

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И РЕАЛЬНОСТЬ: УСЛОВИЯ РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ В ВОСТОЧНО-КАМЧАТСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПОЯСЕ

*В.Л.Леонов*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, [lvl@kcs.iks.ru](mailto:lvl@kcs.iks.ru)*

### **Введение**

Формирование разрывных нарушений на поверхности Земли – редкое явление. Они образуются чаще всего в связи с сильными землетрясениями и являются выходом на поверхность плоскости разрыва, образовавшейся в недрах в неглубоко расположенном очаге землетрясения. В вулканических районах причины формирования разрывов могут быть разные. Например, разрывы, сформировавшиеся в 1987 г. в северо-восточной части Вулканической зоны Таупо в Новой Зеландии были связаны с землетрясением с  $M=6,3$  и имели, как предполагается, тектоническую природу – были связаны с растяжением в тылу вулканической дуги [20]. Разрывы, сформировавшиеся в 1975 г. на юго-восточном склоне вулкана Килауэа были связаны с крупным гравитационным оползанием части вулкана [25]. Разрывы, образовавшиеся в 1978 г. в рифте Асаль в Африке были связаны с внедрением дайки и землетрясением с  $M=5,3$  [24]. Множество молодых разрывных нарушений известно в Исландии, где неоднократно наблюдалось их образование также в связи с внедрением базальтовых даек. Отмечено, что формирование крупных разрывов (с амплитудой смещения более 1 м) в Исландии сопровождается сравнительно слабыми землетрясениями (с  $M$  не выше 2,5) [22]. Часть разрывных нарушений в Исландии формируется, как предполагается, без участия вулканической деятельности – в поперечных трансформных зонах. Они обычно связаны с землетрясениями, имеющими  $M$  5,8-7,0 [19, 21].

На Камчатке молодые разрывные нарушения развиты также широко и образуют несколько обособленных групп [4, 5]. Большой частью они связаны с вулканическими поясами и вытягиваются вдоль них. Многочисленные молодые разрывы располагается в осевой зоне Восточно-Камчатского вулканического пояса (ВКВП). В настоящей работе мы рассмотрим имеющиеся точки зрения на условия формирования этих разрывов, а также результаты изучения разрывов, сформировавшихся в 1996 г. вблизи Карымского вулкана, и то, что нового дают эти результаты для понимания причин образования разрывов в ВКВП.

### **Теоретические схемы**

Высказано несколько различных точек зрения на условия формирования разрывных нарушений, протягивающихся вдоль оси ВКВП. Как единую систему эти разрывы впервые выделил и описал В.А.Леглер [4, 5], который дал им название «Вулканический раздвиг». Зона разрывов, проходящая вдоль оси вулканического пояса, по В.А.Леглеру имеет ширину от 5 до 10 км, а отдельные нарушения, входящие в нее, параллельны друг другу и являются чаще всего сбросами. Встречаются также открытые трещины, цепочки шлаковых конусов, дайки, которые свидетельствуют о процессах растяжения, сконцентрированных вдоль оси вулканического пояса. В.А.Леглер также показал, что разрывы в этой зоне образуют несколько обособленных групп, которые под острым углом секут вулканический пояс и кулисообразно подставляют друг друга. Происхождение разрывов В.А.Леглер [5] связывал с расклинивающим действием гидростатически всплывающих магматических тел, а обособление кулисообразно расположенных групп – с наличием поперечных сдвигов, аналогичных трансформным разломам типа рифт-рифт (рис. 1, а).

И.В.Флоренский и В.Г.Трифонов [17] выделяя ту же систему разрывных нарушений, проходящую вдоль осевой части ВКВП, рассматривали ее несколько иначе – как чисто тектоническое образование. Они считали, что молодые разрывные нарушения маркируют здесь протяженную зону растяжения, которая «обеспечивает общий подъем магматического вещества из глубоких горизонтов (переходного слоя кора - мантия)». Исходя из таких представлений, кулисообразное расположение отдельных сегментов зоны разрывов эти исследователи связывали с наличием «левосдвиговой компоненты движений вдоль оси зоны» [17] (рис. 1, б).

По представлениям А.И.Кожурина [3] развитие кулисообразно расположенных сегментов в Восточно-Камчатской зоне разрывов связано с наличием серии поперечных субширотных разломов, по которым происходит смещение по типу правостороннего сдвига. В районах, где

расположены четвертичные кальдеры, по представлениям А.И.Кожурина происходят вращательные движения по часовой стрелке, что приводит к некоторому изгибу окончаний разрывов вблизи кальдер (рис. 1, в).

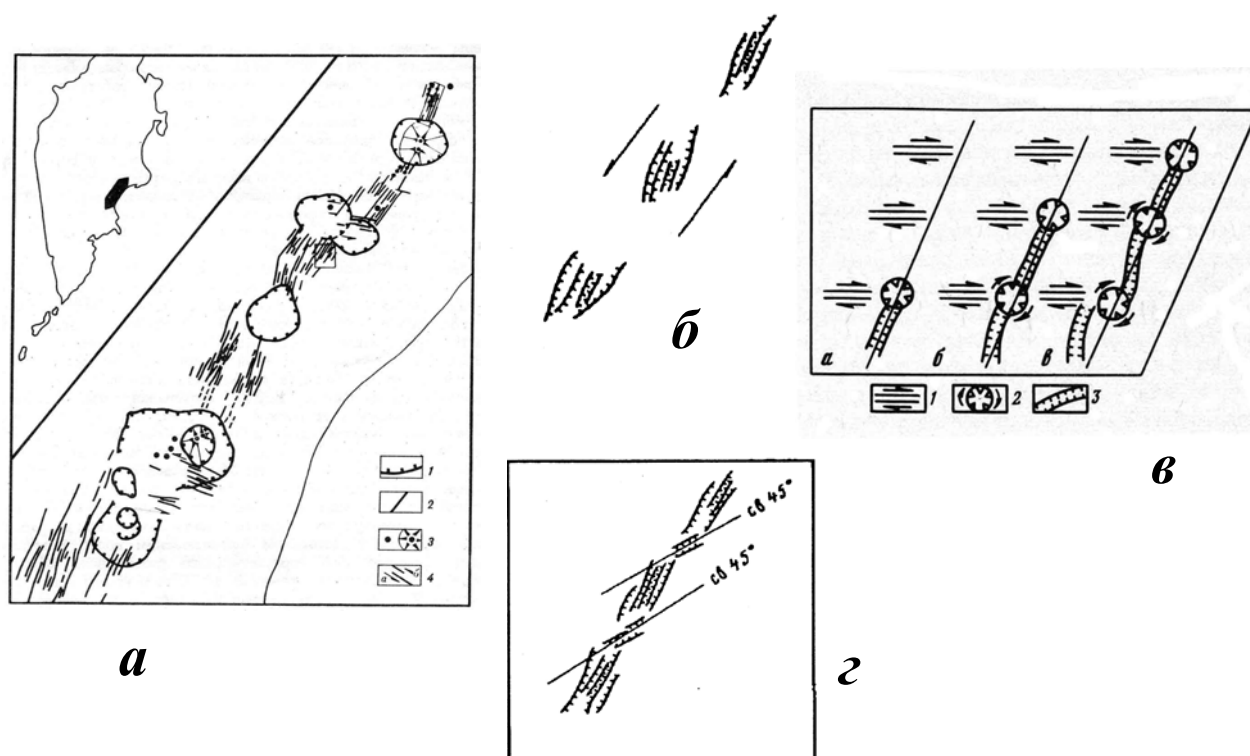


Рис. 1. Представления различных авторов о причинах кулисообразного расположения разрывов в пределах ВКВП. *а* – по В.А.Леглеру [5]: 1 – сбросы обрамления кальдер; 2 – сбросы и трещины растяжения; 3 – вулканические проявления, приуроченные к трещинам растяжения: *а* – небольшие вулканы, *б* – крупные вулканы; 4 – сдвиги; *б* – по И.В.Флоренскому и В.Г.Трифонову [17]; *в* – по А.И.Кожурину [3]: 1 – субширотные глубинные зоны (указаны направления предполагаемых смещений); 2 – кальдеры (показано направление предполагаемого вращения над глубинными сдвиговыми зонами); 3 – грабены осевой зоны растяжения ВКВП; *г* – по В.Л.Леонову [6].

Существенно отличаются от представлений, приведенных выше, взгляды В.Л.Леонова [6]. Рассматривая распространение позднеплейстоцен-голоценовых разрывных нарушений в пределах ВКВП и кулисообразное расположение их отдельных сегментов, В.Л.Леонов показал, что основное влияние на простирание и расположение молодых разрывов оказывает современное поле напряжений [6]. Кулисообразность в расположении отдельных сегментов зоны разрывов возникает из-за несовпадения общего простирания вулканического пояса и направления оси максимального сжатия современного поля напряжений (рис. 1, г).

В целом, как следует из приведенных данных, основные разногласия существуют в объяснении кулисообразности в расположении отдельных сегментов зоны разрывов ВКВП. Часть исследователей связывает ее появление с наличием «левосдвиговой компоненты движений вдоль оси зоны» [17]. Другие исследователи – с подвижками вдоль поперечных разломов, имеющих субширотное простирание, при этом некоторые считают, что эти поперечные разломы являются правыми сдвигами [3], а некоторые – что по ним происходит смещение как у трансформных разломов типа рифт - рифт [5]. Существует и объяснение, в котором кулисообразность объясняется без привлечения сдвиговых перемещений [6].

В 1996 году природа преподнесла подарок исследователям, изучающим разломы ВКВП – в результате тектоно-магматической активизации, произошедшей в районе Карымского вулкана, на поверхности образовались многочисленные разрывы, изучение которых позволило взглянуть на ранее высказанные точки зрения об условиях разрывообразования в данном районе критически и оценить правильность тех или иных представлений. Ниже мы рассмотрим основные итоги изучения разрывов, сформировавшихся в 1996 г., и то, какую новую информацию они дали для понимания процессов, происходящих в ВКВП.

## Разрывы, образовавшиеся вблизи Карымского вулкана в 1996 г.

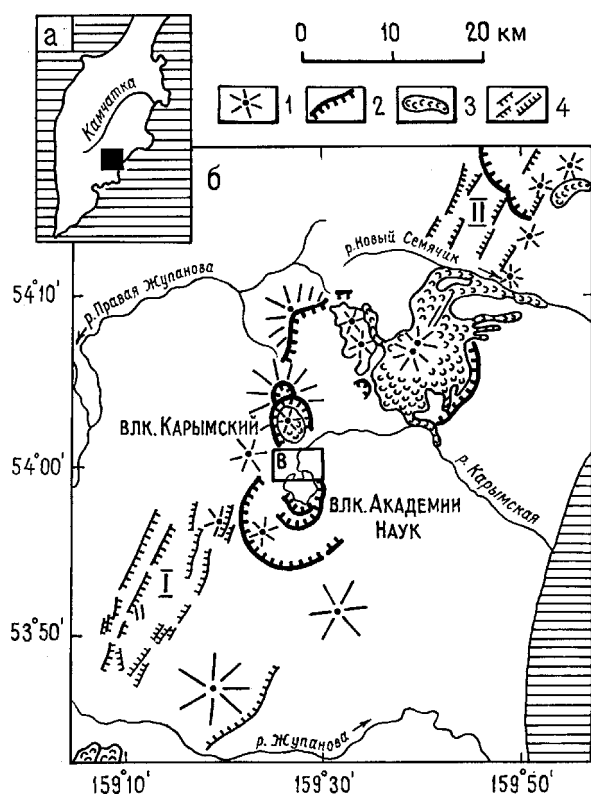


Рис. 2. Обзорные схемы (а, б) района тектоно-магматической активизации 1996 г. 1 – вулканы; 2 – кальдеры; 3–4 – лавовые потоки (3) и разрывные нарушения (4) позднеплейстоцен-голоценового возраста (I, II – обособленные группы разрывов: I – Жупановско-Карымская, II – Мало-Большесемячикская); в – см. рис. 3.

вдоль простирания и т.д. [7].

Район, где произошли описываемые события, приурочен к центру обширного вулканического нагорья, являющегося частью Восточно-Камчатского вулканического пояса (рис. 2). Нагорье составляют более 20 крупных и множество мелких вулканов преимущественно четвертичного возраста.

Положение разрывов, сформировавшихся вблизи Карымского вулкана в начале января 1996 года, показано на рис. 3. Большинство из выявленных к настоящему времени нарушений по характеру произошедших по ним подвижек относятся к взбросам (Таблица). В центре района в узкой меридиональной зоне размером 1,5 x 5 км, расположенной в верховьях реки Карымской, выявлены также разрывы с подвижкой типа сброса и раздвига. В этой меридиональной зоне зафиксированы и наиболее крупные горизонтальные и вертикальные перемещения по разрывам [7, 8]. Надо отметить, что полученные данные о характере и амплитудах перемещений по выявленным нарушениям полностью совпали с инструментально измеренными горизонтальными и вертикальными деформациями, полученными по данным прямых геодезических наблюдений [12].

В первых числах января 1996 года вблизи Карымского вулкана на Камчатке произошел рой сильных коровых землетрясений и практически одновременно с землетрясениями начались извержения двух вулканов, расположенных в 6 км друг от друга: Карымского и в кальдере Академии наук [1, 14, 16]. Извержение в кальдере закончилось через ~ 18 часов после начала. Извержение Карымского вулкана продолжается непрерывно до настоящего времени (2006 г.). На поверхности в 1996 г. сформировалось множество разрывов, при этом была выявлена сложная геометрия некоторых из них: пропеллерообразность плоскости сместителя, совмещение подвижек типа взброса и раздвига, изменение морфологических характеристик

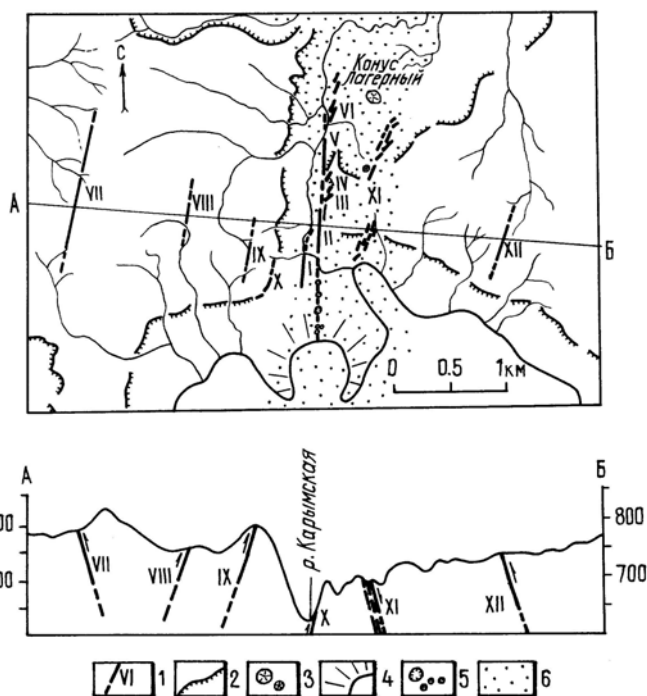


Рис. 3. Участок, где в 1996 г. сформировались наиболее крупные разрывы. 1 – разрыв и его номер; 2 – эрозионные уступы, ограничивающие кальдеры; 3 – шлаковые, лавовые конусы, некки; 4 – основной центр извержения, произошедшего в Карымском озере 2-3 января 1996 года; 5 – мелкие эксплозивные и провальные воронки; 6 – меридиональная зона растяжения и проседания.

Таблица. Характеристика наиболее крупных разрывов, сформировавшихся 1-2 января 1996 г. вблизи вулкана Карымский

| № разрыва | Простирание, град. | Длина, м       | Амплитуда вертик. перемещения, см | Наклон плоскости сместителя |             | Тип разрыва        | Раздвиговая составляющая, см |
|-----------|--------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------|------------------------------|
|           |                    |                |                                   | Направление, румб           | Угол, град. |                    |                              |
| I         | 0 – 10<br>25 – 30* | 400            | 85                                | В                           | 80          | сброс              | 20 -50                       |
| II        | 0                  | 700<br>1800*** | 80 - 375                          | З*<br>В**                   | 80 - 82     | взброс*<br>сброс** | До 250                       |
| III       | 30 - 70            | 40             | 20                                | ЮВ                          | 80          | сброс              | До 60                        |
| IV        | 20 - 45            | 60             | 10*<br>40-50**                    | ЮВ                          | 63 –<br>80  | сброс              | До 60                        |
| V         | 0                  | 400            | 130                               | З                           | 75 - 82     | взброс             | До 100                       |
| VI        | 25 - 30            | 100            | 30                                | СЗ                          | 76          | взброс             | До 50                        |
| VII       | 10 - 15            | 1200           | 16 – 20                           | В                           | 70 - 75     | взброс             | До 50                        |
| VIII      | 15 - 17            | 170            | 3 - 4                             | З                           | 70 - 80     | взброс             | -                            |
| IX        | 20                 | 250            | 40 - 50                           | З                           | 70 - 80     | взброс             | -                            |
| X         | 20 – 25<br>40**    | 200            | 50 – 70<br>20**                   | ЮВ                          | 70          | взброс             | -                            |
| XII       | 20                 | 150            | 10                                | В                           | 81          | взброс             | -                            |

Примечание: \* - данные о разрыве в северной его части, \*\* - данные о разрыве в южной его части, \*\*\* - длина разрыва с учетом предполагаемого его продолжения на юг, к центру извержения в Карымском озере.

Разрывы в верховьях реки Карымской вытянуты в меридиональном направлении, имеют длину до 0,5-1 км и, в целом, сменяя друг друга, протягиваются на расстояние 2,5-3 км [7]. Южнее, на продолжении этих разрывов расположена цепочка эксплозивных и провальных воронок, сформировавшихся во время извержений, происходивших из озера 2-3 января 1996 года. Характерной чертой разрывов II и V явилось то, что у их северного окончания сформировались более мелкие оперяющие нарушения, имеющие общее северо-восточное простирание и необычную дугообразную форму.

Важные особенности, позволяющие восстановить последовательность подвижек, были выявлены у нарушений, расположенных в самой северной части описываемого участка. При вскрытии зоны нарушения поперечными канавами, были выявлены две рядом расположенные плоскости сместителя (рис. 4). При этом один разрыв показывал, что здесь произошло сжатие, а другой – что произошел сброс, растяжение.



Рис. 4. Пример двух разрывов, расположенных рядом и имеющих разный характер подвижки – в правой части видна вертикальная трещина с валиком выжатого из нее грунта, в левой части – пологий разрыв, смещающий все отложения, в том числе и грунт, выжатый из первой трещины. Вид юго-западной стенки канавы.

Таким образом, этот пример, как и ряд других, показывают, что на данном участке было два этапа деформаций: на первом этапе произошло сжатие и формирование взбросов, а на втором этапе – растяжение и формирование сбросов и открытых трещин. Очень пологое залегание

плоскостей сместителя разрывов, сформировавшихся на втором этапе, позволяет также сделать вывод, что деформации на этом этапе были субгоризонтальны и связаны со смещением юго-восточного крыла разрывов к юго-востоку.

Изучение разрывов, образовавшихся в 1996 г. в районе вулкана Карымского, позволило выявить также еще одну важную особенность – многие вновь сформировавшиеся разрывы были приурочены к зонам более старых нарушений [7], при этом характер смещений у старых нарушений был такой же, как у новых (рис. 5).

### Предполагаемый механизм произошедших деформаций

Приведенные выше описание разрывов и условий, в которых они образовались, а также данные геодезических работ, проведенных в этом районе [12], позволяют говорить о целом ряде особенностей, которые характерны для произошедших деформаций:

1) они проявились на обширной территории размером не менее 14 x 7 км, при этом не были ограничены какими-то локальными поверхностными структурами – постройками вулканов или кальдерами - они как бы наложились на них и охватили как эти структуры, так и пространства между ними; 2) в результате произошедших событий на поверхности сформировался не один разлом, а множество относительно небольших разрывов, рассредоточенных на большой площади; 3) сформировавшиеся разрывы не были ориентированы радиально по отношению к каким-либо вулканам или в целом к Карымскому вулканическому центру - большинство из них были параллельны друг другу и имели северо-северо-восточное простирание (около 20° ССВ); 4) деформации носили блоковый характер, при этом выделившиеся блоки не были новыми образованиями, все они сформировались на предыдущих этапах развития, в основном, в связи с процессами кальдерообразования; 5) движения блоков не были однородными - некоторые блоки опустились и на их границах сформировались сбросы, другие блоки испытали поднятие и на их границах (и на них) сформировались взбросы, наконец, были блоки, которые сместились горизонтально, преимущественно в восточном направлении, и на их западных границах образовались раздвиги.



Рис. 5. Северная стенка канавы, вскрывающей плоскость сместителя разрыва VIII. В 1996 г по нему произошла подвижка (взброс) с вертикальным смещением 3-4 см, но в расчистке видно, что несколько тысяч лет назад по этому разлому произошел взброс с амплитудой 92 см. Плоскость сместителя как у старого, так и у нового разрывов падает на запад под углом около 80°.

Как было показано выше, необходимо также выделять два этапа деформаций. На первом этапе сформировались преимущественно поднятия и разрывы взбросового типа. На втором этапе – преимущественно опускания, сбросы и горизонтальные перемещения. Сжатие, проявившееся на первом этапе, было ориентировано вертикально и направлено снизу вверх. Судя по наклону поднятых блоков (максимальное поднятие на юге и постепенное уменьшение амплитуды к северу) основной источник давления, вызвавшего деформации первого этапа, находился на юге, в районе Карымского озера. В этом же районе вслед за описанными деформациями произошло необычное явление – одновременное извержение лав базальтового и риолитового состава [14]. Несомненная связь этих явлений и то, что они произошли в центре области, которая по многолетним геодезическим наблюдениям являлась областью максимальных деформаций растяжения [13], позволяет предполагать, что все эти явления непосредственно связаны с магматизмом. Вероятный механизм этих связей рассмотрен С.А.Федотовым [16], который показал, что первопричиной произошедших событий могло явиться повышение давления в промежуточном магматическом очаге, расположенном на глубине 13-23 км.

Среди разрывов, возникших в 1996 году вблизи Карымского вулкана, как видно на рис. 3, обособляется, по крайней мере, две группы взбросов, веерообразно расходящихся снизу вверх и расположенных западнее и восточнее Карымского озера. Сравнение этих данных с результатами экспериментов [11] позволяет предполагать, что деформации, произошедшие вблизи Карымского вулкана, были связаны с повышением давления в обширном силлообразном теле (уплощённом магматическом очаге). Верхняя кромка этого тела была расположена на глубине 3-4 км (оценка сделана исходя из среднего размера блоков и данных о распределении гипоцентров землетрясений [1, 9]). Можно предположить, что в данном случае, как и в кальдерах Йеллоустон и Лонг-Вэлли [23], магма базальтового состава внедрилась в основание частично расплавленного кислого магматического резервуара, расположенного на небольшой глубине под кальдерой Карымского озера. Предполагаемая схема расположения очага и механизм произошедших деформаций

показаны на рис. 6. Накопление магмы базальтового состава и повышение давления привели в итоге к взламыванию кровли очага и к наблюдавшимся на поверхности блоковым подвижкам.

Но почему разрывы, сформировавшиеся на поверхности, имеют устойчивое северо-северо-восточное простирание, а не осесимметричное, как должно было бы быть, если бы появление разрывов было связано с действием избыточного давления в очаге? Это, скорее всего, связано с действием регионального поля напряжений, имеющего на Камчатке северо-северо-восточную ориентировку оси максимального горизонтального сжатия [6]. Поле напряжений, существовавшее на первом этапе деформаций, как мы считаем, имело следующие особенности: ось максимального напряжения ( $\sigma_1$ ) его была ориентирована вертикально (её направление определялось избыточным давлением магмы); оси среднего и наименьшего напряжения ( $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ ) были ориентированы горизонтально, при этом ось максимального горизонтального напряжения ( $\sigma_H$  max), соответствующая  $\sigma_2$ , имела северо-северо-восточное простирание (около  $20^\circ$  ССВ).

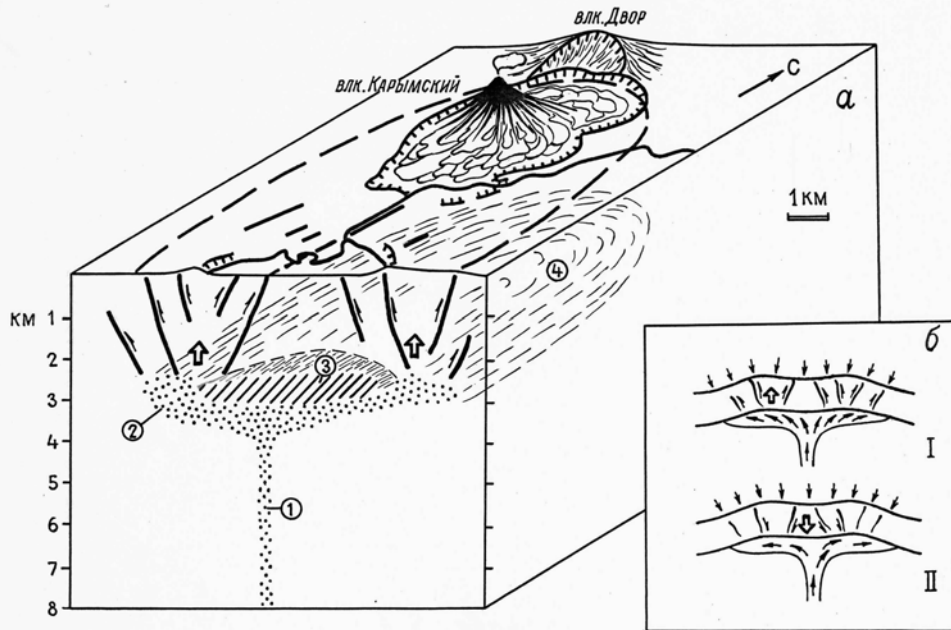


Рис. 6. Схематическая блок-диаграмма, показывающая предполагаемое глубинное строение рассматриваемого района (а) и вероятный механизм произошедших деформаций (б). Цифрами в кружках показаны: 1 – зона подъема базальтовой магмы из нижнекорового магматического очага; 2 – зона силлообразных внедрений базальтовой магмы; 3 – частично застывший очаг риолитовой магмы под кальдерой Карымского озера; 4 – область распространения иньекции базальтовой магмы под кальдерами Карымского озера и Карымского вулкана. Пунктиром на поверхности показана область, где были выявлены блоковые подвижки. I – условия деформации на первом этапе, когда избыточное давление магмы превышало давление кровли (обозначено мелкими стрелками сверху); II – условия деформации на втором этапе, когда давление кровли превысило давление магмы и она стала распространяться горизонтально.

На втором этапе деформаций, по-видимому, произошла переориентировка осей главных напряжений. Возникшие на этом этапе просадки свидетельствуют, что избыточное давление магмы в очаге исчезло. Судя по тому, что на этом этапе ясно проявились горизонтальные перемещения и при этом были образованы пологие сбросы и раздвиги, ось максимального напряжения в это время приобрела, по-видимому, горизонтальную ориентировку (стала соответствовать  $\sigma_H$  max). Эти вновь возникшие условия, когда горизонтальное сжимающее напряжение оказалось выше, чем вертикальные напряжения, должны были остановить распространение магмы вверх и способствовать её внедрению по горизонтали. При этом, поскольку ось максимального сжимающего напряжения имела северо-северо-восточную ориентировку (около  $20^\circ$  ССВ), то горизонтальные внедрения магмы должны были происходить в направлении, перпендикулярном к этой оси. События, которые произошли в районе Карымского вулкана в начале января 1996 года, хорошо согласуются с изложенными представлениями [9, 14].

Появление опережающих нарушений на концах образовавшихся при описываемых деформациях меридиональных разрывов можно объяснить локальным изменением регионального поля напряжений. Поскольку простирание этих разрывов не совпадает с ориентировкой оси максимального горизонтального сжатия ( $\sigma_H$  max), то, как показывают результаты моделирования

подобных структур [15, 18], на концах меридиональных разрывов должны появиться определённым образом ориентированные разрывы второго порядка (рис. 7). Реально образовавшиеся разрывы полностью совпадают с предполагаемыми по результатам моделирования, что свидетельствует о правдоподобности предложенного механизма.

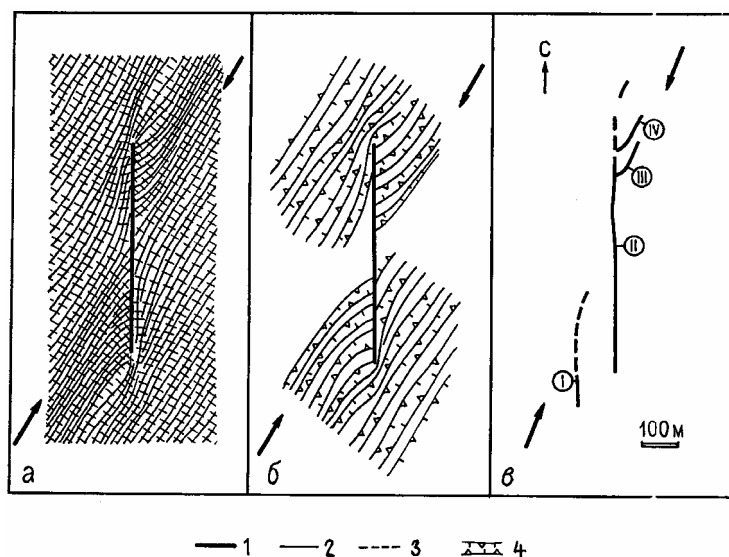


Рис. 7. Сопоставление поля напряжений и разрывов, прогнозируемых на основе моделирования и теоретического анализа, и выявленных в районе Карымского вулкана. *а* – двумерное локальное поле напряжений в окрестностях плоского разрыва, ориентированного под углом  $\sigma = 30^\circ$  по отношению к оси наибольшего сжатия исходного поля, по [15, 18]; *б* – схема прогнозируемых вторичных нарушений в массиве, окружающем разрыв, показанный в левой части рисунка, по [15]; *в* – схема разрывов, выявленных в верховьях реки Карымской, в кружках указаны их номера. 1 – разрыв; 2 –  $\sigma_{\min}$ ; 3 –  $\sigma_{\max}$ ; 4 – тип перемещений по вторичным разрывам. Стрелки указывают направление оси наибольшего сжатия исходного поля напряжений ( $\sigma_1$ ).

Рассматривая в целом произошедшие деформации, мы видим, что они могут быть удовлетворительно объяснены, если их связать с магматизмом и рассматривать, как следствие повышения давления в системе магматических очагов, существующих в недрах этого района. Попытки объяснить произошедшие деформации с иных позиций, в частности, признавая, что основное событие было чисто тектоническим, по-видимому, менее удачны, так как остаётся не ясным, какова природа этих тектонических движений. Если это региональное горизонтальное поперечное растяжение, как это предполагается в [2, 17], то это не согласуется с преимущественно взбросовой подвижкой, произошедшей в рассматриваемом районе. Нет оснований также рассматривать эти деформации, как результат левостороннего сдвига, что можно было бы предполагать из анализа механизма очага произошедшего одновременно с этими деформациями землетрясения с  $M = 7.0$  [1]. Сдвиговых перемещений в данном районе ни по старым, ни по новым разрывам обнаружено не было [7, 10].

### Заключение

Результаты изучения разрывов, образовавшихся в районе Карымского вулкана в 1996 г., кратко изложенные выше, заставляют отнестись критически ко многим ранее предложенным механизмам образования разрывов в ВКВП. Не нашли подтверждения взгляды о наличии сдвиговых смещений – ни вдоль продольных, ни вдоль поперечных разрывов таких смещений установлено не было. Не подтвердились и взгляды о том, что образование разрывов – это следствие формирования зон растяжения, следствие тектонических растягивающих напряжений, в ответ на которые в ВКВП происходит внедрение новых порций магмы. Такие условия, существующие в вулканических районах Исландии, Африки, других рифтовых зонах мира, на Восточной Камчатке не обнаруживаются. В вулканических зонах Камчатки, располагающихся над зоной субдукции, как можно предполагать, исходя из данных о разрывах Карымского центра, значительную роль играют взбросы, которые формируются при подъеме магмы из недр Земли к поверхности. Условия растяжения могут возникать в этих условиях лишь в узких зонах на фоне более обширных поднятий. В то же время имеются, по-видимому, существенные отличия в условиях формирования разрывов вблизи вулканов (в вулканических центрах) и вдали от них. В частности, группы разрывов, показанные на рис. 2 (I и II), расположенные в промежутках между вулканическими центрами, возникают в условиях, которые могут существенно отличаться от тех, в которых происходило формирование описанных выше разрывов, возникших в 1996 году. В этих районах вулканические проявления отсутствуют или незначительны. К сожалению, изученность молодых разрывов Камчатки еще очень слабая и для получения данных обо всём многообразии

процессов, происходящих в ВКВП и приводящих к разломообразованию, требуются дополнительные работы.

### Список литературы

1. Гордеев Е.И., Дроздин Д.В., Касахара М. и др. Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов Карымский и в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28-48.
2. Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А. Значение рифтогенеза в формировании четвертичных вулканических зон Камчатки // Вестн. МГУ. Геология. 1974. № 3. С. 3-20.
3. Кожурин А.И. Тектоническая расслоенность литосферы Центральной Камчатки // Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. С. 107-115.
4. Леглер В.А. Новейшие разломы и горизонтальные тектонические движения Восточной Камчатки: Автореф. дис. Хабаровск, 1978. 16 с.
5. Леглер В.А., Парфенов Л.М. Системы разломов островных дуг // Тектоническое районирование и структурно-вещественная эволюция северо-востока Азии. М.: Наука, 1979. С. 134-155.
6. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104с.
7. Леонов В.Л. Поверхностные разрывы, связанные с землетрясением и извержениями, произошедшими в Карымском вулканическом центре 1-2 января 1996 г // Вулканология и сейсмология. 1997. №5. С.113-129.
8. Леонов В.Л. Структурный анализ разрывов, сформировавшихся 1-2 января 1996 года вблизи Карымского вулкана (Камчатка) // Структурный анализ в геологических исследованиях. Материалы Международного научного семинара. Томск: ЦНТИ, 1999. С.133-136.
9. Леонов В.Л. Механизм формирования разрывов, образовавшихся вблизи вулкана Карымский (Камчатка) 1-2 января 1996 г. // Вулканизм и геодинамика: Материалы II Всерос. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2003. С.884-889.
10. Леонов В.Л., Иванов В.В. Землетрясения Карымского вулканического центра и их связь с тектоникой // Вулканология и сейсмология. 1994. №2. С.24-40.
11. Лучицкий И.В., Бондаренко П.М. Эксперименты по моделированию сводовых поднятий Байкальского типа // Геотектоника. 1967. № 2. С.3-19.
12. Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтиаров Б.Ф. Деформации земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью в Карымском вулканическом центре в январе 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С.97-112.
13. Магуськин М.А., Шароглазова Г.А. Деформации земной поверхности Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С.90-110.
14. Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А., и др. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С.38-70.
15. Осокина Д.Н. Моделирование тектонических полей напряжений с помощью поляризационно-оптического метода и его применение при решении задач тектоники и тектонофизики // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука, 1985. С.62-93.
16. Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С.3-37.
17. Флоренский И.В., Трифонов В.Г. Новейшая тектоника и вулканизм Восточной вулканической зоны Камчатки // Геотектоника. 1985. № 4. С.78-87.
18. Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок. М.: Недра, 1981. 245 с.
19. Agustsson K., Linde A.T., Stefansson R., Sacks S. Strain changes for the Vatnafjoll earthquake in south Iceland and possible magmatic triggering // J. Geophys. Res. 1999. V.104. № B1. P.1151-1161.
20. Beanland S., Blick G.H., Darby D.J. Normal faulting in a back arc basin: geological and geodetic characteristics of the 1987 Edgecumbe earthquake, New Zealand // J. Geophys. Res. 1990. V.95. № B4. P.4693-4707.
21. Bjarnason I. Th., Einarsson P. Source mechanism of the 1987 Vatnafjoll earthquake in South Iceland // J. Geophys. Res. 1991. V.96. № B3. P.4313-4324.
22. Brandsdottir B., Einarsson P. Seismic activity associated with the September 1977 deflation of the Krafla central volcano in northeastern Iceland // J. Volcanol.Geothermal. Res., 1979. № 6. P. 197-212.
23. Dzurisin D., Yamashita K.M., Kleinman J.W. Mechanisms of crustal uplift and subsidence at the Yellowstone caldera, Wyoming // Bull. Volcanol. 1994. V.56. № 4. P.261-270.
24. Jacques E., King G.C.P., Tapponnier P., Ruegg J.C., Manighetti I. Seismic activity triggered by stress changes after the 1978 events in the Asal Rift, Djibouti // Geophys. Res. Letter. 1996. V.23. №18. P.2481-2484.
25. Lipman P.W., Lockwood J.P., Okamura R.T., Swanson D.A., Yamashita K.M. Ground deformation associated with the 1975 magnitude-7.2 earthquake and resulting changes in activity of Kilauea volcano, Hawaii. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1276, 1985.