

Э. ЭРЛИХ

КАЛЬДЕРЫ, КРАТЕРЫ, ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕПРЕССИИ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

По выражению знатока проблем кальдер Х. Вильямса, определения не многих терминов порождало больше вариаций, чем термин «кальдера» [Williams, 1941]. Обзор существующих определений термина «кальдера» можно видеть в работе [Caldera, 2011].

Кальдеры описывались в XIX веке как «кратера поднятия» [Lyell, 1855]. Но в современном понимании понятие «кальдера» и сам термин были впервые введены Христианом Леопольдом фон Бухом после посещения в 1815 году кальдеры Лас Канадас на острове Тенерифе и кальдеры де Табурьенте на острове Лас Пальмас на Канарских островах. Термин происходит от испанского слова *caldera* – кипящий котел. Бух впервые употребил его в описании природы Канарских островов [Buch, 1825]. Кальдеры представляют огромные котловины округлой формы, диаметром до 10 км и глубиной до 2000 метров, расположенную на вершине щитового базальтового вулкана диаметром около 20-км, образовавшегося около двух миллионов лет назад [Caldera de Taburiente, Кратера поднятия]. Тематика, связанная с кальдерами и кальдерообразованием, изначально отражала противоборство двух ведущих идей в области геологических знаний – непунизма и плутонизма.

Впечатление от визита на острова было так велико, что Бух, бывший ярый приверженцем теории непунизма, созданной его учителем А. Вернером, полностью переменяет свои взгляды. Визит на Канары привел его к убеждению, что вулканизм явился причиной образования Атлантики. Так родился термин «кратер поднятия». Позднее он развил гипотезу магматического происхождения гранитов и высказал идею о том, что формирование горной системы Альп явилось следствием внедрения магматических масс. Так с момента появления самого термина «кальдера» материал по этим структурам стал служить ключом при решении самых острых проблем геологических наук. Так продолжается и по наши дни.

Мне было странно (и почти физически больно!) читать о том, что А. Гумбольдт и Л. Бух развили свою теорию «кратеров поднятия» вслед за (или под влиянием?) М. В. Ломоносовым [Короновский, 2006]. То есть опять псевдопатриотизм и «Россия – родина африканских белых слонов»! И кто говорит – Н. В. Короновский, представитель относительно молодого поколения профессуры МГУ!

Соотношение М. В. Ломоносова и его работ с его великими современниками А. Гумбольдтом и Л. Бухом практически таково же, как соотношение африканских студентов из университета им. Лумумбы с профессорами Московского гос. университета. Ломоносов был в Саксонии студентом-практикантом из развивающейся страны. И, право же, смешно думать, что всемирно-признанный учёный А. Гумбольдт знал о нем и его работах. Да и в силу наличия языкового барьера русскоязычные публикации были в этот период мало (мягко скажем) известны за пределами империи. Можно допустить совпадение тематики работ, но не более.

Имена Ломоносова, Буха, Гумбольдта упоминаются в одном ряду в двух разных документах и в разном контексте. Один – программа российского министерства высшего образования, где по традиции М. В. Ломоносов выступает в роли основоположника всех наук (геологии в том числе). О соотношении между собой членов этой триады не говорится. Второй раз этот перечень имен появляется в учебнике Общей геологии, изданном Московским университетом, с уже упомянутым авторством [Короновский, 2006]. В этом можно видеть попытку поставить, вольно или невольно, МГУ в один ряд с Фрейбергской Горной Академией, что не правомерно.

Под кальдерой понимается депрессия рельефа, возникающая в процессе кальдерообразующего извержения большой силы. Одновременно используется термин «кальдера-вулкан» или его синоним «супер-вулкан» для обозначения центров вулканических извержений, связанных с упомянутыми депрессиями. Огромная мощность кальдерообразующих извержений служит важным доводом в пользу необходимости предсказания их времени для предупреждения человеческих жертв.

Грозные последствия подобных извержений были в полной мере оценены в связи с извержением в районе озера Тоба на Суматре, близ одного из основных центров происхождения человеческого вида. В

результате катастрофы погибло по разным оценкам от 10 до 20% населения Земли, стояла угроза самому существованию человечества. Такое явление получило название «эффект Тобы». Значение этого фактора резко возросло в новейшее время, когда близ кальдер располагаются крупные центры народонаселения.

Считается, что объем продуктов, выброшенный в ходе «кальдерообразующих» извержений, на 1-2 порядка превосходит средний объем продуктов, извергаемых обычными вулканами. Именно поэтому кальдера-вулканы получили название супер-вулканов [Rampino, Stothers, 1988, Sparks, Self, et al., 2005, Bindeman, 2006]. Катастрофические последствия таких извержений для всего живого на Земле очевидны. По оценкам вулканологов геологической службы США, если извержение такой силы произойдет в районе кальдеры Йеллоустон, большая часть США будет покрыта слоем обломков общей мощностью до 2 метров, а от понижения температуры атмосферы и кислотных дождей, которые будут вызваны таким извержением, пострадают миллионы людей на всей планете [Calderas].

В 2007 в Перудже Всемирная Ассоциация вулканологии провела в рамках очередного симпозиума специальную сессию, посвященную катастрофическим последствиям крупнейших извержений. Те же мотивы привели к составлению в Геологической службе США фундаментальной сводки, посвященной вулканической и гидротермальной активности, наблюдавшейся в историческое время в пределах кальдер всего мира [Newhall and Dzurizin, 1988].

Признавая большую теоретическую важность изучения подобных вопросов, нельзя, однако, опускать и встающий не менее важный вопрос о мерах безопасности. Приостановить любое извержение, тем более извержение огромной силы, не в человеческих силах; невозможно и оперативно эвакуировать многочисленное население из угрожаемых районов; а любое даже лучшее из возможных предсказаний сегодня более чем проблематично.

Изначально встает вопрос о сходстве и различии трех видов депрессий – кратеров, кальдер и вулканотектонических депрессий, образование которых в той или иной мере связано с вулканическими процессами. Кроме того, в англоязычной литературе широко используется термин cauldron (от испанского слова «котел»), имеющий то же значение, что и кальдера. Можно считать удачным этот термин, как описывающий корневые формирования под собственно кальдерами, [Anderson, 1936, 1937]. Термин «кальдрон» предлагается использовать для структур, где эрозией удалены все поверхностные вулканические формации, связанные с обрушением рельефа в ходе кальдерообразующего извержения. Сегодня на поверхности наблюдаются вулканические и осадочные формации, сформированные в докальдерный период [Cole, Millner, Sprinks, 2005]. Общее различие кальдер, кальдронов и кольцевых комплексов показано на рис. 1.

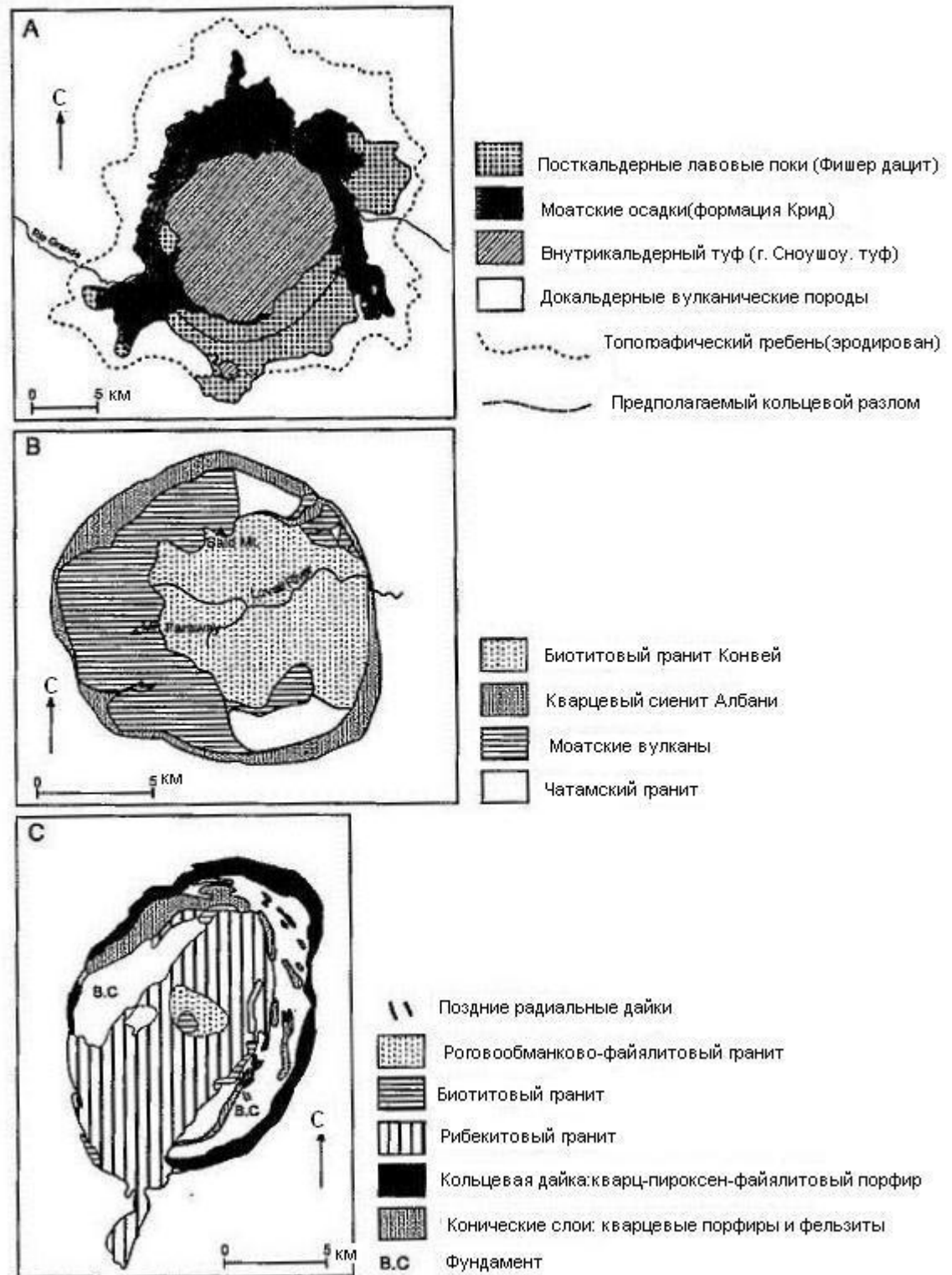


Рис.1.Различие между кальдерами (А), кальдронами (В)и кольцевой системой интрузий (С). В качестве примеров использованы А – кальдера Крид, штат Колорадо, В. кальдрон Оссипи, штат Нью Хемпшир, С. кольцевая структура Кудуру, Сев.Нигерия [no Cole et al., 2005]

Прежде всего можно отметить резкое различие между кратерами и кальдерами. Под кратерами понимаются выраженные в рельефе депрессии, образование которых связывается с движением магмы по подводящему каналу. Для кальдер и вулcano-тектонических депрессий характерно наличие кольцевых разломов вдоль их границ. Учитывая генетические различия этих структур вряд ли можно считать оправданным формальное разграничение их по диаметру, предлагаемое в работе В. Л. Леонова и Е. Н. Гриб [Леонов, Гриб, 2004], условно проводящих границу между кратерами и кальдерами по диаметру до 2-2.5 км. В результате такого подхода кальдера, в которой располагается молодой конус Авачинского вулкана, попадает в категорию кратеров в то время как комплекс Сомма-Везувий к которому вне всякого сомнения принадлежит и Авачинская сопка считается кальдерным вулканом [Lipman, 1984]. Путаница в использовании этих терминов так велика, что сам термин кальдера определяется как «тип вулcano-тектонических депрессий», а совершенно несомненная, хотя бы по размеру, вулcano-тектоническая депрессия Нгоронгоро определяется как «кратер Нгоронгоро» [Ngorongoro conservation area]. Даже такой знаток кальдер как Р.Л. Смит определяет кальдеры как гигантские кратера [Smith, 1960]. Что касается разграничения терминов кальдера и кратер подчеркивается, что диаметр кальдер намного превосходит диаметр подводящих каналов (т.е. кратеров) расположенных на их дне. соотношение кратеров и кальдер хорошо видно на рисунке 2.



Рис. 2. Кратер вулкана Мутновский. Видно озеро, заполняющее часть депрессии рельефа по всей видимости являющейся небольшой вершинной кальдерой. По В. И. Белоусову Е. Вакин называл кратер «активной воронкой», а кальдеру «кратером». Представляется, что тут терминологическая путаница. Автор снимка неизвестен.

Проблемы, связанные с определением вулcano-тектонических депрессий, будут рассмотрены ниже в специальном разделе. Изучение структур и механизма образования кальдер и вулcano-тектонических депрессий привлекает к себе особое внимание в связи с тем, что в этих структурах располагается большое число крупных гидротермальных месторождений.

РОЛЬ ПРОЦЕССОВ ПОДНЯТИЯ И ОПУСКАНИЯ В ЖИЗНИ КАЛЬДЕР

Элементарные соображения, подтвержденные геодезическими наблюдениями, приводят к выводу о том, что подъем магматической колонны в общем случае должен сопровождаться воздыманием старой вулканической постройки или поверхности в ее районе, а в результате извержения магматического материала (или его бокового оттока) должна происходить просадка поверхности.

Обсуждение возможного сочетания импульсов поднятия и опускания в ходе образования кальдер привлекал к себе пристальное внимание в течение всей многовековой истории изучения этих структур. Все началось с того, что именно в связи с описанием кальдер была создана теория «кратеров поднятия» - структур, образующихся в случае, если расплавленные массы поднимали и прорывали осадочные породы в процессе подъема к поверхности [<http://miningexpo.ru/useful/1539>].

Идея преобладающей роли тектонического поднятия в развитии вулканических процессов была всесторонне обсуждена в работах А. Е. Святловского. Для утверждения этого положения А. Е. Святловский вводит термин «воздымающаяся кальдера» – своеобразная реминесценция термина «кратера поднятия».

Абсолютизация одного из процессов приводит к искажению общей картины движений и структурообразования. Такого рода абберация связана с работами А. Е. Святловского [Святловский, 1959, 1971, 1975], абсолютизовавшего процессы поднятия, связанные с вулканизмом. В разделе, посвященном кальдерам и связанному с ним структурообразованию, в работе 1975 года он приводит целую серию интересных наблюдений. Так, при образовании в 1944 году на Хоккайдо вулкана Севасидзан отмечалось поднятие, общая величина которого перед извержением достигла 50 метров. При извержении вулкана Сакурадзима на Южном Кюсю произошло общее погружение поверхности на 89,4 метра. При эксплозивной деятельности в 1911 году вулкана Усу на Хоккайдо район вокруг вулкана площадью 2700x600 метров поднялся на 155 метров со средней скоростью 1,55 метра/сутки. В итоге за 100 дней образовался тектонический уступ высотой 90 метров. Извержение Усу в 1944 году сопровождалось внедрением экструзивного купола Новая Гора у восточного склона вулкана. В результате наблюдался отток подземных вод от поднимающегося участка. Воды изливались из колодцев в районе, прилегавшем к участку поднятия. С марта до середины апреля 1953 года прилегающая к Усу площадь шириной 4 км была поднята на 16 метров со средней скоростью 30 см/год. После этого центр участка воздымания сместился к северу. К 23 июня 1944 года Новая Гора поднялась на 50 метров. На вершине вулкана до октября 1954 года рос раскаленный купол. 20 января 1955 года произошло глубокофокусное землетрясение, ощущавшееся на расстоянии до 20 км от вулкана, после чего гипоцентры последующих землетрясений быстро поднялись к поверхности. Геодезические наблюдения на Гавайях показали, что перед извержением вершина вулкана обычно поднимается, а после извержения оседает. При этом объем просадки близок соответствовал объему излившейся лавы. Так за период с 1823 до 1924 года общий объем просадки составил 1,75 км³, а объем извергнутого материала несколько превышает эту цифру. При извержении вулкана Килауэа 5 ноября 1967 года площадь, охваченная проседанием, примерно соответствует площади максимального подъема перед извержением. Объем извергнутого материала составлял 84 млн. м³, что равнялось объему просадки.

Обсуждение возможного сочетания импульсов поднятия и опускания в ходе образования кальдер привлекал к себе пристальное внимание в течение всей многовековой истории изучения этих структур. Все началось с того, что именно в связи с описанием кальдер была создана теория «кратеров поднятия» - структур, образующихся в случае, если расплавленные массы поднимали и прорывали осадочные породы в процессе подъема к поверхности [<http://miningexpo.ru/useful/1539>].

Движение магматической колонны по подводящему каналу должно было неизбежно привести к куполообразованию в коре. Этот факт широко признан. При этом различаются два различных по времени импульса поднятия:

1. Куполообразные поднятия, формирующиеся в ходе внедрения магматического тела и образования периферического магматического очага в момент, соответствующий кальдерообразующим извержениям. П. Липман называет такие поднятия «опухолообразными» (tumescens) [Lipman, 1995].

2. Куполовидные поднятия, формирующиеся позже образования кальдер. Они известны под названием «возобновленных» (resurgent) поднятий [Smith and Bailey, 1956]. С ними связано внедрение кольцевых систем экструзивных куполов.

На относительно недавнем этапе в Институте вулканологии эта проблема оживленно обсуждалась в работах Ю. П. Масуренкова [Масуренков, ред., 1980, Масуренков, Комкова, 1978]. Его выводы были основаны, в основном, на общих соображениях о путях развития магматических центров в коре.

Но интересное и неожиданное решение этой проблемы принесли режимные наблюдения за деформацией поверхности в кальдере Йеллоустона. Было установлено, что площадь кальдеры испытывает сменяющие друг друга эпизоды поднятия и опускания. Повторное нивелирование, проведенное в 1975-77 годах по основанной в 1923 году системе маркеров [Pelton and Smith, 1982] показало, что площадь дна кальдеры была поднята на 76 см. С середины 1970 года до 1984 года эпизод поднятия внезапно сменился опусканием, величина которого достигла 6 см [Dzurizin and others, 1994]. Опускание той же площади, что была захвачена поднятием, продолжалось до 1991 года, достигнув 7 см. Но наиболее важной причиной подъема в 1923-1977 годы авторы считают приток магматического материала. По мнению Д. Дзуризина (Геологическая служба США), выделение тепла гидротермами в кальдере настолько велико, что без возобновления магматической подпитки за 700 тысяч лет, прошедших с момента образования кальдеры, вся система остыла бы. Подобные периодические подъемы и опускания поверхности привели к тому, что Йеллоустон заслужил репутацию «дышащей кальдеры» [www.Yellowstoegis.utah.edu/research/calderaCrustal.html].

Сравнение сейсмической активности в районе кальдеры Йеллоустон с вертикальными смещениями поверхности и гидротермальной и магматической активностью показывает их тесную связь. Крупный рой землетрясений последовал непосредственно за изменением направления смещения поверхности почти на 1 метр с 1923 до 1984 года; рой гипоцентров располагается в виде почти вертикальной зоны северо-западного простирания и в течение первого месяца активности рой эпицентров смещался латерально по направлению от кальдеры со средней скоростью 150 м/день, преобладающий механизм очага землетрясений отвечает сбросам или сдвигам в отличие о нормальных сбросов, характерных для региона в целом [Waite and Smith, 2002].

Проблемы, связанные с определением вулcano-тектонических депрессий, будут рассмотрены ниже в специальном разделе.

Изучение структур и механизма образования кальдер и вулканотектонических депрессий привлекает к себе особое внимание в связи с тем, что в этих структурах располагается большое число крупных гидротермальных месторождений. С другой стороны, мощные кальдерообразующие извержения вызывают необходимость предупреждения населения окружающих районов о возможной опасности. Грозные последствия подобных извержений были в полной мере оценены в связи с извержением в районе озера Тоба на Суматре близ одного из основных центров происхождения человеческого вида в результате которого погибло по разным оценкам от 10 до 20% населения Земли и было поставлено под вопрос само существование человечества. Это явление получило название «эффект Тобы». Значение этого фактора резко возросло в новейшее время, когда близ кальдер располагаются крупные центры народонаселения.

РОЛЬ ПРОЦЕССОВ ПОДНЯТИЯ И ОПУСКАНИЯ В ЖИЗНИ КАЛЬДЕР

Элементарные соображения, подтвержденные геодезическими наблюдениями, приводят к выводу о том, что подъем магматической колонны в общем случае должен сопровождаться воздыманием старой вулканической постройки или поверхности в ее районе, а в результате извержения магматического материала (или его бокового оттока) должна происходить просадка поверхности. Абсолютизация одного из процессов приводит к искажению общей картины движений и структурообразования. Такого рода абберация связана с работами А. Е. Святловского [1959, 1971, 1975], абсолютизовавшего процессы поднятия, связанные с вулканизмом. В разделе, посвященном кальдерам и связанному с ним структурообразованию, он в работе 1975 года он приводит целую серию интересных наблюдений. Так при образовании в 1944 году на Хоккайдо вулкана Севасидзан отмечалось поднятие, общая величина которого перед извержением достигла 50 метров. При извержении вулкана Сакурадзима на Южном Кюсю произошло общее погружение поверхности на 89,4 метра. При эксплозивной деятельности в 1911 году вулкана Усу на Хоккайдо район вокруг вулкана площадью 2700х600 метров поднялся на 155 метров со средней скоростью 1,55 метра/сутки. В итоге за 100 дней образовался тектонический уступ высотой 90 метров. Извержение Усу в 1944 году сопровождалось внедрением экструзивного купола «Новая Гора» у восточного склона вулкана. В результате наблюдался отток подземных вод от поднимающегося участка. Воды изливались из колодцев в пайоне прилегающем к участку поднятия. С марта до середины апреля 1953 года прилегающая к Усу площадь шириной 4 км была поднята на 16 метров со средней скоростью 30 см./год.

После этого центр участка воздымания сместился к северу. К 23 июня 1944 года «Новая Гора» поднялась на 50 метров. На вершине вулкана до октября 1954 года рос раскаленный купол. 20 января 1955 года произошло митльное глубокофокусное землетрясение, ощущавшееся на расстоянии до 20 км от вулкана, после чего гипоцентры последующих землетрясений быстро поднялись к поверхности. Геодезические наблюдения на Гавайях показали, что перед извержением вершина вулкана обычно поднимается, а после извержения оседает. При этом объем просадки блтзко соответствовал объеиу излившейся лавы. Так за период с 1823 до 1924 года общий объем просадки составил $1,75 \text{ км}^3$, а объем извергнутого материала несколько превышает эту цифру. При извержении вулкана Килауэа 5 ноября 1967 года площадь, охваченная проседанием примерно соответствует площади, максимального подъемаперед извержением. Объем извергнутого материала составлял 84 млн. м^3 , что равнялось объему просадки.

Одна тема красной нитью проходит через все обсуждения материала по геологии кальдер – соотношение между процессами поднятия – будь то тектоническое поднятие территории кальдер или поднятие магматического материала, косвенным эффектом которого является тектоническое поднятие и опусканием, собственно формирующим кальдеру как таковую.

Обсуждение возможного сочетания импульсов поднятия и опускания в ходе образования кальдер привлекал к себе пристальное внимание в течение всей многовековой истории изучения этих структур. Все началось с того, что именно в связи с описанием кальдер была создана теория «кратеров поднятия» - структур, образующихся в случае, если расплавленные массы поднимали и прорывали осадочные породы в процессе подъема к поверхности [<http://miningexpo.ru/useful/1539>]. Идея превалирующей роли тектонического поднятия в развитии вулканических процессов была всесторонне обсуждена в работах А. Е. Святловского [Святловский, 1971, 1975].

Для утверждения этого положения А. Е. Святловский вводит термин «воздымающаяся кальдера» – своеобразная реминесценция термина «кратера поднятия».

Движение магматической колонны по подводящему каналу должно было неизбежно привести к куполообразованию в коре. Этот факт широко признан. При этом различаются два различных по времени импульса поднятия:

1. Куполообразные поднятия, формирующиеся в ходе внедрения магматического тела и образхования периферического магматического очага в момент, соответствующий кальдерообразующим извержениям. П. Липман называет такие поднятия «опухолообразными», tumescent [Lipman, 1995].

2. Куполовидные поднятия формирующиеся позже образования кальдер. Они известны под названием —возобновленных| (resurgent) поднятий (Smith and Bailey, 1956). С ними связано внедрение кольцевых систем экстрезивных куполов.

На относительно недавнем этапе в Институте вулканологии эта проблема оживленно обсуждалась обсуждалось в работах Ю. П. Масуренкова [Масуренков, ред., 1980, Масуренков, Комкова, 1978]. Его суждения были основаны в основном на общих сображениях о путях развития магматических центров в коре.

Но интересное и неожиданное решение этой проблемы принесли режимные наблюдения за деформацией поверхности в кальдере Йеллоустона. Было установлено, что площадь кальдеры испытывает сменяющие друг-друга эпизоды поднятия и опускания. Повторное нивелирование, проведенное в 1975-76-77 годах по основанной в 1923 году системе маркеров [Pelton and Smith, 1982] показало, что площадь дна кальдеры была поднята на 76 см. С середины 1970 года до 1984 года эпизод поднятия внезапно сменился опусканием величина которого достигла 6 см (Dzurizin and others, 1994). Опускание той же площади, что была захвачена поднятием продолжалось до 1991 года, достигая 7 см.

Но наиболее важной причиной подъема 1923-1977 года они считают приток магматического материала. По мнению Д. Дзуризина (Геологическая служба США) выделение тепла гидротермами в кальдере настолько велико, что без возобновления магматической подпитки за 700 тысяч лет, прошедших с момента образования кальдеры, вся система остыла бы. Подобные периодические подъемы и опускания поверхности привели к тому, что Йеллоустон заслужил репутацию «дышащей кальдеры» (www.Yellowstoegis.utah.edu/research/calderaCrustal.html).

Сравнение сейсмической активности в районе кальдеры Йеллоустон с вертикальными смещениями поверхности и гидротермальной и магмаической активностью показывает их тесную связь. Крупный рой землетрясений последовал непосредственно за изменением направления смещения поверхности почти на 1

метр с 1923 до 1984 года; рой гипоцентров располагается в виде почти вертикальной зоны северозападного простирания и в течение первого месяца активности рой эпицентров смещался латерально по направлению от кальдеры со средней скоростью 150 м/день, преобладающий механизм очага землетрясений отвечает сбросам или сдвигам в отличие о нормальных сбросов, характерных для региона в целом [Waite and Smith, 2002].

ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ. ГЕНЕЗИС КАЛЬДЕР.

Первые подходы к проблемам терминологического различения кальдер и вулканологических депрессий были сделаны в ходе региональных описаний структур Индонезии и Японии [Tanakadate, 1929].

Данные о строении корневых зон кальдер складывались из трех групп фактов:

1. Данных о геологическом строении эродированных кальдерных вулканов, указывающих на то, что материал извергнутый в ходе кальдерообразующего извержения представлял собой верхнюю часть магматической колонны, основная часть которых образовала интрузивное тело, служившее промежуточным питающим магматическим очагом в посткальдерный период (см. Lipman, 1984). На месте эродированных кальдерных комплексов обычно вскрывались интрузивные тела аналогичные по составу продуктам кальдерообразующего извержения. К этой группе данных примыкают материалы комплексных геолого-геофизических исследований на кальдерах и кольцевых структурах. Таковы описания кальдер Крейтер Лейк в штате Орегон [Wason et al., 2002], кальдеры Йеллоустон [Christiansen, 2001], кальдеры Узон на Камчатке [Набоко, ред., 1971], кальдер Хоккайдо и Японии [Katsui, 1963, Aramaki, 1984, Matsumoto, 1963] описаний кальдерообразующих извержений, с которыми ассоциировались просадки. Эти данные могли быть получены либо в результате непосредственных наблюдений, либо как результат реконструкции событий по геологическим данным. Наиболее известными примерами могут служить описание извержения вулкана Кракатау в 1883-1884 годах в проливе между Явой и Суматрой [Simkin, Fiske, 1983] или извержение вулкана Новарупта на Аляске в 1912 [Can another Great Eruption Happen in Alaska, 1998], извержение вулкана Ксудач на Южной Камчатке в 1904 году [Volynets et al., 1999], голоценового извержения в ходе которого образовалась кальдера Курильского озера на Южной Камчатке [Ponomareva et al., 2004]. Примером такой реконструкции явилось описание кальдеры Узон на Камчатке [Набоко, ред., 1974], Веллес (штат Нью Мексико, США, [Smith and Bailey, 1956], описание катастрофического извержения в кальдере озера Тоба, Суматра [Aldis and Ghazil, 1984]. Особенно это относится к так называемым интрузивным кальдерам, таким как комплекс Мессум в Намибии [Bauers, Trumbell and Vietor, 2005]. К этим данным примыкают многочисленные точные количественные измерения кальдерных просадок на Гавайских базальтовых щитовых вулканах, полученные в ходе режимных наблюдений Гавайской обсерватории Геологической службы США от [Dana, 1890] и вплоть до сегодняшнего дня [Walker, 1984]. Аналогичная просадка отмечалась на кальдере вулкана Плоский Толбачик в ходе катастрофического извержения 1975-1976 года [Федотов, ред., 1984]. Сюда же примыкает извержение с котрым связана просадка на кальдере Галапагосских островах [Simkin, Howard, 1972].

2. Геофизических (особенно гравиметрических) данных о современных кальдерах. Начало систематического описания гравиметрических наблюдений на кальдерах связано с именем выдающегося японского геофизика И.Июкоямы [Yukoayama, 1963]. В последующем проведение гравиметрической съемки на кальдерах стало неотъемлемой частью исследования кальдер [see in Casadevall T. J., Dzurisin D., 1987]. Крупный комплекс геофизических работ был проведен на вулканическом центре Мессум, Намибия [Bauers, Trumbell, Vietor, 2005]. На Камчатке такого рода работы были проведены М. Зубиным [Штейнберг и др., 1966, Зубин и др. 1971 Зубин, 1980]. Предполагалось, что отрицательные аномалии силы тяжести возникают за счет заполнения верхней части канала рыхлыми пирокластическими продуктами кальдерообразующего извержения, в то время как положительные аномалии поля силы тяжести отражают существование промежуточного магматического очага, заполненного жидкой магмой. На Камчатке пионерной работой такого рода явились комплексные геофизические исследования на вулкане Авача [Штейнберг и др. 1966], показавшие наличие под вулканом периферического магматического очага. (рис. 3).

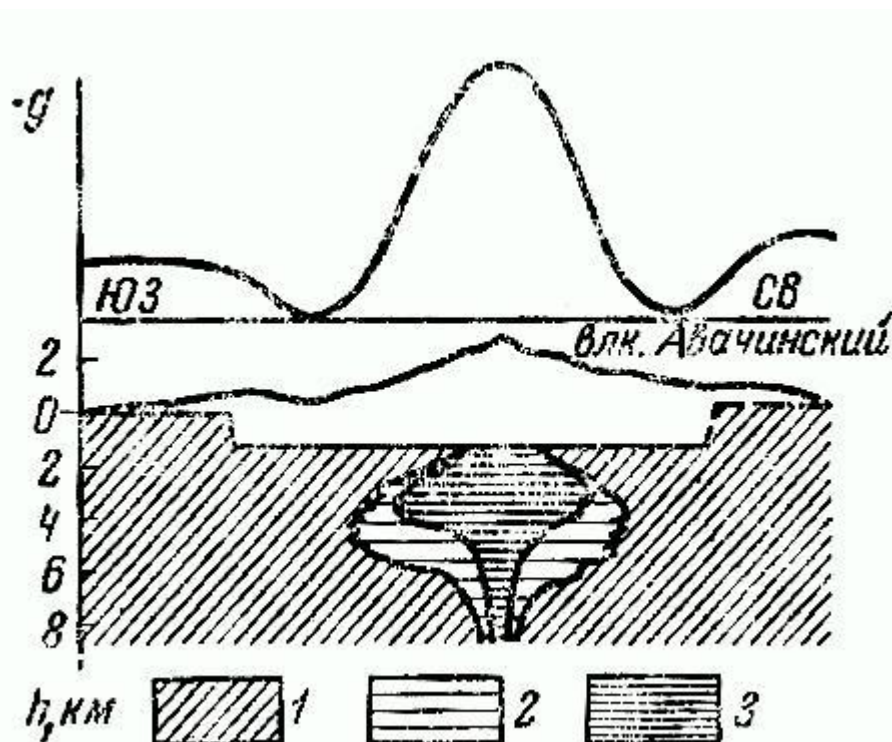


Рис. 3. Положение периферического магматического очага под Авачинским вулканом по геофизическим данным [Штейнберг и др. 1966]. 1 — фундамент, плотность пород $\sigma = 2,65 \text{ г/см}^3$, 2 — очаг в случае, если плотность пород в нем $\sigma = 2,85 \text{ г/см}^3$; 3 — очаг, если плотность пород в нем $\sigma = 3,15 \text{ г/см}^3$;

3. Описаний кальдерообразующих извержений, с которыми ассоциировались просадки. Эти данные могли быть получены либо в результате непосредственных наблюдений, либо как результат реконструкции событий по геологическим данным. Наиболее известными примерами могут служить описание извержения вулкана Кракатау в 1883-1884 годах в проливе между Явой и Суматрой [Simkin and Fiske, 1983] или извержение вулкана Новарупта на Аляске в 1912 [Катмай, 2005]. Примером такой реконструкции явилось описание кальдеры Валлес (штат Нью Мексико, США, Smith and Bailey, 1956), к этим данным примыкают точные количественные измерения кальдерных просадок на Гавайских вулканах, полученные в ходе режимных наблюдений Гавайской обсерватории Геологической службы США, начиная от времени основания этой обсерватории [Dana, 1890] и до наших дней [Walker, 1984]. Непосредственно наблюдалась просадка кальдеры на базальтовом вулкане на Галапагосских островах [Simkin and Howard, 1972] и просадка вершинной кальдеры вулкана Плоский Толбачик в ходе трещинного извержения 1975-1976 годов [Федотов, ред., 1984].

В последние годы все большее значение начинает приобретать бурение на кальдерных комплексах, в частности в Японии и США.

Формирование кальдер в общей форме представлялось как просадка, использующая пространство в верхней части магматического очага опустошенной или понижение давления в ходе кальдерообразующего извержения. Подтверждением этой идеи были данные о последовательности событий в ходе образования кальдер, в частности кальдеры Крейтер Лейк (штат Орегон) и описания извержения вулкана Кракатау. Исходя

из этих данных представлялось, что просадка носила катастрофический характер и соответствовала моменту опустошения верхней части магматической колонны или понижения давления в ней в ходе кальдерообразующего извержения. Представления о катастрофическом характере просадки ассоциировались с наблюдениями над катастрофическими взрывными извержениями. В то же время тот факт, что разломы обрамления кальдер как правило носят характер нормальных сбросов, отсутствие в строении дна многих кальдер признаков дробления (структуры типа «битой тарелки», формированием которой неизбежно при внезапном обрушении) говорило в пользу постепенного, медленного опускания дна кальдер, что привело к развитию концепции кальдер опускания (в противоположность кальдерам обрушения). Сюда же примыкают данные об отсутствии взрывных отложений на значительной части кальдер и несоответствии количества ксенолитов вмещающих пород в продуктах кальдерообразующего извержения объему кальдерной просадки. Эти данные говорили о том, что катастрофическому извержению предшествовал момент «зияния трещин» в кровле магматического очага. В соответствии с этой концепцией образование кальдер отражает не опустошение магматической камеры, а момент внедрения интрузии и формирования промежуточной магматической камеры, питающей посткальдерные вулканические проявления. Принятие подобной модели формирования кальдер снимает указанные выше противоречия. Кальдеры опускания были признаны как самостоятельный тип в классификации В. И. Влодавца [Влодавец, 1954]. Позднее было показано, что к этому типу структур принадлежит значительная часть четвертичных кальдер Камчатки [Зубин и др., 1971]. Признание существования кальдер опускания было так велико, что вызвало появление нескольких работ отстаивавших само существование еще недавно общепризнанных кальдер обрушения [Scandone, 1990, Gudmundsson, 1988].

В связи с огромным интересом к проблеме, на основе накопившегося огромного материала в последние годы появилась серия работ, посвященных попыткам экспериментального воспроизведения и математического моделирования разных их типов [Komuro et al., 1984, 1987, Marti et al., 1994, Acocella et al., 1999, 2000, Roche et al., 2000, Walter and Troll, 2001].

КЛАССИФИКАЦИИ КАЛЬДЕР

Изначально кальдеры делились на группы по составу продуктов кальдерообразующего извержения. Одновременно была сделана попытка подразделить кальдеры по их соответствию наиболее изученным «морфотипам». Так выделяются «кальдеры типа Кракатау», кальдеры типа Веллес, кальдеры типа Крейтер Лейк, кальдеры Гавайского и Галапагосского типа. Отдельно рассматриваются кальдеры, связанные с извержениями пемз и игнимбритов.

К проблемам генезиса кальдер обращались неоднократно. Одна из первых попыток такого рода принадлежит Эшеру [Esher, 1930]. Одна из первых классификаций кальдер была предложена Х. Вильямсом [Williams, 1941].

Особенности подхода Х. Вильямса можно легко понять, если учесть что это была первая работа, посвященная классификации кальдер. В нее автор, естественно включил все типы депрессий, связанных с вулканизмом и использовал все возможные классификационные признаки. Прежде всего это тип процесса образования депрессии рельефа – процессы взрыва с одной стороны и опускания с другой. Далее рассматриваются криповулканические структуры в которых связь образования депрессии с вулканизмом не проявлена в явной форме. К ним примыкают кальдеры смешанного происхождения, сочетающие оба типа процессов, эрозионные кальдеры. Далее проводится деление по расположению кальдер по отношению к докальдерной вулканической постройке.

Работа Х. Вильямса создала основу для всех последующих классификаций. Термин эрозионные кальдеры был отброшен как не соответствующий общему подходу к кальдерам. Одновременно проводилась группировка по типам наблюдавшихся кальдерообразующих извержений. Так выделялись кальдеры типа Кракатау, Катмаи, Крейтер Лейк, и резургентные кальдеры в которых просадка была связана с обновленным (резургентным) куполообразованием в процессе внедрения вязкой кислой магмы в виде систем экструзивных куполов. И всегда особняком стояли так называемые интрузивные кальдеры (или кальдеры типа Глен Ко), в связи с которыми, как предполагалось, кальдерообразующие извержения отсутствовали и взамен предполагался отток магматического материала в периферическую магматическую камеру.

Новейшее подтверждение существования интрузивных камер, связанных с процессом кальдерообразования было получено в результате комплексных геофизических работ на вулканическом центре Мессум (Намибия). Итоги этого комплекса геофизических работ суммированы на рис. 4.

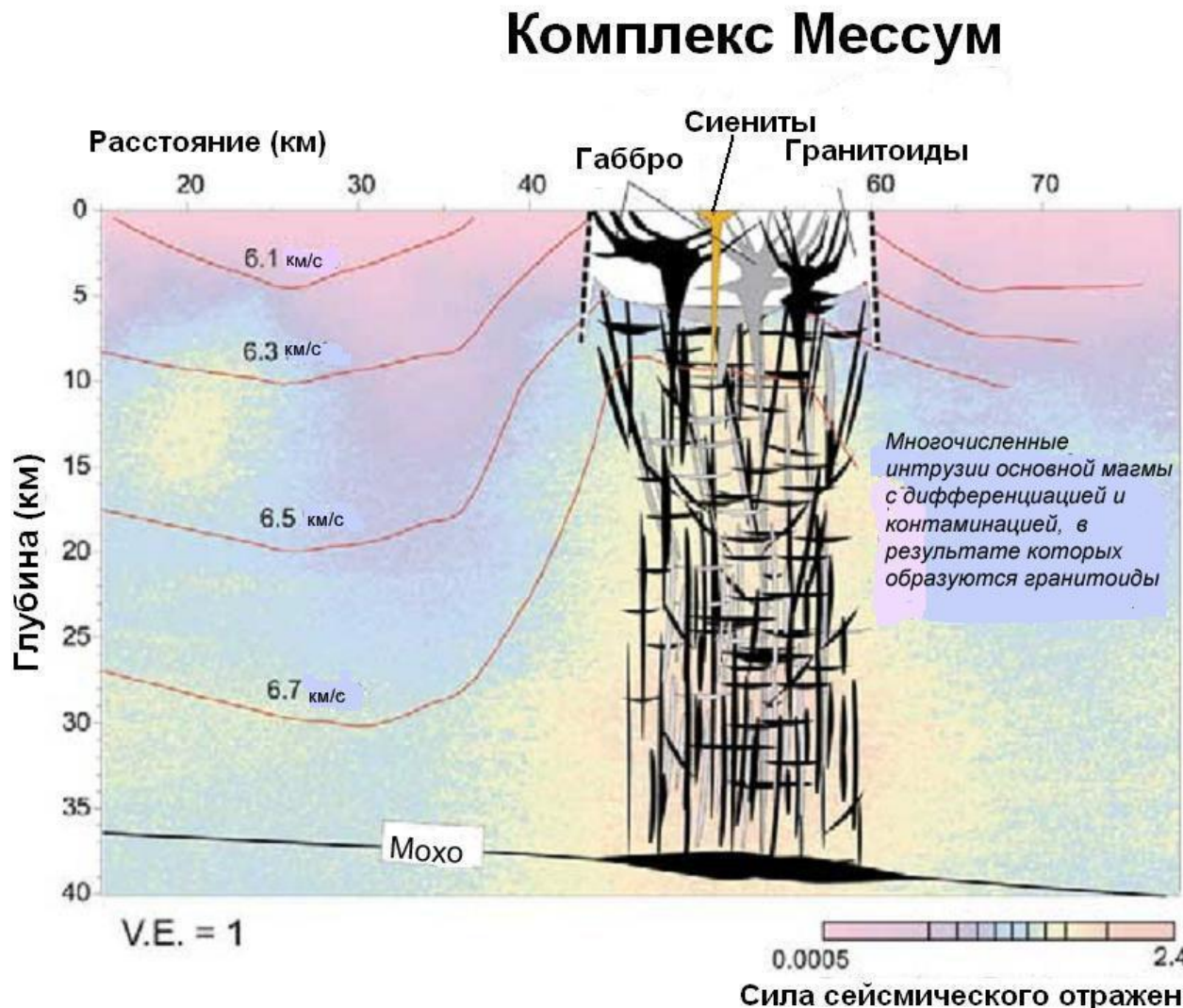


Рис.4. Интерпретация комплексных геофизических работ на вулкане Мессум, Намибия (по Bauer, Trumbell, Vietor, 2005)

Детальные исследования, проведенные на типоморфной кальдере Глен Ко в Шотландии, существенно уточнили ее структуру и историю формирования. Было выяснено, что перед опустошением в ходе кальдерообразующего извержения магматический очаг представлял собой концентрически-зональный pluton состав внешней зона которого соответствовал гранодиоритам, а внутреннее ядро было сложено гранитами. Предполагается, что часть гранодиоритовой зоны очевидно отсутствует поскольку породы кальдрона были извергнуты и магма частично сохранилась как часть спекшихся туфов кальдрона (Bailey, 1969, Moog and Kokelear, 1998).

Важные изменения претерпели представления о некоторых типоморфных кальдерообразующих извержениях, в частности на кальдере Крейтер Лейк (Bacon et al., 2002) и Кракатау (Simkin and Fiske, 1983). Был детально изучен процесс резургентного куполообразования (Smith and Bailey, 1956, Smith, 1961).

Авторы последующих классификаций выбирали для группировки кальдер ограниченное количество критериев. Так в соответствии с классификацией, предложенной в работе А. МакБёрни и Х. Вильямса (McBirney and Williams, 1979) кальдеры разделяются по составу материала, извергнутого в ходе кальдерообразующих извержений. При этом выделяются две группы кальдер:

- Кальдеры, образующиеся при кислотном вулканизме;
- Кальдеры, связанные с базальтовым вулканизмом.

Дальнейшая группировка проводится по типу кальдерообразующих извержений.

Среди кальдер, связанных с кислотным вулканизмом, выделяются:

- кальдеры типа Кракатау образование которых связывается со взрывами и излиянием большого объема кислой пироклаستيку;
- кальдеры типа Катмаи формирующиеся при оттоке материала по трещинам из зоны подводящего канала;
- кальдеры типа Веллес в которых обрушение происходит по трещинам, образованным в ходе обновленного («резургентного») куполообразования.

Среди кальдер, связанных с базальтовым вулканизмом выделяются три типа кальдер:

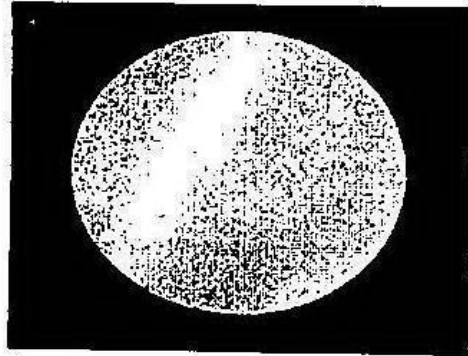
- кальдеры типа Масайя в которых площадь проседания больше площади докальдерной постройки;
- кальдеры Гавайского типа образующиеся за счет оттока материала из-под подводящего канала по так называемым рифтовым трещинным зонам;
- кальдеры Галапагосского типа в которых отток материала из-под подводящего канала происходит за счет извержения по кольцевым разломам обрамления кальдер.

Близкий подход к классификации кальдер использован Э. Кензо (Kenzo, 1971). Он по составу продуктов кальдерообразующих извержений выделяет салические и мафические кальдеры. К первой группе относятся кальдеры взрывного типа, образование которых сопровождалось излиянием большого объема кислого пирокластического материала. Выделяемые группы структур различаются и по типу гравитационных аномалий. Для кальдер первой группы характерны отрицательные, для второй – положительные аномалии поля силы тяжести. Размеры салических кальдер возрастают параллельно с увеличением содержания SiO_2 .

Одной из последних по времени явилась классификация кальдер, предложенная П. Липманом по их конечной структуре (Lipman, 1995). Им выделяется пять типов кальдер:

1. —плитные или —пистонообразные кальдеры (plate- and piston-type calderas) в которых имело место опускание цельного внутрикальдерного блока (рис. 5).

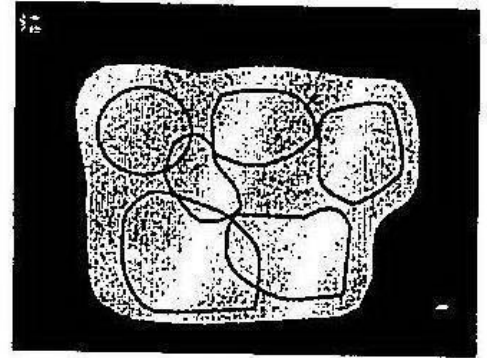
A



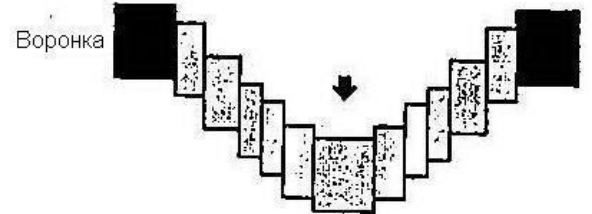
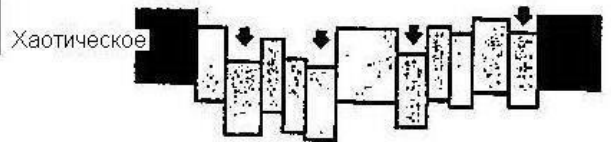
Топографическое кольцо



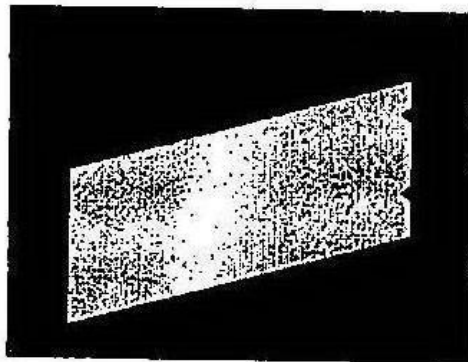
B



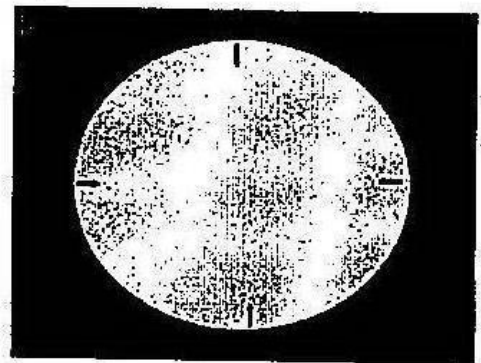
"Битая тарелка"



C



D



Растяжение



Рис. 5. Типы кальдер, выделяемые по конечной структуре опущенного блока. А – плитные и пистонообразные кальдеры, В. кальдеры обрушения; С. кальдеры типа дверной ловушки; С. кальдеры типа дверной ловушки; D. кальдеры опускания (по Cole et al., 2005).

Динамика формирования разломов обрамления в кальдерах опускания показана на рис. 6 (рис. 6).

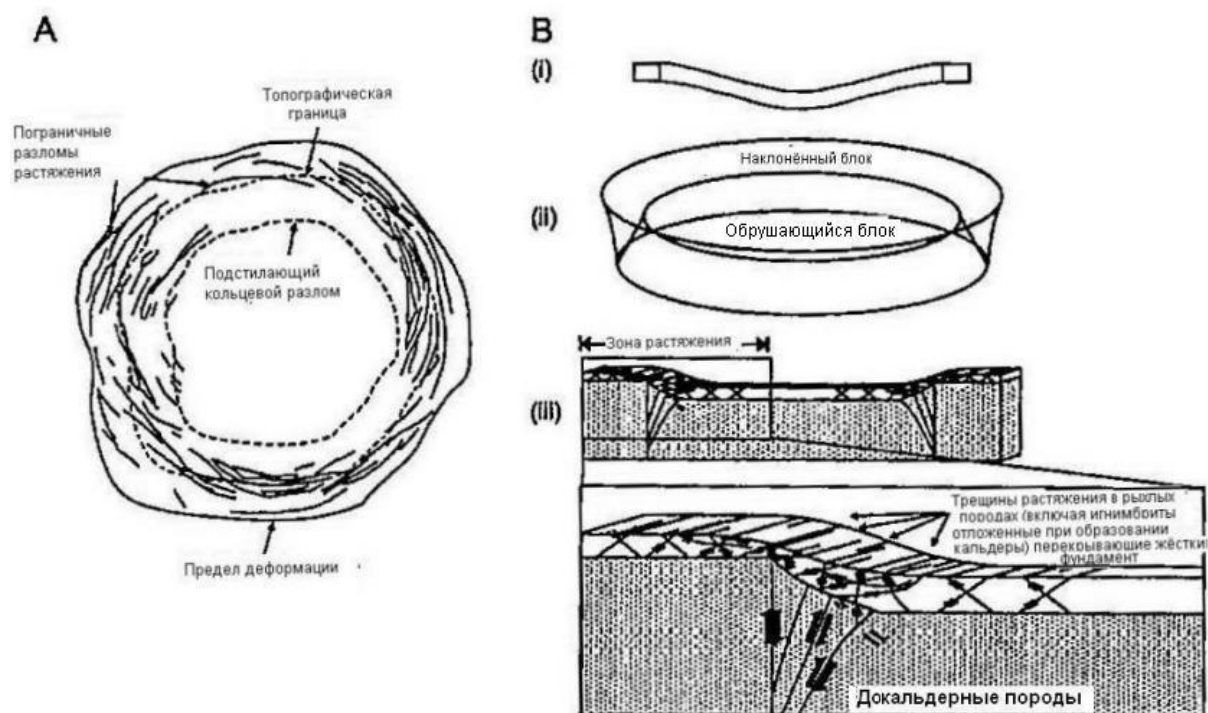


Рис. 6. Образование кальдеры опускания и эволюция кольцевых разломов обрамления. А. Опускание может ассоциироваться с растяжением и флексурой по границе опускающегося блока, что видно по развитию трещин сжатия, В. опускание может быть вызвано: (I) опусканием всего блока коры, перекрывающего магматическую камеру, (II) опусканием только на границе хрупких трещин обрушения, (III) смятием в складки мягких пород, перекрывающих жесткие комплексы докальдерного фундамента. Короткое время опускания всего кальдерного блока делает маловероятным механизм, связанный с опусканием всего кальдерного блока. Опускание по типам (II) и (III) значительно более вероятно [по Cole et al., 2005].

Кальдеры с раздробленным дном (piecemeal calderas) со структурой дна типа «битой тарелки», где блоки дна кальдеры образуют своего рода мегабрекчию. Примерами этого типа являются кальдера Эйра, (Кюсю, Япония) и кальдера Гленко, Шотландия. Предполагается, что амплитуда смещения по разломам обрамления кальдеры на порядок превышает амплитуду смещения по сбросам, смещающим отдельные блоки дна кальдеры. Кальдеры этого типа образуются в процессе обрушения внутрикальдерного блока в ходе кальдерообразующего извержения

2. Кальдеры типа дверной ловушки «трапдор» (trapdoor calderas) характеризуются незаконченным формированием разломов обрамления и возникают при асимметричной просадке блока дна кальдеры.

5. Кальдеры опускания (downsag calderas) образуются в результате постепенного опускания блока, соответствующего дну кальдеры.

6. Воронкообразные кальдеры в котором опускание происходит по воронкообразной (V-образной) системе сбросов.

Поскольку кальдеры образованы под воздействием разнородных процессов современные классификации могут быть обманчивы [Cole et al., 2005]. Любое описание кальдер должно включать данные о количестве кальдерообразующих событий, геометрии опущенного блока, наличии признаков обновленного (резургентного) поднятия и других деформациях и о составе изверженной массы. Динамика геометрии разломов обрамления кальдер в ходе опускания по кольцевой зоне обрамления или в ходе других деформаций (в частности в процессе образования куполообразных поднятий показана на рис. 7 (рис. 7).

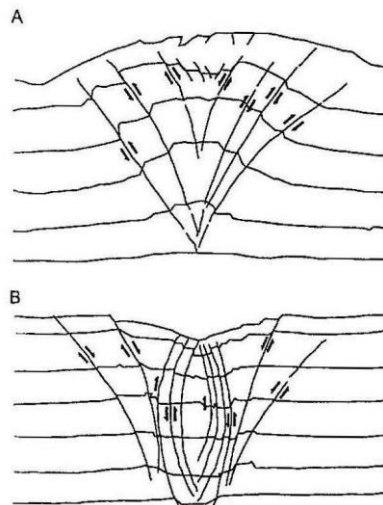


Рис. 7. Разрез через экспериментальный А—опухолообразный купол показывающий развитие обратных сбросов, компенсирующих подъем и В - начало апикального обрушения кальдеры [Marti et al., 1994]

Подход к изучению кальдер и связанного с ними вулканизма в СССР характеризовался резкой обособленностью изучения современных кальдер и древних кальдер в областях древнего вулканизма. Разобщение это негативно сказалось и в исследовании современных структур и особенно – палеокальдер.

К сожалению, большой материал по геологии кальдер и вулканотектонических депрессий, накопленный российскими геологами и по молодым кальдерам Курило-Камчатской зоны и особенно по древним кольцевым структурам территории бывшего СССР остался почти не использованным в обобщающих работах. В первую очередь это конечно связано с языковым барьером. Но, увы, не только. Целая серия работ появилась на английском языке. Это относится в первую очередь к каталогам активных вулканов Камчатки и Курил, изданных Всемирной ассоциацией вулканологии, остался втуне изданный на английском языке обширный обзор русскоязычных работ по туфолавам и игнимбрикам [Cook, ed., 1966], коллективной статье о четвертичных кальдерах Камчатки [Erlich et al., 1972] и сводке по кальдерам Курил и Камчатки в сравнении с кальдерами Алеутских островов и Аляски [Erlich, 1989]. Речь идет не только о русскоязычных работах – в равной мере практически отсутствуют и работы японских авторов. Так что неиспользование российских и японских материалов более всего говорит о кругозоре и этическом уровне самих авторов обобщающих работ. В обобщающей статье, посвященной вулcano-тектоническим структурам В. И. Влодавец (Вложавец, 1954) предложил выделять кальдеры оседания и обрушения. Тем самым он проложил путь к признанию двух типов кальдерообразующих процессов. Он полагал, что кальдеры образуются в результате взрывов или оттока магматического материала. При всеобщем признании роли катастрофических взрывов в образовании кальдер это было большим шагом вперед. Чуть позже решающая роль именно оседания в образовании кальдер четвертичных кальдер Камчатки была показана в статье М.И. Зубина и др. [Зубин и др.,

1971]. В ней была продолжена тенденция признания кальдер оседания (в противоположность кальдерам обрушения. Ныне кальдеры этого типа выделяются как самостоятельный тип под названием «кальдеры оседания» (downsag calderas) [Walker, 1984].

Ниже я останавливаюсь относительно подробно на работах А. Е. Святловского [Святловский, 1971, 1975]. потому, что они в полной мере воплощают традиции Лаборатории Вулканологии в области геологии молодых вулканических поясов. В 1959 году А. Е. Святловский выступил как главный автор Атласа действующих вулканов СССР, изданного по материалам аэрогеологической экспедиции, проведенной по инициативе и под руководством академика А. Н. Заварицкого [Святловский, 1959]. Прекрасно выполненные аэрофото давали яркое впечатление о типах вулканов. Пояснительный текст был выдержан в стиле Международных каталогов вулканов мира, то есть в основном отражал морфологию вулканических аппаратов. Однако эффектность фотографий была так велика, что казалась самодостаточной. Особое внимание уделялось центральной идее А. Е. Святловского – связи вулканизма и обстановки общего поднятия. Атлас был прекрасно издан и стал прекрасным подарочным изданием. Продолжением Атласа явились две другие монографии [Святловский, 1971, 1975]. В них приводилось систематическое описание районов молодого вулканизма различных районов Земли. Поскольку описания такого рода отсутствовали в достаточно многочисленных геологических сводках, они давали концентрированный материал удобный для использования. Описание велось на фоне тектонического районирования Земли и давали автору и читателям оценить степень его соответствия различным тектоническим гипотезам. В то же время описание структуры самих поясов в большинстве случаев осусоовало. На этом фоне этого возник ряд существенных неувязок. Кальдеры рассматривались автором как элемент телескопированного глобального рифтогенеза, то-есть отбрасывался важнейший характерный элемент этих структур – вулканический процесс. То же произошло и с классификацией кальдер. Кальдерам и связанным с ними проблема посвящен особый раздел монографии А. Е. Святловского [1975]. Обсуждение проводится исключительно на базе доказательств того, что именно поднятие является основным процессом кальдерообразования. Все кальдеры делятся на два типа – взрывные кальдеры, близкие к типу Кракатау и кальдеры, связанные с процессом куполообразования, близкие к кальдерам типа Веллес. Более того, А. Е. прямо говорит о кальдерах поднятия. После этих поразительных завлений А. Е. Святловский не мог не изложить общепризнанные подходы к делению кальдер по составу продуктов кальдерообразующих извержений и типу вулканических процессов, но это только запутывало простую и ясную концепцию автора.

Характерной чертой всех этих описаний было то, что приводимые данные рассматривались в рамках морфологически-выраженных вулканов. Анализ структурного положения формирований нижнего яруса полностью отсутствовал. Замечательная идея Биллингса [Billings, 1945] о наличии разных структурных уровней осталась полностью забытой.

Особое место в российской геологической литературе о вулканотектонических структурах занимает монография И. В. Лучицкого [Лучицкий, 1971]. Она представляет собой разительный контраст с книгами А. Е. Святловского. Не отягощенный дурными традициями «негеологичности» описаний, свойственным работникам Лаборатории Вулканологии, он точно знал потребности аудитории к которой он обращался. Поэтому он обстоятельно анализирует геофизические данные, полученные на активных вулканах и в ходе наблюдения над извержениями, давая в руки геологов, работающих в областях древнего вулканизма количественные критерии для реконструкции вулканических процессов геологического прошлого. Наверное в этом состоит секрет огромного спроса, которым пользовалась и продолжает пользоваться эта работа. Не менее важно и то, что И. В. Лучицкий не ограничивается, как это делается в большинстве геологических работ, ссылкой на статьи Андерсона, а приводит развернутый анализ математического аппарата используемого им для реконструкции динамики формирования кольцевых и конических структур. То же относится и к анализу динамике становления интрузивных тел с широким использованием работ Клооса, Биллингса и Баддингтона [Cloos, 1931, Billings, 1945, Баддингтон, 1963].

Крупнейшей по охвату материала по кальдерам работой последних лет, написанной на камчатских данных явилась монография, посвященная четвертичным кальдерам Камчатки [Леонов, Гриб, 2004]. Характер ее вполне отражает состояние изучение вулканической геологии в Институте вулканологии в конце XX, начале XXI века. Наиболее верную оценку положительного вклада этой монографической работы дают сами авторы, попросту говоря о том сколько кальдер ими описано, то есть считая своей крупнейшей заслугой

описание кальдер. Традиционно авторы уделяют специальное внимание вопросам определения понятий кальдера, кратер, вулcano-тектоническая депрессия. К сожалению при обсуждении определений авторы пошли по утрированно-формальному пути попросту признав границей между кальдерами и кратерами диаметр структур равный 2-2.5 км. Было бы куда более плодотворно обсудить степень участия в формировании структур тектонических и вулканических процессов. Можно только пожалеть, что за гранью обсуждения осталась кальдера Авачинского вулкана (возможно потому, что депрессия тут морфологически недостаточно четко выражена в рельефе). А ведь эта структура наиболее изучена комплексом геофизических методов [Штейнберг и др., 1966]. Авторы отвергают предложенное П. Липманом разделение кальдер по характеру структуры их дна. Причина – невозможность (или затруднительность) расшифровки внутренней структуры дна молодых кальдер. Упрекая меня в неполноте описаний четвертичных кальдер Камчатки (в частности отсутствии описания кальдеры Уксичан) авторы попросту не учитывают, что по заказу Геологической службы США мной была выполнена специальная работа посвященная систематическому описанию четвертичных кальдер Камчатки [Erlach, 1989]. Количество описаний четвертичных кальдер, помещенное в этой работе намного превосходит их число в монографии В. Л. Леонова и Е. Н. Гриб. В какой-то степени это может быть объяснено тем, что работа эта была опубликована в формате «open file» и, соответственно, относительно мало доступна за пределами США. Не премину отметить, что кальдера Уксичан была впервые описана не Н. В. Огородовым и его соавторами, а в ходе работ по геологической съемке в 1956 году (партия М. Б. Голубовского, 5 Геол. управление). Но ссылки на производственные отчеты по условиям режима секретности считались, как бы не обязательными. Заглянув в эти отчеты, авторы обнаружили бы немало интересного, в частности, все основные защищаемые положения диссертации Н. Н. Кожемяки. Жаль, что авторы вообще избегают обсуждения любых проблематичных по происхождению вулcano-тектонических структур, таких как Ичинская и Толбачинская вулcano-тектонические депрессии, описание которых можно найти в моей монографии, изданной в 1973 году или Паужетской вулcano-тектонической депрессии, которую ранее И. В. Мелекесцев описал как кальдеру.

Мне не приходится жаловаться на отсутствие ссылок на собственные работы. Их вполне достаточно, а работы по кальдерам были полностью и немедленно востребованы заказчиками – П. Липманом и К. Ньюхоллом, Т. Симкиным. Более того, на фоне того, что само упоминание имени моего было исключено из двухтомной работы «Действующие вулканы Камчатки», авторы проявили широту взглядов и определенную независимость мышления. Со ссылками же на опубликованные работы в монографии Леонова и Гриб вообще происходят странные вещи. Авторы говорят, что в классификации кальдер они следуют работе Х. Вильямса и А. Мак Бёрни [Williams, McBirney, 1979], но работа эта попросту отсутствует в списке литературы. Нет там и статьи В. И. Влодавца о вулканической тектонике. не используются тезисы симпозиума по континентального вулканизма в 1989 году Санта Фе, где мной была развита идея вулcano-тектонических структур на базальтовых вулканах. Но дело не в ссылках, а в другом. А когда авторы ссылаются на первоисточники, то зачастую лучше уж и не делали бы этого. Так, излагая уже упомянутую классификацию кальдер П. Липмана, авторы вместо прямого перевода текста источника перепутали все что только можно было в предлагаемой концепции. Говоря о структуре района БольшеБаннх ключей, авторы попросту опустили наличие здесь кольцевой структуры. Ничем другим кроме небрежности и полного пренебрежения к работам предыдущих исследователей это объяснить нельзя.

В отличие от кратеров, возникающих как результат прочистки подводящего канала, кальдеры формируются при просадке, вследствие понижения давления в верхней части промежуточной магматической камеры. Именно тектоническая отдача, просадка, определяет отличие кальдер от кратеров. Что до отличия кальдер от вулcano-тектонических депрессий, то по определению термина приводимому в wikipedia кальдера и есть один из типов вулканотектонических депрессий. Но где тут было проводить разграничение между кальдерами и вулcano-тектоническими депрессиями, если в работе отсутствует анализ эволюции вулканизма, на этапе, предшествующем кальдерообразованию.

Интересно отметить, что все эти классификации в конечном итоге сходились, так что те же кальдеры всегда попадали в одну категорию (хотя и с различным названием, в зависимости от принятой классификационной схемы).

ОБРАЗОВАНИЕ КАЛЬДЕР И КОЛЬЦЕВЫЕ ДАЙКИ

Идеи о механизме формирования кальдерных депрессий и вулканотектонических депрессий вообще складывались под влиянием признания аналогии поля напряжений при кальдерообразовании полю напряжений, возникающему при образовании конических и кольцевых систем даек [Anderson, 1936, 1937]. Согласно теории Э. Андерсона, радиальные конические разломы возникают при возрастании вертикального давления в глубинном очаге и представляют собой трещины скалывания по поверхностям максимального напряжения. Кольцевые разломы наоборот возникают при уменьшении давления и нередко сопровождаются опусканием участка пород, заключенного внутри кольца (т. е. на поверхности в центре образуется депрессия рельефа, другими словами кальдерная депрессия).

Дайки такого типа впервые описаны в западной Шотландии на островах Скай и Малл в конце XIX века Джаддом [Judd, 1874]. Его исследования были продолжены Гики [Geikie, 1897]. Суммарные описания этих структур, выполненные Ричи, стали классическими и по сведениям, приводимым И. В. Лучицким [Лучицкий, 1971], с момента выхода в свет переиздавались трижды. Последнее издание относится к 1961 году [Richey and Thomas, 1930]. Они были в полной мере использованы в работе Клооса [Cloos, 1936] при создании систематики важнейших вулканических и плутонических типов структур.

Общая схема поля напряжений, возникающего в этом процессе, приведена на рис. 8. Цитировать эту работу и приведенную схему стало признаком хорошего тона. При этом, однако, поскольку работу в оригинале мало кто читал, опускались, отмеченные Андерсоном существенные различия между напряжениями, возникающими при внедрении так называемых даек внешней и внутренней зон. Для понимания механизма образования кольцевых и конических систем даек по Э. Андерсону я отсылаю читателя к широко доступной монографии И. В. Лучицкого [Лучицкий, 1971].

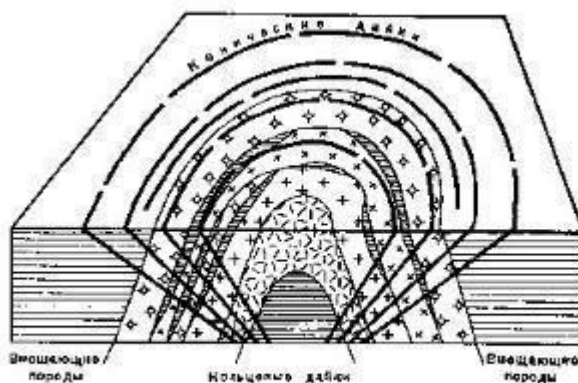


Рис.8. Развитие системы кольцевых и конических даек [Anderson, 1936]

Понять их суть можно, исходя из данных по структуре центральной интрузии Кондёр (Хабаровский край, Россия). На рис. 9 видно, что центральный массив окружен выраженным в рельефе валообразным поднятием вмещающих пород. Здесь вздыбленные вмещающие породы образуют кольцевой хребет диаметром около 8 км при высоте 1200-1387 метров. Центральная часть сложена дунитами, образующими изометричное в плане штокообразное тело. По периферии располагаются карбонатиты в виде зоны мощностью от 0.5 до 45 метров. Они образуют тела, заполняющие две группы сколовых трещин, одна из которых падает к центру массива под углами 35° -- 50° , а другая падает от интрузива под углами 45° - 65° , создавая систему конических даек

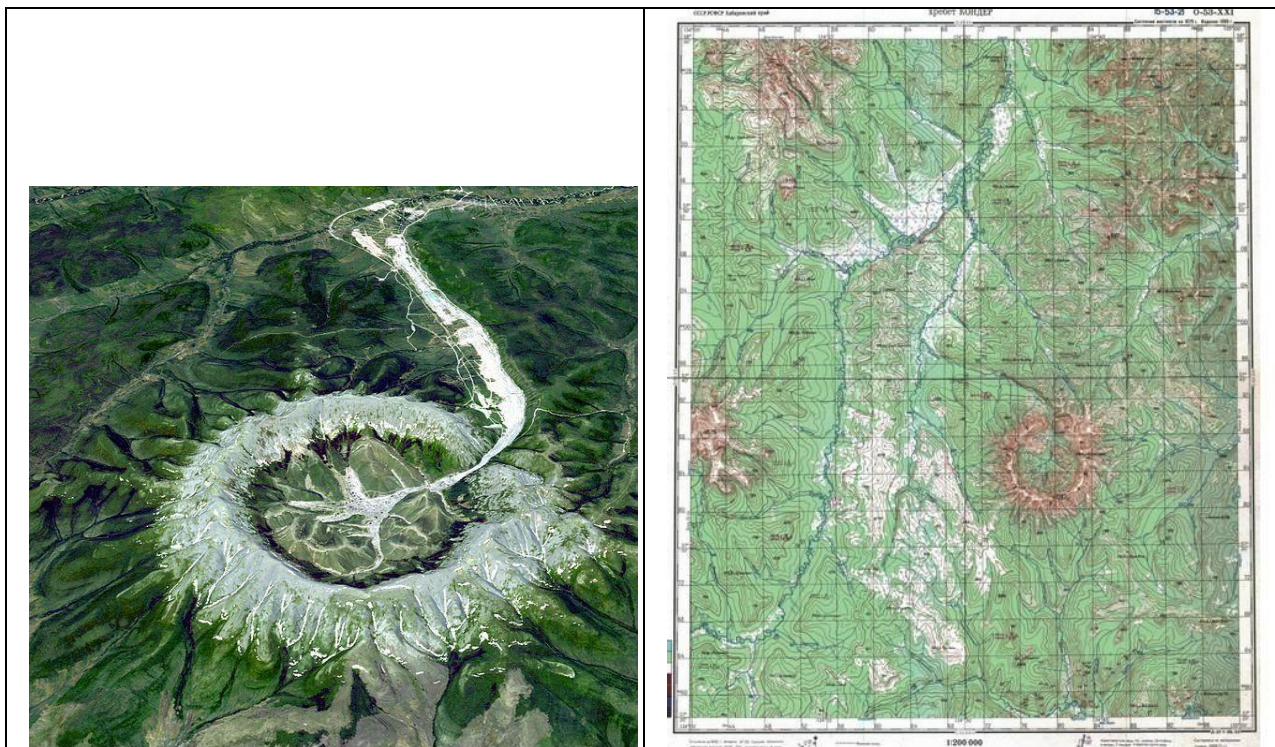


Рис. 9. Кольцевое валообразное поднятие вмещающих глинистых сланцев, окружающее центральный массив Кондёр (светлое кольцо на снимке). Диаметр поднятия 8 км, высота 1200-1385 метров. [<http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%DB%BD%D0%B4%D1%91%D1%80>].

Исключительно важным моментом динамики формирования кольцевых структур (зачастую опускаемым при цитировании работ Андерсона) является то, что инъекция магматического материала связана с поднятием кольцевой зоны вокруг низкого центрального плато. Центральная часть конических залежей приурочена к поднятиям земной коры до 1000-1300 метров [Hills, 1956].

Нет сомнения, что кольцевое поднятие отражает лежащую на глубине систему кольцевых даек, не прорвавшихся к поверхности. Позднее аналогичные системы кольцевых даек были описаны в штате Нью Хэмпшир, США, в Нигерии и во многих других районах мира. Сходные по характеру структуры центрального типа характерны для массивов ультраосновного-щелочного состава (Хибинский массив Кольского полуострова, рис. 10, Томтор в северозападной Якутии, Рис. 11).

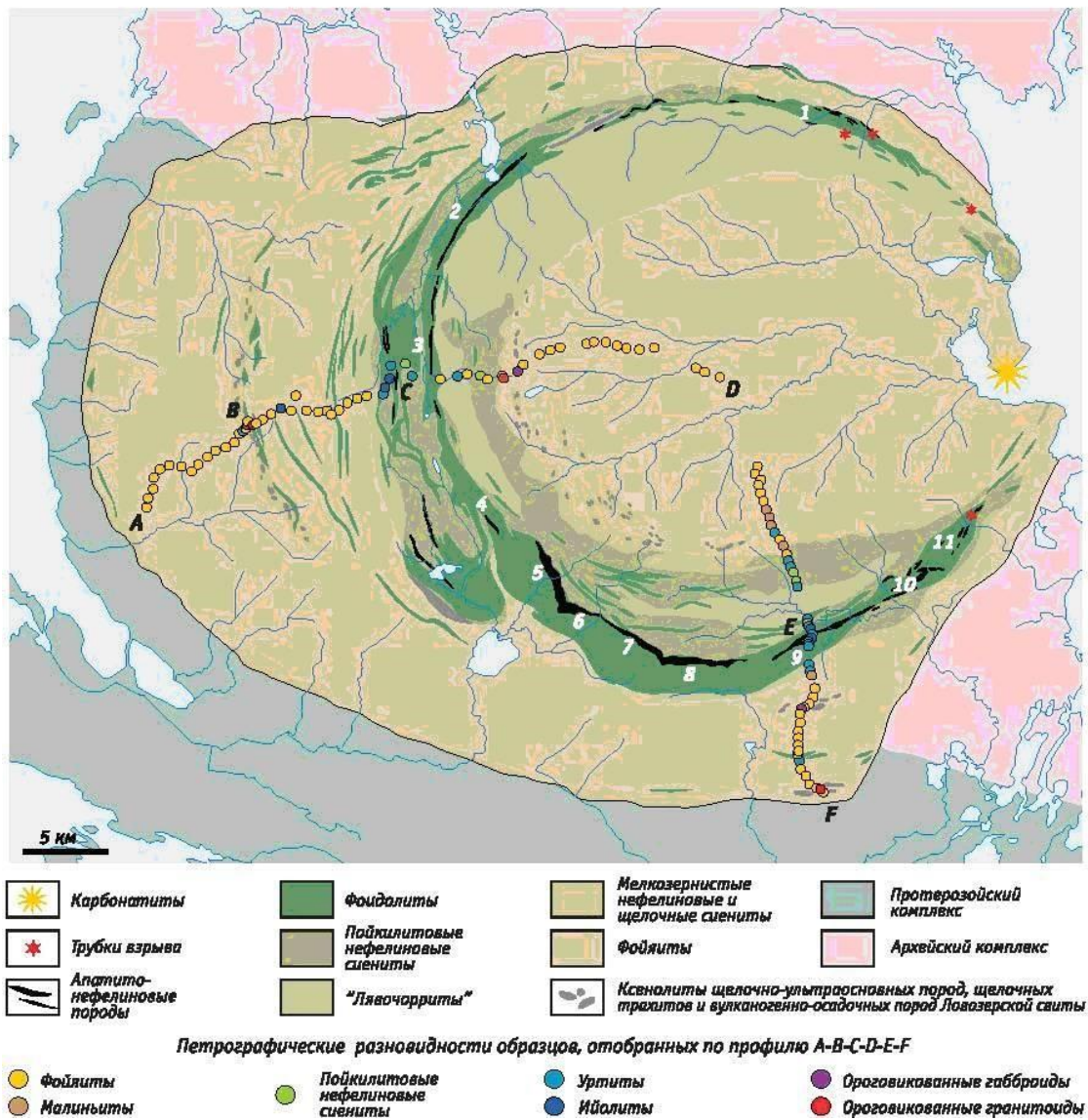


Рис. 10. Хибинский кольцевой массив, Кольский полуостров [Коноплева, 2009].

На рис. 11 показана система кольцевых магнитных аномалий, окружающих карбонатитовое ядро массива Томтор. Аномалии отражают кольцевую систему якупирангит-ийолитовых даек с магнетитолитами.

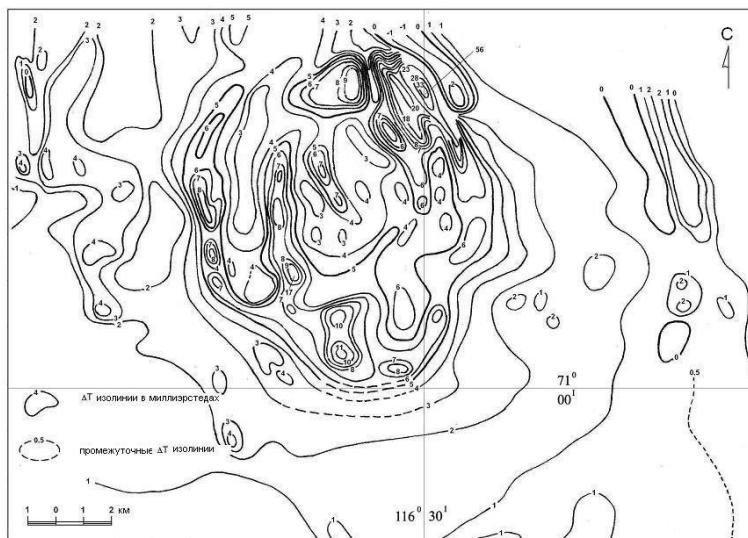


Рис. 11. Дуговая система магнитных аномалий связанная с поясом даек якупирангит-уритового состава с магнетитолитами [Erlich and Tolstov, 2012].

С такого рода коническими системами связано образование сорока кольцевых плутонов Нигерии [Greenwood, 1951] и кольцевых комплексов гранитоидов Охотско-Чукотского вулканического пояса [Устиев, 1965], кольцевые комплексы грабена Осло [Ofte Dahl, 1959], многочисленные кольцевые комплексы Казахстана и других районов бывшего СССР [Лучицкий, 1971].

Аналогичное образование кольцевого валообразного поднятия отмечается по периферии Попигойской вулcano-тектонической структуры [Масайтис и др., 1971]. Надо полагать, что вал отражает положение кольцевой системы даек, не прорвавшихся к поверхности (как и на массиве Кондёр), и совершенно не является подтверждением метеоритного удара, в результате которого по мнению авторов якобы возникла Попигойская депрессия.

Принципиально новый этап изучения образования кальдер был намечен при описании продуктов кальдерообразующих извержений – игнимбритовых покровов и пирокластических потоков [Smith, 1960, Matsumoto, 1963, Арамаки, 1977]. Впервые излияния пирокластических потоков наблюдались при изучении извержения вулкана Новарупта на Аляске, где они затопили речную долину, образовав «Долину Десяти Тысяч Дымов» [Катмаи, 2005]. Считалось, что они образуются при истечении газовой эмульсии, несущей твердые частицы в форме обломков фенокристаллов, ксенолитов и линз вулканического стекла (фьямме), погруженных в спекшийся «туфовый» цемент. Эта идея привела к расшифровке природы так называемых туфолав, таких как Асо-лавы, огромные по масштабам «туфовые покровы», связанные с образованием молодых третичных кальдер Запада США: туфы Бишоп (Калифорния), туфы Бандельер (Нью Мексико). На Камчатке были детально описаны игнимбриты Семьячинского района [Шеймович, 1979]. Важнейший шаг в понимании природы этих образований был сделан, признанием того что они формировались именно в ходе истечения (а не осаждения из палящих туч). Последнее установило двойственный характер этих пород, сходных и с лавами и с пирокластикой. П. Липман, прямо сформулировал что пирокластические потоки представляют собой окно в верхние зоны гранитных батолитов [Lipman, 1984].

Говоря о кальдерах, с которыми связаны покровы кислой пирокластике, следует отдельно остановиться на так называемой кальдере Карымчиной, описанной в верховьях рек Паратунка и Карымчина (Рогозин, 2008). Позднее границы этой структуры были расширены на запад и включили район Больше-Банных источников. Эта новая структура в силу ее огромных размеров была определена как супервулкан и названа Карымшинской кальдерой рис. 12 [Леонов, Рогозин, 2008]. В западной ее части авторы отмечают присутствие ресургентного свода, обрамленного кольцом риолитовых экструзивных куполов. Ранее эта

интрузий. Исследование интрузии Боулдер [Kporf, 1964] показало, что такого рода тела устойчиво существуют в течение нескольких миллионов лет. Продолжительность формирования единичных массивов и рудных формаций в Якутии колеблется от 8—10 до 20 млн. лет [Ненашев, 1979]. Для батолита Сьерра-Невада и Берегового батолита Перу установлено, что многофазные плутоны, имеющие сложную внутреннюю структуру, характеризуются более длительным периодом образования, хотя отдельные фазы кратковременны [Bateman, Eaton, 1967, Cobbing, 1982]. Пульсирующий характер движений в Йеллоустонской кальдере приводит к представлениям о пульсационной подпитке промежуточного магматического очага под кальдерами за счет привноса тепла, принесенного новыми порциями базальтовой магмы. Этим-то и объясняется наблюдающаяся в кальдере Йеллоустон периодическая смена эпизодов опускания и поднятия. В этой сохраняющейся связи с глубинным очагом и состоит, повидимому, вулканоплутонический характер кальдерных формаций. В этом их отличие от чисто вулканических и чисто плутонических (для интрузий).

Наблюдения в Узонско-Гейзерном депрессии Камчатки позволили развить эту идею и говорить о том, что подпитка промежуточного очага свежими порциями осуществляется за счет привноса тепла, и главным агентом теплопередачи является базальтовая магма. Суммируя данные по истории развития корового очага в Узонско-Гейзерном районе, В. Л. Леонов и Е. Н. Гриб [Леонов и Гриб, 2004] показали, что очаг в четвертичное время испытывал сравнительно быстрые (десяtkи тысяч лет) эпохи разогрева и остывания, связанные с периодическим внедрением высокотемпературной базальтовой магмы. Следовательно, коровый очаг выступал как аккумулятор тепла и обеспечивал тепловое питание гидротермальных систем. Временной разрыв между внедрением базальтов и активизацией кислого вулканизма и гидротермальной деятельности, исчислялся не многими десятками и сотнями тысяч лет, а гораздо более короткими интервалами. Данные по изучению вулкана Аскья в Исландии показали, что он мог измеряться годами. Расчет суммарного количества тепла показало, что базальтовый вулканизм является в них самым мощным процессом и в 6-7 раз превышает сумму тепловой мощности кислого вулканизма и гидротерм [Белоусов, 1978]. Позднее это положение в общей форме было развито в работе [Эрлих, Белоусов, 2011].

Общая схема подпитки промежуточного очага за счет поступления новых порций базальтовой магмы показано на рис. 13.

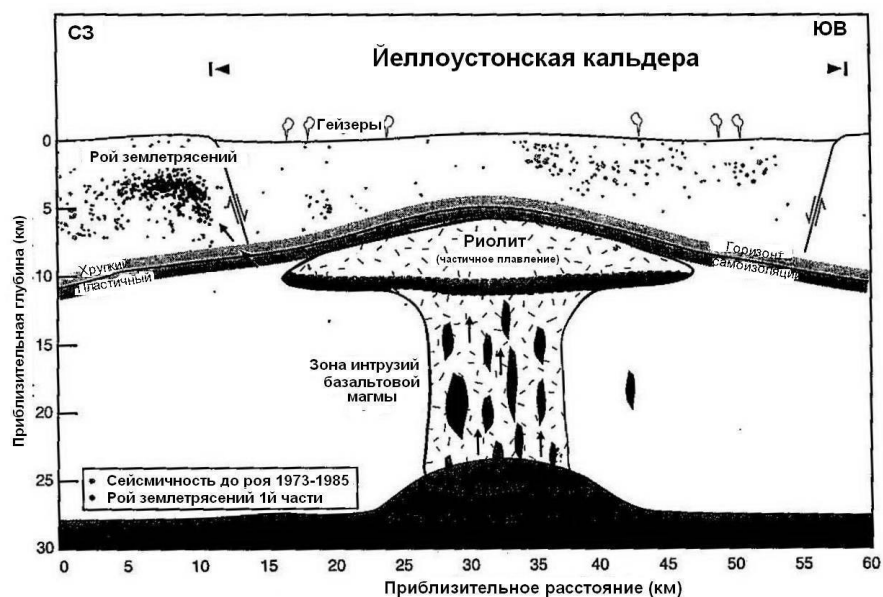


Рис. 13. Схема структуры кальдеры Йеллоустон и подпитки ее теплом за счет повторяющегося поступления базальтовой магмы. Вероятная модель землетрясений, вызвавших миграцию гидротермального и/или магматического флюида. [Waite and Smith, 2005].

Рисунок показывает путь освоенных флюидов через самоизолированный слой или риолитовую магму, через возможный вязкую кору и хрупкую раздробленную кору вне кальдеры. Изменение напряжения, вызванное флюидами, генерирует землетрясения, очаги которых мигрируют на северо-запад.

Большая практическая и теоретическая значимость изучения кальдер привели к тому, что с момента введения этого термина многие ученые обращались к вопросам их классификации и генезиса [Esher, 1930, Williams, 1941, Williams and McBirney, 1979, Lipman, 1995, Влодавец, 1954, Святловский, 1971, 1975]. Неоднократно предпринимались попытки обобщения опыта исследования этих структур. Достаточно назвать специальную конференцию на эту тему, проведенную в Ливерпуле в 1997 году [Symposium, 1997]

В исключительно ёмкой обобщающей статье П. Уокера [Walker, 1984] была отмечена важная черта кальдерного вулканизма – его повторяемость (имплементарность). В кальдерах часто возникают центры посткальдерного вулканизма, в которых в свою очередь в процессе эволюции появляются кальдеры меньшего размера, зачастую взрывного происхождения. Неоднократная повторяемость кальдерообразующего события прекрасно иллюстрируется наличием озер в кальдерах. Например на рис. 14 можно видеть Курильское озеро в одноименной кальдере, На рис. 15 показана плоская поверхность дна кальдеры Узон. При бурении в кальдерах отмечается неоднократное повторение прослоев игнимбритов, фиксирующих повторяющиеся кальдерообразующие извержения.

Другие примеры «возобновляющихся», имплементарных кальдер представляют собой вулкан Крашенинникова в восточной вулканической зоне Камчатки (рис.16), вулкана Заречный в Центральной Камчатской депрессии (рис.17), вулкана Заварицкого на Курилах (рис.18), гнездовая кальдера вулкана Ксудач на Южной Камчатке (рис. 19, 20).

Еще одним примером такой же «возобновляющейся кальдеры» является кальдера Курильского озера. Работами В. И. Белоусова и С. П. Белоусовой [1990] было показано, что после основного кальдерообразующего извержения, в связи с которым образовалась кальдера Курильского озера, тут имели место серия выбросов кислой пироклаستيку, в результате которых происходила просадка новых участков. С одним из таких выбросов, происходившим из района современной экстрезии Дикий Гребень, связано образование пемз знаменитых Кутхиных Батов (рис. 21). Это не отмечено на схеме, приводимой в работе В. Л. Леонова [1981]. К сожалению, это не удивительно – ведь на этой схеме не отмечена и сама кальдера Курильского озера. Это сочетание детальности с неряшливостью в отношении к фактам характерны для этого автора.

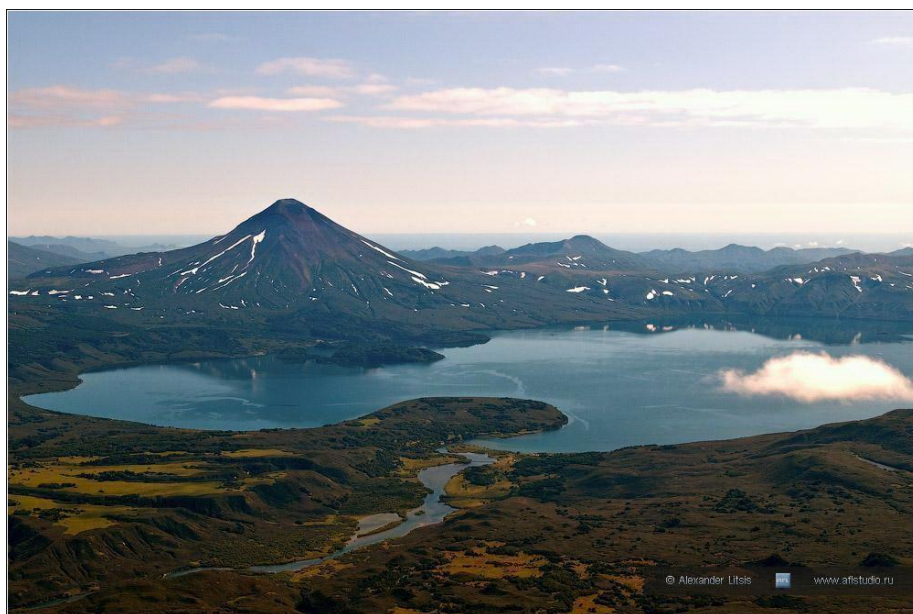


Рис. 14. Курильское озеро в одноименной кальдере (фото А. Литсис)



Рис. 15. Поверхность дна кальдеры Узон (фото из интернета. Автор неизвестен)



Рис. 16. Перспективное аэрофото вулкана Крашенинникова, Восточная Камчатка. За вулканом виден борт кальдеры, в которой он расположен. Диаметр кальдеры 10 км. Диаметр самого крупного кратера на вершине северного конуса вулкана - 2 км (фото Н. П. Смелова, из Леонов и Гриб, 2004).



Рис. 17. Спутниковый снимок вулкана Заречный, Центральная Камчатская депрессия.



Рис. 18. Перспективный снимок с шаттла кальдеры вулкана Заварицкого, Курильская островная дуга.

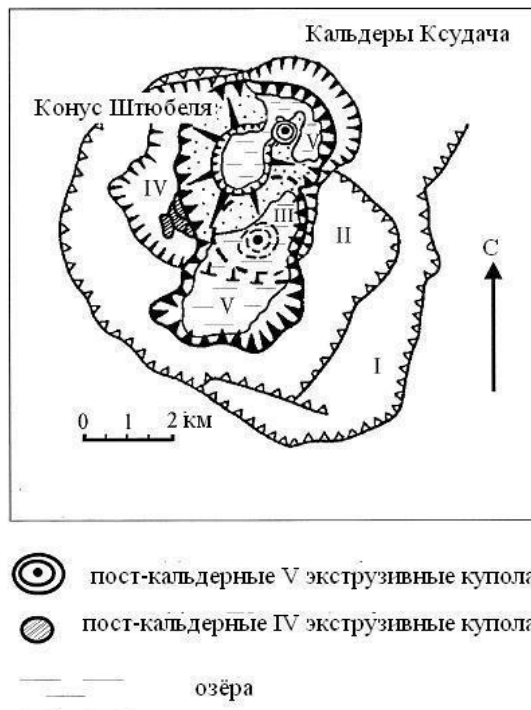


Рис. 19. Гнездовая кальдера вулкана Ксудач [Volynets et al., 1999]. Руины разновозрастных кальдер указаны римскими цифрами. I и II - позднелиценые кальдеры. IV и V – кальдеры голоценового времени. Внутри кальдеры V расположен кратер Штюбеля с которым связано извержение 1904 года.



Рис. 20. Гнездовая кальдера вулкана Ксудач (перспективное аэрофото).



Рис. 21. Пемзы Кутхиных Батов (фото В. И. Белоусова)

Другая важная черта кальдерных вулканических комплексов – их соотношение с докальдерным вулканизмом. Кальдеры зачастую венчают вулканы докальдерных комплексов. Но в не меньшем, если не подавляюще большем, количестве они носят наложенный характер, срезая разнородные по возрасту и генезису породы докальдерных толщ.

Наложенное положение кальдер и вулкано-тектонических депрессий по отношению к фундаменту однотипно. Так, вулканическая депрессия Курильского озера в южной и юго-восточной частях непосредственно наложена на третичные породы, а в северо-западной и северной частях срезает нижнечетвертичные базальт-андезитовые плато. Аналогичная картина на внутренней кальдере вулкана Ичинского; а Ичинская вулкано-тектоническая депрессия срезает еще более разновозрастные структуры: гнейсы Срединного массива на юге, кремнистовулканогенные толщи верхнего мела на юго-востоке, неогеновые вулканогенные толщи на востоке, нижнечетвертичные базальтовые плато на севере и северо-востоке, третичные осадочные толщи Западно-Камчатского тылового прогиба на западе. Не менее показательна и кальдера Хангар, целиком образованная в гнейсах Срединного массива Камчатки. Большая часть кальдер и вулкано-тектонических депрессий Восточной и Южной Камчатки срезает разнотипные и разновозрастные вулканические постройки и базальт-андезитовые плато, сформировавшиеся в нижне-среднеплейстоценовый этап вулканизма, и частично выступы плиоценовых вулканических толщ. Таковы вулкано-тектонические депрессии Узона-Гейзерной, Большого Семячика, Опалы, Крашенинникова, Жупановская и Карымская кольцевые структуры и т. д. То же можно сказать и о других районах кислого вулканизма. Вулкано-тектоническая депрессия Токачи (Хоккайдо) непосредственно наложена на складчатые комплексы орогенической системы Хидака, кальдеры Ата и Эйра (Кюсю) срезают дислоцированные отложения комплекса Шиманто, кальдера Асо наложена на разнородные центры плиоценового вулканизма, грабен Таупо-Роторуа — на граувакки J_3 — S_1 и осадочные комплексы третичного возраста.

ВОПРОСЫ ПЕТРОЛОГИИ КАЛЬДЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Вопросы петрологии кальдерного вулканизма связаны с двумя разными комплексами:

1. Комплекс пород, сформировавшийся в период кальдерообразующего извержения;
2. Комплекс, связанный с посткальдерными эруптивными центрами.

Момент кальдерообразующего извержения отвечающий заложению промежуточного очага в коре, либо его опустошению, соответствует времени резкого изменения физико-химического состояния системы. С этого момента относительно гомогенное магматическое вещество заменяется газовой эмульсией, в которой во взвешенном состоянии находится кристаллическая фаза. Одновременно прекращается гомодромная тенденция

эволюции базальт-андезитовых расплавов. Начиная с этого момента посткальдерный вулканизм развивается в виде коротких антидромных циклов [Katsui, 1963, Эрлих, ред., 1966].

Ниже рассматриваются две группы данных, касающиеся петрологии кальдерных комплексов.

Петрохимия. На материале по петрохимии молодых вулканитов Курило-Камчатской вулканической зоны [Эрлих, ред., 1966] было показано, что эволюция докальдерных вулканических комплексов для единичных докальдерных вулканов и вулканической зоны в целом однотипна. Она характеризуется постоянным накоплением анортитового компонента в расплавах. На диаграмме А. Н. Заварицкого она отражается в наличии характерного колена на вариационных кривых в проекции на плоскость asb .

Петрохимические особенности этой фазы аналогичны базальт-андезитовым сериям. Она одинаково проявляется и при унаследованном, и при наложенном положении центров вулканизма. Однако образование столь крупных масс кислых вулканитов за счет простого фракционирования базальтоидных магм невозможно. Приуроченность центров кислого вулканизма к районам с различным строением коры, в том числе к тем, где гранитный слой коры отсутствует, положение этих центров во фронтальных зонах, где гранитный слой наименее развит, вместе с перечисленными особенностями данного комплекса указывают на подкорový его источник.

На петрохимических диаграммах в первую очередь привлекает внимание внезапное резкое уменьшение в наиболее основных продуктах кислого вулканизма содержания щелочей и, соответственно, возрастание содержания анортитового компонента сравнительно с крайними дифференциатами базальт-андезитового ряда. Наличие на диаграмме А. Н. Заварицкого на вариационных кривых характерных «колен», о которых говорилось выше, напоминает пантеллеритовую тенденцию в некоторых ассоциациях щелочных пород [Заварицкий, 1950]. Подобная картина наблюдается в ходе развития отдельных вулканов (Горелый, Зими́на, Шивелуч, Корьякский вулканы на Камчатке) (рис. 22) и геологически связанных групп вулканических аппаратов, из которых одни Ключевская сопка представляют линию развития до «колена», а другие — после него (вулкан Безымянный).

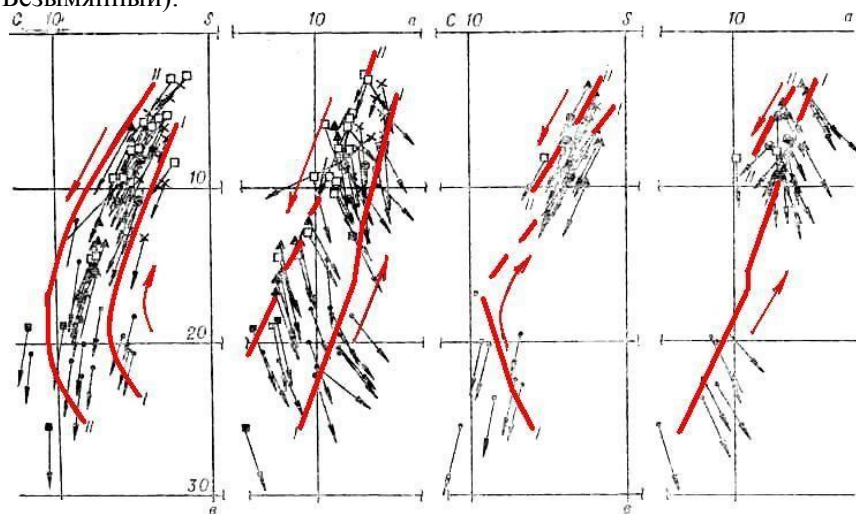


Рис. 22. Петрохимическая диаграмма некоторых центров кислого вулканизма на Камчатке по методу А. Н. Заварицкого [Эрлих, ред., 1973]. I — кальдера Семячик; II — кальдера Узон; III — кальдера вулкана Горелого. 1 — докальдерные базальты; 2 — игнимбриты главной кальдерообразующей стадии; 3 — посткальдерные купола; 4—5 — игнимбриты II и III посткальдерных стадий; 6 — посткальдерные базальты; 7 — вариационные линии; 8 — направление дифференциации.

Изменение соотношения щелочей и полевошпатовой извести сопровождается другими резкими изменениями химизма: уменьшается содержание кальция и железа, появляются породы, пересыщенные алюминием. Изменяются и ход и характер вулканического процесса. В аппаратах рассматриваемого типа этот процесс представлен серией коротких антидромных циклов, например, последние извержения вулканов

Шевелуча и Безымянного [Горшков, Богоявленская, 1965]. После выброса риолитовых пемз в районе Курильского озера сформировалась андезито-дацитовая экструзия Дикий Гребень. И. Кацуи [Katsui, 1963] отмечает, что это типичная особенность посткальдерного этапа развития всех вулканических аппаратов.

Щелочность наиболее кислых вулканических продуктов, формирующихся на первых стадиях антидромного цикла, как правило, соответствует нормальному ходу развития исходной базальтовой магмы, т. е. равна или чуть больше щелочности пород последних фаз развития вулканов базальт-андезитовой серии. Обычно в этих породах не отмечается и пересыщенности алюминием. При появлении же в антидромном цикле более основных пород количество щелочей убывает, причем кривая убывания не соответствует нормальной кривой развития вулканов мантийного питания. При этом и возникают все характерные особенности химизма, отмеченные выше.

Важная особенность извержений вулканов рассматриваемого типа — резкое возрастание количества газовой фазы и ее роли в динамике вулканического процесса. Обычными становятся мощные взрывы катмайского и пелейского типа, вроде тех, что наблюдаются при современных извержениях Безымянного и Шивелуча.

Сохранение вулканическими продуктами, связанными с вулканами данного типа, основных особенностей химизма, характерных для базальт-андезитовых серий провинции в целом (соотношения K_2O и Na_2O , избыток алюминия, малое количество железа и титана и т. д.), и закономерное образование вулканов этого типа в конце вулканического цикла свидетельствуют о генетической связи между ними и вулканами мантийного питания.

Ко второй группе проявлений кислого вулканизма относится посткальдерная стадия формирования пемзово-игнимбритовых покровов и роста экструзивных куполов, а также образованные в заключительные фазы вулканического цикла самостоятельные стратовулканы с центральной экструзией и многочисленными латеральными куполами. Особенности кислого вулканизма этого типа сравнительно с базальт-андезитовым вулканизмом были выявлены на примере Курило-Камчатской провинции [Эрлих, 1966]. Они полностью сохраняются во всех других вулканических провинциях западной части Тихоокеанского кольца и имеют, следовательно, общий характер.

Диаграммы $MgO - Fe_2O_3 + FeO - Na_2O + K_2O$ показывают, что в ходе антидромного цикла в вулканах рассматриваемого типа резко возрастает сумма окислов железа. В некоторых вулканах (Безымянный) на последних стадиях дифференциации убывает содержание железа. Параллельно с появлением описанного «колена» изменяется величина $alkal$, что, возможно, свидетельствует о значительной роли аккумуляции плагиоклазов в образовании рассматриваемой группы пород.

Сохранение вулканическими продуктами, связанными с вулканами данного типа, основных особенностей химизма, характерных для базальт-андезитовых серий провинции в целом (соотношения K_2O и Na_2O , избытка алюминия, малого количества железа и титана и т. д.), и закономерное образование вулканов этого типа в конце вулканического цикла свидетельствуют о генетической связи между ними и вулканами мантийного питания.

В то же время указанные петрохимические особенности нельзя объяснить нормальным ходом дифференциации базальтовой магмы, для эволюции которой всегда характерно прогрессирующее нарастание содержания щелочей от основных пород к кислым. Диаграммы $MgO - Fe_2O_3 + FeO - Na_2O + K_2O$ показывают, что область исходной магмы для вулканов данной группы смещается как по отношению к области исходной базальтовой магмы, так и по отношению к стандартным линиям ее дифференциации [Kuno, 1959, 1960, Эрлих, 1966;]. Резко возрастает «степень порфировости» пород этой посткальдерной фазы вулканизма. Количество вкрапленников в среднем составляет 5—10%, доходя в единичных случаях до 15—25% общего объема. Одновременно на последних стадиях формирования этого комплекса отмечается экструзия почти чистых стекол, отвечающих наиболее кислым породам — риолитам. Процесс аккумуляции кристаллической фазы и фракционирования в результате выжимания под давлением чистого стекла — ведущий процесс дифференциации на этой стадии.

Для определения времени становления промежуточного магматического очага очень важно отметить, что особенности посткальдерного комплекса возрастают во времени. В первых извержениях, связанных с развитием комплекса, они проявляются слабо (или не проявляются вообще). Со временем они усиливаются и наиболее яркую форму приобретают при завершающих выбросах пемз и росте наиболее поздних

экструзивных куполов. В породах посткальдерного комплекса обычно присутствуют плавленые ксенолиты пород фундамента, особенно гранитоидов [Масуренков, 1969; Иванов, 1970], полностью отсутствующие в продуктах кальдерообразующей фазы кислого вулканизма. Плавленые ксенолиты гранитоидов и вмещающих пород на Хангаре сосредоточены в породах центрального купола и пемзах заключительной фазы вулканизма. На Узоне ксенолиты такого рода связаны с пемзами и экструзивными куполами, сформировавшимися в посткальдерную фазу. Такое же положение занимают многочисленные ксенолиты Ичинского вулкана. При этом гранитоиды ксенолитов имеют состав, очень близкий к составу вмещающих пород. По данным Б. В. Иванова, ксенолиты гранитоидов на Карымском вулкане обладают теми же петрохимическими особенностями, что и описанная посткальдерная фаза вулканизма.

Все эти данные, как и связь комплекса с кальдерами, показывают, что особенности посткальдерного вулканизма отражают кристаллизацию в интрузивных камерах в земной коре, служащих периферическими очагами, питающими вулканы. Систематический характер отклонений от нормального хода кристаллизации в петрохимических особенностях этого комплекса показывает, что главными факторами определяющими его специфику являются не процессы ассимиляции, а, по-видимому, аккумуляция кристаллической фазы, газовый перенос и фильтпрессинг. Подтверждает это и отмеченное Л. Л. Леоновой, Н. И. Удальцовой и Б. В. Ивановым [1969] близкое содержание редких и радиоактивных элементов в докальдерном базальт-андезитовом комплексе Карымского вулкана, его посткальдерных дацитовых лавах и ксенолитах гранитоидов. По-видимому, степень ассимиляции является функцией времени существования очага в коре, а для средне-верхнечетвертичных кальдер время это очень мало. Как говорилось выше, геофизические данные свидетельствуют о том, что кровля питающих интрузий под кальдерами зачастую находится на глубине свыше 15 км, т. е. в базальтовом слое. Это говорит о невозможности формирования данных комплексов за счет расплавления гранитного слоя коры.

Минералогия. Для кислых вулкаников обычна ассоциация минералов вкрапленников кварц — кислый плагиоклаз — гиперстен. Отсутствие калиевого полевого шпата как в виде фенокристаллов, так и в мезостазисе указывает на температуру застывания породы, превышающую минимум в четверной системе плагиоклазы — калиевый полевой шпат — кварц. Обычная форма нахождения калиевого полевого шпата — тонкодисперсные кварц-полевошпатовые выделения в жеодах, равномерно распределенных по некоторым разностям дацитов и риолитов, образующих экструзивные купола. Образование кварц-полевошпатовых агрегатов, выполняющих жеоды, связано с газовым переносом и имеет характер автометасоматоза.

Наиболее обычными минералами вкрапленников кислых вулканических пород являются плагиоклазы. Статистическое изучение плагиоклазов из вкрапленников, проведенное О. Н. Вольным [Вольнец, 1969] и позднее по другим районам автором, показало идентичность их составов в ряду базальт—андезит—кислые вулканические породы (40—90% анортита). Для плагиоклазов 40—60 (максимум на кривой распределения № 51—55) устанавливается интрателлурическое происхождение. Плагиоклазы № 70—90 встречаются в виде корродированных ксенокристаллов, иногда образующих внутренние зоны фенокристаллов, обрастающие более кислыми плагиоклазами поздних генераций. Количество их в породах уменьшается по мере возрастания их кислотности. Ксенокристаллы отличаются обилием включений стекла, придающих им ситовидную структуру. Степень упорядоченности плагиоклазов 0,0—0,30 (среднее 0,15—0,20). В липаритах появляются дополнительные генерации более кислых плагиоклазов (№ 20—40), а степень упорядоченности плагиоклазов № 40—60 в них резко выше обычной (0,725—0,55, среднее 0,40—0,45).

Кварц обычно встречается в виде оплавленных зерен. Типично ксеногенный облик зерен кварца позволяет уверенно говорить о том, что они сформировались в первые этапы кристаллизации или захвачены из вмещающих пород. Тем существенней данные о температурах ранних стадий кристаллизации кварца, полученные для пемз вулкана Хангар. Гомогенизация первичных включений состава газ — стекло в кварце происходит при температурах 1190—1260° С.

Второй стадии роста отвечают включения состава стекло — газ с температурой гомогенизации 800—830° С. При этих же температурах гомогенизируется большая часть вторичных включений, залечивающих трещины в зернах. Параллельно со снижением температуры эволюционирует состав газов включений — от состава азот+редкие газы, углекислота и «кислые газы» ($H_2S+SO_2 + SO_3 + NH_3 + HCl + HF$) для высокотемпературных включений к исчезновению азота и преобладанию углекислоты с присутствием «кислых газов» во включениях второй стадии [Бакуменко и др., 1970]. Эти данные позволяют полностью

исключить захват кварца из вмещающих пород и говорить о нем как о характерном минерале ранних стадий кристаллизации кислых вулканитов. В игнимбритах и многих риолитовых экструзиях (в частности, в обсидианах экструзивных куполов) кварц обычно отсутствует. Наиболее обычен кварц для дацитовых и риолито-дацитовых экструзий и пемз посткальдерной фазы развития кислого вулканизма.

Среди цветных минералов, как правило, преобладают пироксены — гиперстен и авгит. В незначительных количествах во всех разностях кислых вулканических пород вплоть до самых кислых присутствует оливин (гиалосидерит). По мере возрастания кислотности породы количество оливина убывает, и в наиболее кислых разностях (липариты, обсидианы) он фиксируется как аксессуарный минерал. Гиперстен присутствует в количестве 2—3% как в виде вкрапленников, так и в основной массе. $2F=54—70^\circ$, чаще всего $62—67^\circ$, что соответствует гиперстену Fs_{35-45} по номенклатуре А. Польдерваарта. В отдельных случаях отмечаются гиперстены Fs_{85} , в частности в дацитах Асио (Япония), в ассоциации с альмандином и фаялитом во вкрапленниках [Купо, 1966]. Железистость клинопироксенов в андезито-дацитах и дацитах (Fs_{13}) меньше, чем в андезито-базальтах и базальтах (Fs_{14-18}). Общий состав клинопироксенов соответствует формуле $Wo_{45}, En_{42}, Fs_{13}$. Амфиболы и биотит относительно редки и встречаются, как правило, в породах экструзивных куполов. Хотя аксессуарные минералы в кислых эффузивах почти не исследованы, обращают на себя внимание частые находки граната (альмандина). Как показано А. А. Маракушевым, гранаты альмандин-пиропового ряда из кислых эффузивов занимают промежуточное положение между гранатами из метаморфических комплексов и малоглубинных интрузий гранитоидов [Маракушев, Тарарин, 1964]. Особый интерес представляет находка Ф. Ш. Кутыевым в немагнитной фракции пемз вулкана Хангар (Срединный хр. Камчатки) муассанита (SiC). Вплоть до последнего времени этот минерал встречался лишь в метеоритах и кимберлитах. Он считается индикатором высоких давлений. Недавно муассанит описан и в кислых вулканических породах Акбастау-Кусмурдинской кальдеры [Каипов, Баймуратов, 1970].

Перечисленные основные особенности минералогического состава кислых вулканитов дают возможность еще раз подтвердить заключение об их «базальтоидности». Но в редких случаях, когда центры кислого вулканизма расположены непосредственно на породах метаморфического комплекса (например, Хангар), реликтовые минералы гнейсов и кристаллических сланцев в них отсутствуют. Приведенные данные говорят о высоких температурах и давлениях ранних стадий кристаллизации кислых магм, что наряду с другими доводами свидетельствует об их первично подкоревой природе.

Для того чтобы правильно понять природу кислого вулканизма, надо учесть данные о вспышках кислого вулканизма в дочетвертичное время. В зонах поднятий, прилегающих к вулканическим поясам, происходит внедрение массивов гранитоидов. Речь идет именно о крупных массивах гранитоидов, интрузирующих в зонах поднятий, параллельных вулканическим поясам, а не о субвулканических интрузиях в пределах вулканических поясов, представляющих собой вскрытые эрозией глубинные части подводящих каналов. Так, на Центральной Камчатке (обрамление Срединного массива, Начикинская горст-антиклинальная зона) в периоды, соответствующие времени проявления миоценового вулканизма, формируются интрузии габбро-гранодиоритовой и гранодиорит-порфириновой формаций [Волынец, Колосков, Флеров, Шилин, 1968]. Периоду неогенового кислого вулканизма на Кюсю и в Юго-Западной Японии отвечает внедрение комплекса мелких интрузий гранитоидов во внешней невулканической зоне, где развит геосинклиальный комплекс Шиманто. Аналогична картина и в орогенической системе Хидака. Данные определений абсолютного возраста указывают на узкий временной интервал формирования этих интрузий, что отвечает закономерности проявления кислого вулканизма в виде коротких катастрофических вспышек.

Кальдерообразование является завершающим моментом развития докальдерного вулканизма. Это хорошо видно на примере кальдеры Узон, где кальдера формируется после завершения формирования докальдерного щитового вулкана (рис. 23).



Рис. 23. Кальдера Узон. Перспективный аэрофотоснимок. Видно, что кальдера срезает верхушку докальдерного щитового вулкана, сложенного существенно лавовым комплексом пород базальт-андезитобазальтовой серии. Фото Филип Кайл.

Последовательное опускание кальдерного блока (в противоположность катастрофическому обрушению) хорошо выражено в серии сбросов обрамления кальдеры (рис. 24).



Рис. 24. Кальдера Академии Наук. Видна последовательная просадка блока кальдеры в результате чего на кольцевых разломах ее обрамления отмечается серия ступенчатых сбросов. Перспективное аэрофото Б. В. Иванова

Состав внутрикальдерных комплексов целиком зависит от соотношения скорости опускания кальдерного блока и характера и состава аккумулируемых тощ. Последнее зависит от типа посткальдерной эруптивной активности – наличия пеплопадов, излияний лав, выжимания экструзивных куполов. В случае преобладания опускания в кальдере

образуется озеро, что хорошо видно на примере Курильского озера в одноименной кальдере (рис. 12), озера в кальдере Академии Наук (рис. 24). После накопления осадочно-вулканогенной толщи рельеф в пределах опущенного блока представляет собой плоскую равнину (см. фото поверхности кальдеры Узон – рис. 23). В случае преобладания посткальдерных лавовых излияний в кальдере образуется существенно-лавовый стратовулкан, как это видно на примере Карымского вулкана в одноименной кальдере (рис. 25).



Рис. 25. Кальдера Карымского вулкана. Видно, что кальдера Карымского вулкана срезает более древнюю кальдеру Двор. Перспективное аэрофото Б. В. Иванова

В случае внедрения на посткальдерном этапе вулканической активности экструзий кислого состава на дне кальдеры вырастают характерные экструзивные купола. Их можно видеть на примере купола, образующего остров Сердце Алаида (рис.26) в кальдере Курильского озера, и сложной экструзии Дикий Гребень (рис. 27) в Паужетской вулканотектонической депрессии.



Рис. 26. Экструзивный купол Сердце Алаида в кальдере Курильского озера (фото из интернета. Автор неизвестен)

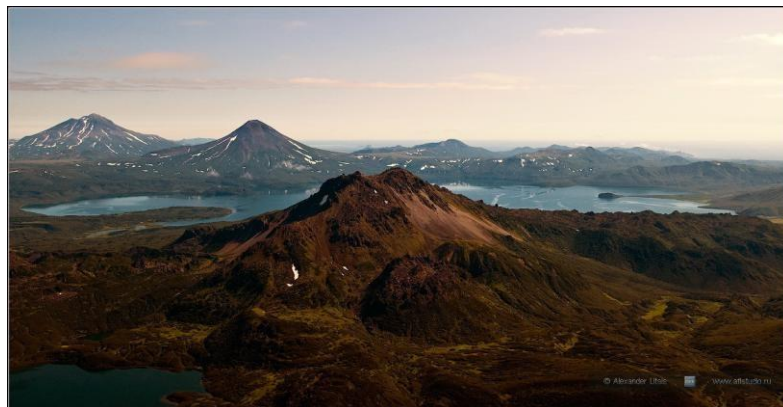


Рис. 27. Сложный экстремивный купол Дикий Гребень в Паужетской вулcano-тектонической депрессии (фото А. Листис)

ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕПРЕССИИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ

В практике утвердилось использование термина «вулcano-тектоническая депрессия» в отношении крупных кальдер типа Кракатау, особенно тех из них, что срезают несколько различных центров предкальдерной вулканической активности или накладываются на разнородный фундамент. В обзорной работе Вильямса как примеры вулcano-тектонических депрессий рассматриваются районы крупных просадок, связанных с центрами кислого вулканизма на Северном острове Новой Зеландии и на Суматре близ озера Тоба [Williams, 1941]. Вильямс выделяет вулcano-тектонические депрессии как особый тип структур, отличающийся от кальдер главным образом размерами. Тот же подход характерен и для Геологического «словника» [Bates and Jackson, eds., 1980]. Характерно употребление термина в отношении Узон-Гейзерной депрессии, в противоположность кальдерам Узон и Гейзерной [Леонов, Гриб, 2004], а также для сходных с Узон-Гейзерной депрессией структур – кальдеры Масайя (Никарагуа) и озера Атитлан (Гватемала). Во всех этих случаях с просадкой связаны массовые выбросы игнимбритов, как и в кальдерах типа Кракатау. Именно к этим структурам относится определение вулcano-тектонических депрессий, приводимое в словаре наук о Земле [Allaby and Allaby, 1999], где подчеркиваются большие размеры депрессий и то, что они окружены огромными покровами игнимбритов.

Вулcano-тектонические депрессии определяются как кольцевые, овальные или полигональные в плане структуры обрушения, развивающиеся в связи с вулканическими процессами, но не связанные с деятельностью конкретного вулканического центра. В этом смысле вулcano-тектонические депрессии противопоставляются кальдерам, отражающим развитие единичных вулканов [van Bemmelen, 1949]. Начало образования депрессий предшествует циклу вулканической активности, соответственно вулcano-тектонические депрессии могут формироваться как на невулканическом фундаменте, так и на разнородных вулканических образованиях. В пределах вулcano-тектонических депрессий располагаются группы вулканических аппаратов, сложенные рядом пород от базальтов до риолитов. Зачастую внутри них локализуются нормальные кальдеры типа Кракатау, в результате чего вулканотектонические депрессии приобретают сложную телескопическую структуру. Они ассоциируются с отрицательными гравиметрическими аномалиями в редукции Буге, связанными с присутствием астенолитов.

Влодавец [Влодавец, 1954] предлагает более широкую интерпретацию термина «вулcano-тектоническая депрессия», относя к ним любой тип отрицательных структур, образование которых связано с вулканизмом.

Определение собственно вулcano-тектонических депрессий, данное в Геологическом словаре [Красный, Эрлих, 1973], отмечает две черты, отличающие их от

собственно кальдер: наложение их на разнородный фундамент и огромные диаметры этих структур сравнительно с кальдерами (12-15 км в среднем и до 60-80 км и даже 100 км в поперечнике). Выделение в определении этих особенностей подчеркивает важную роль региональных тектонических процессов, и менее существенную роль вулканизма.

Таким образом вопрос определения этого важнейшего класса структур остается открытым. Поэтому представляется, что самый верный путь выработки их определения лежит через рассмотрение характерных черт структур, к которым в литературе прилагается этот термин. При этом обнаруживается, что почти во всех случаях они либо секут структуры довулканического фундамента, либо наложены на комплекс базальтовых и базальт-андезитовых вулканических плато предшествующих излияний. Граничными структурами служат крупноамплитудные (300-600 метров до 1 км) сбросы, падающие под крутыми (60° и более) углами по направлению к центру депрессии. Приведенные примеры вулкано-тектонических депрессий Камчатки показывают, что в отличие о кальдер образование их зачастую не ассоциируется с крупными кальдерообразующими извержениями. Исключением является только извержение вулканического центра озера Тоба на Суматре. В этом отношении вулкано-тектонические депрессии подобны тем кальдерам, с формированием которых не связываются мощные кальдерообразующие извержения (кальдеры типа Глен Ко, так называемые «интрузивные кальдеры»), в которых кальдерообразующее извержение заменяется оттоком материала во вновь образуемую камеру промежуточного магматического очага – будущую интрузию. На широкое распространение кальдер такого рода указывает исследование вулканического поля структуры Мессум в Намибии [Bauer, Trumbell, Vietor, 2005] схема итогов которого приведена выше на рис. 4.

Внутри вулкано-тектонических депрессий располагаются либо базальтовые вулканы (например, вулкан Фудзи), либо базальт-андезит-риолитовые вулканические центры, со многими из которых связаны кальдеры нормального типа. Примером может служить в депрессии Фудзи-Хаконе вулкан Хаконе, на котором располагаются две кальдеры [Kuno, 1963], или кальдеры: Академии наук (рис.24), Карымского вулкана (рис. 25), вулкана Двор и другие, внутри Карымско-Жупановской вулкано-тектонической депрессии, вулкан Ичинский в центре одноименной вулкано-тектонической депрессии [Эрлих, 1973].

В зависимости от характера вулканической активности внутри депрессий предполагаются два возможных механизма образования этих структур. Один в связи с оттоком магматического вещества в ходе извержения базальтовых вулканов, по аналогии с понижением давления в пределах нефтеносного пласта в итоге долговременной эксплуатации скважины (рис. 28). Образование вулкано-тектонических депрессий по этому механизму иллюстрируется примером вулкана Фудзи (рис. 29).

Второй - в итоге формирования купольной структуры в процессе внедрения промежуточного магматического очага. Пример – депрессия, в которой расположен вулкан Хангар. (рис. 30) [Erlich 2011].

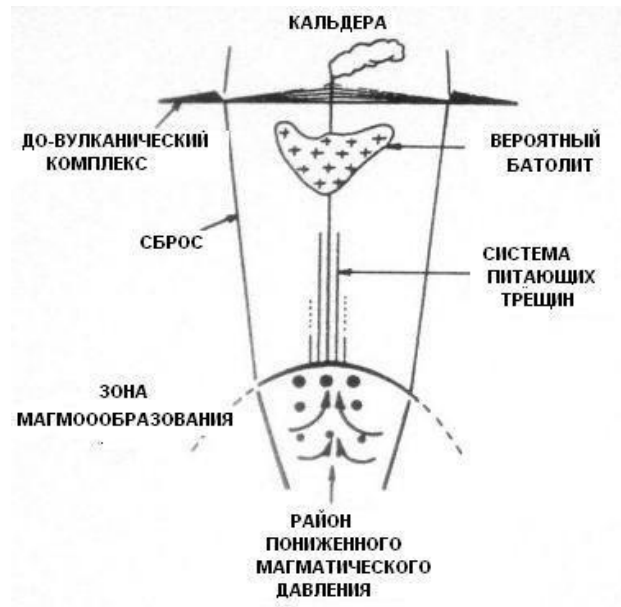


Рис. 28. Модель образования вулcano-тектонических депрессий типа Толбачик-Этна [по Erlich, 1989]



Рис. 29. Спутниковый снимок вулкана Фудзи, выступающего в роли нефтяной скважины, продолжительная эксплуатация которой приводит к просадке окружающего рельефа.

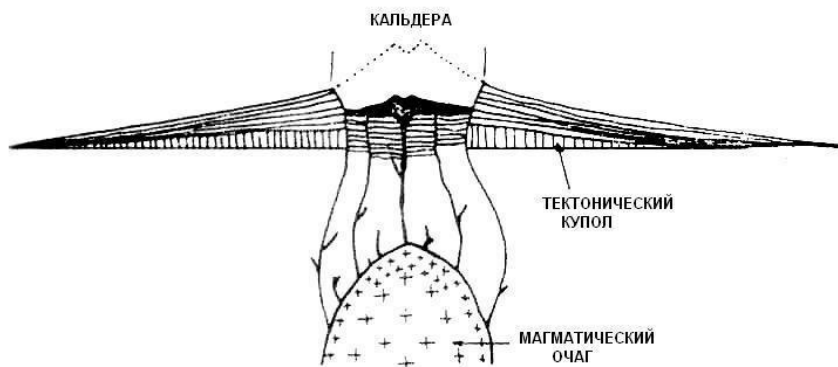


Рис. 30. Модель образования вулcano-тектонических депрессий типа Хангар [Erllich, 1989]

ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕПРЕССИИ, СТРУКТУРНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ

Характерно резкое различие диаметров кальдер в разных типах геотектонических систем в западной части Тихоокеанского кольца. Средний размер их варьирует от 2-4 км в островных дугах нормального типа (типа Курил) до 10-15 км в геотектонических системах типа Камчатки [Эрлих, 1973, 2011]. И только в этом последнем типе геотектонических систем появляются вулcano-тектонические депрессии диаметром от десятков до 100 км. Это различие отражает ускорение процессов роста гранитного слоя коры, свойственное геотектоническим системам типа Камчатки.

В геотектонических системах, где присутствуют два параллельных пояса молодого вулканизма, кальдеры типа Кракатау располагаются в внешней вулканической зоне. На Камчатке это вулканический пояс Восточной Камчатки, в северо-восточной Японии вулканическая зона Насу. В тыловых вулканических зонах (Центральная Камчатская депрессия, вулканическая зона Срединного хребта на Камчатке, зона Чокаи в северо-восточной Японии) кальдеры типа Кракатау отсутствуют.

Характерно, что массовые проявления кислой пирокластики, связанные с кальдерообразующими извержениями, проявляются в пределах тех или иных вулканических зон одноразово.

Чтобы правильно понять природу этого явления, следует учесть данные о вспышках кислого вулканизма в дочетвертичное время. В прилегающих к вулканическим поясам зонах поднятий, происходит внедрение массивов гранитоидов. Речь идет именно о крупных массивах гранитоидов, интродуцирующих в зонах поднятий, параллельных вулканическим поясам, а не о субвулканических интрузиях в пределах вулканических поясов, представляющих собой вскрытые эрозией глубинные части подводных каналов. Так, на Центральной Камчатке (обрамление Срединного массива, Начикинская горст-антиклинальная зона) в периоды, соответствующие времени проявления миоценового вулканизма, формируются интрузии габбро-гранодиоритовой и гранодиорит-порфириковой формаций [Волынец, Колосков, Флеров, Шилин, 1968]. Периоду неогенового кислого вулканизма на Кюсю и в юго-западной Японии отвечает внедрение комплекса мелких интрузий гранитоидов во внешней невулканической зоне, где развит геосинклинальный комплекс Шиманто. Аналогична картина и в орогенической системе Хидака. Данные определений абсолютного возраста указывают на узкий временной интервал формирования этих интрузий, что отвечает закономерности проявления кислого вулканизма в виде коротких катастрофических вспышек.

Оценка возможной роли тектонических процессов, в частности, движений по трансформным разломам типа глубинных сбрососдвигов, была проведена на примере Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии. Итоговая модель ее формирования приведена на рисунке 31 [Набоко, ред., 1971].

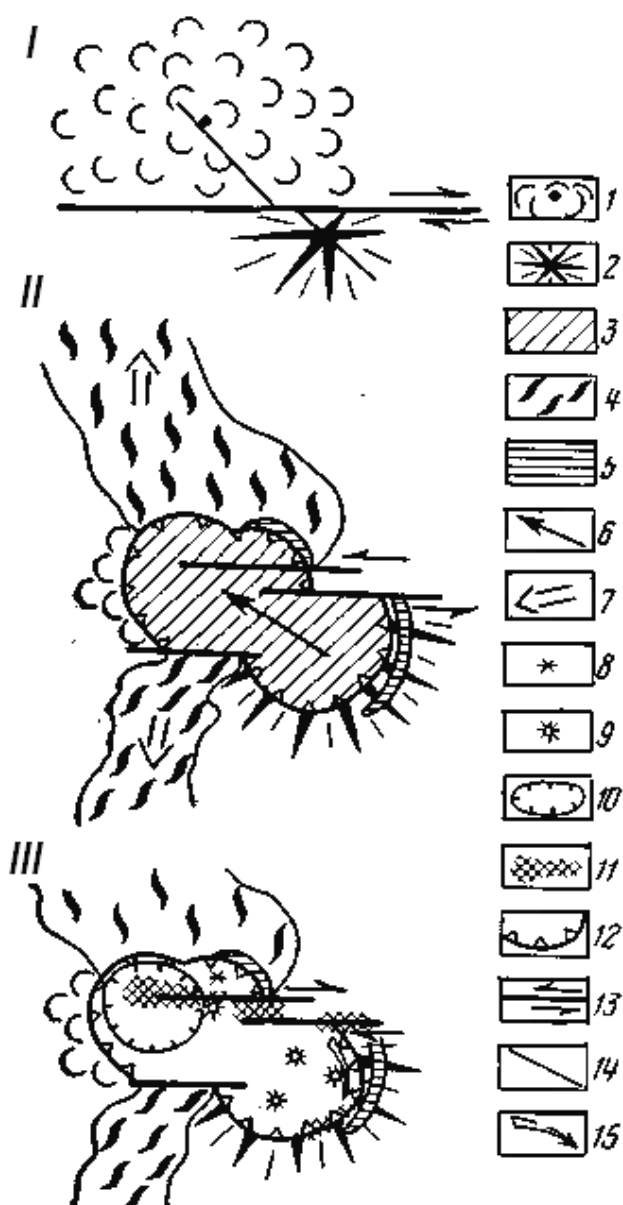


Рис. 31. Схема развития вулканизма Узон-Гейзерной депрессии в связи с движениями по трансформному разлому типа глубинного сбросо-сдвига (по Эрлих, ред., 2009). I- Докальдерный этап вулканической активности; II – этап кальдерообразования; III – этап посткальдерного вулканизма. 1 – базальтовый щитовой вулкан Q_1 ; 2 - центр кислого вулканизма докальдерного этапа; 3 – поле локализации центров эрупции кальдерообразующих выбросовкислой пироклаستيки, приведших к формированию игримбритов; 4 – поля развития игнимбритов; 5 – дуговые системы трещин, заполненные кислой магмой; 6 – направление смещения очага кислой магмы; 7 – направление течения игнимбритов; 8 – маар озера Дальнего; 9 – кислые экструзивные купола; 10 – воронка взрыва; 11 – поле развития гидротермальной активности; 12 – разлом, ограничивающий вулкано-тектоническую депрессию; 13 – зоны глубинных сдвигов с указанием

направления относительного перемещения крыльев 14 – трещины оперения сдвигов; 15 – направление оттока термальных вод от основного глубинного сдвига по дренирующей системе трещин.

Зоны аналогичного типа, пересекают центральную часть Жупановско-Семячинской вулкано-тектонической депрессии (рис. 32).

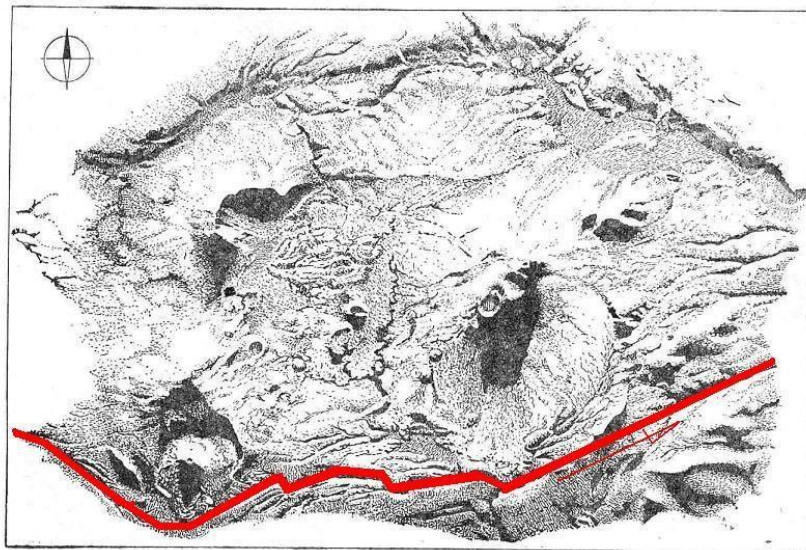


Рис. 32. Трансформный разлом, пересекающий центральную часть Жупановско-Карымской вулкано-тектонической депрессии [модифицировано по Н. А. Гусеву, из Святловский, 1975]. Красным цветом показан предполагаемый глубинный трансформный разлом.

ПРИМЕРЫ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕПРЕССИЙ

Наряду с вулкано-тектоническими депрессиями, окруженными полями кислой пирокластики, возможно особого внимания заслуживают структуры, образованные в связи с центрами базальтового или базальт-андезитового вулканизма. На Камчатке такие структуры были впервые отрисованы автором [Эрлих, 1973]. Ниже приводятся схемы их строения. Общей чертой их является отсутствие характерных признаков извержений, связанных с образованием депрессий. Они располагаются на крупных (десятки километров в диаметре) щитообразных постройках, сложенных лавами базальт-андезитовой серии с небольшим количеством прослоев пирокластического материала.

ПАУЖЕТСКАЯ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ДЕПРЕССИЯ

Рассмотрение данных по разломной тектонике Паужетской вулкано-тектонической депрессии показывает, что центры молодого кислого вулканизма, такие как кальдера Курильского озера и Камбальный хребет, располагаются на противоположных окончаниях основной зоны разломов широтного простирания, определяющей контуры Паужетской вулкано-тектонической депрессии. Предлагаемая схема динамики движений по этой зоне практически аналогична картине динамики напряжений в ходе эволюции Узон-Гейзерной структуры (рис. 31).

Структуре и эволюции вулканизма Южной Камчатки посвящено большое число работ. Повышенный интерес к этому району во многом был связан с изучением структуры Паужетской геотермальной системы [Аверьев и Святловский, 1961, Святловский, 1975,

Апрелков, 1977]. Все эти данные были суммированы в сборнике статей [Масуренков, ред., 1980]. Помещаемый ниже обзор в основном следует этой сводке и специальной работе В. Л. Леонова [Леонов, 1981]. Анализируя заключения авторов, можно только пожалеть, что они ограничились описанием морфологии и простирающихся линий нарушений и не попытались реконструировать схему динамики движений по разломам. То же можно сказать и о сложной проблеме несоответствия масштаба вертикальных тектонических движений и перекомпенсированной аккумуляции вулканических продуктов. В результате чего масштаб тектонического поднятия часто сильно преувеличен. Местами создается впечатление, что авторы слишком охотно следуют предвзятым идеям о примате тектонического поднятия и недооценивают масштабов и характера опускания.

Предполагается, что основной структурой района является пологий аккумулятивно-тектонический свод. Амплитуда его поднятия составляет от 400 до 1000 м. Максимальная амплитуда поднятия в центре достигает около 2 км. Диаметр свода около 20 км. Предполагается, что образование свода произошло в основном в конце миоцена-начале плиоцена, т. е. около 10-15 млн. лет назад. В самом конце плиоцена и начале раннечетверичного времени в центре свода образовалась Паужетская вулканотектоническая депрессия, которая считается компенсационной просадкой в ходе выноса кислого пирокластического материала. Наибольшее погружение до 1000-1200 метров наблюдается в северозападной части депрессии. В среднечетверичное время произошло массовое извержение игнимбритов, объем которых достигал 60-80 км³. Их место и заполнила Паужетская вулканотектоническая депрессия. Время образования депрессии, по данным Ar-Ar датирования игнимбритов Гольгинского горизонта, относится не к плиоцену, а к среднему плейстоцену в интервале 0,451±0,222 – 0,436±0,056 млн. лет [Леонов, Биндеман, Rogozin, 2008].

Структурная схема района Паужетской вулканотектонической депрессии приводится на рис. 33.

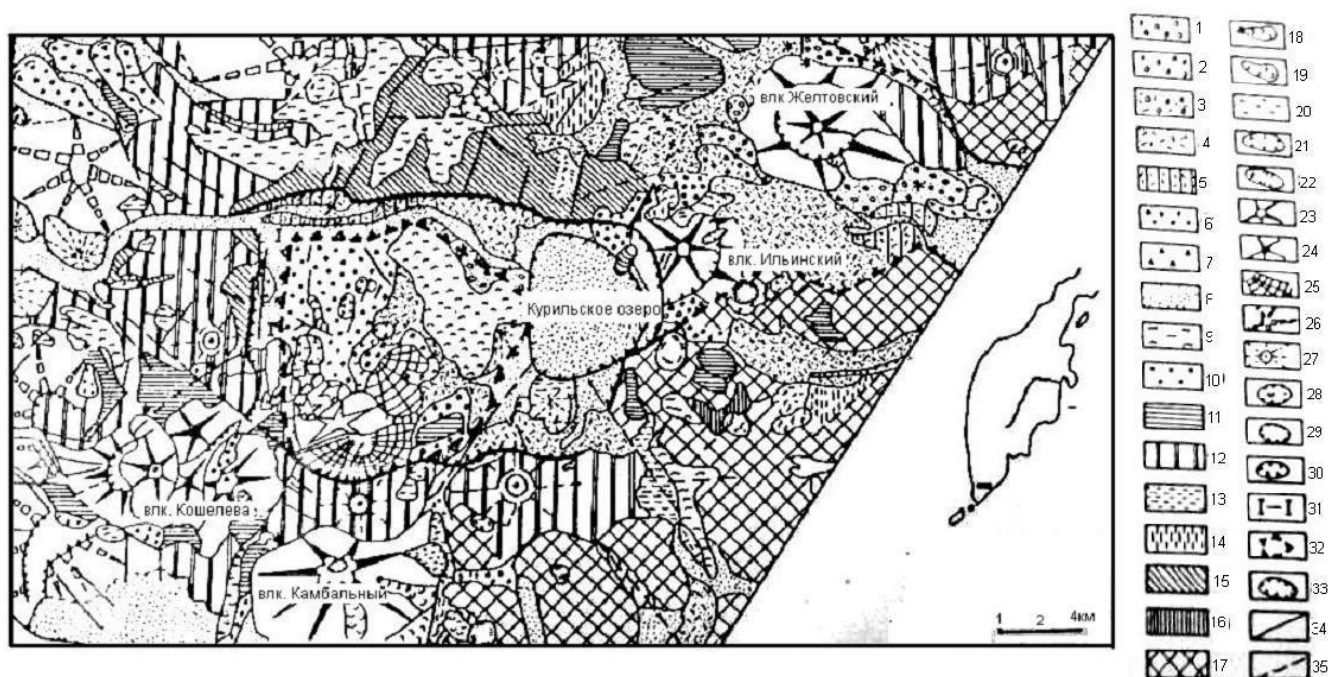


Рис. 33. Схема структуры Паужетской вулканотектонической депрессии. По Масуренков, ред., 1979. По данным интерпретации аэрофотоснимков и геологическим материалам Камчатского Геол. Управления и Института вулканологии. I. Четвертичные отложения. 1 – взрывные отложения (Q₃); 2 –

шлаки (Q_4^1); 3 – Взрывные пемзовые отложения и шлаковые брекчии (Q_3^1); 4 – мощные пемзово-пирокластические потоки (Q_3^1); 5 – Переотложенные пемзы (Q_3^1); 6 –; 7 – Ледниковые отложения второй фазы верхнечетверичного оледенения (Q_3) Ледниковые отложения первой фазы верхнечетверичного оледенения; 8 – Нерасчлененные рыхлые четверичные отложения (Q_3^1); 9 – Риодациты и игнимбриты (Q_2); 10 – Осадочные туфы паужетской свиты ($N_2 - Q_3^1$). II. Миоценовые, плиоценовые и нижнечетверичные отложения: 11. Платообразные реликты щитовидных вулканов; 12 – Эффузивно-пирокластические комплексы крупных плиоценовых центров вулканизма; ($N_{2,3}$); 13 – вулканогенно-осадочные толщи среднемиоценового – среднеплиоценового возраста); 14 – Крупные интрузивные тела (N_2); 15 – вулканогенные существенно-лавовые комплексы нижнего и среднего миоцена (N_2^{1-2}); 16 – Туфогенные песчаники и гравелиты позднепалеогенового-среднемиоценового возраста ($Pg_3-N_1^{1-2}$); 17 – Нерасчлененные отложения позднего палеогена – нижнего-среднего миоцена ($Pg_2-N_1^{1-2}$); III. Генетические типы вулканов и их морфология: 18 – Базальтовые шлаковые конуса (Q_4); 19 – Базальтовые лавовые вулканы (Q_4); 20 – Крупный многофазовый экструзивный комплекс Дикий Гребень (Q_4); 21 – Небольшие экструзивные купола дацитового состава (Q_3-Q_4); 22 – Субинтрузивные образования; 23 – существенно лавово-пирокластические стратовулканы; 24 – Существенно пирокластические стратовулканы; 25 – Щитовидные существенно-лавовые вулканы (Q_1-Q_2); 27 – Крупные плиоценовые центры вулканизма; 28 – Сильно эродированные реликты плиоценовых вулканов; 29 – Кратера стратовулканов; 30 – сбросы обрамления Паужетской вулканотектонической депрессии; 31 – грабен долины р. Паужетки; 32 – Горст Камбального хребта; 33 – кальдеры с которыми связаны пемзовые потоки; IV. Дизъюнктивные нарушения. 34 – Наблюдаемые разломы; 35 – Предполагаемые разломы; 36 – Трещины с которыми связаны пемзовые потоки.

Наиболее ясно выражен широтный разлом, проходящий у главного прогиба Голыгинских гор. Разлом подтвержден геологическими данными, по которым амплитуда погружения вдоль него составляет 700-800 метров, а по гравиметрическим данным доисигает 1200-1300 метров. По нему отмечается общее погружение толщ на север. Разлом контролирует размещение вулканических аппаратов Кошелевской группы вулканов. Время образования разлома относится к нижнечетверичному времени (судя по приведенным выше данным абсолютных датировок игнимбритов, к среднему плейстоцену. Другая система разломов – меридианальная. Одна система разломов этого простирания трассируется долиной реки Паужетка. В пяти км к западу от которой проходит так называемый Ключевской разлом, и затем, примерно на расстоянии 5 км друг от друга, следуют разломы Явинский и Прибрежный. Все они характеризуются опусканием восточного крыла. Крупное меридианальное нарушение отмечается также и в восточной части района. К востоку от Голыгинских гор вдоль этого разлома отмечается ступенчатое погружение с амплитудой не менее 500-600 метров. Также, как и разломы широтного простирания, эти нарушения, повидимому, сформировались в период образования Паужетской вулканотектонической депрессии. Разломы северо-восточного простирания группируются в три полосы. Большинство из них имеет почти вертикальный сместитель с наклоном плоскости на юго-восток. Время образования оценивается как средне-верхнечетверичное. Разломы с простиранием северо-северо-запад 230° образуются в верхнечетверичное-голоценовое время. Они развиты в виде полосы шириной около 15 км. Сместитель наклонен к юго-востоку (рис. 34).

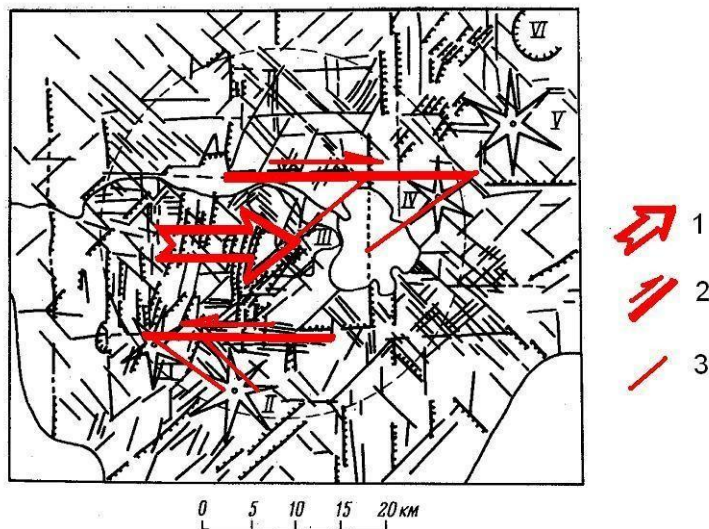


Рис. 34. Интерпретация динамики движений по разломам Паужетской вулcano-тектонической депрессии [Леонов, 1981]. 1. Направление общего смещения блока; 2 Направление движений по глубинным сбросо-сдвигам; 3 Оперяющие трещины отрыва, контролирующие пространственное положение молодых эруптивных центров.

Анализ картины трещиноватости и движений в сочетании с данными о времени движений и вулканизма позволяет предположить, что центры вулканизма на линии северовосток $20-30^{\circ}$ в районе Курильского озера и «субширотные» линии вулканических проявлений Кошелевского вулкана и хребта Камбальный располагаются непосредственно на оперении основных широтных систем трансформных разломов. Подобная динамика вполне аналогична предполагаемой динамике развития движений по трансформному широтному разлому и миграции центров вулканической активности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии [Набоко, ред., 1971]. Важным, если не решающим, доводом в пользу предлагаемой модели движений в пределах Паужетской структуры является смещение центров активного вулканизма во времени. Так, в восточной части структуры в голоцене центр эруптивной активности смещается на восток, где образуется кальдера Курильского озера, в которой локализируются центры посткальдерной эруптивной деятельности, вулканы Ильинский и Желтовский. В западной части Паужетской структуры в то же время происходит смещение центров эруптивной активности в обратном направлении, на запад, где образуется Камбальный хребет. Подобное различие направления миграции центров активности хорошо объясняется наличием не одного, а двух субширотно ориентированных глубинных разломов, отмеченных Леоновым [Леонов, 1981].

Сходные по характеру зоны глубинных сбросо-сдвигов широтного простирания контролируют положение других кальдер Южной Камчатки. Ранее было отмечено, что по ним фиксируется горизонтальное смещение флексуры поверхности М [Штейнберг, 1969], проходящей по границе передового горстантиклинория и грабен-синклинали Южной Камчатки. Амплитуда горизонтального смещения достигает несколько километров. Они выражены в рельефе плоскодонными долинами, переходящими в заливы, которыми изрезано восточное побережье полуострова [Эрлих, 1973].

Аналогичная зона трансформного разлома контролирует положение структуры Тоба на Суматре [Katili, 1963]. Такого же рода зона контролирует положение ряда посткальдерных эруптивных центров в кальдере Масайя (рис. 35).

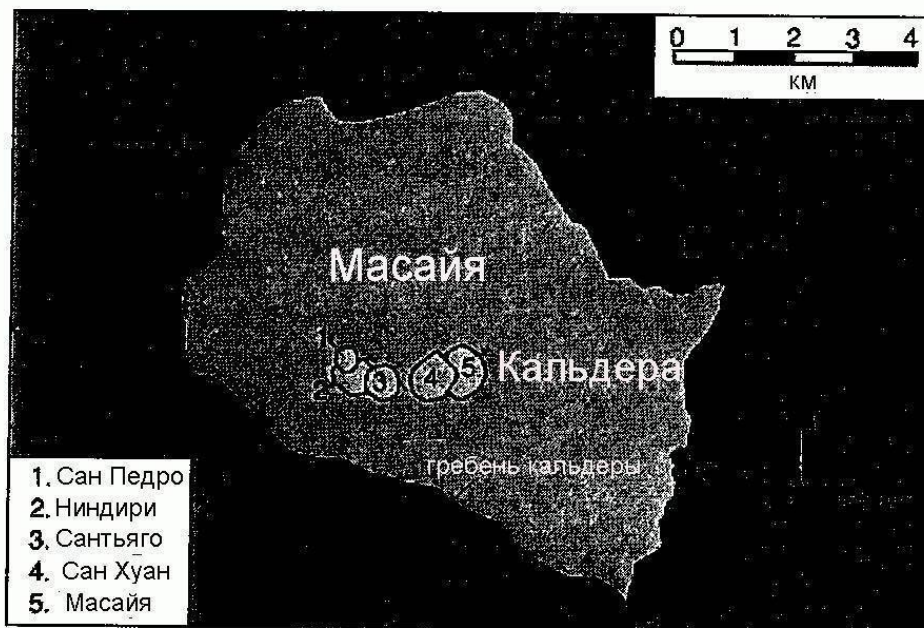


Рис. 35. Молодые конуса расположенные вдоль линии трансформного разлома в кальдере Масайя (из Masaya, Nicaragua, 2000).

Отражением движений по такой же зоне трансформного разлома является отмеченная горизонтальная миграция эпицентров землетрясений на кальдере Йеллоустон [Waite and Smith, 2003]. Трансформный разлом отчетливо виден на схеме вулканотектонической депрессии озера Атитлан, Гватемала (рис. 36).

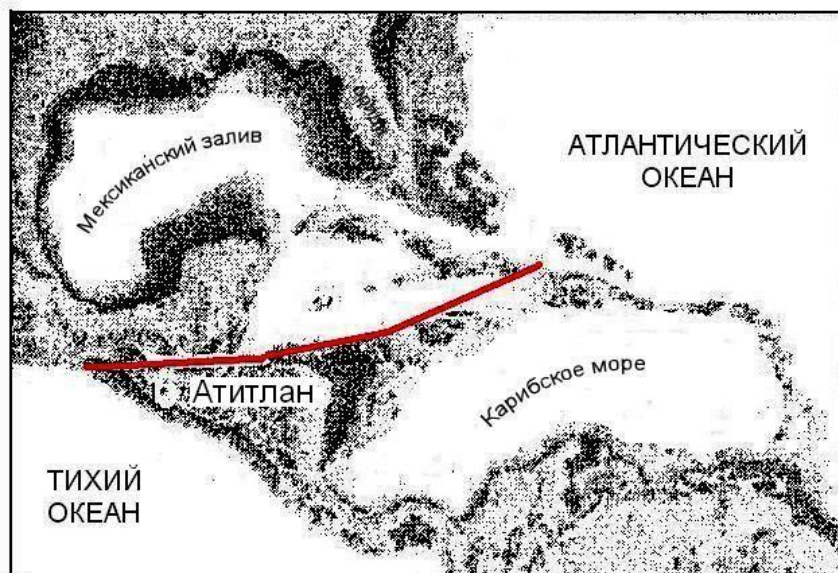


Рис. 36. Трансформный разлом близ вулканотектонической депрессии озера Атитлан (Гватемала). [Атитлан, озеро, 2010]. Красной линией показано положение трансформного разлома типа глубинного сбросо-сдвига.

Приведенные примеры достаточно отчетливо показывают, что главным отличием вулcano-тектонических депрессий, с которыми ассоциируются огромные поля кислой пирокластики, от аналогичных кальдер являются не столько их размеры, сколько их тектонический контроль, постоянная связь с трансформными разломами типа глубинных сбросо-сдвигов при относительно пониженной, сравнительно с кальдерами, роли вулканических процессов.

ИЧИНСКАЯ ДЕПРЕССИЯ

Границы этой структуры отрисовываются по дугообразным системам сбросов, срезающих нижнечетвертичные базальтовые плато (рис. 37). Амплитуда перемещения по разломам составляет несколько сот метров. В южной части Ичинской структуры амплитуда смещения резко уменьшается и четвертичные вулканы налегают непосредственно на третичные осадочные толщи Западно-камчатского тылового прогиба. Внутри депрессии расположены щитовые базальтовые вулканы верхнечетвертичного-голоценового возраста (Большой и Малый Паялпан) и крупный вулканический центр действующего Ичинского вулкана. Тенденция к телескопированию структуры отражается в кольце побочных экструзивных куполов, окружающих Ичинский вулкан, сложенный рядом пород от базальтов до риолитов с повышенным содержанием щелочей.



Рис. 37. Структурная схема Ичинской вулcano-тектонической депрессии [Э. Н. Эрлих, Ф. Ш. Кутыев, из Эрлих, 1973]. I — Хангар. II — Ичинский вулкан. А: 1 — дочетвертичные складчатые комплексы фундамента; 2—миоценовые интрузии гранитоидов. Б. Первый цикл четвертичного вулканизма (Q_2-Q_1), 3—щитовые базальтовые вулканы; 4 — экструзивные купола (от андезитов до дацитовых обсидианов по составу). В. Главная стадия кислого вулканизма (Q_2) — стратовулканы (дацитового состава на Хангаре и андезито-дацитового на Ичинском вулкане). Экструзивные купола, сложенные: 6 — амфиболсодержащими андезитами на Ичинском вулкане и ортопироксенсодержащими андезитами на Хангаре; 7 — стекловатые дациты с орто- и клинопироксенами и плагиоклазом № 60 — 80; 8 — амфиболсодержащие андезиты и андезитдациты; 9 — Обсидианы. Г. Новейшая стадия посткальдерного вулканизма (Q_3-Q_4): 10 — взрывные кратеры; 11 — купола биотитовых липаритов; 12 — дацитовые стратовулканы; 13 — новейшие дацитовые экструзивные купола; 14 — потоки вязких кислых лав; 15 — потоки и покровы пемзы. Д. Стадия новейшего базальтового вулканизма: 16 — мелкие вулканы и шлаковые конусы. 17 — лавовые потоки; 18 — щитовые вулканы; 19 — недиагенезированные четвертичные осадки.

поэтому я счел нужным привести в статье о вулcano-тектонических депрессиях, связанных с базальтовым вулканизмом, спутниковый снимок этого района, наглядно показывающий существование разломов [Эрлих, Белоусов, 2009].

Позднее оказалось, однако, что интерпретация этих спутниковых снимков была уже проведена дважды и с одинаковым результатом, подтверждающим мою интерпретацию. Один раз это было сделано Н. А. Гусевым, результат работы которого приведен в монографии А. Е. Святловского [1975], повторена в монографии В. Л. Леонова и Е. Н. Гриб [2004]. Никаких сомнений в этой интерпретации структуры северных границ депрессии не возникает. Но при этом резко изменилась интерпретация южного обрамления депрессии. В качестве южной границы ее была принята система разломов широтного простирания, пересекающая структуру к югу от Карымского озера. Разлом этот, по моему мнению, имеет характер глубинного сброса-сдвига, отвечающего трансформному разлому, определившему локализацию депрессии. Таким образом, диаметр предполагаемой депрессии был сокращен вдвое и сама она потеряла правильную кольцевую форму.

Предлагаемая интерпретация показана на рис. 39. С моей точки зрения, дело было в том, что снимок южной половины структуры не рассматривались. Даже такой авторитет как И. В. Мелекесцев нимало не сомневался в существовании граничных разломов южного обрамления структуры.

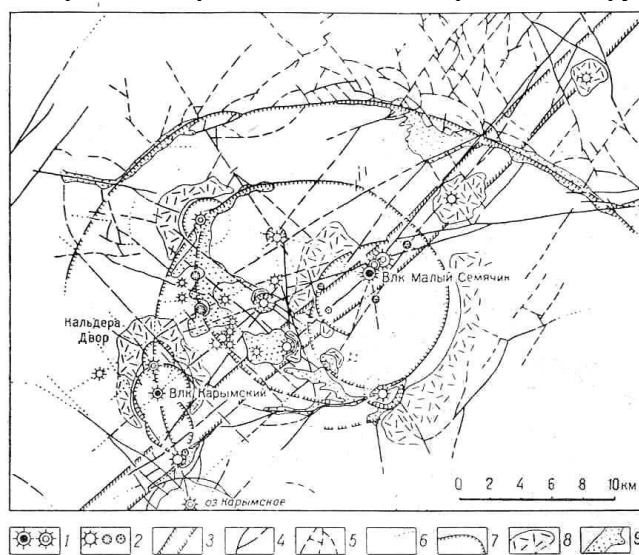


Рис. 39. Структура северной части Жупановско-Семьячинской вулканотектонической депрессии [по Н. А. Гусеву, из Святловский, 1975].

Для меня критерием, определяющим достоверность этой рисовки было ее совершенство. На том же основании я никак не мог согласиться с уродливо обрубленной рисовкой южного окончания структуры. Законченность рисовки должна быть естественной, даже если она, казалось бы, противоречит «очевидной реальности».

В связи с этим случаем мне вспоминается история отрисовки контура кольцевого массива Томтор (Северная Якутия). В ходе работ на массиве был показательный случай при проходке бурового профиля поперек массива. Дуговые системы пологих холмов, отражающие структуру массива, закономерно проявлялись вплоть до долины реки Чымаара. Поэтому для меня было совершенной неожиданностью, когда очередная скважина, пройденная на пол-пути к Чымааре близ озера Боронгко, вскрыла вмещающие массив доломиты улахан-курунгской свиты. Ну, что же, против фактов, как говорится, «не попрешь!» Пришлось рисовать массив уродливо обрубленным. На следующий год волокущие буровую тракторы очередной раз сломались и буровики получили по радио классическую команду: «бурите где стоите!». Так была пройдена внеплановая скважина между озером Боронгко и Чымаарой, которая к моему восторгу, вскрыла нефелиновые сиениты того же типа, что и развитые в восточной части массива. Природа взяла свое и Томтор вновь, и на этот раз окончательно, приобрел законченный вид закономерной кольцевой структуры.

Позднее на основании дешифрирования спутниковых снимков были описаны сходного характера вулcano-тектонические депрессии на Этне, в районе вулканов Фудзи и Хаконе на Хонсю (Япония) (рис. 40), вулкане Тятя (остров Кунашир, Южные Курилы), вулканах Вениаминофф и Угашик (Аляска) [Erlich, 1989].

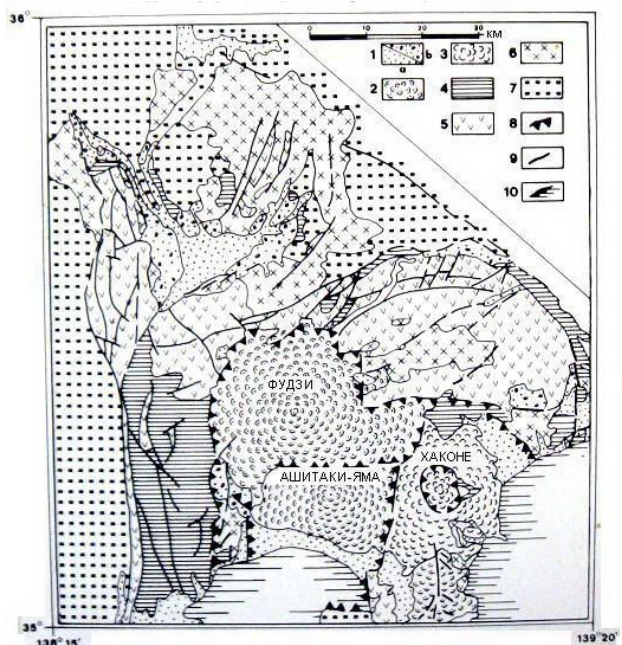


Рис. 40. Схема структуры вулcano-тектонической депрессии вокруг вулканов Хаконе и Фудзи, центральная часть острова Хонсю, Япония [Erlich, 1989, по данным интерпретации спутниковых снимков и материалов по геологии района из Minato et al., eds., 1963]. 1а – рыхлые осадочные отложения голоценовых террас; 1в – плейстоценовые гравии верхних террас; 2– вулканические породы, в основном базальты плейстоцен-голоценового возраста; 3– вулканические породы, преимущественно андезиты; 4 – осадочные толщи миоцен-плиоценового возраста; 5–вулканические породы верхнетретичного возраста, нерасчлененные; 6 – плато плиоценовых базальтов; 7 – интрузии миоценовых гранитоидов; 8 – сбросы обрамления вулканотектонических структур; 9 – сбросы региональные; 10 – береговая линия.

Ниже приводится описание вулcano-тектонической депрессии (кальдеры) на вулкане Масайя.

МАСАЙЯ, НИКАРАГУА

Древняя вулcano-тектоническая депрессия (часто называемая кальдерой) Масайя имеет поперечники 6 и 11,5 км. Она открыта на восток. Всего отмечается 13 центров эруптивной активности, располагающихся вдоль широтной зоны (рис. 35). На днище расположены действующие вулканы Масайя и Сантьяго, андезитовый конус Момотомбито. Это цепь преимущественно базальтовых вулканов. Санта Клара представляет собой андезито-дацитовый стратовулкан, конус Телика сложен оливинными базальтами.

В районе кальдеры Масайя развита толща третичных и более молодых вулканических пород – лав, переслаивающихся с пирокластическим материалом называемая формацией Лас Сиеррас. Общая ее мощность неизвестна, но в некоторых пунктах она не менее 600 метров. Считается, что по крайней мере часть этого материала была извергнута из района нынешней кальдеры в период 29200 ± 200 лет до н. э. [Williams, 1985a]. Предполагается, что кальдера сформировалась в ходе единичного катастрофического обрушения, связанного с извержением игнимбринов и пирокластических отложений базальтового состава. Время образования кальдеры

ограничивается по данным радиоуглеродных датировок обломков, развитых в регионально-развитых отложениях «волны основания», известных как Эль Ретиро в интервале между 2250 и 6500 лет до н. э. Измерения показывают, что присутствуют коротковолновые аномалии большой амплитуды. Одна из таких аномалий расположена к северо-западу от активного кратера Сантьяго и может быть связана с геометрией подводящего канала или с присутствием на небольшой глубине магматического тела. Авторы указывают на то, что эта аномалия по положению совпадает с молодой открытой трещиной, из которой в течение последних 1000 лет было извержено около 1 км^3 лав. Трещина протягивается от северо-западного окончания старого кратера, лежащего на западном окончании линии Сантьяго-Ниндири-Сан Педро.

Докальдерный щитовидный вулкан образован жидкой базальтовой лавой. Кальдера ограничена почти вертикальными разломами, выраженными в рельефе уступами высотой до 250 метров. Аномалия вызвана относительно тонким плотным телом длиной 17 км и шириной 6-7 км, при мощности 2 км. Это тело смещено по отношению к кальдере и, скорее всего, было внедрено перед ее образованием. Предполагаемое плинианское извержение имело место 4550 лет до н.э. и явилось одним из крупнейших на Земле за последних 10000 лет. Сам по себе Масайа - это небольшой базальтовый вулкан, но с ним связаны необычные по силе эксплозивные извержения. С 1965 по 1979 год на вулкане существовало лавовое озеро.

С кальдерой Масайа связаны существенные по амплитуде аномалии поля силы тяжести. Главной чертой их является положительная аномалия, величина которой 35 мгал и длина волны 15 км сходны с подобными аномалиями на других базальтовых вулканах [Williams, 1972, Casadevall T. J., Dzurisin D., 1987], но существенно меньше по амплитуде и длине волны, чем аномалии поля силы тяжести, связанные с неглубокими (менее 10 км глубиной) интрузиями на Гавайских щитовых вулканах и андезитовых вулканах Центральной Америки [Casadevall T. J., Dzurisin D., 1987]. Но гравитационная аномалия на Масайе несколько смещена по отношению к контуру кальдеры Масайа и не совмещается с ее структурой [Casadevall T. J., Dzurisin D., 1987]. Это означает, что, несмотря на присутствие заполняющей кальдеру мощной толщи жидких лав с прослоями пирокластики и брекчиями течения, крупная аномалия вызвана в основном другим источником. Резкий градиент изолиний аномалии поля силы тяжести на границах кальдеры указывает на неглубокое залегание объекта образующего аномалию.

Высокий контраст плотности предполагает, что аномалия вызвана, скорее всего, твердым телом, а не полностью или частично расплавленным веществом. Предполагается, что интрузия была скорее всего внедрена до образования кальдеры, поскольку с ней не связываются никакие деформации поверхности. Детали контуров, соответствующих изолиниям 35 и 40 мгал над краями кальдеры (рис. 40), согласны с допущением о том, что интрузивное тело было опущено по этим разломам.

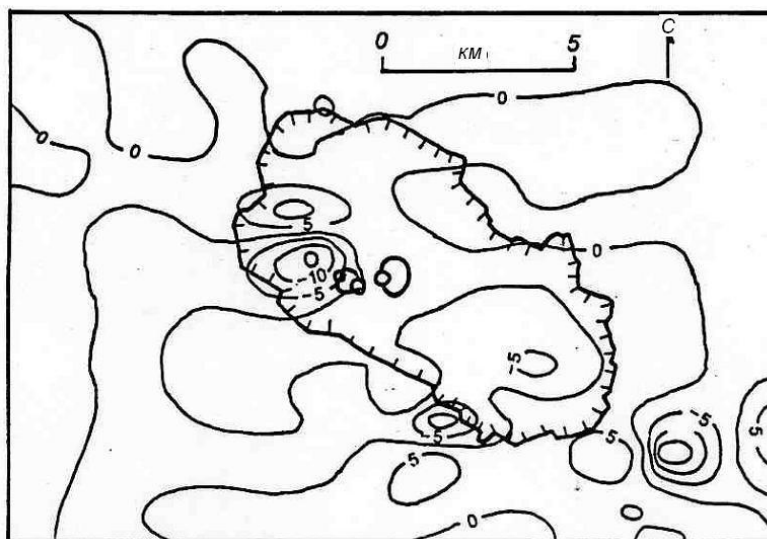


Рис. 41. Контуры аномалий поля силы тяжести на кальдере Масайя. Проекция наверх до 1500 м значений поля силы тяжести оконтуривает крупную аномалию большой амплитуды на северо-восточном разломе обрамления кальдеры Масайя. Изолинии проведены с интервалом 1 мгал. [Connor and Williams, 1989].

Предполагаемое положение тела образующего аномалию по данным интерпретации аномалий поля силы тяжести показано на рисунке (рис. 42).

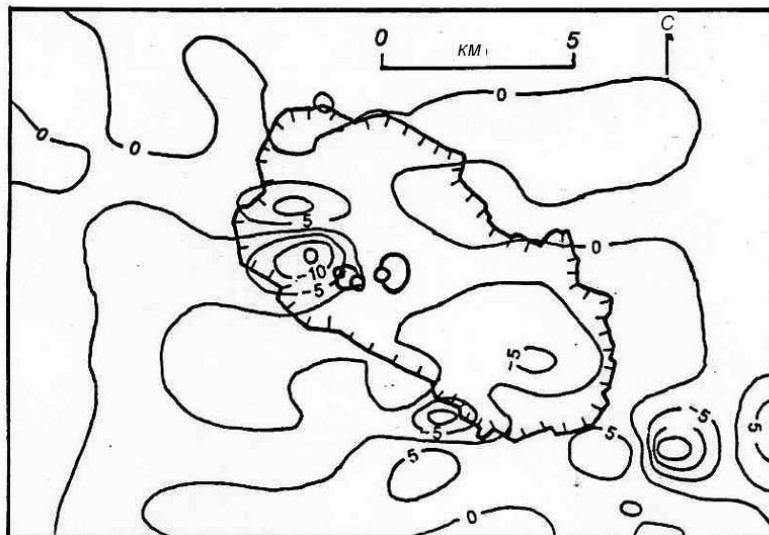


Рис. 42. Наблюдаемые значения поля силы тяжести (точки) и модель распределения аномальных масс (заштрихованный полигон [Connor and Williams, 1989].

Однако отрицательная аномалия поля силы тяжести расположена также около точки на краю кальдеры, в которой тефра отлагалась постоянно на протяжении всей истории современной кальдеры Масайя. Эта точка соответствует направлению исключительно постоянных пассатов, дующих на широтах Никарагуа. Пирокластические отложения, изверженные из Масайя в результате предполагаемого мощного плинианского извержения в период порядка 30 000 [Williams, 1983b] были накоплены здесь в необычно большом количестве. Если бы те же процессы продолжались в течение более длительного времени, отрицательная аномалия поля силы тяжести могла быть вызвана накоплением рыхлой пирокластики малой плотности.

Если тело образующее аномалию сложено изверженными породами, предполагаемыми на основе изучения исключительно интенсивной дегазации в Масайе [Stoiber et al., 1986] объем от 100 до 200 км³ был накоплен в течение короткого интервала времени продолжительностью от 1000 до 2000 лет. Авторы допускают, что генерирующее аномалию тело образовано изверженными породами. Оно может быть связано с силлом, лакколлитом, или с серией лавовых покровов значительной мощности, аккумулярованных на небольшой площади. Если генерирующая аномалию масса имеет контраст плотности в 300 кг/м³, то оно должно иметь форму плоской четырехугольной пластины, мощностью 2 км, длиной 17 км и шириной 6 км, расположенной на глубине 0.5 км.

Учитывая все эти оговорки, не исключено, что в допущении предполагаемого плинианского извержения, связанного со столь необычным составом лав, нет необходимости. Образование кальдеры (или, вернее, вулканотектонической депрессии) может быть связано с внедрением интрузии и образованием вихревой структуры.

Другой крупной кальдерой (или вулканотектонической депрессией) того же типа, что и Масайя, является озеро Атитлан в Гватемале. Она занимает площадь 130,1 км². Рядом с озером находятся три конусообразных вулкана: Панахачаль, Атитлан и Сан Лукас. В ходе кальдерообразующего извержения Лос Чоккойос было выброшено до 300 км³ тефры – 1800000. Наиболее древние извержения датируются периодом около 11 млн. лет назад. Озеро занимает большую часть кальдеры и имеет глубину до 600 метров. Так как и в

случае кальдеры Масайя, перспективное аэрофото озера Атитлан и последовательность эруптивных событий абсолютно аналогичны событиям, наблюдаемым на кальдере Узон.

ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕПРЕССИИ, ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕЗИСА

Вопрос о предполагаемом генезисе вулcano-тектонических депрессий, а также и кальдеры, следует начать с того, что многие депрессии и так же как и кальдеры с которыми связаны массовые выбросы игнимбритов, располагаются на трансформных разломах типа глубинных сбросо-сдвигов. Этим определяется значительная роль тектонических напряжений в образовании подобных структур. Но наиболее ярко специфика образования вулcano-тектонических депрессий проявляется в формировании тех структур, которые связаны с базальтовым вулканизмом. Эта связь впервые была отмечена на Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии (рис. 31). Можно видеть важнейшие последствия этой связи на примерах Паужетской и Жупановско-Семячинской вулcano-тектонических депрессий. Литературные данные свидетельствуют о наличии такого же рода структур на кальдерах Масайя (Никарагуа), Тоба (Суматра) и Флегрейских полях (Южная Италия) [Katili, 1952, Williams et al., 2003, Acocella et al., 1991]. О том же говорит горизонтальное перемещение роя эпицентров, пересекающего кальдеру Йеллоустон [Waite, Smith, 2002]. На карте магнитных аномалий Северного острова Новой Зеландии видно, что вулcano-тектоническая депрессия Таупо лежит на линейной зоне высоких градиентов магнитного поля, отвечающей, судя по простиранию, трансформному разлому, пересекающему вулканическую зону Таупо [Soengkono, 1995]. Это доказывает решающую роль именно тектонических процессов в формировании вулcano-тектонических депрессий (в отличие от кальдер, образование которых существенно определяется вулканическими процессами).

При образовании кальдер опустошение их полости взрывом сочетается с обрушением по кольцевым разломам с амплитудой до 1 км. Если глубина кальдер колеблется от 300—400 м до 4 км; в результате вулканических взрывов на этой глубине возможно образование кальдер диаметром не более 8 км. Следовательно, кальдеры больших размеров образуются при участии кольцевых обрушений [Болдуин, 1968, Штейнберг 1969].

К вулcano-тектоническим депрессиям примыкают кольцевые структуры, образованные интрузиями кислых андезитов, дацитов и риолитов, выходящие на поверхность в виде кольцевой системы экстррузивных куполов. Просадка в центральной части такой кольцевой структуры может отсутствовать.

Эти структуры аналогичны валлообразным поднятиям, формирующимся в связи с образованием кольцевых комплексов ультраосновного-щелочного состава – таких, как массивы Кондёр, Хабаровский край, и Томтор, Якутия.

Признание связи образования кальдер и вулcano-тектонических депрессий с кольцевыми интрузиями позволяет проводить аналогию их с «интрузивными кальдерами» типа Мессум и кальдеры Глен Ко. Такое допущение снимает противоречия, в трактовке главенствующей роли процессов опускания и поднятия в образовании вулcano-тектонических структур. Существование этих противоречий представляется искусственным. Воздействие процессов опускания и поднятия магматической колонны на раму вмещающих пород, подобно действию поршня. В результате материалы по геологии кольцевых интрузивных комплексов мало использовались при обсуждении генезиса вулcano-тектонических депрессий.

Сравнение вышеприведенных данных по различным вулcano-тектоническим депрессиям отчетливо показывает, что главной особенностью их формирования (в отличие от кальдер) является отсутствие «депрессиеобразующих» (по аналогии с термином «кальдерообразующих») извержений, ассоциирующихся с моментом образования структур. Общими для всех них чертами являются большие размеры – диаметр их много больше, чем у нормальных кальдер и достигает нескольких десятков, до 100 км. Геофизические характеристики для большинства вулcano-тектонических депрессий отсутствуют. Образованию структур, как правило, предшествует базальтовый вулканизм, в результате которого формируются огромные щитообразные вулканы. Вулканизм периода после образования депрессий обнаруживает широкий спектр составов извергаемых продуктов от базальтов до дацитов и риолитов. Большие размеры структур предполагают, что жидкая магма в глубинном очаге должна реагировать на воздействие внешних факторов. В связи с этим представляется возможным принять как рабочую гипотезу модель образования вихревых структур под воздействием «вулканического торнадо» [Колосков, Аносов, 2000] (рис. 43).

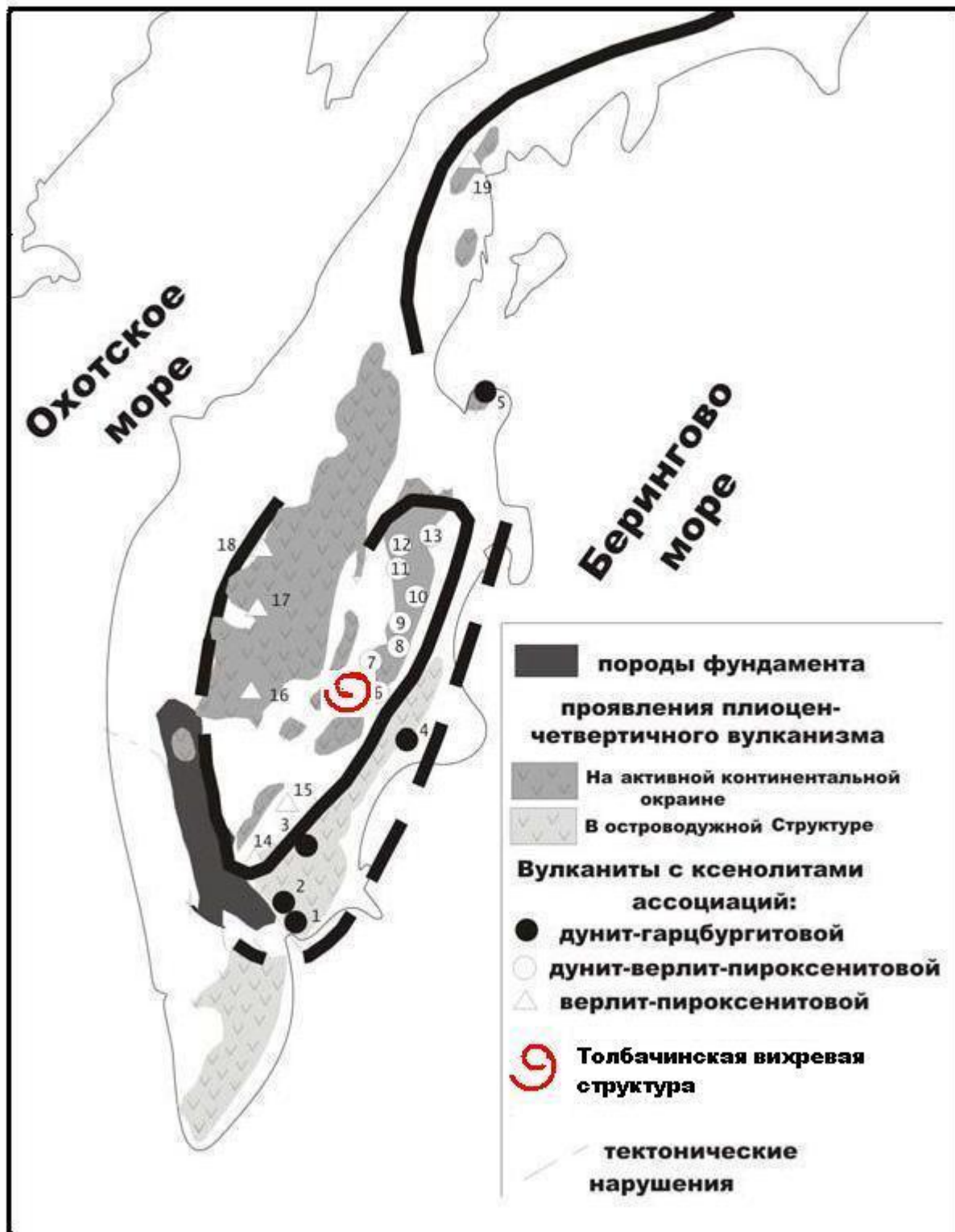


Рис. 43. Вихревая структура «вулканического торнадо» в Центральной Камчатской Депрессии [Колосков,

Аносов, 2000]. Красным цветом показано положение предполагаемой вихревой структуры, положение которой совпадает с Толбачинской вулcano-тектонической депрессией.

Тут надо вспомнить, что одним из главнейших достижений в развитии идей о вихревых структурах явилось установление возможности самостоятельного вращения различных оболочек [Долицкий, 2000]. Это положение можно сформулировать иначе, а именно: независимость вращения оболочек есть результат различия их физико-химических параметров. В этом случае естественно напрашивается идея о совпадении северного окончания предполагаемой вихревой структуры с северным окончанием вулcano-тектонической депрессии. Можно сделать и следующий шаг – предположить, что образование вулcano-тектонических депрессий, особенно ассоциированных с базальтовым вулканизмом, связано с вихревыми структурами типа торнадо, границы которых совпадают с границами вулcano-тектонических структур.

Надо ли говорить, что присутствие до 20% жидкой фазы в зоне магмообразования под вулcano-тектоническими депрессиями [Федотов, Фарберов, 1966] создает идеальные условия для появления вихревых структур, что может явиться причиной генерации вулcano-тектонических депрессий.

Отмеченное выше резкое изменение амплитуды вертикального смещения по разломам обрамления на Ичинской и Толбачинской структурах и ярко выраженный телескопированный характер опускания на Жупановско-Семячинской структуре подтверждают предполагаемую вихревую природу смещений масс в рассматриваемых вулcano-тектонических депрессиях.

Центробежный «разгон», испытываемый магматическим материалом в пределах предполагаемых вихревых структур, должен сказываться на трех этапах развития кальдерного вулканизма:

1. На дифференциации магматического расплава. По всей видимости, процессы дифференциации крупных кольцевых массивов типа Хибин или Томтора идут именно по этому сценарию;

2. Должна иметь место «отгонка» летучей фазы от магматического расплава в результате чего может образовываться игнимбритообразующая газовая эмульсия;

3. Происходит дифференциация рудной фазы в газо-гидротермах. В итоге должна формироваться концентрическая зональность в распределении различных по составу рудных тел в пределах кольцевой структуры. Пример этого можно наблюдать в концентрической зональности распределения рудных компонентов в массиве Томтор [Erlich, Tolstov, 2012].

Ассоциация крупнейших вулcano-тектонических структур с базальтовым вулканизмом определяет резкое различие с ранними их определениями, подчеркивавшими ассоциацию вулcano-тектонических депрессий с огромными полями кислых игнимбритов. Тут невольно напрашивается аналогия с горой Олимпус, крупнейшим вулканическим центром на Марсе, предположительно базальтового состава, расположенном в гнездовой структуре, состоящей из шести центров обрушения, общий диаметр которых достигает 80x65 км. Можно высказать предположение о том, что сходный генезис имеют и лунные «моря» и что на Луне присутствуют кальдеры, сходные с тем типом земных кальдер, образование которых сопровождается массовыми извержениями кислой пироклаستيку [Green, 1969, Elston, 1965].

Присутствие под кальдерами существенно жидких магм и постоянная связь их с зонами трансформных разломов (типа глубинных сбросо-сдвигов) создают исключительно благоприятные условия для образования вихревых структур. Признание этой вполне убедительной гипотезы имеет большое значение с точки зрения возможных механизмов дифференциации как магматического вещества, так и особенно гидротермального раствора и рудной фазы, испытывающих центробежный разгон, в этой связи нельзя не вспомнить работы М. А. Фаворской и И. Н. Томсона о том, что крупные рудные месторождения обычно локализуются в пределах кольцевых структур [Фаворская, сост., 1989].

Очевидная пространственная локализация многочисленных рудопроявлений в кальдерах оставляет открытым вопрос о наличии генетической связи кальдерообразования и рудообразования. При наличии несомненной пространственной связи, временная корреляция между образованием кальдер и рудопроявлений отсутствует. Минерализация зачастую формируется на несколько миллионов лет раньше или позже кальдерообразующего извержения [Rytube, 1994, Connell et al., 2005, Guillon-Frotter, Burov, Milesi, 2000].

Особое место в описании кальдер занимает сборник, посвященный кальдере Узон и Долине Гейзеров [Набоко, 1974], поскольку в нем суммированы данные как по структуре и эволюции вулканизма, так и по

гидрогеологии термальных вод и современному рудообразованию. В 2009 году было осуществлено интернетное издание сборника под редакцией автора [Erlich, 2009]. Эти материалы послужили основой для многочисленных попыток моделирования упомянутых процессов [Бычков, 2009].

Другим уникальным примером минералообразования на посткальдерной стадии развития вулканов является вулкан Кудрявый, расположенный в кальдере Медвежьей на острове Итуруп (Южные Курилы). Здесь, в единственном месте в мире, температура пароводяных струй фумарол достигает 920°C [Знаменский, 2007].

Минералы, образующие корочки вокруг фумарол, включают самородные элементы: сера, графит, кремний-титановые минералы, сульфиды свинца, висмута, цинка, кадмия, меди, индия, рения, мышьяка. Но наиболее характерной чертой минерализации можно считать присутствие многочисленных минеральных форм молибдена. В этом отношении эту минерализацию можно считать родственной молибденитовой минерализации, ассоциирующейся с гранитоидами Скалистых гор в Колорадо (Клаймакс и др.) и молибденового месторождения Тырнауз на Северном Кавказе. Среди молибден-содержащих минералов в отложениях фумарол присутствуют последовательно образующиеся повеллит ($\text{Ca}[\text{MoO}_4]$) – молибденит (MoS_2), тугариновит (MoO_2), молибдит (MoO_3) ильземанит ($\text{Mo}_3\text{O}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)+растворимая Мо-фаза). По заключению В. С. Знаменского, такая последовательность минералов, скорее всего, свидетельствует, что первоисточником всего являлся молибденовый ангидрид; появление сероводорода отмечено ближе к поверхности (за счет гидролиза SO_2). Неожиданным было обнаружение разновидности молибденита, в котором молибден существенно (до 49%) замещен рением. Среди других минералов описаны кристаллы кадмиевого вюртцита (ZnCd)S, дисульфида рения, сульфидо-висмутовые сульфосоли.

В Паужетской вулcano-тектонической депрессии кровля гравитационной аномалии, предположительно совпадающей с промежуточным очагом, располагается на глубине 15-20 км. При этом «подлежащее» интрузивное тело, вероятно, имеет состав, соответствующий составу игнимбритов так называемого гольгинского горизонта, то есть отвечает дацитам. Обращает на себя внимание, что генерирующее аномалию тело располагается в пределах базальтового слоя коры, другими словами кислые вулканы имеют глубинное происхождение и не связаны с плавлением гранитного слоя. Однотипный состав, по-видимому, имеет и интрузия под вулcano-тектонической депрессией, в которой располагается вулкан Хангар. Указанием на средний состав пород в промежуточном очаге служат многочисленные ксенолиты гранодиоритов и диоритов в дацитах вулкана.

КОНКА СТРУКТУРЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ОПОЛЗАННЯ

Чтобы закончить обзор вулcano-тектонических депрессий надо остановиться на еще одном типе структур – так называемых «конках». Термин этот произошел от итальянского слова, обозначающего раковину. Структуры этого рода образованы системой пологих сбросов, возникающих в ходе гравитационного оползания после снижения давления в верхней части магматической камеры, приводящего к просадке поверхности. Как видим, механизм близок, если не аналогичен, предполагаемому процессу кальдерообразования [Tanakadate, 1929, Влодавец, 1954]. В российской геологической литературе этот термин практически не употребляется вообще. Причина тому видимо связана с широко распространенным отрицанием сколько-нибудь существенной роли горизонтальных напряжений. Между тем «конкообразные» структуры на вулканах описаны во многих местах под другими названиями, в частности, как секторные грабены. Это терминологически неверно, прежде всего потому, что разломы их обрамления не могут быть причислены к нормальным сбросам, а связаны с оползанием сектора по пологой плоскости сместителя. Как я понимаю конками являются секторные структуры на вулкане Менделеева (остров Кунашир, Южные Курилы), вулкане Зимина сопка (Ключевская группа вулканов, Камчатка). В последние годы «живущая» структура такого рода была описана на вулкане Дамаванд, Иран [Shirzael et al., 2011].

ЛИТЕРАТУРА

Авдеев А. В., 1968, О кольцевых структурах Земли. //Сб. VI совещания по пробл. планетологии. Тезисы докладов, вып. 1, Л

Аверьев В. В., 1966, Гидротермальный процесс в вулканических областях его связь с магматической деятельностью. //Современный вулканизм, Тр. Второго вулк. Сопещения 3-17сент. 1965 года. М. Наука, стр. 118-128;

Аверьев В. В., А. Е. Святловский, 1961, Вулкано-тектонические структуры Южной Камчатки. //Известия АН СССР, сер. геол., № 6, стр. 98-100;

Апрелков, С. Е., 1971, Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки. //Геотектоника, № 2, стр. 105-111.

Арамаки, С., 1977, Пирокластические потоки и кальдеры Японии. В: Вулканизм островных дуг. //М. Наука, стр. 207-211;

Атитлан (озеро).

[http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%B8%D1%82%D0%DO%BO%](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%B8%D1%82%D0%DO%BO%...)

...

Баддингтон А., 1963, Формирование гранитных тел. М., ИЛ;

Бакуменко И. Т., Н. А Шугурова, Э. Н. Эрлих, Н. М. Попова, 1970, Генезис кварца из пемз вулкана Хангар. //Докл. АН СССР, т. 191, № 3;

Белюсов В.И., 1978, Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. //М. Наука, 176 стр.

Болдуин Р. Б., 1968, Соотношения между параметрами кратера. — В кн.:

Взрывные кратеры на Земле и планетах. //М., «Мир», с. 67—80.

Бычков А. Р., 2009, Геохимическая модель современного рудообразования в кальдере Узон (Камчатка). Москва, ГЕОХИ, 124 с.;

Влодавец В. И., 1954, О вулканической тектонике. Бюлл вулк. ст. № 236 стр. 38-44;

Волынец О. Н., 1969, Плагноклазы с промежуточной оптикой в кислых четвертичных лавах Юго-Восточной Камчатки и их генезис. //В сб. «Вулканизм, гидротермы и глубины Земли». Петропавловск-Камчатский;

Волынец О. Н., А. В. Колосков, Г. Б. Флеров, Н. Л. Шилин, 1968 Формация габбро-гранодиоритов миоценового возраста. //В сб. «Формации и фации верхнемеловых и кайнозойских магматических образований Центральной Камчатки». М., «Наука»;

Долицкий А.В., 2000, Вращение мантии по ядру: движение географических и магнитных полюсов, периодичность геологических и тектонических процессов //Вестник ОГГГН РАН. № 4 (14). www.scgis.ru/russian/cp1251/_dgggms/4-2000/dolitsky.htm

Егоров Л. С., 1991, Ийолит-карбонатитовый плутонизм. //СПб, Недра, 260 стр.;

Знаменский В. С., 2007, Уникальный вулкан на Курилах.

<http://kcmi.ru/geologija/?cd=73>

Зубин М. И., 1980, Геофизические поля и глубинное строение по геофизическим данным. Масуренков Ю. П., ред. // М. Наука, стр. 10-19;

Зубин М. И., И. В. Мелекесцев, А. А. Таракановский, Э. Н. Эрлих, 1971, Четвертичные кальдеры Камчатки. Вулканизм и глубины Земли, //М. Наука, стр. 61-66;

Иванов Б. В., 1970, Извержение Карымского вулкана в 1962—65 гг. и вулканы Карымской группы. //М., Наука;

Каипов А. Д., М. Н. Баймуратов, 1970, Муассанит из эффузивно-интрузивных пород Акбастау-Кусмурунского рудного поля. //Изв. АН КазССР, сер. геол., № 3;

Кальдера. Геоологическая энциклопедия.

[http://dic.acadtmic.ru/dic.sf/enc_geolog/2011/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%8C%](http://dic.acadtmic.ru/dic.sf/enc_geolog/2011/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%8C%...)

Катмай, 2005, // [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%0AD0%B%D1%82%D0%BC%D0%B0%D0%B9](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%0AD0%B%D1%82%D0%BC%D0%B0%D0%B9...)

Колосков, А. В., Г. И. Аносов., 2005, Новая версия интерпретации изотопно-геохимических данных плиоцен-четвертичных вулкаников Камчатки. //Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, с. 7-15.

Кондёр. // [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B4%D1%91D1%80](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B4%D1%91D1%80...)

- Коноплева Н. Г., 2009, Геология апатито-нефелинового месторождения Коашва (Хибинский массив).//<http://geo/web/ru/db/disser/view.html?mid=1183079>;
- Короновский Н.В., 2006, Общая геология. М., Издательство МГУ, 528 стр.;
- Кратера поднятия, //www.minigexpo.ru/useful/1539).
- Леонов В. Л.,1981, Разрывные нарушения Паужетской вулканотектонической структуры.//Вулканология и сейсмология., №1, стр. 24-36;
- Леонов В. Л.,И. Н. Биндеман, А. Н. Рогозин, 2008, Новые данные по Ar-Ar датированию игнимбритов Камчатки.//Материалы VI региональной молодежной научной конференции, посвященной Дню Вулканолога. Петропавловск-Камчатский, ИвиС, ДВО РАН;
- Леонов В. Л., Гриб Е. Н., 2004, Структурные позиции вулканизма четвертичных кальдер Камчатки.//Владивосток, Дальнаука, 170 стр.
- Леонова Л. Л., Н. И. Удалцова, Б. В. Иванов, 1969, Редкие щелочные и радиоактивные элементы в породах Карымского вулкана.//В сб. «Вулканизм, гидротермы и глубины Земли». Петропавловск-Камчатский;
- Луцицкий И. В., 1971, Основы палеовулканологии, М., Наука, т. 1-2, 850 стр.;
- Маракушев А. А., Тарарин И.А., 1964, О глубинности формирования гранитоидов. //В: XXII сессия МГК. Петрографические формации и проблемы петрогенезиса.// Доклады советских геологов, М., Наука;
- Масайтис В. Л., М. В. Михайлов, Т. В. Селивановская, 1971, Попигайский метеоритный кратер.// Советская геология, № 6;
- Масуренков Ю. П. ред., 1980, Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки.// М. Наука
- Масуренков Ю.П., ред., 1980, Вулканический центр, как проекция эндогенной динамической системы. Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура).//М.: Наука, стр.275-290.
- Масуренков Ю. П., 1969, Включения в вулканических породах и проблема возникновения магматических расплавов.//В сб. «Вулканизм, гидротермы и глубины Земли». Петропавловск-Камчатский;
- Масуренков Ю. П., М. А. Комкова, 1978, Геодинамика и рудообразование в купольно-кольцевой структуре.//М. Наука, 288 стр.
- Набоко С. И., ред., 1974, Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. Москва, Наука, 170 стр.;
- Ненашев Н.И., 1979, Магматизм и развитие рудно-магматических узлов в Восточной Якутии. //Новосибирск: Наука,142 с.
- Рогозин А. Н., 2008, Карымчинская гидротермальная система (Южная Камчатка): новые данные о геологическом строении района.//Материалы VI региональной молодежной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, ИвиС ДВО РАН, стр. 93-98;
- Святловский А. Е.,1975, Региональная вулканология.//Москва, Недра, 225 стр.;
- Святловский А. Е.,1971, Структурная вулканология.//Москва, Недра 232 стр.
- Святловский А. Е. 1959. Атлас вулканов СССР.// М., изд-во АН СССР, 178 с.
- Устиев Е. К., 1965, О составе родоначальных магм па примере меловых и палеогеновых формаций Охотского вулканической пояса.//Изв. АН СССР, серия геол., № 3.
- Фаворская М.А.,1989,Изучение сквозных рудоконцентрирующих структур в прогнозных целях.//М., Аэрогеология,62 стр.
- Федотов С. А., ред., 1984, Большое Толбачинское трещинное извержение, Камчатка 1975-1976, //Москва, Наука, 640 стр.
- Федотов С. А., А. И Фарберов, 1966, Об экранировании поперечных сейсмических волн и магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов. //В

кн. «Вулканизм и глубинное строение Земли». Тр. II Всесоюз. вулканолог, совещ., т. 3. М., Наука.

Шеймович В.С., 1979, Игнимбриты Камчатки.// М.: Недра, 179 с.

Штейнберг Г. С., 1969, О взрывном образовании кальдер.//Сб. «Вулканизм, гидротермы и глубины Земли». Петропавловск-Камчатский;

Штейнберг Г. С, Балеста С. Т., Зубин М. И., Таракановский А, А. 1966, Геологическое строение Авачинского вулкана по геофизическим данным.//Труды II Всес. вулканол. совещ., т. 3. М., Наука.

Эрлих Э. Н., ред., 2009, Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. //Интернет-издание http://sites.google.com/site/geyzer-uzon/kaldera_uzona-istoria-issledovaniya;

Эрлих Э., 2010, Кислый вулканизм, рост гранитного слоя коры, гидротермальный процесс и рудообразование.//<https://sites.google.com/site/geovolcanism/proishozhdenie-granitnyh-rasplavov>

Эрлих Э. Н., ред.,1966, Петрохимия Курило-Камчатской кайнозойской вулканической провинции. //Наука, Москва, 279 стр.;

Эрлих Э., В. И. Белоусов, 2011,. Базальтовый вулканизм ключ к решению проблем кислого вулканизма и геотермии//

Эрлих Э. Н., И. В. Мелекесцев, 1973, Четвертичный кислый вулканизм западной части Тихоокеанского кольца.// В кн.: Кислый вулканизм. Новосибирск, Наука, с. 4-39.

Эрлих Э. Н., Ю.П.Трухин, 1969, Пример картирования неоген-четвертичных вулканических толщ одного из районов юго-восточной Камчатки.// В кн: Методика картирования вулканических формаций. М. Наука

Acocella V., F. Cifelli, R. Funicello, 2000, Analogue models of collapse calderas and resurgent domes.// Jour. Volc. Geothermal Res., 104, 81-95;

Acocella V., R. Funicello, 1999, The interaction between regional and local tectonics during resurgent doming: the case of the Island Ischia, Italy.//Jour. Volc. Geothermal Res., 88, 109-123;

Acocella V., F. Salvini, R. Funicello, C. Faccuone, 1991, The role of transfer structures on volcanic activity in Campi Flegrei (Southern Italy). //Jour. Volc. Geothermal Res. 91, 123-139;

Aldis A. T., and S. A. Ghazill, 1984, The regional geology and evolution of Lake Toba volcano-tectonic depression, Indonesia.//Jour. of Geol. Soc. 141, 487-500; jgs.lyellcollection.org;

Anderson E. M. 1937, Cone -sheets and ring-dykes; the dynamical explanation.// Bull. volc t 1.

Anderson E. M.,1936, The dynamics of the formation of cone-sheets, ring dykes and cauldron subsidence.//Proc. of the Royal Soc. of Edinburgh, v. 56, p. 128-156;

Allaby A. and M. Allaby, Volcano-tectonic depressions. //A Dictionary of Earth Science www.encyclopedia.com/doc/1013;

A Living Breathing caldera, 2010,// <http://www.yellowstonegis.edu/research/calderaCrustal.html>;

Aramaki S., 1984, Formation of Aira caldera, southern Kyushu, ca. 22000 years ago. //Journal Geoph. Res. 89, 8485-8501;

Bacon Ch. R., J. V. Gardner, L. A. Mayer, M. W. Buktenica, P. Dartnell, D. W. Ramsey, J. E. Robinson, 2002, Morphology, volcanism, and mass wasting in Crater Lake, Oregon, //Geological Society of America Bulletin v. 114, p. 675-692.

Bailey R. A., 1969, Form of the Glen Coe magma chamber and the Main Fault-Intrusion, Scotland.//IAVCEI Symposium on volcanoes and their roots. Oxford, p. 280-281;

Bauer K., R. B. Trumbell R. B., and Vietor T., 2003, Geophysical Images and crustal model of intrusive structure beneath Messum ring complex, Namibia. Earth and Planetary Sci. Letters, 216, 65-80;

Barberi F., E. Cassano, A. Sbrana, 1991, Structural evolution of Campi Phlegrei caldera in light of volcanological and geophysical data. //Jour. Volc. Geothermal Res., 48, 33-4;

- Bateman P.C., Eaton J.P., 1967, Sierra Nevada Batholith.//*Science*, V. 158. N 3807. P. 1407-1417.
- Bindeman I. N., 2006, The Secrets of Supervolcanoes. //*Scientific American*, № 6, p. 70-76;
- Billings M. P., 1945, Mechanics of igneous intrusion in New Hampshire.//*Amer. J. Sci.*, v. 234.
- Buch L. von, 1825, Physicalische Beschreibung Kanarische Inseln, //Berlin, KaiserlAcad. Wissensch., 407 p.; Caldera crustal deformation. //A living Breathing caldera.
- Caldera de Taburiente, // http://en.wikipedia.org/wiki/caldera_de_Taburiente
- Caldera, 2011, // <http://en.wikipedia.org/wiki/caldera>;
- Can another Great Volcanic Eruption Happen in Alaska?, 1998, // <http://pubs.usgs.gov/fs/fs075-98>,
- Casadevall T. J., Dzurisin D., 1987, Intrusive rocks of Kilauea caldera//USGS Professional paper 1350, in Decker R. Volcanism in Hawaii, chapter 14, 377-394p.;
- Cassano E., M. Gugliemini, and Vardani G., 1956, Phlegrean Fields Area. Results of geothermal research.//Paper presented at International Symposium on Earthquake Engineering.
- Chesner C. A., W. I. Rose, 1991, Stratigraphy of Toba Tuffs and the evolution of the Toba caldera Complex, Sumatra, Indonesia.// *Bull of Volc.* v. 53, № 5, p. 343-356;
- Christiansen R. L., 2001, The Quaternary and Pliocene Yellowstone Plateau Volcanic Field of Wyoming, Idaho, and Montana. //U. S. Geol. Survey Prof. Paper 729-G, 146 p.
- Cloos H., 1931, Einige Versuche zur Granittektonik.//*Neues Jahrb. Mineral., Geol. und Paleontol.*, Bd. 64, Abt. A. (Brauns Festband) (in German).
- Cobbing T.E., 1982, The segmented coastal batholith of Peru: its relationship to volcanicity and metallogenesis // *Earth Science Review*, Elsevier Publishing Company, V. 18. P. 241—252.
- Connell J., D. B. Cooke, J.L Walsh, H Stein, 2000, Relationship between caldera collapse and magma chamber.//*Jour. Volcanology and geothermal research*, *Economic Geology*, August 1, 100 (5), p. 979-1005;
- Connor Ch. B., S. N. Williams, 1989, Interpretation of gravity anomalies, Masaya Caldera Complex, Nicaragua.//*Transactions of the 12th Carribean Geological Conference*, St. croix, U. S. Virginia Islands, Miami Geological Society, vol. 12, p. 495-502;
- Cole J.W., D.M. Milner, K.D. Sprinks, 2005, Caldearas and caldera structure. *Earth Sci. Review*, 60 (1-2), 1-26;
- Cook E. F., ed., 1966, Tufflavas and ignimbrites. A survey of Soviet studies.//*American Elsevier*, 212 p.
- Dana J. D., 1890, Characteristic of Volcanoes with contributions of Facts and Principles from the Hawaiian Islands.// *Dodd, Macdonald and CO*, New York, NY, 399 p.
- De Rita D., M. Di Filippo, C. Rosa, 1996, Structural evolution of the Bracciano.volcano-tectonic depression, Sabatini volcanic district, Italy.// *Geol. Soc. of London*, Sp. publication, 110, p. 225-236;
- Druitt T. H., and Bacon Ch., 1985, Lithic breccia and ignimbrite erupted during collapse of Crater Lake caldera, Oregon.//*Journal Volcanol. Geothermal Research*, 29, 1-32;
- Dzurisin, D., Yamashita, K.M., and Kleinman, J.W., 1994, Mechanisms of crustal uplift and subsidence at the Yellowstone caldera, Wyoming.// *Bulletin of Volcanology*, v. 56, p. 261-270.
- Escher B. I. 1930, On the formation of Calderas//*In.: Proc. IV Pacif. sci. congr.*», vol. 2, p. 120—135.
- Erlich E. I., 1989, Specific type of volcano-tectonic depressions surrounding groups of volcanoes.//*New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources*, Bull. 131, Continental Magmatism, Abstracts of IAVCEI General Assembly, Santa Fe, p. 83;
- Erlich E. I., 1984, Geology of the calderas in Kamchatka and Kurile Islands in comparison with same structures of Japan and the Aleutians, Alaska.//*USGS Open-File Report* 86-291:300 p.

- Erlich EN, Melekestsev IV, AA Tarakanovsky, 1972, Quaternary calderas of Kamchatka, Bulletin of volcanology, v. 36, pp. 222-237;
- Geikie A., 1897, The ancient volcanoes of Great Britain, London. McMillan, 523 p.
- Greenwood R., 1951, Younger intrusive rocks of of the Plateau Province, Nigeria., compared with the alkalic rocks of New England. //Bull. G.S..A., v. 62, 1151-1178;
- Gudmudsson A., 1988, Formation of collapse calderas. //Geology, 16, 808-810;
- Guillon-Frotter L., Burov E. B., Milesi J.-P., 2000, Genetic links between ash-calderas and associated ore deposits as revealed by large-scale mechanical modeling.//Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 102, № 3, p. 339-361;
- Hildreth W., R. L. Christiansen, J. R. O'Neil, 1984, Catastrophic isotopic modification of caldera subsidence, Yellowstone plateau volcanic field//Journal Geoph. Res. 89B, 8339-8369;
- Hills E. S., 1958, Cauldron subsidences, granitic rocks and crustal fracturing in S. E. Australia. //Geol. Rundschau, v. 47, p. 543-561;
- <http://miningexpo.ru/useful/1539>
- <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%DB%BD%D0%B4%D1%91%D1%80>
- Is the surging Yellowstone Caldera – the World's largest Supervolcano – poised to erupt?//<http://earth-issues.com/2011/01/is-the-surging-yellowstone-caldera-the-worlds-largest-supervolcano-poised-to-erupt/>
- Judd I.W., 1874, On the Ancient volcanoes of the Highlands//Quart. J. Geol. Soc. London, v. 30.
- K a t i l i J.A., 1966, On the possible occurrence of large transcurrent faults in Sumatra, Indonesia. //Proc. XI Pac. Sci. Congress, vol. 4, Tokyo;
- Katsui Y., 1963, Evolution and magmatic history of some Krakatoan calderas. //In Hokkaido. Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. IV, Geol. and Mineralogy. V. 11, p. 631-650;
- Kenzo Y. 1971, Relation between caldera size and magma chemistry//«Bull. volc. soc. Jap.», 1971, vol. 16, № 1, p. 28—35.
- Knopf A. Time required to emplace Boulder batholith.//American Journ. Sci. 1964. V. 262. N 10. p. 1207-1211.
- Komuro H., 1987, Experiments on cauldron formation: a polygonal and ring fractures//Jour. Volc. Geothermal Res. 31, pp. 149-149;
- Komuro H., Y. Fudjita, K. Kodama, 1984, Numerical and experimental models on the formation mechanism of collapse basins during the Green Tuff orogenesis of Japan.//Bull. Volc. 47, 649-666;
- K u n o H., 1966, Review of pyroxene relations in terrestrial rocks in the light of recent experimental works. //Mineral. Jour., vol. 5, No 1.
- K u n o H., 1960, High-alumina basalt. //Jour, of Petrology, vol. 1, pt. 2, 1960.
- K u n o H., 1959, Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas. //Bull. Volc, II ser., t. 20;
- Lipman P. W., 2000a, The Central San Juan caldera cluster: regional volcanic framework.// Spec. Paper Geol. Soc, America, 346, 9-71;
- Lipman P. W., 2000b, Calderas. In: Sigurdsson H., (Editor) Encyclopedia of volcanoes, //Academic Press, San Fransisco, pp. 643-556;
- Lipman, P. W., 1999, "Caldera".//In H. Sigurdsson, ed., 1999, Encyclopedia of Volcanoes. [Academic Press](#);
- Lipman P. W., 1995, Subsidence of ash-flow calderas: role of magma chamber geometry, //IUGG Gen Assem. 21 (Week A), 452;
- Lipman P. W., 1984, The roots of ash flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths. //Jour. Geoph. Res. 89B, 8801-8841;
- Lyell, Ch., 1858, On the structure of lavas which have consolidated on steep slopes; with remarks on the mode of origin of Mount Etna, and on theory of «Craters of Elevation».// Phil. Transaction Soc. Of London, 148, 703-786;

- Marti J. G.J. Abey, L.T. Redshow, R.S. J. Sparks, 1994, Experimental studies of caldera collaps.// Jour. Geol. Soc. (London), 151, 919-929;
- Masaya, Nicaragua, 2000, // http://volcano.oregon.vwdocs/volc_south_america/masaya.html;
- Matsuoto T., 1965, Some aspects of the formation of primary granitic magmas in the upper mantle. // Upper Mantle Symp. (New Delhi, 1964), J. U. G. S., 112—126;
- Matsuoto H., 1963, Petrological study on rocks from Aso volcano. // Kumamoto Jour. of Sci., ser. B, sec. 1, Geology, v. 5, No 2;
- McBirney A.R., and A.R. Williams, 1979, *Volcanology*. San Francisco: Freeman, Cooper and Company. 397 pp.
- McCall G. J. H., 1963, Classification of calderas: Krakatoan and Glen Coe types// Nature, v. 197, p.136-138;
- Meertens Ch., Mangleer, R. B., Smith, R., Ch. Bauer, M. Puskas, 2000, Crustal deformation of the Yellowstone caldera from campaign and continuous GHS surveys 1987-2000.//Eos 81:1388-1388;
- Moor I., P. Kokelaar, 1998, Tectonically controlled piecemeal caldera collapse: case study of Glencoe caldera, Scotland.//Geol. Soc. America Bull. V. 110, p. 1446-1466;
- Newhall Ch. G., D. Dzurizin, 1988, Historical unrest at large calderas of the world. //U. S. Geol. Survey Bull. 1855, (2 volumes, 1108 p.)
- Oftedahl C., 1959, Volcanic sequence and magma formation in the Oslo Region// Geol. Rundschau, Bd. 48;
- Pelton J. R., and R.B. Smith, 1979, Recent crustal uplift in Yellowstone.Ntl. Park.//Jour. Geoph. Res. 117, 2745-2761;
- Ponomareva V. V., R. P. Kyle, I. V. Melekestsev, P. G. Rinkleff, O. V. Dirkse, L. D. Sulerzhitsky, N. E. Zaretskaya, R. Rourke, 2004, The 7600 (¹⁴C) year B. P. Kurile Lake caldera-forming eruption. Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships.//Jour. Volc. Geothermal Res. 136, 199-222;
- Rampino M., R.B. Stothers, 1988, Periodicity in flood basalts, mass extinction and impacts.// Science, 241, 663-668;
- Richey J. E. and Thomas H. H., 1930, The geology of Ardnamurchan, northwest Mull and Coll. Memoir of the Geol. Survey (Scotland).//HMSO, 393 p.;
- Roche O., T.H Druitt, O. Merle, 2000, Experimental study of caldera formation Journal of Geophysical Research v. 10, iss. B1, 10 January 2000, pp, 395-418;
- Rymer H., B. van Wick de Vries, J. Stix, G. William-Jones, 1988, Pit crater structure and processes governing persistent activity at Masaya volcano, Nicaragua.//Bull. Volcanology 59, 345-355;
- Rytubo J. J., 1994, Evolution of volcanic and tectonic features in caldera setting and their importance in localization of ore deposits. //Economic Geology, v. 89, № 8, p. 1887-1896;
- Rymer H., B., van Wick de Vries, J. Stix, G. William-Jones, 1988, Pit crater structure and processes governing persistent activity at Masaya volcano, Nicaragua.//Bull. Volcanology 59, 345-355;
- Scandone R., 1990, Chaotic collapse calderas.//Jour. Volc. Geothermal. Res. 42, 285-308;
- Schroter J. H., 1802, Selenotopographische Fragmente.//vol. 2. Getting. 1791 (in German).
- Seager W. R., 1973, Resurgent Volcano-Tectonic Depression of Oligocene age, South-central New Mexico.// Geol. Soc. America Bulletin v. 84, p. 3611-3526;
- Shirzael M., T. R. Walter, H. R. Nakali, and E. P. Holohan, 2011, Gravity-driven deformation of Damavend volcano, Iran, detected through InSAR time series.//Geology, v. 39, p. 251-254;
- Simkin T., K. A. Howard, 1970, Caldera collapse in the Galapagos Islands 1968// Science 169, 429-437;
- Simkin T., and Fiske R. A., 1983, Kraratau 1883, The volcanic eruption and its Effects. //Smithsonian Institution, Washington D. C., 484 p.;
- Smith R. L., 1960, Ash flows. //Bull. Geol. Soc. America, v. 71, N 6.
- Smith R., 1961, Resurgent Calderas. //USGS Research, Pap. 424D.
- Smith R. L., and Bailey R. A., 1956, Resurgent cauldrons//Geol. Soc. America, 116, 153-210;

- Soengkono S., 1995, A magnetic model for deep plutonic bodies beneath the central Taupo Volcanic Zone, North Island, New Zealand. // *Journal Volc. Geothermal Res.*, 68, 193-207;
- Sparks R. S. J., and Wilson L., 1984, A model of gravitational column collapse. // *J. Geol. Soc.* 132, 441-452;
- Spera F. J., and J. A. Crisp, 1981, Eruption volume, Periodicity and Caldera Area: Relationships and Inferences on development of Compositional Zonation in Silicic Magma Chambers. // *Jour. Volcanol. Geothermal Research*, 11, 169-187;
- Sparks S., S. Self, J. Grattan et al., 2005, Super-eruptions: global effects and future threats. // Report of a Geological Society of London Working Group, 25p.;
- Stoiber R. E., S. N. Williams, and R. J. Huebert, 1986, volcanic sulphur and halogen geochemistry at Masaya caldera complex, Nicaragua: total flux and variations with time. // *Jour. Geoph. Research* 91 (B12), 12,215-12,231;
- Symposium on volcanoes and their roots. England. // Abstracts. Liverpool, 1997;
- Tanakadate H., 1929, The problems of calderas in Pacific region. // *Proc. of the Fourth Pacific Scientific Congress*, p. 729-744;
- Teller E., W. K. Talley, G. H. Higgins, and Johnson G. W., 1968, The constructive uses of Nuclear Explosives. // McGraw Hill, New York, NY 320 pp.
- Verbeek R. D. M., 1885, Krakatau. In: T Simkin and R. S. Fiske, eds., *Krakatau 1883 - the volcanic eruption and its Effects*. // Smithsonian Institution, Washington D. C., pp. 169-269;
- Volynets O. N. V. V. Ponomareva, O. A. Braitseva, I. V. Melekestsev, Ch. C. Chen, 1999, Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber. // *Jour. Volc. Geothermal Res.* 91, 23-42;
- Waite G. P., and R. B. Smith, 2002, Seismic evidence for fluid migration accompanying subsidence of the Yellowstone caldera. // *Journal of Geoph. Res.*, v. 107, # B9, ESE 1-14;
- Walker G. P. L., 1984, Downsag cauldrons, Ring Faults, Caldera Sizes and Incremental caldera Growth. // *Jour. Geoph. Res.* 89, 8497-8416;
- Walker G. P. L., 1985, Origin of coarse lithic breccias near ignimbrite source 27;
- Walter T. R. and Troll V. R., 2001, Formation of caldera periphery faults: an experimental study. // *Bull Volc.* v. 63, p. 191-203;
- Williams, H; 1941. Calderas and their origin. // *California University Publ. Geol. Sci.* 25, 239 p.
- Williams H., and A. McBirney, 1979, *Volcanology*. // Freeman Cooper, San Francisco, 397 p.
www.Yellowstongis.utah.edu/research/calderaCrustal.html
- Yokoyama I., 1981, Gravimetric studies and drilling results at the Four calderas in Japan // In: D. Shimozuru and I. Yokoyama, eds. *Arc Volcanism*. // Physics and Tectonics, Terra Sci. Pub. Co Tokyo, pp. 29-41;
- Yokoyama I., 1963, Structure of calderas and gravimetric anomaly. // *Bull. Volc.* , t. 26;