.143. №1–3. P.53–68.
5. *Alidibirov M.A., Dingwell D.B.* Magma fragmentation by rapid decompression // *Nature*. 1996. V.380. P.146–148.
6. *Бармин А.А., Мельник О.Э.* Гидродинамика вулканических извержений // *Успехи механики*. 2002. №1. С.32–60.
7. *Sabagian D.* Volcanic eruption mechanisms: insights from intercomparison of models of conduit processes // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2005. V.143. P.1–15.
8. *Cashman K.V.* Groundmass crystallization of Mount St. Helens dacite, 1980–1986: a tool for interpreting shallow magmatic processes // *Contributions to Mineral. Petrol.* 1992. V.109. №4. P.431–449.
9. *Melnik O., Sparks R.S.J.* Nonlinear dynamics of lava dome extrusion // *Nature*. 1999. V.402. №6757. P.37–41.
10. *Мельник О.Э., Бармин А.А., Спаркс С.* Беспокойная жизнь лавовых куполов // *Природа*. 2006. №3. С.46–55.
11. *Barmin A., Melnik O., Sparks R.S.J.* Periodic behavior in lava dome eruptions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V.199. P.173–184.
12. *Newman A.V., Dixon T.H., Gourmelen N.* A four-dimensional viscoelastic deformation model for Long Valley Caldera, California, between 1995 and 2000 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. V.150. P.244–269.
13. *Hautmann S., Gottsmann J., Sparks R.S.J. et al.* Modelling ground deformation caused by oscillating overpressure in a dyke conduit at Soufriere Hills Volcano, Montserrat // *Tectonophysics*. 2009. V.471. P.87–95.
14. *Costa A., Melnik O., Sparks R.S.J., Voight B.* Control of magma flow in dykes on cyclic lava dome extrusion // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V.260. P.137–151.
15. *Chouet B.* Origin of coda waves, source, attenuation, and scattering effects // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. P.15129–15150.
16. *Ripepe M., Rossi M., Saccorotti G.* Image processing of explosive activity at Stromboli // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1993. V.54. P.335–351.
17. *Ripepe M., Poggi P., Braun T., Gordeev E.* Infrasonic waves and volcanic tremor at Stromboli // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V.23. №2. P.181–184.
18. *Ripepe M., Gordeev E.* Gas bubble dynamics model for shallow volcanic tremor at Stromboli // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. №B5. P.10.639–10.654.
19. *Pitman E.B., Patra A., Bauer A. et al.* Computing Granular Avalanches and Landslides // *Phys. Fluids*. 2003. №12. P.3638–3646.
20. *Марков В.В., Мельник О.Э.* Моделирование динамики распространения продуктов вулканических извержений в атмосфере // *Тр. МИАН*. Т.223. М., 1998. С.207–212.
21. *Neri A., Esposti Ongaro T., Menconi G.G. et al.* 4D simulation of explosive eruption dynamics at Vesuvius // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V.34. P.L04309. doi:10.1029/2006GL028597.
22. *Searcy C., Dean K., Stringer W.* PUFF: A volcanic ash tracking and prediction model // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1998. V.80. P.1–16.
23. *Costa A., Macedonio G., Folch A.* A three dimensional Eulerian and deposition of volcanic ashes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. V.241. №3–4. P.634–647.
24. *Costa A., Macedonio G.* Numerical simulation of lava flows based on depth-averaged equations // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V.32. L05304. doi: 10.1029/2004GL021817.
25. *Hidaka M., Goto A., Umino S., Fujita E.* VTFS project: development of the lava flow simulation code LavaSIM with a model for three-dimensional convection, spreading, and solidification // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2005. №6. Q07008, doi:10.1029/2004GC000869.