

АНАЛИЗ ОБРАЗУЮЩЕЙ ВУЛКАНИЧЕСКОГО КОНУСА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОСЛАБЛЕННЫХ СЕКТОРОВ ПОСТРОЙКИ (НА ПРИМЕРЕ КОРЯКСКОГО ВУЛКАНА, КАМЧАТКА)

И. Ф. Делемень^{1,2}, И. С. Уткин¹, Л. И. Уткина¹,
Д. В. Мельников^{1,2}, О. К. Жданова^{1,2}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, delemen@kcs.iks.ru;*

² *Камчатский государственный педагогический университет,
683032, Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4*

Рост вулканов существенно зависит от гравитационной устойчивости их вулканических конусов. Представлена детальная количественная морфологическая модель рельефа Корякского вулкана (Камчатка). Моделирование равновесной формы постройки показывает, что её морфологические особенности могут быть обусловлены основными структурными элементами вулканического конуса.

Введение

Вулканы - одни из немногих форм земной поверхности, имеющих правильную конусовидную форму. Даже в тех странах, где вулканические конуса - неперемнная часть ландшафтов, их симметрия всегда поражала человека. Не случайно первая попытка понять происхождение такой гармонии появилась еще на этапе зарождения вулканологии, когда посетивший в 1875 г. Японию горный инженер и геомеханик Джон Милн решил разобраться в причинах этого явления. Он предположил, что конусовидность построек определяется гравитационной устойчивостью склонов.

Для проверки этой гипотезы была выполнена серия экспериментов с сыпучими зернистыми материалами для моделирования их правильной конусовидной формы (Milne, 1878; Milne, 1879). Впоследствии Дж. Беккер использовал законы механики сплошных сред для объяснения происхождения наблюдаемой геометрической формы вулканов с учетом предела упругости слагающих их лав (Becker, 1885). Эти

работы положили начало целой серии исследований по геомеханическому изучению формы вулканов. Обзор таких работ (по состоянию на 50-60-е годы XX в.) выполнен А.И. Лучицким (Лучицкий, 1971).

В последующих работах Г.С. Штейнберга и Т.В. Соловьёва (Штейнберг, Соловьёв, 1976), А. Ласи и Дж. Окендона (Lacey, Ockendon, 1981), А. Шейдеггера (Шейдеггер, 1987) и других исследователей уточнялись и детализировались подходы, намеченные еще Дж. Милном и Дж. Беккером. При варьировании различных факторов и параметров формообразования проводилось исследование двумерного профиля идеализированной, усредненной образующей конуса; однако при этом вариации параметров образующей для различных секторов вулкана учтены не были.

Не учитывалась также неоднородность строения конуса. Между тем, как было показано И.В. Мелекесцевым (Мелекесцев, 1980), в реальных условиях внутреннее строение конуса весьма значительно отличается от принимаемых, зачастую весьма упрощенных, допу-

щений об однородности и изотропности слагающей его среды. Именно поэтому (И.В. Мелекесцев, устное сообщение) формальные математические методы моделирования применимы в полной мере только к некоторым вулканам Камчатки (например, постройка Карымского вулкана или простые шлаковые конусы) и должны с особой осторожностью применяться на сложно построенных вулканах. Что касается формы образующей, то ее параметры к тому же значительно изменяются от сектора к сектору вулкана. Так, например, еще в XVIII столетии один из первых исследователей Этны, чрезвычайный и полномочный посол королевы Великобритании при Неаполитанском дворе, сэр Уильям Гамильтон, обратил внимание на то, что хорошо морфологически сохранившиеся, но уже угасшие вулканы вокруг Этны в большинстве своем обломаны (обрушены) с одной стороны. Очень хорошо эта закономерность видна, например, и на серии посекторных профилей, построенных Варе для Этны в 1977 г.

Вулкан Этна не является исключением. В Срединном хребте Камчатки разрушена значительная часть из более чем 120 вулканов (Святловский, 1982), а остальные имеют не совсем правильную конусовидную форму. Значительное отклонение формы образующей от идеального конуса было установлено также для Корякского вулкана. Однако во всех этих случаях форма вулкана определялась визуально (например, пирамидальный облик Корякского вулкана по Ю.П. Масуренкову (Масуренков и др., 1981)), или рассматривались профильные задачи, либо производилось погоризонтное сравнение образующей конуса с реальной формой вулкана. Что касается решения объемных, трехмерных задач формообразования вулканов, то оно стало возможным только в последнее время, с появлением цифровых моделей рельефа вулканических построек, реализуемых на компьютерах, обладающих мощными ресурсами. При этом следует учитывать то, что аналитические математические модели, аналогичные рассмотренным выше, не позволяют рассматривать реальную неоднородность в строении вулканов, они могут быть использованы либо для моделирования устойчивости однородных и изотропных построек, либо для построек, характеризующихся некими эффективными (усредненными) параметрами.

В последнем случае необходим тщательный анализ применимости модели и её ограничений.

Другой подход в математическом моделировании устойчивости и формы вулканов, когда, например, весь объём постройки разбивается на тетраэдрические или иные конечные элементы, позволяет адекватно моделировать форму и устойчивость вулканических сооружений даже с весьма сложным рельефом. При использовании метода конечных элементов на их вершинах задаются реальные параметры постройки, характеризующие её неоднородность. Недостатком метода является то, что для детального описания строения постройки количество узлов элементов и требуемое для моделирования количество значений параметров может превысить наши реальные знания о строении постройки (особенно её внутренних частей).

Представляется, что возможен также третий путь в моделировании устойчивости вулканических построек, основанный на поисках морфологических признаков устойчивости склонов вулкана. Эта возможность обусловлена тем, что экспоненциальная форма образующей конуса относится только к тому сечению, в котором она выработана. Поэтому простые моногенные вулканы чаще всего имеют примерно одинаковую форму вертикального профиля образующей во всех сечениях. Если же вулканическая постройка представлена двумя или более слившимися разновозрастными конусами (а тем более наложенными или вложенными друг в друга), то в каждом сечении такой профиль характеризует устойчивость склонов такой сложной постройки на текущий момент времени. Нельзя отнести образующую такого сечения к какому-то одному конусу, она характеризует устойчивость флангов сложного сооружения, как единого горного массива. При этом возможность разграничения участков, соответствующих равновесному профилю и неравновесных секторов конуса, позволяет качественно оценить степень гравитационной устойчивости вулканической постройки.

Насколько это важно, можно судить по тому, что практически все наиболее катастрофические извержения последних десятилетий (на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч и др.) происходили с крупномасштабными секторными обрушениями, сопровождавшимися сходом сухих каменных лавин и

направленными взрывами (Богоявленская и др., 1985), возможны такие явления и на других вулканах (Адушкин и др., 1994). Масштабность такого явления была продемонстрирована на примере возможного обрушения Корякского вулкана (Адушкин и др., 1995). Близость этого вулкана к крупнейшим населенным пунктам Камчатки (гг. Петропавловск-Камчатский и Елизово) определяет повышенный интерес к проблеме его гравитационной устойчивости. В данной работе на примере Корякского стратовулкана (Камчатка) рассматривается возможность создания и анализа цифровой модели образующей рельефа вулкана для оценки механизмов формирования морфологии постройки и прогноза возможных участков ее гравитационной неустойчивости. Выбор для моделирования именно Корякского вулкана обусловлен также и тем, что на простых конусах моделирование образующей приведет к тривиальным результатам, в общем-то повторяющим перечисленные выше одномерные модели. Использование же методики на примере одного из наиболее сложных (и при этом достаточно хорошо эродированных и изученных вулканов) позволяет увидеть как достоинства метода, так и его ограничения и недостатки.

Методологические основы реконструкции равновесной формы вулканической постройки

В вулканических районах классическое "географическое трио" У.М. Девиса (геологическая структура - экзогенный процесс - стадия развития рельефа) (Девис, 1962) дополняется еще одним мощным фактором - глубинным выносом и преобразованием вулканического вещества и связанных с ним форм рельефа. Фактически процессы собственно геоморфологического цикла и вулканического формообразования накладываются друг на друга (Мелекесцев, 1980; Святловский, 1982), что приводит к очень сложным соотношениям равновесных и неравновесных форм вулканического рельефа даже в пределах одного вулканического сооружения.

По способу образования, вулканические постройки многих вулканов Камчатки, не склонные к сильным взрывным извержениям, имеют форму, близкую к равновесно устойчивой. Понятие равновесно устойчивой формы справедливо для статичного нагружения постройки собственным весом, когда условия окру-

жающей среды существенно не изменяются. Такой стационарный режим развития постройки приводит к тому, что в первом приближении её равновесие определяется лишь полем силы тяжести и свойствами материала, слагающего постройку.

Конечно, такая идеализация является упрощением, позволяющим объяснить лишь особенности пирамидальной или конусовидной формы постройки. В реальности на формообразование вулканической постройки существенно влияет множество причин: тектонические и гляциологические факторы; эрозия и денудация; гравитационные склоновые процессы; диагенетическое преобразование вещества постройки, сопровождающееся деформациями объема и формы конуса; движение магмы, газов и подземных вод и многое другое. Без учета действия этих факторов гравитационная кривая равновесно-устойчивого состояния проходит намного круче. Как же учесть все их многообразие? Количественный учет всех факторов для конкретного вулкана, даже сложного однородной изотропной средой, задача трудно выполнимая.

Методологический подход к такого рода задач рельефообразования был намечен в работах Н.П. Костенко на примере анализа динамических факторов неотектонически обусловленного горообразования (Костенко, 1972). Вместо того чтобы анализировать огромное количество факторов, выявляются несколько определяющих (управляющих) параметров и изучаются их взаимоотношения в связи с условиями рельефообразования. В ее работах было показано, что в тектонически активных регионах рельеф гор определяется соотношением скоростей тектонических движений и экзогенного расчленения территории. В современных вулканических районах такой подход не даёт положительных результатов, если не учитывается интенсивность вулканической аккумуляции. Возможность учета последнего параметра появилась только после того, как были разработаны принципы оценки возраста, продуктивности вулканов и вулканических центров (работы И.В. Мелекесцева, Н.Н. Кожемяки и др.), а также моделирования расходов питающих магматических систем вулканов (Федотов, 1982).

Итак, в вулканическом районе триада Девиса сводится всё же к соотношению в основном двух факторов. С одной стороны, это аккумуля-

муляция, накопление, рост вулканических гор и конусов, образование положительных вулканических форм. С другой - разрушение сооружений при взрывах, вулканическая эрозия, кальдерообразование и иные деструктивные процессы - образование отрицательных вулканических форм. Конечно, одновременно действует множество различных механизмов формообразования. Тем не менее, перечисленные факторы являются определяющими. Так, например, поверхностная ползучесть или накопление новых лавовых потоков может слегка изменять профиль образующей вулкана, но не более того.

Эволюционное, постепенное развитие постройки продолжается до тех пор, пока один из трех параметров не достигает некоего критического значения, которое переведет развитие постройки в иной режим формообразования. Для упрощения представим, что рост постройки стратовулкана происходит в условиях тектонической стабильности (скорости тектонических движений фундамента постройки нулевые $T=0^1$). Допустим также, что отсутствуют экзогенная аккумуляция и вулканическая деструкция. Теоретически можно представить несколько типов возможных соотношений факторов формообразования (вулканической аккумуляции B , эрозионного расчленения, эрозии и денудации \mathcal{E}):

Тип 1. $B \gg \mathcal{E}$. Происходит быстрое эндогенное “залечивание” любых экзогенных изменений постройки. Быстро достигается предельная высота вулкана, после достижения которой начинается наращивание его флангов. Формообразование постройки определяется в этом случае скоростями и масштабами поступления вещества в питающей системе вулкана к поверхности. Фактором, ограничивающим неограниченный рост такой постройки (при условии отсутствия деструктивных вулканических процессов), является только сила тяжести. Равновесная форма такой постройки приближается к идеальному конусу. Вертикальное и горизонтальное её расчленение весьма незначительно; глубокие барранкосы отсутствуют (за исключением секторных грабенов или вулкано-

тектонических желобов, заложение и развитие которых в конусе предопределяется эндогенными факторами (Делемень, 1994) при некоторой роли ледниковых и склоновых явлений). Данный режим может быть назван режимом быстрого роста конуса. Примером может служить Ключевской вулкан.

Тип 2. $B \geq \mathcal{E}$. Стратовулкан сохраняет хорошо выраженную конусовидную форму. Эрозионное расчленение (как вертикальное, так и горизонтальное) хорошо заметно. Тем не менее, барранкосы не успевают сильно врезаться в конус постройки и через какое-то время после врезания заполняются лавовым или пирокластическим материалом. В каждый момент времени на вулкане можно заметить наличие двух разнородных поверхностей равновесия, чаще всего (но не всегда) вложенных одна в другую. Верхняя поверхность определяется гравитационным равновесием постройки и совпадает с реальной поверхностью вулкана (при условии отсутствия эрозионного расчленения) на большей части секторов конуса. Нижняя поверхность является поверхностью эрозионно-денудационного равновесия и совпадает с реальной поверхностью вулкана в днищах наиболее врезанных барранкосов. Как правило, площадь участков постройки с преобладанием барранкосов невелика. Режим медленного роста конуса. Примером таких построек может служить, возможно, вулкан Карымский.

Тип 3. $B = \mathcal{E}$. Эрозионное расчленение конуса компенсируется вулканическим накоплением. Общие параметры постройки в целом остаются неизменными. Лавовые потоки выполняют ложбины барранкосов, а линии зарождающихся барранкосов следуют вдоль границ потоков. Такой механизм формирования конуса хорошо изучен и может обеспечить длительное развитие вулканической системы в пределах одного и того же объема конуса. Стабильность постройки в целом достигается за счет того, что поверхность лавовых и пирокластических потоков не может приблизиться к критическому значению поверхности гравитационного равновесия из-за эрозионного разрушения, а днища барранкосов не могут достичь своего профиля равно-

¹ Строго говоря, это, значительное упрощение. Известные случаи медленного гипсометрического опускания вершины постройки при незначительном эрозионном расчленении и высокой продуктивности вулкана требуют допущения о ненулевых скоростях неотектонических или вулкано-тектонических движений различного генезиса. Кроме того, явления вулканической деструкции проявляются в той или иной мере на всех вулканах - хотя бы потому, что вершинная часть большинства построек, как правило, разрушена.

веса из-за заполнения ложбин вулканитами. Стационарный режим существования постройки может быть достигнут в двух случаях - высокий уровень выноса вещества при средних или высоких масштабах эрозионного расчленения (Авачинский вулкан), а также при низких (и даже очень низких) значениях продуктивности, но на фоне низкой интенсивности эрозионных процессов расчленения (Камбальный вулкан).

Тип 4. $V < \dot{E}$. Недостаточное, по сравнению со скоростью эрозионных процессов, поступление глубинного вещества приводит к тому, что барранкосы все интенсивнее расчленяют вулканическую постройку. Реликты профиля гравитационного равновесия сохраняются только лишь на отдельных участках вулкана. Вертикальный профиль вулкана все больше стремится к эрозионному профилю равновесия, поверхность которого достигается днищами многочисленных барранкосов. Чрезвычайно высокая изрезанность конуса делает невозможным применение к этим конусам аналитических геомеханических моделей, рассмотренных во введении. Оценка профилей гравитационного равновесия становится возможной только на локальных участках. Это вызвано тем, что по мере усиления эрозионного расчленения, поверхность гравитационного равновесия, все более понижаясь и выполаживаясь, стремится слиться с профилем эрозионного равновесия. О прежней поверхности гравитационного равновесия постройки можно говорить только в прошлом времени, как реликтовой, которую можно восстановить по фрагментам незэродированной поверхности конуса. Примерами таких построек могут служить, возможно, вулканы Корякский и Дзендзур. Необходимо иметь в виду, что разрушение вулкана за счёт взрывной или гравитационной деструкции предшествующего конуса (или конусов) мало меняет картину формирования единой постройки, если более древний и более молодой конус пространственно сближены между собой.

Тип 5. $V \ll \dot{E}$. Скорость эрозии многократно превышает скорость выноса вещества из недр вулканической системы. В реальности эти условия реализуются только лишь в тех системах, вулканическая активность которых прекратилась. Постройка медленно эродирована, вскрывается внутреннее строение вулканического сооружения, от которого с течением времени оста-

ются лишь руины. К этому типу относятся постройки вулканов Ааг и Аарик.

Обилие построек различных морфологических типов делает весьма затруднительным прямое использование методов оценки устойчивости путем выявления равновесного профиля расчетным путем. Поэтому необходимо опираться скорее не на расчетные методы, а максимально использовать доступные аналогии. Для этого мы считаем целесообразным использовать методические подходы, разработанные для реконструкции образующей формы на примере "идеального" тектонического рельефа (Симонов и др., 1963; Уфимцев, 1977).

Под идеальным рельефом понимается та форма поверхности, которая существовала до его расчленения. Реконструкция идеального тектонического рельефа сводится к реконструкции его вершинной поверхности. Конечно, для вулканического конуса понятие вершинной поверхности не имеет смысла хотя бы потому, что вершина постройки - наиболее нестабильная ее часть. Если же мы попытаемся реконструировать первичную, незэродированную и неразрушенную, форму вулкана (полагая в качестве реликтов первичной поверхности постройки вершины гребней между барранкосами), нас может ждать разочарование. Эти гребни могут быть хорошо сохранившимися дайками, высоко выступавшими над поверхностью конуса и до его разрушения. Или наоборот, эрозия и разрушение постройки зашли настолько далеко, что поверхность гребня находится сейчас значительно ниже первоначальной поверхности постройки.

Выход из этой ситуации нам видится в учете конусовидности постройки. Если аппроксимировать поверхность постройки конусом, "склеенным" с реальной постройкой в минимальном количестве точек, однозначно относящихся к поверхности первичного² конуса, то реконструкция первоначальной формы постройки становится вполне решаемой задачей. Более того, по мере накопления и учета информации о постройке, можно разрабатывать все более детальные модели первичной формы вулкана.

Предположим, что в идеальном случае конус сложен вдоль линии образующей одно-

² Под первичным в данной работе понимается вулканический конус, не подвергшийся последующей частичной или полной деструкции, либо эрозионному расчленению.

родным материалом. Из соображений симметрии (Четвериков, 1968), мы вправе ожидать, что равновесная форма постройки будет иметь вид кругового конуса с профилем образующей, определяемым условием равновесности. Независимо от формы образующей, такой конус имеет осевую симметрию и характеризует равновесное состояние именно данной постройки и именно в данном сечении, при любом механизме равновесного формообразования.

Допустим, что последующее изучение вулкана может привести к выводу о наличии латеральной анизотропии конуса. В этом случае равновесная поверхность конуса до его эрозии или разрушения имела симметрию конуса с эллиптическим основанием, а его образующая в горизонтальном сечении - форму эллипса. Дальнейшее уточнение свойств среды, слагающей конус, приведет к уточнению параметров образующей конуса.

Преимущество такого подхода определяется тем, что нет необходимости использовать какие-либо аналитические геомеханические модели для определения гравитационно равновесной формы постройки - мы реконструируем ее в том виде, в каком она была до эрозии или разрушения конуса. Оценка величины расхождения в высотах и форме реконструированной (первичной или идеальной) и реальной (эродированной) построек позволяет понять причины нарушения первичной равновесной формы постройки и оценить возможность дальнейшего развития формы вулкана.

Для решения поставленных задач необходимо:

- а) создать цифровую модель рельефа вулкана;
- б) разработать алгоритм реконструкции первичного конуса;
- в) оценить масштабы и геометрию отклонения реальной (эродированной или разрушенной) формы постройки от реконструированной первичной;
- г) определить участки и секторы постройки, более подверженные воздействию процессов разрушения постройки.

Цифровая модель рельефа вулкана

Объемная цифровая модель рельефа постройки создается на основе цифровой топоосновы, идентичной топографической карте в соответствующем масштабе. Эта карта использоваться как основа для создания вулканоло-

гической геоинформационной системы (ГИС), а также имеет самостоятельную ценность для изучения морфологии вулканического сооружения.

Создание цифровой топоосновы представляет рутинную задачу, решаемую с помощью цифрователя (дигитайзера) и компьютера. Компьютерная модель рельефа должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Модель должна быть электронным аналогом обычной топографической карты, представленной на экране дисплея, с возможностью получения трехмерного изображения геометрической формы вулканической постройки и подошвы вулкана, рассматриваемой с различных сторон и под различными углами зрения.

2. Модель должна иметь оптимальный масштаб представления исходных данных. Завышение точности приведет к неоправданному завышению требуемых ресурсов компьютера, а занижение - к потере информации. Для изучения формы вулкана в целом необходимо представление рельефа в масштабе 1: 10 000, или в крайнем случае, 1:25 000. Такая карта позволяет достаточно точно отобразить основные элементы морфологии поверхности вулкана, его подошвы и окружающей территории.

3. Двумерная (карта) и трехмерная (объемная) модели рельефа вулкана должны визуализироваться в виде мнемонической схемы, на которой работающему с ней оператору удобно было бы указать запрос на информацию, имеющую отношение к любой из указанных на схеме точек и их заданному в запросе окружению.

4. Задав (с помощью некоторого контура) на плановом или трехмерном изображении некую область, нужно иметь возможность получить более крупное и точное изображение данного участка. Последнее требование должно быть тщательно изучено и, по возможности, ограничено, поскольку его выполнение требует значительных усилий и затрат.

5. Необходимая точность отображения геометрии указанных участков определяется требованиями математического и физического моделирования процессов формообразования конуса, подготовки обрушения, схода лавин и т.д. В отсутствие полного набора данных точность приближенных моделей такова, что ошибка в 1-2 % от размеров воспроизводимого участка рельефа вулканической постройки становится допустимой.

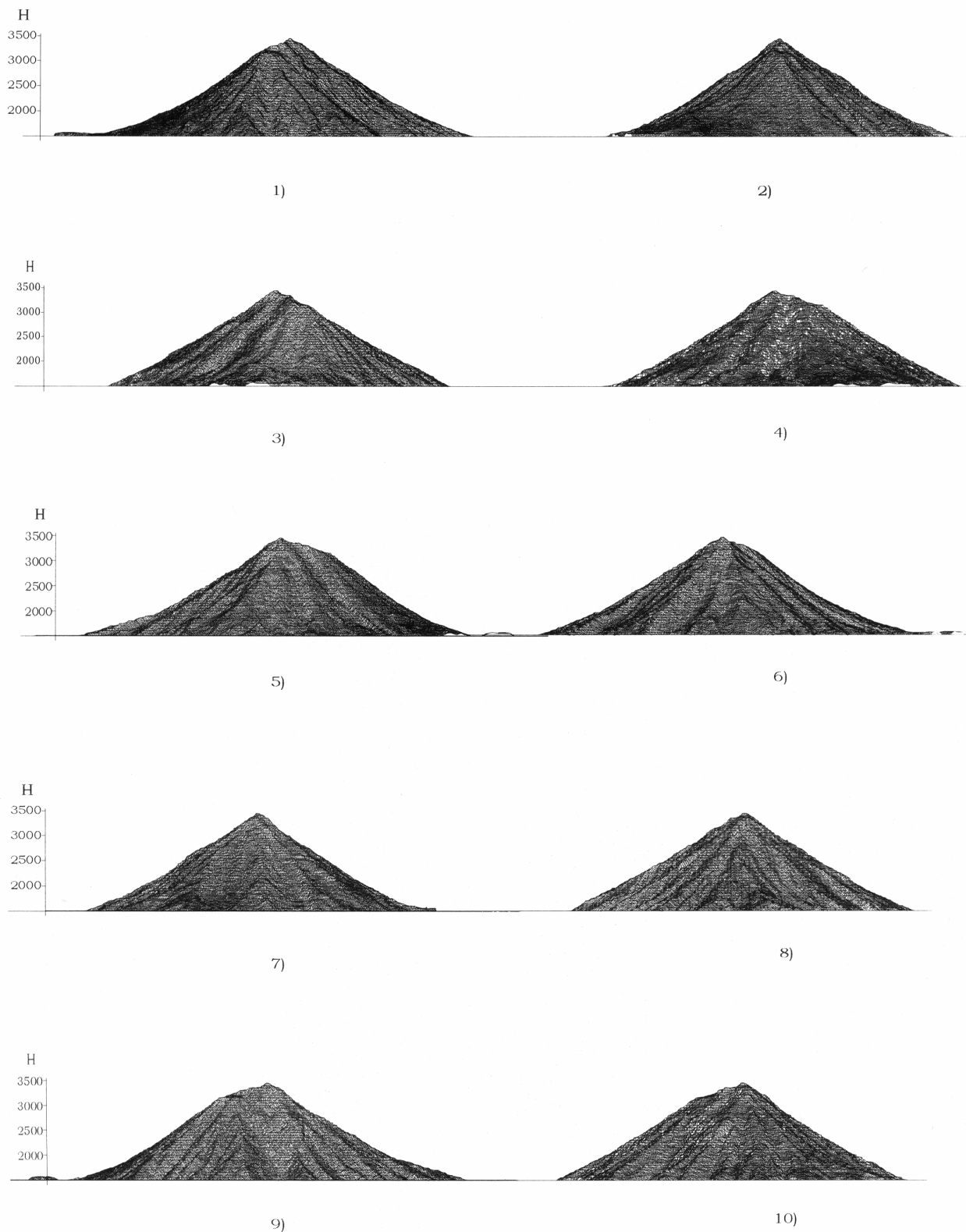


Рис. 1. Трехмерная визуализация компьютерной модели рельефа вулканической постройки Корякского вулкана. Вид на вулкан с различных румбов: 1) 0°; 2) 36°; 3) 72°; 4) 108°; 5) 144°; 6) 180°; 7) 216°; 8) 252°; 9) 288°; 10) 324°.

Технологии получения компьютерной модели рельефа (алгоритмы и программы) должны обеспечить соединение (склежку) фраг-

ментов изображения поверхности рельефа, данные для которой получены в разное время и разными средствами.

Учитывая возможность деформации бумажного носителя информации, “склеивание” фрагментов изображения должно осуществляться по контуру соединения с использованием информации со всей поверхности соединяемых фрагментов, а не только за счет совмещения малого числа сопрягаемых реперов и (или) ограниченной длины сопрягаемых контуров.

Созданная нами компьютерная модель рельефа Корякского вулкана соответствует перечисленным выше требованиям. Теоретические и практические аспекты технологии такого соединения разработаны Н.А. Гусевым и Н.Ф. Добрыниным (Гусев, Добрынин, 1979), в последующем реализация алгоритма для современных компьютеров выполнена Н.Ф. Добрыниным и Л.И. Уткиной.

Суть разработки сводится к тому, что нашиваемые фрагменты изображения предварительно наносятся особым образом точки, регулярность положения которых может быть вычислена. Чем больше контрольных точек и чем лучше они расположены, тем точнее производится склеивание фрагментов. Положение склеиваемых фрагментов определяется минимумом суммы квадратов отклонений контрольных точек от их расчетных координат.

Разработаны алгоритмы сборки частей изображений, претерпевших значительную деформацию, что позволяет производить оцифровку рельефа непосредственно с бумажных носителей (топокарт). Обеспечивается запись цифровой карты на стандартных носителях. Трехмерная визуализация компьютерной модели рельефа вулканической постройки Корякского вулкана приведена на рис. 1.

Алгоритм реконструкции рельефа первичного конуса

Из допущения об однородности строения конуса следует, что кривые идеального равновесно-устойчивого склона для одного и того же вулкана и для разных его склонов не сильно отличаются, поэтому в первом приближении можно считать, что это одна кривая (первое допущение)³.

Разрежем конус вулкана плоскостью, проходящей через вертикальную ось вулкана, и некоторым образом сгладим полученную при этом реальную криволинейную образующую конуса. Эта образующая покажет положение

линии, пролегающей не ниже равновесно-устойчивой поверхности вулкана в данном сечении.

Определим процедуру построения сглаженной образующей идеального конуса стратовулкана. На форму искомой образующей полезно наложить разумные ограничения, например, она не должна быть выпуклой, иметь точки перегиба или излома (второе допущение).

Ограничение на отсутствие точек перегиба и излома хорошо согласуется с результатами предшествующих исследований формы образующей. Что касается ограничения на выпуклость образующей, то большинство исследователей, от Дж. Милна (Milne, 1878) до А. Шейдеггера (1987) и современных работ считают, что склоны вулкана имеют прямолинейный или вогнутый профиль. Экспериментально подтвержденные же выводы о равновесных выпуклых профилях склонов вулкана, в действительности, как считается, касаются лишь кратковременных или начальных эпизодов в развитии изотропных вулканических конусов, и не могут быть распространены на конуса, сформировавшиеся при многократных извержениях.

Если такой подход не вызывает особых сомнений для изотропной среды, то не совсем очевидно для анизотропных условий (и не всегда верно), поэтому должно быть оговорено целым рядом условий и затем строго доказано.

Представляется, что важно не строгое выполнение перечисленных запретов, а некоторое требование (менее жесткое), связанное с “гладкостью кривой” равномерно устойчивой формы склона. Перечисленные запреты такую гладкость обеспечивают, но далеко не во всех случаях могут быть строго выполнены. Решение задачи построения линии устойчивого состояния анизотропного склона требует многих отсутствующих данных, а также таких времени и затрат, которые намного превышают разумные ограничения на ресурсы.

Поэтому сделаем еще одно предположение: кривая строгого решения задачи построения линии равновесно-устойчивого состояния

³ Впрочем, такое же допущение можно сделать, предположив, что реальная вулканическая постройка близка к равновесно-устойчивой, но только “в среднем”. Это предположение справедливо для большинства построек, особенно для наиболее крутых и наиболее отодвинутых от воображаемой вертикальной оси конуса участков их склонов.

анизотропного склона вулканической постройки и кривая, найденная с перечисленными ограничениями, не сильно отличаются между собой (третье допущение).

Найдем координаты неразрушенного идеального конуса следующим образом. Разрежем поверхность вулканической постройки равно отстоящими друг от друга плоскостями, параллельными горизонтальной плоскости, с небольшим шагом (допустим, через каждые 50 метров). Для фигур, ограниченных линиями равного уровня (изолиниями реального рельефа), найдем центры тяжести, центры минимальных радиусов описанных окружностей, центры радиусов окружностей, имеющих минимальное среднеквадратичное отклонение от линий равного уровня. Для каждой из названных групп точек (одинакового способа нахождения) найдем математическое ожидание по координатам X и Y .

В результате получим три близко расположенные точки. Любая из этих точек или некоторая четвертая - средняя между ними, может быть использована в качестве проекции оси вулканической постройки на горизонтальную поверхность. Отметим сразу, что неоднозначность в выборе положения оси объясняется отсутствием осевой симметрии и сложностью формы вулканической постройки. Кроме того, если стремиться к поиску положения оси, обеспечивающей приближение к осевой симметрии вулканической постройки, то такую ось

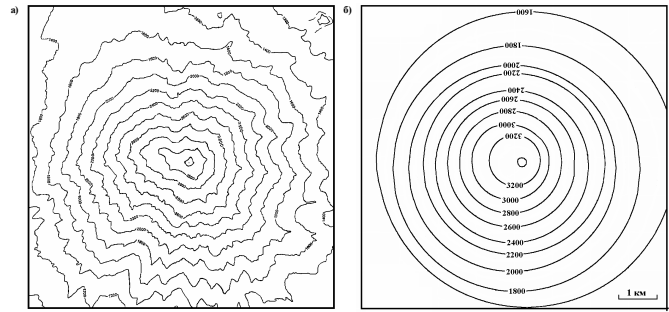


Рис. 2. Наблюдаемые сейчас изолинии рельефа (M) поверхности вулканического конуса (a) и двумерная модель идеальной формы образующей конуса Корякского вулкана (b).

во многих случаях придется проводить наклонно к плоскости основания. Таким образом, о построенной нами вертикальной оси можно сказать лишь то, что ее проекция на основание вулканической постройки находится в пределах окружности небольшого радиуса в центральной части вулкана.

Получив положение оси конуса на фиксированном срезе вулкана, определим пространственное положение образующей идеального конуса, как математическое ожидание точек X и Y окружности максимального радиуса, описанной вокруг линии равного уровня (изолинии реального рельефа). Множество образующих, рассчитанных для серии горизонтальных срезов вулкана (рис. 2, b), дает трехмерную реконструкцию формы первичного конуса (рис. 3).

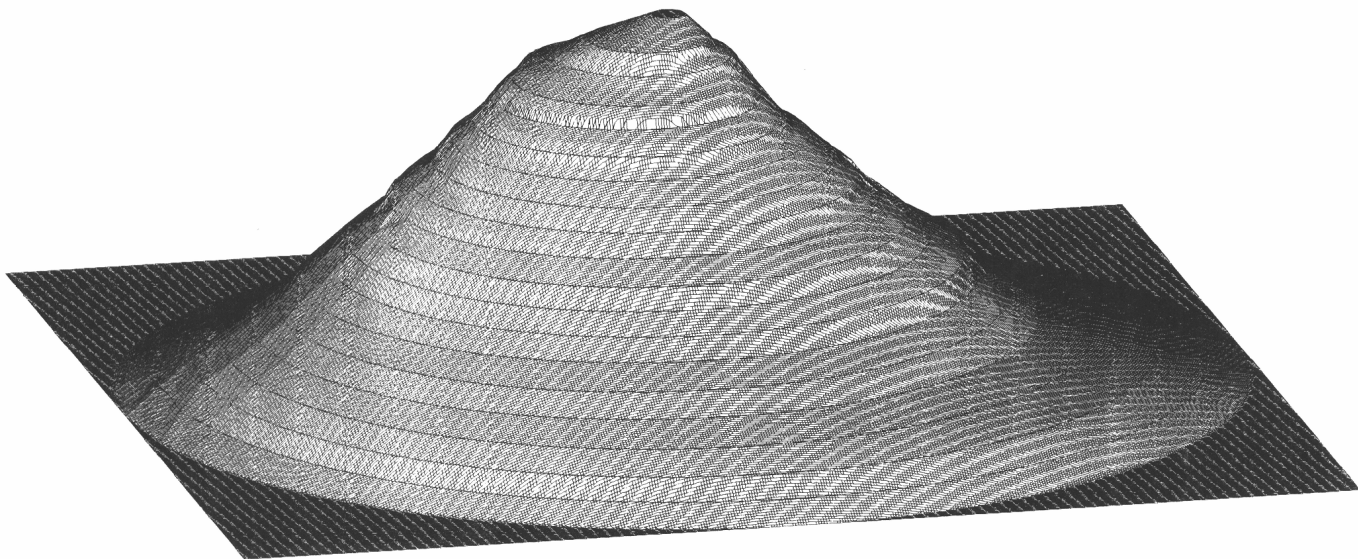


Рис. 3. Трехмерная модель формы образующей конуса Корякского вулкана. Вид с юго-запада.

Анализ морфологии постройки

Симметрия первичного конуса. Сечение вулканической постройки вдоль линий равного уровня нередко имеет форму, близкую к окружности у основания и заметно вытянутого эллипса у вершины, что характерно и для Корякского вулкана. Вытянутость обычно обусловлена сильной анизотропией строения постройки, но может быть также следствием разрушения или эрозии верхней части конуса. Выполненное В.Л. Леоновым изучение простираний даек на Корякском вулкане⁴ дает основание полагать, что вытянутость вершины этого вулкана не связана с анизотропией состава пород постройки или их распределения, а определяется наличием систем параллельных даек.

Вероятно, удлинение вершины обусловлено тем, что в привершинной части преобладал вынос вещества на поверхность вдоль питающей зоны, имеющей северо-западное простирание. Это хорошо согласуется с предполагавшейся еще А.Н. Заварицким (Заварицкий, 1977) глубинной проницаемой зоной, подтвержденной в последнее время геофизическими данными, а также с вытянутостью в этом же направлении линейной зоны, где сосредоточены современный и древние (“замерзшие”) питающие каналы вулкана⁵.

Форма первичного конуса, как правило, не совсем симметрична относительно вертикальной оси и как бы наклонена в одну сторону (рис. 3). Этому явлению можно дать несколько объяснений:

а) более пологий наклон образующей на каком-либо участке склона обусловлен преимущественным накоплением вулканического материала именно в этой части склона;

б) различия в наклонах отдельных участков склона являются следствием кратковременных

больших деформаций постройки (например, при тектонических подвижках) или же результатом длительного накопления малых деформаций;

в) различия в петрофизических параметрах пород, слагающих различные склоны постройки (например, из-за различного соотношения лав и пирокластики), обусловили значительную дифференциацию интенсивности денудации конуса на различных его участках;

г) наличие анизотропии состава среды, слагающей конус, вызвало формирование различных профилей гравитационного равновесия образующей постройки в различных ее секторах.

В нашем случае определяющую роль может играть наличие нескольких конусов в строении вулкана. В этом случае на форме нового конуса сказывается подстилающая поверхность более древнего вулкана (Леонов, 1994). Вероятно, все эти механизмы возникновения асимметрии конуса реализуются одновременно, хотя роль их может быть различной. Если фактор (а) не вызывает сомнения, то возможность больших деформаций постройки нуждается в доказательстве. В пользу предположения о возможности медленного смещения конуса в течение времени по наклонному основанию в юго-западном направлении свидетельствует наличие линейного тренда в дрейфе точек пересечения оси конуса, совпадающего по простиранию с наклоном основания вулкана (рис. 4).

Основание вулкана наклонено в юго-западном направлении, и по данным Ю.П. Масуренкова (Масуренков и др., 1991), разница превышений основания вулкана на противоположных флангах доходит до 1000 м. Не исключено, что в этом направлении происходило медленное (криповое) сползание конуса, по механизму, описанному нами ранее (Делемень, 1994). Влияние интенсивности денудации будет

⁴ Федотов С.А., Делемень И.Ф., Леонов В.Л. и др. Разработка, физическое и численное исследование возможного гравитационного обрушения постройки Корякского вулкана с целью расчета и оценки вулканической опасности для населения и хозяйственных объектов / Отчет по теме договора с администрацией Камчатской области: “Обрушение вулкана - комплекс научно-исследовательских работ по выявлению и оценке вулканической опасности для населенных пунктов Петропавловск-Елизовской агломерации и Елизовского аэропорта, связанной с возможным катастрофическим гравитационным обрушением вулкана Корякский (второй этап работы). Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН. 1996. 130 с.

⁵ Федотов С.А., Адушкин В.В., Делемень И.Ф. и др. «Обрушение вулкана» - комплекс научно-исследовательских работ по выявлению и оценке вулканической опасности для населенных пунктов Петропавловск-Елизовской агломерации и Елизовского аэропорта, связанной с возможным катастрофическим гравитационным обрушением вулкана Корякский. Отчет по теме договора с администрацией Камчатской области. г. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН. - 1995 г. - 143с.

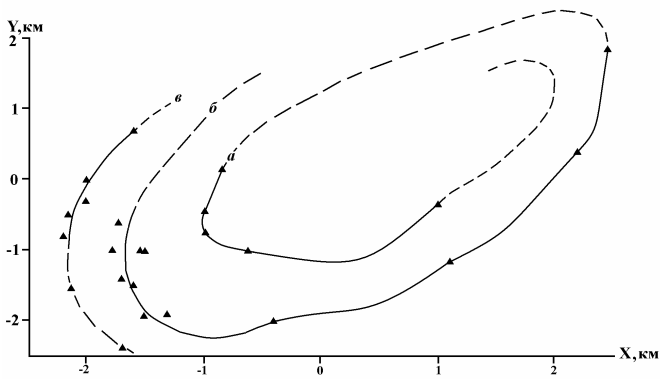


Рис. 4. Пространственный дрейф оси постройки (при сечении ее горизонтальными плоскостями через 50 м). Треугольниками показаны определения координат оси постройки. Сплошными линиями показаны установленные направления её дрейфа по мере изменения высоты постройки (от подошвы постройки вулкана к его вершине), а пунктирными - предполагаемые. Буквами а, б, в обозначены различные траектории дрейфа оси.

рассмотрено ниже. Что касается анизотропии среды, то она весьма существенно сказывается в местах концентрации даек.

Кроме того, сооружение Корякского вулкана представляет собой, по данным М.Ю. Пузанкова (Масуренков и др., 1991), как минимум две слившиеся постройки - современную и более древнюю. Эти постройки не являются отдельными, самостоятельными конусами. Если в облике более древней постройки на визуализированной трехмерной цифровой модели рельефа хорошо просматривается форма конуса, то современная постройка представляет собой, по сути, серию конических слоев (рис. 1), эксцентрично наложенных на западные сектора древнего конуса (или нескольких конусов). По этой причине асимметрия всего сооружения проявлена незначительно.

Если убрать линейный тренд в пространственном дрейфе оси постройки (рис. 4), то ось ее представляет собой не прямую, а винтовую линию. Природа этого явления еще недостаточно ясна, хотя само явление уже известно достаточно давно. Спиралевидный в плане тренд миграции центров извержения был отмечен, например, для постройки Ключевского вулкана (Кирсанов и др., 1973). Не исключено, что это явление отражает закономерность в накоплении материала постройки, на которую обратил внимание Д. Паласиос (устное сообщение) - лавовые потоки движутся не по старым потокам, а по ложбинам и рытвинам на их границах, образуя обращенный рельеф. Дли-

тельное развитие такого процесса приведет к тому, что потоки (статистически, в среднем) будут "пробегать" по всей поверхности конуса. Если достаточно большие временные промежутки развития конуса удалось бы сжать в короткий миг (как в мультипликационном фильме), то мы могли бы увидеть, как вначале зарождается маленький конус, затем с остановками, то затихая, то ускоряясь, на этот конус в виде двух систем разбегающихся и снова сходящихся спиралей накладываются лавовые потоки. Они засыпаются продуктами эксплозивных извержений (которые тоже выпадают неравномерно), а затем процесс повторяется снова. Не исключены и иные механизмы.

По мнению авторов, это обусловлено застыванием магмы в подводящих каналах, что препятствует повторному прорыву в том же секторе. Опубликованные в последнее время результаты геомеханического моделирования Ключевского вулкана (Адушкин и др., 1994) позволяют сделать вывод, что соотношения между вулканическим конусом и дайково-силловыми системами в нем могут быть более сложными, тем не менее спиральное наращивание конуса боковыми прорывами возможно для конусов крупных стратовулканов (в том числе Корякского). Возможно также, что спиралевидное смещение центров тяжести конуса на различных уровнях является отражением длительного развития неравномерных деформаций среды в недрах вулканической системы. Возможность наличия таких деформаций под Корякским вулканом, связанных с внедрением протрузии верхней мантии, рассматривалась А.И. Байковым⁶. Всё же, на наш взгляд, наиболее оптимальным объяснением этого явления может быть миграция боковых прорывов по мере изменения высоты постройки. В таком случае отмеченные траектории на рис. 4 отражают не спиральное перемещение активности вулкана, а свидетельствуют лишь о наличии, по крайней мере, трёх отдельных конусов, на каждом из которых побочные прорывы располагались в ограниченных секторах постройки.

⁶ Байков А.И., Сидоров Е.Г., Аникин Л.П. и др. Вулканогенное рудообразование и минералогия базит-гипербазитовых комплексов островодужных систем. Алмазноносность базит-гипербазитовых комплексов Корякско-Камчатского региона / Заключительный отчет о научно-исследовательской работе по теме договора с Администрацией Камчатской области. Петропавловск-Камчатский. 1996. 125 с.

В целом можно предположить несколько механизмов асимметрии постройки в целом. При реализации любого из них вулканическая постройка растёт от извержения к извержению, каждый раз прибавляя некоторый объём, который ложится на уже существующую постройку каждый раз по-разному, не обязательно осесимметрично. Одновременно идут процессы неравномерного проседания фундамента основания вулканической постройки. Поэтому, например, центры тяжести фигур, образованных линиями равного уровня вулканической постройки на разной высоте, смещены относительно друг друга. В итоге, осевая линия трехмерной образующей конуса имеет винтовую симметрию. Когда же такие смещения значительны, на вулканической постройке это проявляется в виде локальных образований - выпуклостей или впадин, иногда сложной формы. Рассмотрим возможности анализа этих форм.

Локальные неоднородности поверхности конуса. Исследование локальных неоднородностей может дать много информации о строении и устойчивости конуса. Однако анализ их непосредственно на цифровой карте вулкана или же по дистанционным материалам затруднен - неясно, какая часть постройки относится к реликтам равновесной формы, а какая - к более поздним новообразованиям. В тех случаях, когда выпуклости на поверхности конуса соответствует дайка или иная неоднородность строения, интерпретация формы не вызывает затруднения, также как и в случае соответствия впадине кратера или барранкоса. Когда таких соответствий не находим, необходим дополнительный анализ природы неоднородности.

Теоретические основы такого анализа (применительно к любым геологическим поверхностям) были заложены основателем современной горной геометрии П.К. Соболевским (Соболевский, 1932). Если рельеф поверхности (реальный рельеф вулкана) представляет собой результат наложения двух или более рельефообразующих механизмов, то, вычтя из результирующего рельефа поверхность, которую формирует один из формообразующих процессов, можно получить поверхность, определяющуюся воздействием второго механизма. Физический смысл этой поверхности состоит в том, что в реальном рельефе неоднородности его строения являются осложнениями равновесной поверхности конуса. Остаточная поверхность представляет собой рельеф этих же неоднороднос-

тей, спроектированный на горизонтальную поверхность. Эта трансформация позволяет контрастировать изображение локальных неоднородностей, убрав из него избыточную информацию, относящуюся к рельефу всего конуса. Эту поверхность можно представить не только в изолиниях (рис. 2,б), но и в трехмерном виде (рис. 3).

Трансформированные изображения неоднородностей рельефа подтверждают исходное предположение о том, что аппроксимация формы постройки конусом является лишь первым приближением к реальной его форме. На рис. 3 хорошо просматривается округлая возвышенность, очень пологая в восточной части и приподнятая, с более крутыми склонами - в западной. Сопоставление идеальной формы конуса с реальной (рис. 5,а, 5,б) позволяет сделать вывод в том, что идеальная форма конуса представляет собой форму постройки, в геометрии которой не проявлены наложенные, осложняющие конус образования - барранкосы, желоба, гребни даек и т.д. Вместе с тем, крупные отклонения постройки от идеального кругового конуса на рис. 3 хорошо видны.

Таким образом, в строении остаточного рельефа проявилась "анизотропная" составляющая, соответствующая объёму молодой постройки, наложившейся на правильный конус древней постройки. О том, что это так, соответствует практически полное соответствие поднятия ареалу развития вулканитов молодого конуса, закартированных М.Ю. Пузанковым (Масуренков и др., 1991).

Эрозионное расчленение постройки обусловило заложение серии кольцевых и радиальных эрозионных ложбин (барранкосов). На рис. 6 можно заметить также серию дуг, образующих кольцевой спиралевидный узор узких впадин и поднятий. Первое предположение, возникающее при взгляде на этот парагенезис, что мы имеем дело с артефактами, являющимися следствием редкой сети измерений. Однако плотность сети измерений и расчётной сети такова, что каждая из таких впадин и поднятий покрывается в одном сечении несколькими узлами расчётной сети, т.е. полученная картина этих морфологических форм и их сочетание отражает реальные особенности морфологии постройки (наличие участков с пониженными значениями крутизны склона). При сопоставлении карты остаточной поверхности с имеющимися геолого-геофизическими данны-

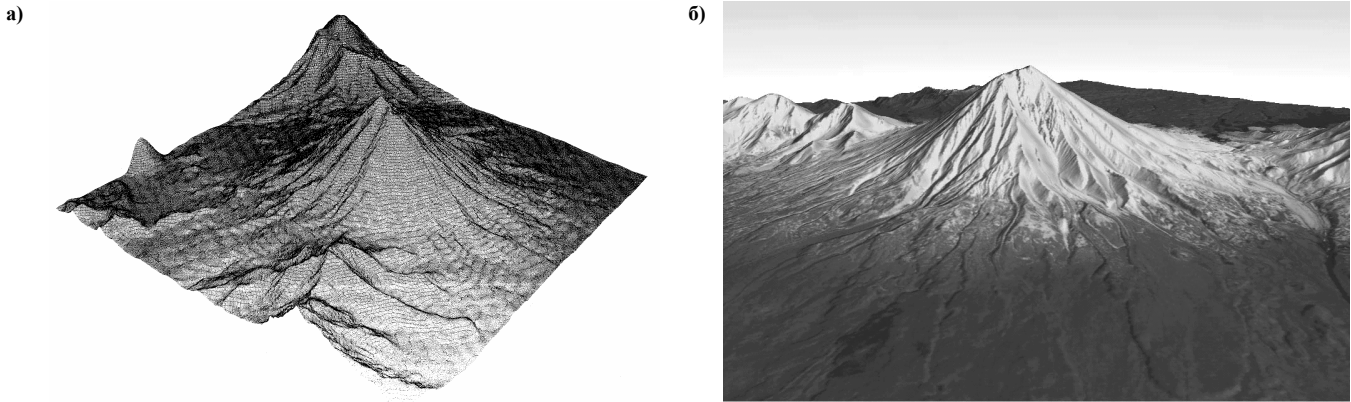


Рис. 5. Трехмерная визуализация схемы эрозионного расчленения поверхности Корякского вулкана по данным оцифровки карт рельефа, вид с юго-запада (*а*). Видны: вулcano-тектонический желоб, радиальные барранкосы и кольцевые ложбины, уступы и ступеньки на склонах конуса, а также отпрепарированная жерловая пробка на вершине вулкана и гребни даек на его склоне. На заднем плане возвышается современный конус Авачинского вулкана, окружённый уступами соммы (амфитеатра обрушения) Авачинского вулкана, а на переднем плане – сильно эродированные постройки вулканов Ааг и Арик. При сопоставлении с трехмерной визуализацией (вид с юго-запада) рельефа вулкана, выполненной по данным космической съемки, видно (*б*), что оба вида визуализации достаточно детально отражают вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа постройки. Цифровая модель рельефа основана на данных снимка SRTM, драпированном космическим снимком Landsat ETM+, спектральные каналы 4, 3, 2.

ми можно сделать вывод о том, что некоторым из них пространственно соответствуют кольцевые разломы, закартированные Ю.П. Масуренковым и показанные на геологической карте Корякского вулкана (рис. 158 в работе (Масуренков и др., 1991)). Уже зная о существовании таких ложбин и поднятий, их можно увидеть и на объемных моделях рельефа конуса (рис. 5). На данном этапе работ можно только утверждать о реальном существовании системы кольцевых эрозионных ложбин. Выявление же их диагностических признаков, типизация и изучение их происхождения - дело будущего.

Более ярко проявлены радиальные барранкосы. Хотя они хорошо видны на аэрофотоснимках или на трехмерной модели рельефа вулкана (см. рис. 3), схема остаточного рельефа позволяет более уверенно анализировать пространственные соотношения барранкосов, а также их пространственные параметры. Кроме того, на схеме остаточного рельефа хорошо проявлена радиальность системы барранкосов, причем ось симметрии совпадает с древним кратером Корякского вулкана, полностью выполненным сейчас ледником. На основании анализа схемы можно подтвердить вывод И.Т. Кирсанова (Кирсанов и др., 1964; Кирсанов, 1994) о наличии на вулкане вулcano-тектонического желоба - на схеме он представлен системой из двух наиболее врезанных барран-

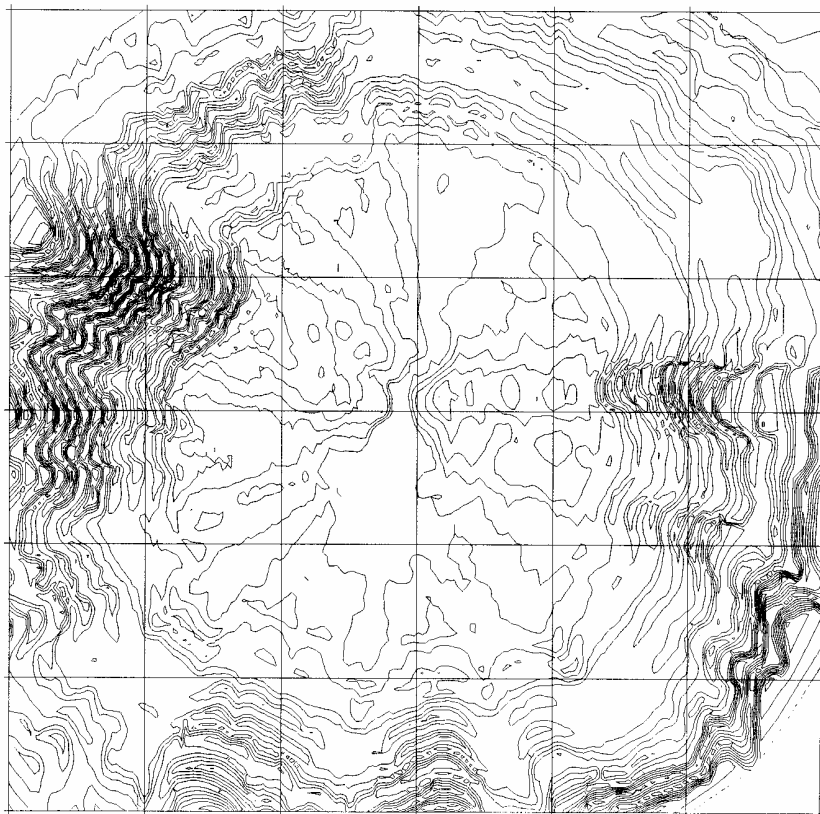
косов, пересекающих южный и северный склоны вулкана.

На схеме остаточного рельефа хорошо проявлены также (в виде гребней, сильно выступающих над окружающей территорией) выпуклости склонов, соответствующие дайкам. Анализ поверхности позволяет также высказать предположение о происхождении скалистого выступа на вершине вулкана, впервые описанного Т.Ю. Марениной (Маренина и др., 1962). В последующих работах выдвигались различные точки зрения о его происхождении. Высказывались гипотезы об экструзивном его происхождении, о том что это - купол выжимания, жерловая пробка и т.д. На наш взгляд, имеющиеся морфологические данные позволяют принять гипотезу жерловой пробки, так как гипсометрическое положение выступа выше, чем рельеф реконструированной неэродированной поверхности вулкана.

Гравитационное равновесие конуса

Для построения равновесно-устойчивой фигуры вулканической постройки использовалось расстояние от характерных точек на равновесно-устойчивой кривой до вертикальной оси вулкана. Для этого нужно знать ее положение - определить координаты проекции вертикальной оси вулкана на плоскость осно-

а



б

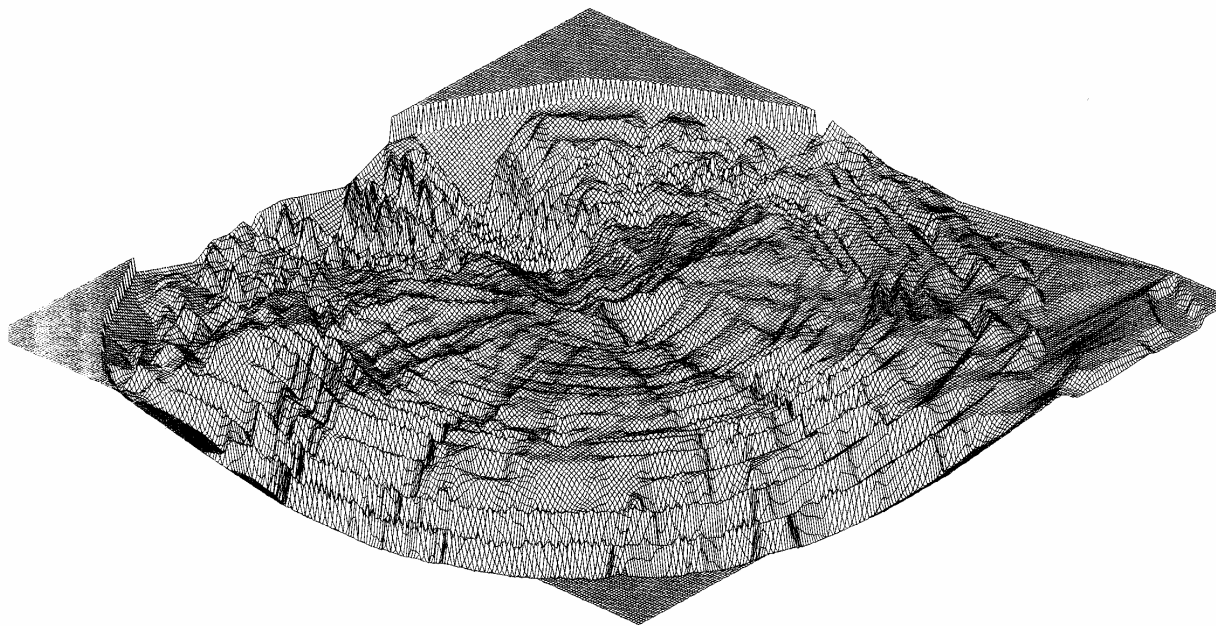
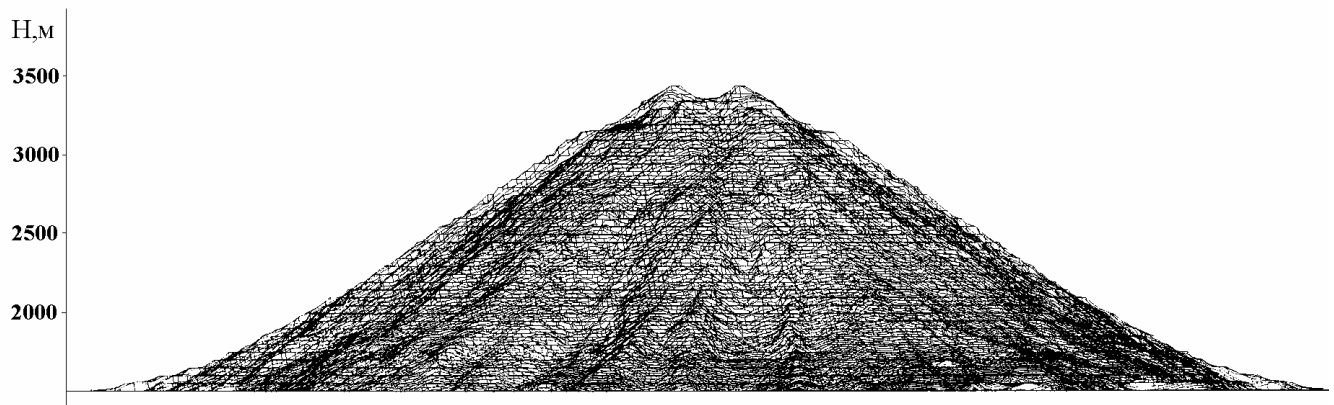
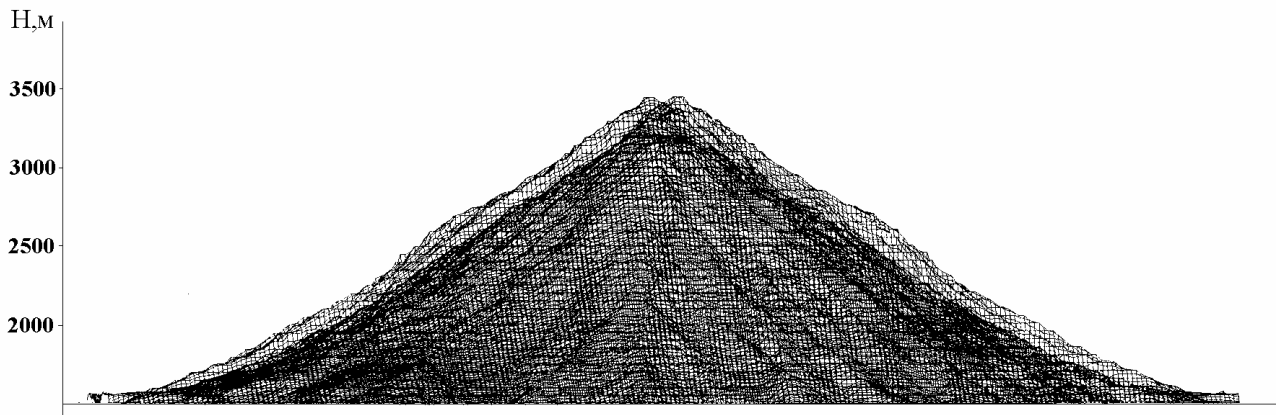


Рис. 6. Изолинии остаточной поверхности, полученные путём вычитания образующей конуса Корякского вулкана из его реального рельефа (а), и трехмерное представление этой поверхности, вид с юго-запада (б). Хорошо заметен вулcano-тектонический желоб, глубоко врезанный в тело постройки в двух противоположных (южном и северном) секторах вулкана, а также система перпендикулярных к ним глубоких барранкосов субмеридионального пространства. Ярко проявлена система радиальных барранкосов, а также кольцеобразная система борозд в рельефе остаточной поверхности (соответствующая в рельефе реального конуса участкам уменьшения крутизны склона), причём обе системы имеют единый центр симметрии.



а)



б)

Рис. 7. Проекция изображения изображения конуса вулкана на фронтальные плоскости меридионального (а) и широтного (б) простираний.

вания. Таким образом, о построенной нами вертикальной оси можно сказать лишь то, что ее проекция на основание вулканической постройки находится в пределах окружности небольшого радиуса в центральной части вулкана.

Для многих приложений такая точность, в определении положения вертикальной оси оказывается достаточной, но для построения равновесно-устойчивой кривой склона вулканической постройки под выпуклостью неоднозначность в выборе координат центра оси вулкана может помешать. Поэтому процедура рассечения вулкана вертикальными плоскостями строится с учётом отсутствия данных о точном положении вертикальной оси. Для этого будем вращать изображение вулканической

постройки вокруг любой вертикальной оси. Это удобно делать вокруг одной из найденных нами вертикальных осей. При каждом очередном повороте будем проектировать изображение вулкана на фронтальную плоскость, так как это показано на рисунке 7.

Повернем изображение вулканической постройки так, чтобы на фронтальную плоскость спроектировался профиль склона вулкана с выпуклостью. Затем повернем изображение так, чтобы на фронтальную плоскость спроектировался профиль равновесно-устойчивого склона вулкана. Совместим обе проекции на фронтальную плоскость изображения вулкана таким образом, чтобы площадь перекрываемого изображения вулкана обеими проекциями была

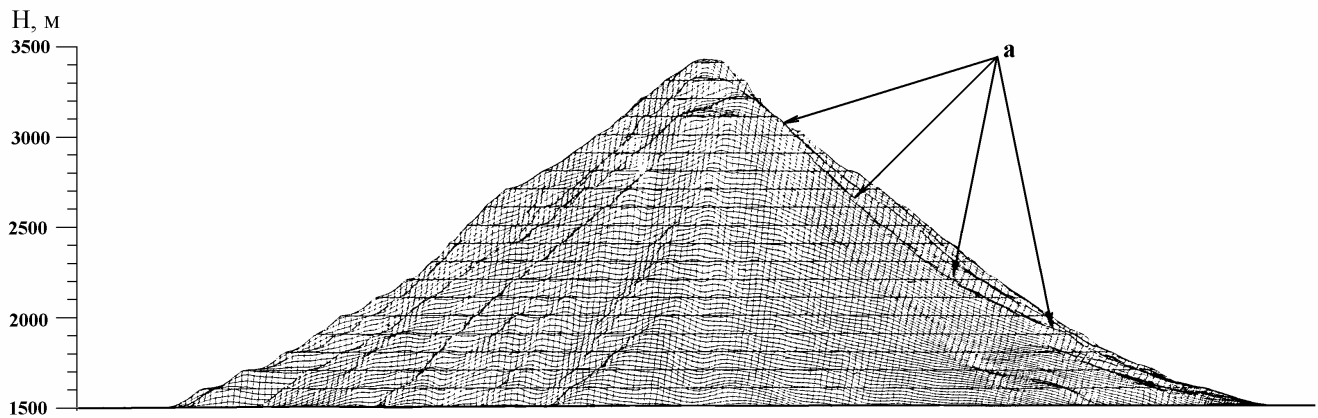


Рис. 8. Равновесный профиль образующей конуса (показан стрелками) на западном фланге постройки Корякского вулкана.

максимальной, тогда взаимное положение обоих профилей будет говорить об их соответствии друг другу. Взаимное положение изображений можно делать и другим, добиваясь совпадения положения оснований, вершин или некоторого среднего положения, определяемого целями решения задачи.

Заметим попутно, что путем совмещения изображений фронтальных проекций просто и наглядно выявляются некоторые свойства геометрии вулканической постройки. Определим такую важную характеристику, как общий угол наклона вулканической постройки к плоскостям основания вдоль заданного направления, например, направления на ближайшую к вулкану населенную территорию. Тогда нужно повернуть изображение вулканической постройки на нужный нам угол, затем повернуть на угол, отличающийся от исходного на 180 градусов, получить изображения фронтальных проекций и совместить их основаниями. Далее нужный нам угол легко находится на основании рисунка 7.

Каждый раз, когда на склоне вулкана реальная форма вулкана отклоняется от равновесной с формированием выпуклости вверх по отношению к равновесному профилю, на данном участке возникает реальная опасность обрушения неустойчивого сектора склона или его сползания вниз. Поэтому протяжённые в плане, хотя и не обязательно большие по высоте, выпуклые выступы реального профиля по отношению к равновесному при ослаблении или действии провоцирующих факторов (пригрузка склона новыми продуктами извержения, подрезка эрозией или изменение порового давления в пирокластических отложениях) могут

быть причиной гравитационных смещений склона, в том числе катастрофических. В этом смысле такие морфоструктурные формы являются индикатором возможной опасности и требуют анализа и проверки на достаточность остальных признаков возможного или даже готовящегося оползня или обрушения.

Очевидно, что природа и способ возникновения вздутий, выступов, выпуклых форм конвергентны. Это могут быть формы рельефа, обусловленные накоплением отложений побочных извержений, процессами перемещения магмы внутри вулканической постройки (без ее извержения на поверхность), тектонических подвижек (медленных крипов или сейсмодислокаций), ледниковых процессов, а также эрозии поверхности вулканической постройки.

Потенциально опасные, с точки зрения обрушения, участки вулканической поверхности могли бы быть легко определены, если бы удалось построить равновесно-устойчивую форму склонов для каждого конкретного вулкана. Состав, структура, текстура слагающих вулканическую постройку пород, а следовательно, прочность, модуль сдвига, коэффициент и другие механические свойства, существенно различны.

Анизотропность механических характеристик вулканической постройки, крайняя затруднительность их измерения и оценки не позволяет решить проблему нахождения опасных для обрушения зон путем сравнения реальной поверхности вулкана с равновесной прежде всего потому, что строго равновесную форму конкретного вулкана построить крайне сложно. Для одного и того же вулкана она может проходить по разному на разных его склонах.

Предположим, что рядом со выпуклостью склона мы обнаружили реальную кривую образующей склона, обладающую следующими свойствами: 1) падающую круче сглаженной кривой образующей, проходящей через выпуклость; 2) не имеющую точек перегибов и изломов, и 3) точка начала кривой на кратере вулкана и точка конца кривой у основания вулкана находятся соответственно на том же (или близком) расстоянии от оси вулкана, что и аналогичные точки на сглаженной образующей на вздутии склона вулкана. Тогда такую реальную кривую образующей склона и следует принять как равновесно-устойчивую для сечения со вздутием.

В соответствии с описанными представлениями, первое приближение к фигуре равновесно-устойчивого состояния вулканической постройки может быть получено, если с поверхностного слоя реальной вулканической постройки срезать все «лишнее» (что может переместиться вниз под действием силы тяжести) таким способом, который указан выше при построении равновесно-устойчивой кривой склона под выступом. При компьютерной обработке сначала выявляются участки выпуклостей и оцениваются «нависающие» массы грунта над сглаженной образующей склона вулканической постройки, затем проводится поиск равновесно-устойчивой кривой склона поблизости от выступа (рис. 8), и оценки объемов «нависающих» масс уточняются. Если разница в первой и второй оценке не слишком велика (до 30%), то уточнение принимается. Если больше, то причины расхождения изучаются.

Участки реальной поверхности вулкана, находящиеся над сглаженной образующей в выбранных нами сечениях, потенциально опасны с точки зрения возможности их обрушения или оползня. Сделаем предположение относительно одного из морфологических критериев такой опасности: опасность таких участков тем выше, чем большие массы пород находятся над сглаженной образующей, чем выше расположен центр тяжести «нависающих» масс и чем круче спад высоты вдоль сглаженной образующей конуса вулкана. Нужно иметь в виду, что оцененные таким образом объемы нависающих масс много меньше объемов сползающего

грунта при оползнях и тем более при обрушениях⁷.

Из теории механики оползней известно, что между этими массами и крутизной сместителя есть взаимно-однозначное соответствие, которое может быть использовано для оценки общего объема сползающих масс. Такой подход указывает на потенциальную опасность далеко не для всех типов вулканов. Например, щитовые и подводные вулканы имеют весьма пологую образующую, далекую от равновесно-устойчивой формы, при которой возможны обрушения, и для них (если не действуют процессы, приводящие к сильному ослаблению склона) характерны скорее процессы отседания флангов, формирования циркульных глыб, но не гравитационные обрушения. Поэтому следует сопоставлять наклон производной к сглаженной образующей реального вулкана с некоторым минимальным ее значением, при котором еще возможны гравитационные обрушения и оползни.

Следует заметить, что и тогда, когда и это условие выполнено, мы находим лишь участки поверхности вулканической постройки с необходимыми, но еще не достаточными признаками обрушения. Выше уже отмечалось, что для обрушения необходимо наличие ослабленной зоны в массиве готовящегося обрушения, в том числе, подготовка и образование ослабленной плоскости будущего скольжения или отрыва.

Поиск всех достаточных признаков обрушения - тема, заслуживающая отдельного и весьма важного исследования, когда это касается сколько-нибудь обширной (даже однотипной) группы вулканов. Понятно, что признаки обрушения, например, для моногенных вулканов и сложно построенных (а тем более двойных, таких как Корякский) стратовулканов будут различными. В каждом конкретном случае (в том числе, и для Корякского вулкана) важны гарантии того, что все достаточные признаки и причины найдены.

Поэтому любые морфологические исследования должны сопровождаться геологическим и геомеханическим анализом постройки. Данную работу авторы рассматривают только как первый шаг на этом пути.

Выводы

1. На основе создания и использования цифровой карты рельефа Корякского вулкана

⁷ Поскольку реально сместитель оползня при гравитационном обрушении скорее всего пройдет значительно ниже сглаженной образующей.

разработан метод трехмерной реконструкции первичной (ненарушенной эрозией, денудацией, ледниковыми и другими процессами) формы стратовулканов. Это открывает путь к количественному сопоставлению формы вулканических построек в связи с решением проблем их устойчивости и динамики вулканического процесса.

2. Реконструкция ненарушенной, первичной формы Корякского вулкана позволяет утверждать о том, что постройка имеет вид эксцентричного (скорее всего с винтообразной осью) анизотропного конуса, который в первом приближении может быть аппроксимирован конусом с круговым горизонтальным сечением.

3. Выявлена кольцевая (спиралевидная в плане) система дуговидных ложбин, выступов и ступенек, свидетельствующая о наличии здесь системы кольцевых разрывов.

4. В теле постройки Корякского вулкана имеются секторы, для которых выработался гравитационно-устойчивый профиль склона. Выявление таких профилей позволяет установить участки возможной локальной гравитационной неустойчивости вулкана.

Обсуждение проблем устойчивости вулканических построек с академиком РАН С.А. Федотовым и д.г.-м.н. И.В. Мелекесцевым способствовало лучшему пониманию поднятых в статье проблем. Авторы признательны также В.И. Андрееву, Г.И. Аносову, А.В. Викулину, О.Н. Егорову, Т.Г. Константиновой, В.Л. Леонову, Б.И. Самойленко и М.Ю. Пузанкову за обсуждение результатов, различных аспектов поднятых в статье проблем и полезные критические замечания.

Работа выполнена по программе и при финансовой поддержке проектов РФФИ № 02-05-64979, Государственной поддержки ведущих научных школ № НШ-2294.2003.5, ФЦП "Интеграция" № Э0334/946 и проекта "Извержения вулканов Камчатки..." программы № 13 фундаментальных исследований Президиума РАН "Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы".

Список литературы

Адушкин В.В., Зыков Ю.Н., Федотов С.А. О механизме разрушения вулканической постройки из-за потери устойчивости и оценке размеров возможного обрушения Ключевского

вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 81-95.

Адушкин В.В., Иванов Б.А., Зыков Ю.Н. Численное моделирование лавинообразного обрушения вулкана Корякский // Вулканология и сейсмология. 1995. № 6. С. 82-93.

Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3 - 26.

Гусев Н.А., Добрынин Н.Ф. Теоретические основы аэрофотограмметрического метода в вулканологии // Вулканология и сейсмология. 1979. № 5. С. 50-61.

Девис В.М. Геоморфологические очерки. М.: ИЛ, 1962. 354 с.

Делемень И.Ф. Механизмы потери гравитационной устойчивости вулканической постройки (на примере Ключевского вулкана) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 64-80.

Заварицкий А.Н. Вулкан Авача на Камчатке. М.: Наука, 1977. 308 с.

Кирсанов И.Т. Вулканы // Камчатка. Петропавловск-Камчатский: РИО КОТ, 1994. С. 103-132.

Кирсанов И.Т., Медведева Г.Г., Серафимова Е.К. Фумарольная деятельность Авачинского и Корякского вулканов // Бюл. вулканол. Станций. 1964. № 38. С. 1-32.

Кирсанов И.Т., Пономарев Г.П., Штейнберг Г.С. Некоторые закономерности извержений Ключевского вулкана // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 93-98.

Костенко Н.П. Развитие складчатых и разрывных деформаций в орогенном рельефе. М.: Недра, 1972. 320 с.

Леонов В.Л. Линеаменты, трещиноватость и устойчивость склонов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 44 -63.

Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. Т. 1. Современные вулканы. М.: Наука, 1971. 480 с.

Маренина Т.Ю., Сиринов А.Н., Тиммербаев К.М. Корякский вулкан на Камчатке // Тр. Лаб. вулканологии. 1962. Вып. 22. С. 67-130.

Масуренков Ю.П., Пузанков М.Ю., Егорова И.А. Вулкан Корякский // Действующие вулканы Камчатки. Т.2. - М.: Наука. 1991. С. 230-240.

Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.

Святловский А.Е. Морфологическая вулканология. М.: Недра, 1982. 256 с.

Симонов Ю.Г., Лукашев А.А. Некоторые приемы и результаты анализа неотектонических структур юго-восточного Забайкалья // Зап. Забайкальского отд. геогр. о-ва. 1963. № 21. С. 170-179.

Соболевский П.К. Современная горная геометрия // Социалистическая реконструкция и наука. 1932. № 7. С. 42-78.

Уфимцев Г.Ф. Карта вершинной поверхности Дальнего Востока и ее неотектоническая интерпретация // Геоморфология и неотектоника горных областей Дальнего Востока. Владивосток, 1977. С. 21-45.

Федотов С.А. Расчет питающих каналов и магматических очагов вулканов, имеющих устойчивые размеры и температуру // Вулканология и сейсмология. 1982. № 3. С. 3-17.

Четвериков Л.И. Теоретические основы моделирования тел твердых полезных ископаемых. Воронеж: Изд. Воронежского гос. ун-та, 1968. 152 с.

Шейдеггер А. Основы геодинамики / Пер. с англ. М.: Недра, 1987. 384 с.

Штейнберг Г.С., Соловьев Т.В. О форме вулканов и положении побочных кратеров // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 5. С. 83-84.

Becker G.F. The geometric form of volcanic cones and the elastic limit of lava // Am. Journ. of Sci. 1885. Vol. 30. № 1. P. 283 - 293.

Lacey A., Ockendon J.R., Turcotte D.L. On the geometrical form of volcanoes // Earth and Planetary Science Letters. 1981. Vol. 54. № 1. P. 139-143.

Milne J. On the form of volcanoes // Geol. Mag. 1878. Vol. 15. № 2. P. 337-345.

Milne J. Further notes on the form of volcanoes // Geol. Mag. 1879. Vol. 16. № 4. P. 506-514.

The Volcanic Cone Forming Surfer Analises for the Weak Sector Prediction of Koryaksky Volcano Edifice (Kamchatka)

I. F. Delemen, I. S. Utkin, L. I. Utkina, D. V. Melnikov, O. K. Zgdanova

The growth of volcanoes is strongly dependent upon the gravitational stability of their volcanic cones. We present a detailed digital morphological model of relief of Koryaksky volcano (Kamchatka). The modeling of equal form of volcanic cone show that their morphological characteristics can be attributed to principal structure elements of volcanic edifice.