

УДК 551.21:551.243:550.349

## ГЕОМЕТРИЯ И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЫВОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ ВБЛИЗИ ВУЛКАНА КАРЫМСКИЙ (КАМЧАТКА) В ЯНВАРЕ 1996 г.

© 2009 г. В. Л. Леонов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 09.06.2008 г.

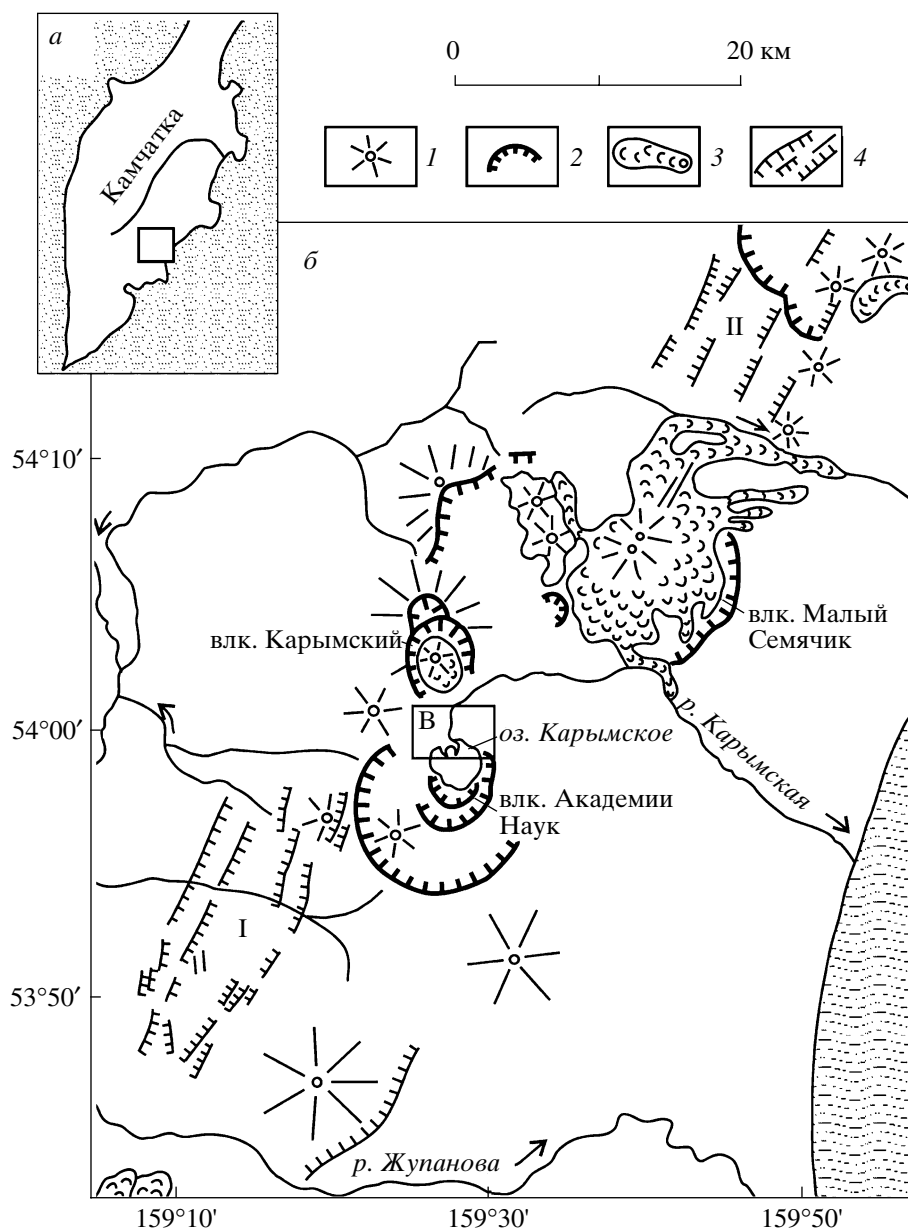
В начале января 1996 г. вблизи вулкана Карымский на Камчатке произошли редкие для этого места события – землетрясение с  $M = 6.9$ , извержение сразу двух вулканов, образование на поверхности множества разрывов. В статье рассматриваются разрывы: их расположение, особенности строения, характер произошедших по ним подвижек. Изучение разрывов проводилось с помощью канав, вырытых поперек разрывов и вскрывших их внутреннее строение. На некоторых нарушениях были построены поперечные профили, позволяющие судить об изменении их геометрии по простиранию. В результате этих работ были выявлены особенности, многократность подвижек, установлена их последовательность, предложен механизм формирования разрывов и общий механизм произошедших деформаций.

В первых числах января 1996 г. вблизи Карымского вулкана на Камчатке произошел рой коровых землетрясений и, в том числе, наиболее крупное землетрясение из зафиксированных за все время наблюдений в вулканических районах Камчатки ( $M = 6.9$ ) [3, 18]. Практически одновременно с землетрясениями начались извержения двух вулканов, расположенных в 6 км друг от друга: Карымского, последнее извержение которого было в 1982 г., и в кальдере Академии наук, где извержения в историческое время не происходили [14, 18]. Извержение в кальдере, имеющей диаметр около 5 км и заполненной озером, было фреатомагматическим и закончилось через ~18 ч после начала. Извержение Карымского вулкана продолжается непрерывно до сих пор (2008 г.) в течение уже 12 лет. Обследование территории, произведенное в летний период 1996 г., показало, что в результате событий, произошедших в январе, на поверхности сформировалось множество трещин и разломов, при этом на разных участках преобладали либо взбросы и трещины, вкрест простирания которых произошло сжатие, либо раздвиги и сбросы [8]. Была выявлена сложная геометрия некоторых разломов: пропеллерообразность плоскости сместителя, совмещение подвижек типа взброса и раздвига, изменение морфологических характеристик вдоль простирания разрывов и т.д. Для восстановления механизма формирования этих нарушений требовались более детальные работы, и они были проведены в летние периоды 1997–2002 гг. Многие трещины и разломы были вскрыты канавами, вырытыми вкрест их простирания. На разрезах в стенках канав были изучены особенности произошедших подвижек, в ряде мест выявлена их многократность, установлена последовательность событий. Эти работы дали возможность судить о меха-

низмах формирования разрывов и о возможных причинах, которые привели к наблюдаемым деформациям. Ниже приводятся результаты этих работ.

**Общее описание района и разрывных нарушений, сформировавшихся на его территории в начале января 1996 г.** Район, где произошли описываемые события, приурочен к центру обширного вулканического нагорья, являющегося частью Восточно-Камчатского вулканического пояса и имеющего размеры  $40 \times 60$  км (рис. 1). Нагорье составляют более 20 крупных и множество мелких вулканов преимущественно четвертичного возраста и в том числе два действующих вулкана: Малый Семячик и один из наиболее активных вулканов Камчатки – Карымский. Имя последнего дало название и всему нагорью, которое иногда называют Карымской группой вулканов или Карымским вулканическим центром [1, 16 и др.]. Вдоль оси нагорья расположено несколько позднечетвертичных кальдер, окруженных обширными полями пемзовых и игнимбритовых отложений. Сливаясь, кальдеры образуют единую зону проседания, вытянутую в северо-восточном направлении на 35 км (рис. 1).

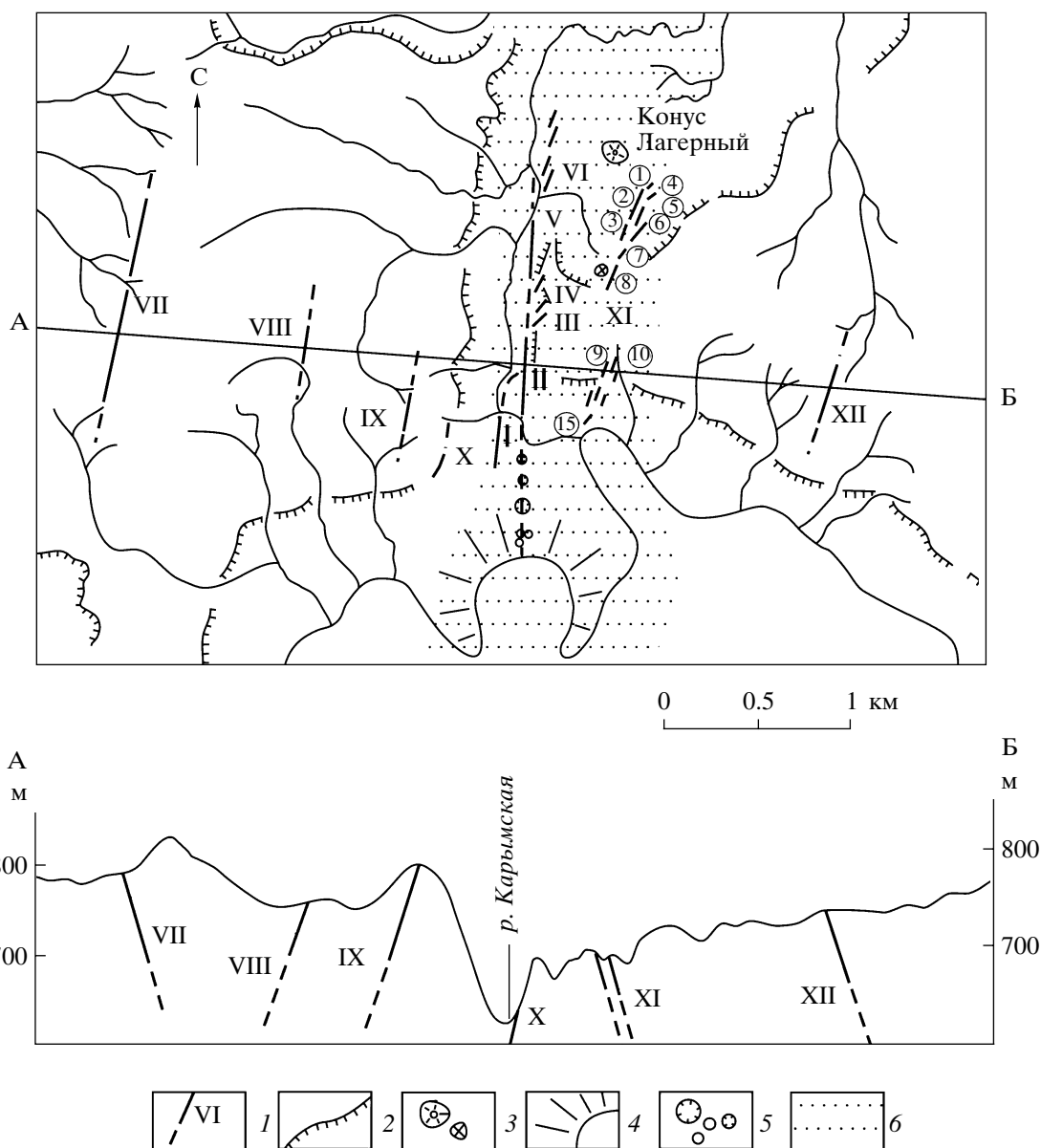
Ярким элементом строения описываемого района, как и в целом Восточно-Камчатского вулканического пояса, является сеть молодых, преимущественно позднеплейстоцен-голоценовых разрывных нарушений. Они распространены, в основном, в осевой зоне вулканического пояса, имеют северо-северо-восточное простирание ( $20^\circ$ – $25^\circ$  ССВ) и образуют ряд обособленных групп, расположенных кулисообразно друг относительно друга. На территории Карымского вулканического центра выделяется две группы таких разрывов: Жупановско-Карымская и Мало-Большесемячикская [20].



**Рис. 1.** Обзорные схемы (а, б) района исследований. 1 – вулканы; 2 – кальдеры; 3 – лавовые потоки позднелейстоцен-голоценового возраста; 4 – разрывные нарушения позднелейстоцен-голоценового возраста (I, II – обособленные группы разрывов: I – Жупановско-Карымская, II – Мало-Большесемячичская). Прямоугольником в центре (B) показан участок, изображенный на рис. 2.

Положение разрывов, сформировавшихся вблизи Карымского вулкана в начале января 1996 г., показано на рис. 2. Основные их характеристики приведены в табл. 1. Частично эти нарушения были откартированы нами в 1996 г. [8]. Они обозначены цифрами от I до VII. Другая часть разрывов обнаружена в 1997 г. – они обозначены цифрами от VIII до XII. По данным [17] предполагаемые разрывы были выявлены и на дне Карымского озера. Большинство из выявленных к настоящему времени нарушений по характеру произошедших по ним подвижек относятся к взбросам. В центре района в узкой ме-

ридиональной зоне размером  $1.5 \times 5$  км, расположенной в верховьях р. Карымская, выявлены также разрывы с подвижкой типа сброса и раздвига. В этой меридиональной зоне зафиксированы и наиболее крупные горизонтальные и вертикальные перемещения по разрывам [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 [11, 12]. Области, где произошли поднятия,



**Рис. 2.** Участок, где в начале января 1996 г. сформировались наиболее крупные поверхностные разрывы. 1 – разрыв и его номер (характеристика наиболее крупных разрывов приведена в табл. 1, мелкие разрывы зоны XI обозначены цифрами в кружках, их характеристика приведена в табл. 2); 2 – эрозионные уступы, ограничивающие кальдеры (вверху и внизу) и ущелье р. Карымская (в центре); 3 – шлаковые конусы, некки; 4 – основной центр извержения, произошедшего в Карымском озере 2–3 января 1996 г.; 5 – мелкие эксплозивные и провальные воронки, образовавшиеся вблизи основного центра извержения в Карымском озере; 6 – меридиональная зона растяжения и проседания (см. пояснения в тексте).

зафиксированные по геодезическим данным, совпали с участками, где были выявлены разрывы с взбросовыми подвижками. Область, где, по геодезическим данным, произошли растяжение и опускание земной поверхности, полностью совпала с отмеченной выше меридиональной зоной, где были выявлены сбросы и раздвиги. Близки и амплитуды деформаций. По геодезическим данным, максимальное растяжение зафиксировано на широтном профиле, ориентированном вкост меридиональной

зоны растяжения. Оно составило 2.3 м на базе 3.6 км [11]. Максимальный раздвиг, измеренный нами по разрыву II, составил 2.5 м [8]. Максимальные амплитуды вертикальных перемещений, по геодезическим данным – 1.37 м, по нашим замерам 1996 г. – 1.5 м по разрыву I и около 1 м в южной части разрыва II [8]. В то же время дополнительное изучение разрывных нарушений показало, что на некоторых участках, особенно вдоль разрыва II, амплитуда вертикальных перемещений была значительно боль-

**Таблица 1.** Характеристика наиболее крупных разрывов, сформировавшихся в январе 1996 г. вблизи вулкана Карымский

№ разрыва	Простираание, град	Длина, м	Амплитуда вертикал. перемещения, см	Наклон плоскости сместителя		Тип разрыва	Раздвиговая составляющая, см
				направление, румб	угол, град		
I	0–10 25–30*	400	85	В	80	сброс	20–50
II	0	700 1800***	80–375	З* В**	80–82	взброс* сброс**	До 250
III	30–70	40	20	ЮВ	80	сброс	До 60
IV	20–45	60	10* 40–50**	ЮВ	63–80	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 40**	200	50–70 20**	ЮВ	70	взброс	–
XI****							
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, \*\*\*\* – зона мелких разрывов (табл. 2).

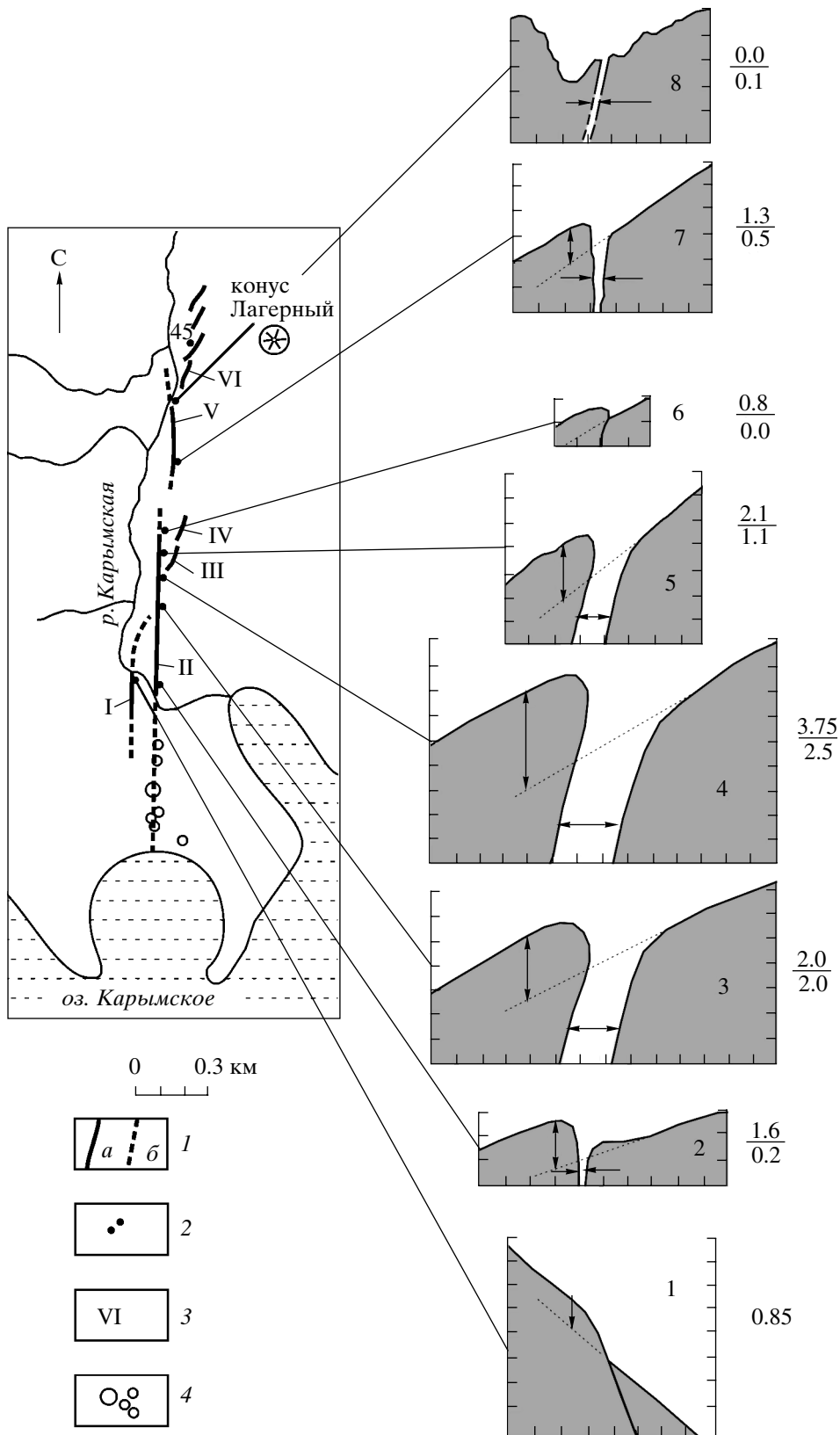
ше, а амплитуда горизонтальных перемещений – меньше, чем измеренная в 1996 г. Рассмотрим результаты этих работ более подробно.

**Геометрия и условия образования разрывных нарушений, расположенных в верхнем течении реки Карымская (вдоль западной границы меридиональной зоны проседания).** Разрывы в верховьях реки Карымская являются наиболее крупными среди вновь образовавшихся поверхностных нарушений (табл. 1). Они вытянуты в меридиональном направлении, имеют длину до 0.5–1.0 км и, в целом, сменяя друг друга, протягиваются на расстояние 2.5–3.0 км [8]. Южнее, на продолжении этих разрывов расположена цепочка эксплозивных и провальных воронок, сформировавшихся во время извержений из озера 2–3 января 1996 г. (рис. 2). Поперечные профили, построенные летом 1997 года на разрывах I, II и V, позволили более точно рассчитать амплитуды вертикальных и горизонтальных подвижек (рис. 3).

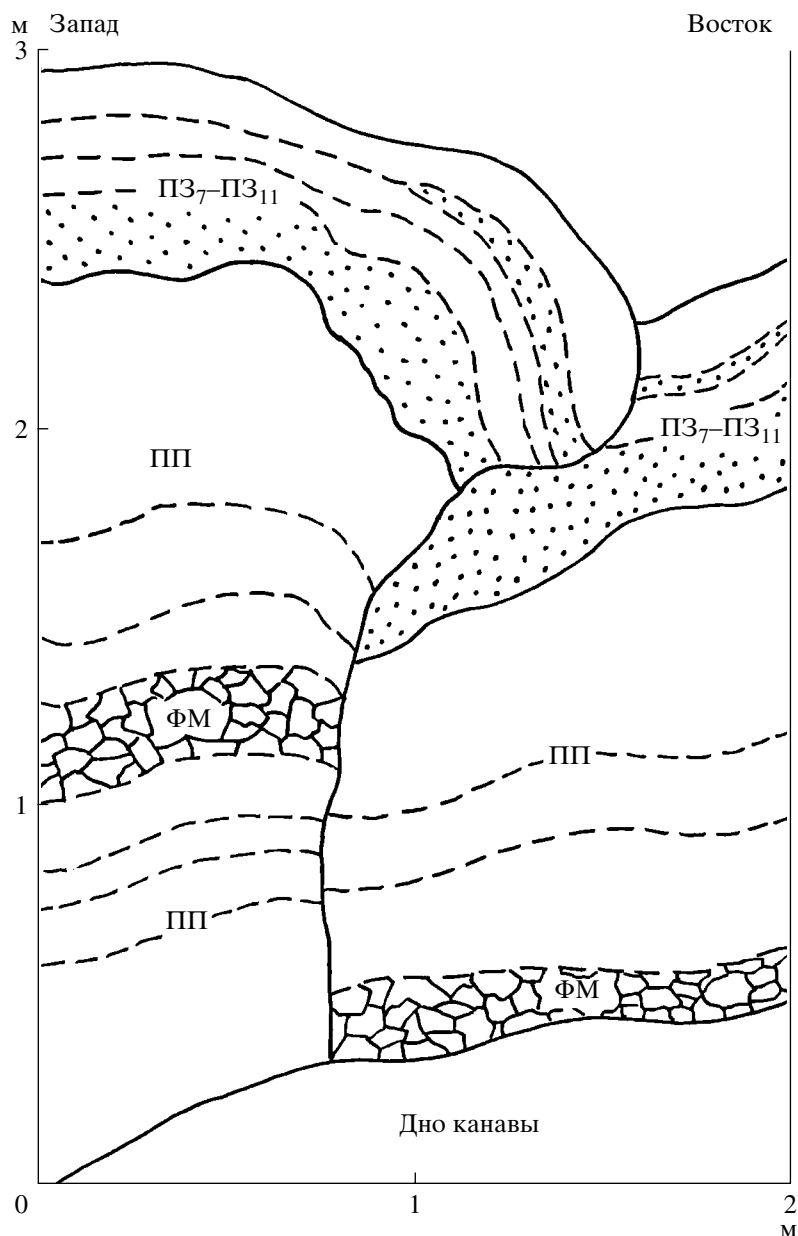
По разрыву I, расположенному на левом борту р. Карымская и имеющему наклон плоскости сместителя к востоку под углом 80°, произошло опускание восточного крыла. Ранее мы оценивали амплитуду вертикального перемещения по этому разрыву в 1.5 м [8], однако истинная амплитуда, рассчитанная по построенному поперечному профилю с учетом наклона земной поверхности, оказалась значитель-

но меньше и составила 85 см (рис. 3). Необходимо отметить также, что плоскость сместителя разрыва I дугообразно изгибается – на юге она имеет простираание 0°, севернее, в месте пересечения реки Карымская – 10°ССВ, а еще далее, на северном окончании разрыва – 25°–30°ССВ.

На разрыве II поперечные профили были построены на пяти участках (точки 2–6, рис. 3). При сопоставлении профилей видно, что морфология разрыва II значительно меняется по его простираанию. В самой южной части (точка 2) плоскость сместителя разрыва падает к востоку. Опущенным является восточное крыло, амплитуда вертикального перемещения – 1.6 м. Севернее, в точках 3–6, также восточное крыло разрыва является опущенным, западное – поднятым, но плоскость сместителя в этих точках имеет падение к западу. Угол падения плоскости сместителя как на юге, так и на севере составляет 80°–82°. Амплитуда вертикального перемещения достигает максимальной величины (3.75 м) в точке 4. К северу и к югу от этой точки уже через 100–150 м амплитуда вертикального перемещения уменьшается до 2 м (точки 3 и 5). Далее к северу за точкой 5 разрыв быстро выклинивается – уже через 100 м, в точке 6, амплитуда вертикального перемещения по нему уменьшается до 0.8 м, а еще через 100 м разрыв совсем исчезает.



**Рис. 3.** Поперечные профили, построенные на разрывах I, II и V. 1 – разрывы (а – установленные, б – предполагаемые); 2 – точки, в которых были выкопаны каналы и построены поперечные профили; 3 – номера разрывов; 4 – эксплозивные и провальные воронки, образовавшиеся на вероятном продолжении к югу разрыва II. Стрелки на профилях и цифры рядом с ними показывают вычисленные амплитуды вертикальных и горизонтальных перемещений по разрывам. Расстояние между рисками на профилях соответствует 1 м.



**Рис. 4.** Вид на северную стенку канавы, вырытой поперек разрыва II в точке 6 (рис. 3). Буквами обозначены: ПЗ7-ПЗ11 – пемзовые горизонты последнего этапа активности Карымского вулкана (возраст 0–500 лет), по [1]; ПП – погребенные почвы, фиксирующие период ослабления активности Карымского вулкана (возраст 500–3000 лет), по [1]; ФМ – слой плотных песчаников и гравелитов зеленого цвета (фреатомагматические отложения, связанные, по-видимому, с одним из верхнеголоценовых извержений в Карымском озере).

На значительном протяжении разрыв II является открытым – его крылья разошлись, образовав на правом борту р. Карымская протяженную зияющую расщелину. Ранее мы писали, что расхождение крыльев разрыва II достигает 2.5 м [8], однако, учитывая описанные выше вертикальные перемещения и сделав расчеты на отстроенных профилях, мы пришли к выводу, что оно было значительно меньше (рис. 3). Максимальное расхождение наблюдается в точке 4, где оно составляет, с учетом сделан-

ных оговорок, около 1.7 м (при фактическом расстоянии между стенками образовавшейся щели 2.5 м). К югу и к северу от точки 4 амплитуда горизонтального расхождения крыльев постепенно уменьшается и составляет: на юге, в точке 3 – 1.6 м, в точке 2.0 – 0.2 м; на севере, в точке 5.0 – 0.6 м. Далее на север крылья разрыва сходятся; в точке 6 он представляет собой типичный взброс – западное крыло его плотно прижато к восточному и поднято относительно него на 0.8 м (рис. 4). Взброс сопро-

вождается запрокидыванием верхней части разреза, вскрытого на западном крыле (в том числе дёрна и растительного покрова), на восточное крыло, что, по-видимому, связано со значительным сжатием, направленным вкрест простираения разрыва на данном участке.

На двух профилях, построенных вкрест разрыва V (точки 7 и 8 на рис. 3), видно, что у этого разрыва также происходит небольшое искривление плоскости сместителя – на юге она субвертикальна, а на севере падает к западу под углом  $75^{\circ}$ – $82^{\circ}$ . На значительном протяжении вдоль этого разрыва также поднято западное крыло. Амплитуда вертикального перемещения в точке 7 составляет 1.3 м (рис. 3), амплитуда горизонтального перемещения меняется от 0.1 до 0.5 м.

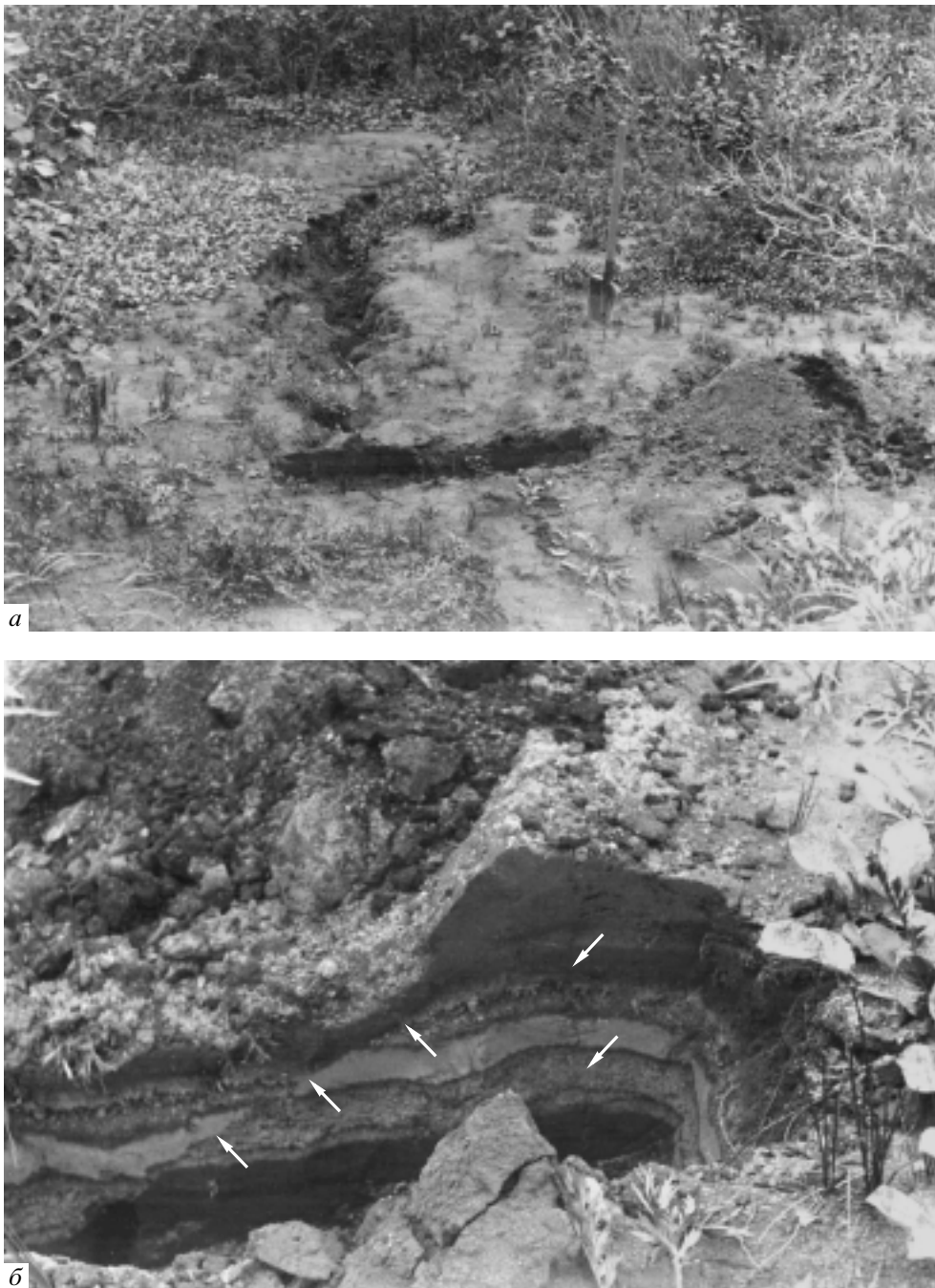
У северного окончания разрывов II и V сформировались более мелкие оперяющие нарушения, имеющие общее северо-восточное простираение. Многие из них имеют характерную дугообразную форму, при этом выпуклой частью они обращены на юго-восток. Нарушения, расположенные вблизи северного окончания разрыва II были ранее описаны нами как разрывы III и IV, а одно из нарушений, отходящих от северного конца разрыва V, – как разрыв VI [8]. У всех оперяющих нарушений поднято северо-западное и опущено юго-восточное крыло, амплитуда вертикальных перемещений колеблется от нескольких см до 40–50 см. В некоторых случаях, как и для основных разрывов, установлено пропеллерообразное искривление плоскости сместителя – в южной части падение к юго-востоку, в северной – к северо-западу. У разрыва IV плоскость сместителя повсеместно падает на юго-восток, но угол падения меняется от  $63^{\circ}$  на юго-западе до  $80^{\circ}$  на северо-востоке.

Важные особенности, позволяющие восстановить последовательность подвижек, были выявлены у нарушений, расположенных в самой северной части описываемого участка. Так, в точке наблюдения 45, расположенной в 300 м к западу от конуса Лагерный (рис. 3) при вскрытии зоны нарушения поперечными канавами, были выявлены две рядом расположенные плоскости сместителя (рис. 5а, 5б). При этом по одной плоскости произошла подвижка типа сброса (плоскость сместителя погружается к северо-западу, северо-западное крыло поднято относительно юго-восточного), а по другой плоскости – сброс и раздвиг (плоскость сместителя падает на юго-восток, юго-восточное крыло опущено, вдоль плоскости сместителя проходит открытая трещина шириной до 6–7 см). На поверхности над первой плоскостью сформировался характерный валик выжатым земли, обычный для трещин, по которым происходило сжатие [8]. Над второй плоскостью и открытой трещиной, сформировавшейся вдоль нее, на поверхности произошли просадки и провалы грунта (рис. 5а). Местами видно, что вблизи по-

верхности вторая плоскость приобретает очень пологое залегание (до  $27^{\circ}$ ) и рассекает земляной валик, сформировавшийся над первой плоскостью (рис. 5б). Это позволяет утверждать, что на данном участке было два этапа деформаций: на первом произошло сжатие и формирование сбросов, а на втором – 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.

Для более точного определения относительного горизонтального перемещения крыльев разрывов нами были проведены специальные поиски маркеров, которые были бы видны на обеих стенках образовавшихся расщелин. На разрыве II они были найдены в двух точках (4, 5 на рис. 3). В точке 4 разрывом была рассечена вертикальная нептуническая дайка мощностью около 50 см. Дайка отчетливо видна как на западной, так и на восточной стенках расщелины, при этом горизонтальное смещение дайки вдоль плоскости разрыва отсутствует. Таким образом, в данном случае произошел только раздвиг – восточное крыло разрыва сместилось к востоку. В точке 5 (рис. 3) в качестве маркера был найден характерный участок пересечения горизонтального контакта двух слоев пемзовых туфов разного цвета вертикальной нептунической дайкой мощностью 3 см. Это пересечение было обнаружено на обеих стенках расщелины, причем на восточной стенке оно было расположено на 2.1 м ниже и на 0.4 м севернее. Таким образом, на данном участке по разрыву II кроме вертикальных перемещений и раздвига произошло также небольшое горизонтальное смещение крыльев вдоль плоскости сместителя по типу левостороннего сдвига.

**Геометрия и условия образования разрывных нарушений, расположенных юго-восточнее конуса Лагерный (вдоль восточной границы меридиональной зоны проседания).** Ранее разрывы на этом участке были кратко описаны в [8]. В 1997 г. многие нарушения здесь были вскрыты канавами, вырытыми вкрест их простираения. Это позволило уточнить амплитуды вертикальных перемещений, направление падения и углы наклона плоскостей сместителей. Характеристика наиболее крупных нарушений этого участка приведена в табл. 2. Их расположение показано на рис. 2. Разрывы сформировались у подножия крутого склона, являющегося частью южного борта кальдеры Карымского вулкана. Простираение как уступа борта кальдеры, так и зоны разрывов –  $20^{\circ}$ – $25^{\circ}$ ССВ. Простираение отдельных разрывов также, в основном,  $20^{\circ}$ ССВ (табл. 2). По характеру смещений здесь преобладают сбросы с опущенным северо-западным крылом. В центре участка образовалось также несколько сбросов, у которых плоскость сместителя падает на



**Рис. 5.** Пример двух разрывов, расположенных рядом и имеющих разный характер подвижки (*а* – общий вид, *б* – вид юго-западной стенки канавы, вырытой поперек разрывов). Положение плоскостей сместителей разрывов показано стрелками. Пояснение см. в тексте.

юго-восток. В результате возник небольшой грабен длиной около 200 м и шириной 10–15 м. В целом зона разрывов на этом участке вытянута в длину на 500 м и в ширину на 50–60 м (рис. 2).

Характер перемещения по отдельным разрывам на данном участке достаточно сложный. В месте сближения разрывов 2 и 5 на северном окончании описанного выше грабена канавой было вскрыто

сочетание трещин, показанное на рис. 6. В стенке канавы видно, что оба разрыва здесь представляют собой зияющие трещины с раскрытием до 5–6 см. Плоскости сместителей разрывов падают в разные стороны: у разрыва, расположенного западнее – к северо-западу (под углом около  $60^\circ$ ), а у разрыва, расположенного восточнее – к юго-востоку (под углом около  $80^\circ$ ). На поверхности видно, что цен-



**Таблица 2.** Характеристика разрывов, сформировавшихся в январе 1996 г. к югу от конуса Лагерный (зона разрыва XI, рис. 2)

Номер разрыва (рис. 2)	Простираание, град	Длина, м	Амплитуда вертикального перемещения, см	Наклон плоскости сместителя		Тип разрыва
				направление, румб	угол, град	
1	20	25–30	2	–	90	взброс (?)
2	20–35	100	12	СЗ* ЮВ**	70	взброс* сброс**
3	20	50	8	ЮВ	57	сброс
4	45	10	3–5	СЗ	70 (?)	сброс
5	20	100	10–20	СЗ ЮВ*	77	сброс взброс
6	20 50**	100	15–20	СЗ	60	сброс
7	45	100	20–30	СЗ	67	сброс
8	20	10	7	–	90	сброс (?)
9	10	30	–	ЮВ	80	(?)
10	10	20	3	ЮВ	70	сброс
11	20	20	3	ЮВ	80	сброс
12	20	20	–	СЗ	73	(?)
13	15	20	–	СЗ	80	(?)
14	20	20	–	СЗ	66	(?)
15	45	30	10–20	ЮВ	80	сброс

Примечание. \* – данные о разрыве в северной его части, \*\* – данные о разрыве в южной его части.

тральный блок, находящийся между разрывами, опущен на 7–8 см, что в целом позволяет рассматривать образовавшуюся структуру, как ограниченный взбросами грабен, или так называемый – рамп. В то же время на разрезе в стенке канавы видно (рис. 6а, 6б), что северо-западное крыло структуры, после того, как оно было поднято при взбросовой подвижке, испытало горизонтальное смещение и опускание (произошло как бы обрушение козырька висящего крыла). Горизонтальные деформации второго этапа привели также к тому, что оба разрыва превратились в раздвиги – их крылья разошлись, образовав зияющие расщелины. Предполагаемые два этапа деформаций, образовавших эту структуру, показаны на врезках (рис. 6б; I, I).

Было выявлено резкое изменение геометрии описанных разрывов вдоль их простираания. Так, плоскость сместителя разрыва 2 в 2-х метрах южнее точки, описанной выше, падает к северо-западу уже под углом около 70°, а еще южнее в 10 м падение ее изменяется на юго-восточное под углом около 60°. То есть, в северной своей части разрыв 2 описываемого участка, так же, как разрывы, описанные выше в верховьях реки Карымская, имеет пропеллерообразное искривление плоскости сместителя. То же можно сказать и о разрыве 5 данного участка. Если на севере он представляет собой

взброс, плоскость сместителя его круто погружается к юго-востоку, то уже в 2-х м южнее его плоскость имеет падение к северо-западу, разрыв становится сбросом и сохраняет такое строение на протяжении более 100 м.

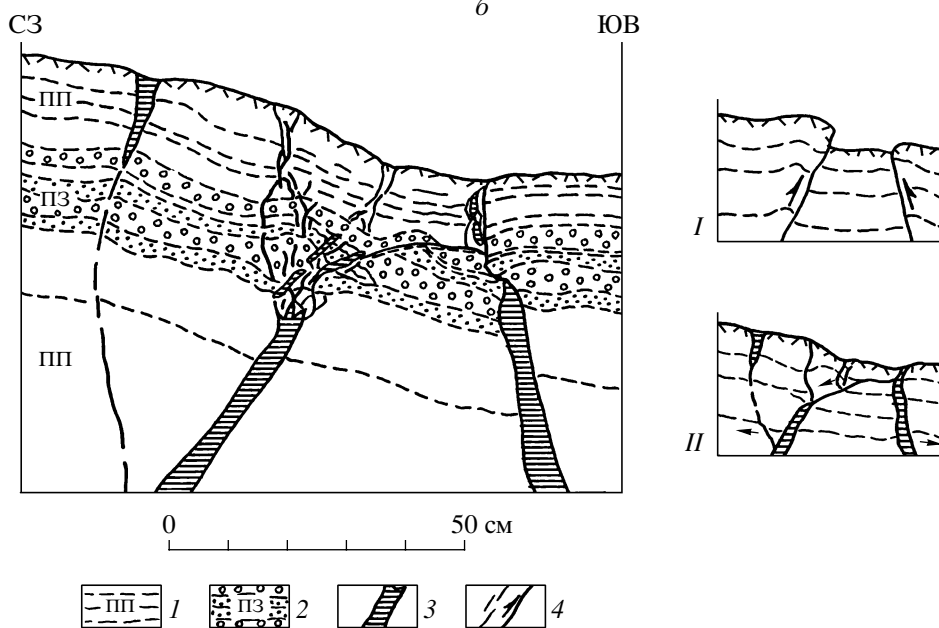
Разрывы, расположенные на востоке описываемого участка имеют более простое строение. Разрыв 6 представляет собой на всем протяжении сброс, северо-западное крыло которого опущено на 15–20 см. Установлено изменение простираания этого разрыва – на севере оно составляет 20°ССВ, на юге – 50°СВ. Расположенный южнее разрыв 7 (рис. 2), также представляет собой сброс; северо-западное его крыло опущено на 20–30 см. Простираание этого разрыва – около 45°СВ. В одной из канав, вырытых в северной части разрыва 6, виден характерный изгиб слоев на опущенном северо-западном крыле (рис. 7). Этот изгиб и то, что края разрыва плотно сжаты, свидетельствуют о том, что после растяжения и формирования сброса в данном месте произошло сжатие, направленное вкост простираания разрыва.

В целом описанные особенности строения разрывов на данном участке также позволяют утверждать, что здесь было, по крайней мере, два этапа деформации. Наличие взбросов и рамповой структуры, обнаруженных в северной части разрывов 2 и 5,

*a*



*б*



**Рис. 6.** Вид северной стенки канавы, вырытой вкрест простирания разрывов 2 и 5 вблизи их северного окончания (рис. 2). На фото (*a*) и чертеже (*б*) отчетливо видны плоскости сместителей разрывов, образующих характерную рамповую структуру. На врезках (*В, ВВ*) показаны два этапа деформаций, которые, как предполагается, привели к формированию этой структуры. *1, 2* – горизонты погребенных почв (*1*) и пемзового вулканического гравия и песка (*2*); *3* – зияющие расщелины, сформировавшиеся вдоль плоскостей сместителей разрывов; *4* – разрывы и характер смещения их крыльев.

свидетельствуют о том, что здесь, также как на участке в верховьях реки Карымская, общему растяжению предшествовало сжатие. При этом на первом этапе были сформированы взбросы (разрывы 1, 2, северная часть разрыва 5), а на втором этапе – сбросы и открытые трещины. Сжатие, установлен-

ное на последней стадии формирования разрыва 6 могло быть связано с тем, что при растяжении, проявившемся на втором этапе, здесь также происходило субгоризонтальное смещение блоков на юго-восток (что было установлено на предыдущем участке). Такое смещение могло вызвать локальное



Рис. 7. Вид северной стенки канавы, вырытой вкрест простирания разрыва б (рис. 2). Пояснения см. в тексте.

поперечное сжатие на крайних юго-восточных нарушениях.

**Геометрия разрывов, расположенных в районах, испытавших поднятие.** Районы, расположенные к западу и к востоку от описанной выше меридиональной зоны проседания, испытали поднятие. По геодезическим данным амплитуда поднятия на западе была 60–70 см, а на востоке – 20–30 см [11]. По результатам работ 1996 года к западу от реки Карымская нами был выявлен лишь один разрыв, описанный в [8] под номером VBB. Разрыв имеет простирание  $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ ССВ, длину – 1.2 км и на большей части представляет собой взброс с поднятым восточным и опущенным западным крылом. Плоскость сместителя падает на восток под углом  $70^{\circ}$ – $75^{\circ}$ . Амплитуда вертикальной подвижки колеблется от 16–20 см на юге до 3–4 см на севере. В 1997 г. восточнее разрыва VII было выявлено еще три нарушения, которым мы дали номера VIII, IX и X (рис. 2). Все они также являются взбросами, плоскость сместителя у разрывов VIII и IX падает на запад, а у разрыва X – на восток. Угол падения плоскости сместителя во всех случаях –  $70^{\circ}$ – $80^{\circ}$ . Разрыв VIII имеет простирание  $15^{\circ}$ – $17^{\circ}$ ССВ, западное его крыло поднято относительно восточного на 3–4 см, в длину он был прослежен на 170 м. Разрыв IX имеет простирание  $20^{\circ}$ ССВ, амплитуда поднятия западного крыла в центре разрыва достигает 40–50 см, в длину он был прослежен на 250 м. Разрыв X имеет простирание  $20^{\circ}$ – $25^{\circ}$ ССВ (на юге простирание изменяется до  $40^{\circ}$ СВ), поднято восточное крыло, амплитуда поднятия – от 20 см на юге, до 50–70 см на севере. В длину разрыв X был прослежен на 200 м.

В районах, расположенных к востоку от описанной выше меридиональной зоны проседания и также испытавших поднятие (на 20–30 см по [11]), нами был обнаружен лишь один разрыв (XII, рис. 2). По характеру смещения, произошедшего по нему, это тоже взброс. Простирание его –  $20^{\circ}$ ССВ, поднято восточное крыло, амплитуда поднятия – 10 см. Плоскость сместителя падает на восток под углом  $81^{\circ}$ . В длину разрыв был прослежен на 150 м.

**Особенности распространения и структурной приуроченности разрывов разной ориентировки.** Приведенное описание разрывных нарушений, сформировавшихся в начале января 1996 г. вблизи Карымского вулкана, показывает, что большинство из них имеет устойчивое северо-северо-восточное простирание ( $10^{\circ}$ – $20^{\circ}$ ССВ). Среди разрывов других направлений, встречающихся значительно реже, проявлены меридиональные и северо-восточные ( $30^{\circ}$ – $70^{\circ}$ СВ). Почти полностью отсутствуют разрывы широтного и юго-восточных – северо-западных направлений (лишь на юге района в верховьях ручья Карымский встречено три небольших трещины с простиранием  $115^{\circ}$ – $120^{\circ}$ ЮВ [8]).

Анализ распространения выявленных разрывов по площади показывает, что все меридиональные и северо-восточные разрывы сконцентрированы в центре района на небольшом участке, вытянутом в меридиональном направлении. При этом, как было показано в [8], меридиональные нарушения, отличающиеся наибольшими амплитудами вертикальных и горизонтальных перемещений, приурочены к зоне относительно старого меридионального разлома, ограничивающего с востока поднятый блок

земной коры. Формирование новых нарушений произошло в результате активизации движений в зоне этого разлома. При этом был унаследован и характер движений: у всех вновь сформировавшихся разрывов в этой зоне было поднято западное крыло [8].

Разрывы северо-восточного простирания ( $30^{\circ}$ – $70^{\circ}$  СВ) наибольшим распространением пользуются вблизи северных окончаний меридиональных разрывов (рис. 2). Они имеют значительно меньшие размеры, многие из них отличаются дугообразной формой (выгнуты к юго-востоку) и у них, также как у меридиональных разрывов, поднято западное крыло. Приведенные особенности расположения и строения северо-восточных разрывов позволяют рассматривать их как оперяющие по отношению к меридиональным. По [22] подобные разрывы, образующиеся на концах основных разрывов, где происходит концентрация напряжений, относятся к структурам второго порядка. Образующий ими рисунок в целом напоминает структуру типа “конский хвост” (рис. 2). Не исключено, что определенную роль в появлении разрывов северо-восточного простирания сыграли более древние разломы такого же простирания. О наличии таких разломов свидетельствуют прямолинейные, вытянутые в северо-восточном направлении долины р. Карымская и ее притоков, а также северо-восточная ориентировка южных границ кальдеры Карымского вулкана. Большинство вновь образовавшихся разрывов этого направления расположено на продолжении отмеченных линеаментов (рис. 2).

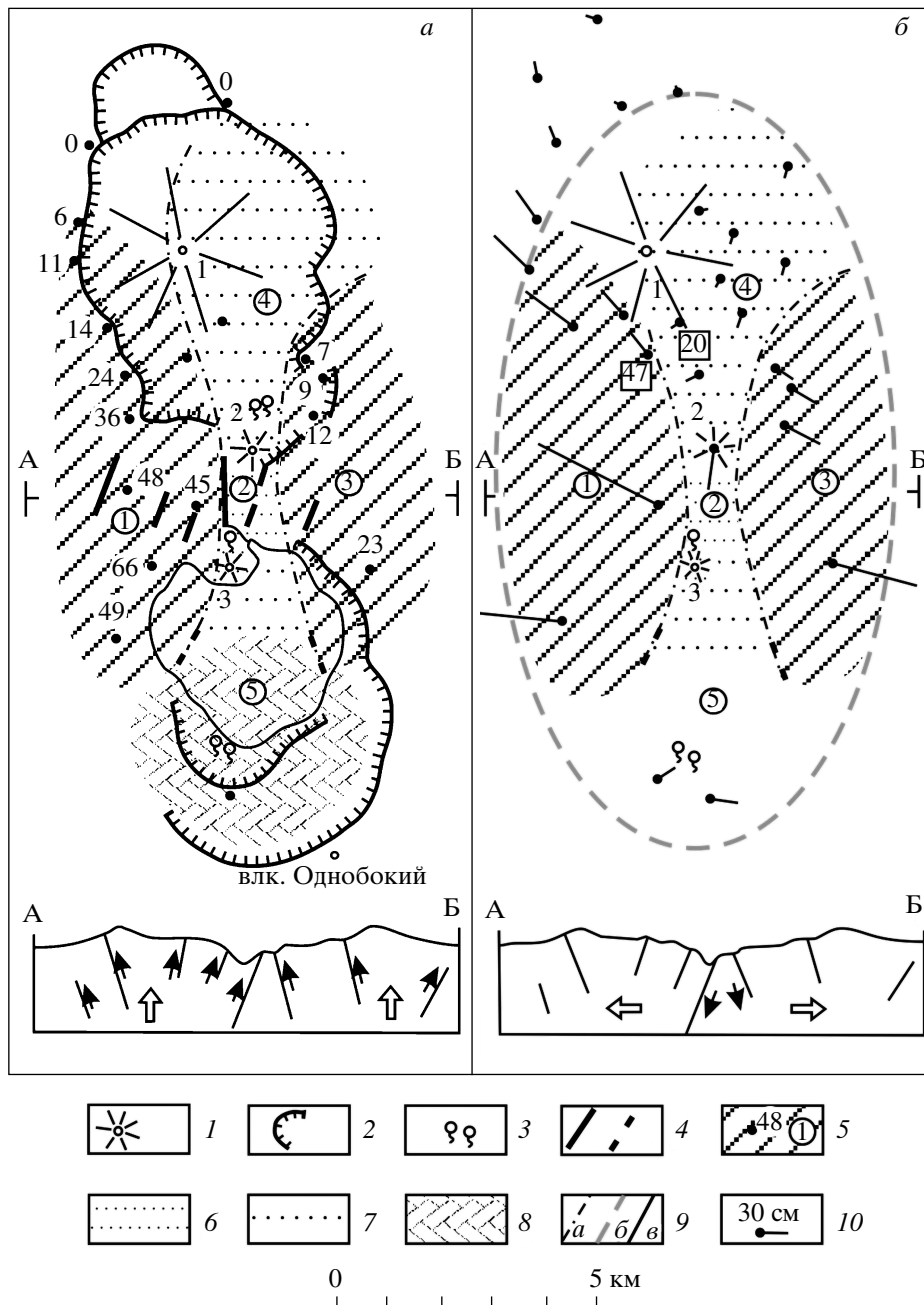
Разрывы северо-западного направления, как было отмечено выше, встречены только в одном месте – на юге района в верховьях руч. Карымский [8]. Кроме них в долине этого ручья были встречены и разрывы других направлений и, в целом, их простирание менялось в соответствии с изменением простирания долины ручья [8]. Так как ручей заложился, по-видимому, вдоль дугового разлома, проходящего по внутреннему краю кальдеры вулкана Однобокий (рис. 2 в [8]), то появление трещин, вытянутых вдоль него, может свидетельствовать об активизации движений в зоне этого разлома. В то же время небольшая длина образовавшихся здесь трещин (40–50 м), отсутствие по ним заметных вертикальных подвижек, свидетельствуют, что крупных перемещений по этому разлому не произошло.

Таким образом, общим для вновь сформировавшихся меридиональных, северо-восточных и северо-западных разрывов является, по-видимому, то, что все они возникли в связи с активизацией движений в зонах более старых разломов. Для разрывов северо-северо-восточного простирания такой приуроченности не отмечается – они отличаются широким распространением по площади и отсутствием явной связи с какими-либо более старыми разломами.

**О блоковом характере произошедших подвижек.** Ранее на основе морфоструктурных построений нами было выделено несколько блоков, расположенных на участке между кальдерами Карымского вулкана и Академии Наук, и, в том числе, блоки 1 и 2, расположенные, соответственно, к западу и востоку от р. Карымская [8]. Было показано, что подвижки по меридиональному разлому, разделяющему эти блоки, происходили неоднократно. Амплитуда поднятия блока 1 относительно блока 2 составляет в настоящее время около 100 м. Подвижки, произошедшие в зоне этого разлома в начале января 1996 г., показали, что западное крыло разлома (блок 1) вновь испытало поднятие, а восточное (блок 2) – опускание [8, 11]. Имеющиеся в настоящее время данные об образовавшихся разрывах, приведенные выше, и данные геодезических работ [11, 12], позволяют рассмотреть произошедшие блоковые подвижки более широко, и при этом считать, что они возникли в два этапа, существенно отличающиеся по характеру смещений (рис. 8).

Блок 1, выделенный нами ранее [8], расположен между кальдерами Карымского вулкана и Карымского озера, к западу от верховьев р. Карымская. Он ограничен с востока описанным выше меридиональным разломом, а западная его граница проходит, по-видимому, вблизи разрыва VII (рис. 2, 8). Северная и южная границы этого блока проходят вдоль краев кальдер, соответственно, Карымской и Академии Наук. Таким образом, блок имеет размеры примерно 3–4 км в ширину и до 7–8 км в длину. Все разрывы, образовавшиеся в его пределах, являются взбросами и свидетельствуют о том, что блок был поднят. Это подтверждают и геодезические данные, согласно которым все пункты наблюдений, расположенные в пределах этого блока, испытали поднятие [11]. При этом было выявлено, что амплитуда поднятия была максимальной (66 см) вблизи южной границы блока, а к северу она постепенно уменьшалась (рис. 8). Амплитуда перемещений по разломам, ограничивающим этот блок с востока и запада, также в целом увеличивается с севера на юг [8]. Приведенные данные позволяют говорить, что блок 1 не только был единообразно поднят, но также испытал наклон к северу. При этом источник деформации находился на юге, где и произошли максимальные перемещения по разломам и максимальные поднятия геодезических пунктов. Все геодезические пункты, расположенные в пределах блока 1, испытали горизонтальное смещение на запад-северо-запад, при этом амплитуда смещения уменьшалась с юга на север от 120–150 см до 40–60 см [12].

Блок 2 (рис. 8) расположен восточнее блока 1 и отличается значительно меньшими размерами (примерно  $0.5 \times 1.5$  км). Ранее он был выделен на основе морфоструктурных построений [8] и отчетливо проявился по результатам геодезических работ [11, 12]. На западе его границей является меридио-



**Рис. 8.** Блоковые подвижки, произошедшие в начале января 1996 г. вблизи Карымского вулкана (*a* – поднятия и про­садки, произошедшие на первом этапе деформаций; *б* – горизонтальные смещения, произошедшие на втором этапе деформаций). 1 – голоценовые вулканы (1 – Карымский, 2 – Лагерный, 3 – основной центр извержения 1996 г. в Карымском озере); 2 – кальдеры; 3 – термальные источники; 4 – разломы: *a* – установленные, *б* – предполагаемые (с учетом данных, приведенных в [17]); 5–8 – участки, где были выявлены блоковые подвижки: 5 – поднятия и наклоны к северу (точка и цифра показывают точки наблюдений и амплитуду поднятия в них, в см, по [11], цифра в кружке – номер блока; цифры в квадратиках на рисунке справа – номера точек наблюдений, на которые есть ссылки в тексте), 6 – опускания с амплитудой до 1.5–2.0 м и наклоны к западу, 7 – опускания с амплитудой до 15 см [11], 8 – блок вулкана Академии Наук (по его границам образовалась серия дуговых трещин [8], данные о вертикальных подвижках отсутствуют); 9 – линии, ограничивающие: *a* – поднятые и опущенные участки, по [11]; *б* – область, в которой были выявлены блоковые подвижки (обобщенно), *в* – разломы на разрезах (стрелки указывают направление смещения по ним); 10 – направление и амплитуда горизонтальных смещений, по [12]. Большие стрелки на разрезах указывают предполагаемый характер перемещения блоков на первом (*a*) и втором (*б*) этапах деформаций.

нальный разлом, ограничивающий с востока блок 1. Северная и южная границы совпадают с границами кальдер Карымская и Академии Наук. Восточная граница проходит вблизи зоны разрывов, расположенных южнее конуса Лагерный (подробное описание их было приведено выше). Большинство разрывов, расположенных в пределах и по границам этого блока, испытали растяжение. Среди них преобладают сбросы и раздвиги. Геодезические пункты, расположенные вблизи восточного края блока, в результате произошедших деформаций опустились на 70–71 см [11]. Вблизи западной границы блок испытал, по-видимому, значительно большее опускание. Расположенные здесь разрывы II и V имеют амплитуду вертикальных перемещений 1.5–2.0 м, а в точке 4 разрыва II – 3.75 м. Поскольку эта величина складывается из амплитуд поднятия блока 1 и опускания блока 2, то можно полагать, что “чистая” величина опускания блока 2 на западной его границе составляла, в среднем, 1.0–1.5 м (максимальной она была в точке 4 – до 3 м). В целом, таким образом, блок 2 испытал опускание и наклон на северо-запад. По геодезическим данным он был также смещен горизонтально на юг – пункт 63, расположенный на вершине конуса Лагерный, был смещен на юг на 45 см [12].

Область, расположенную восточнее блоков 1 и 2, также, по-видимому, необходимо рассматривать как отдельный блок или группу однородно деформированных блоков (блок 3 на рис. 8). По геодезическим данным эта область испытала небольшое поднятие (до 23 см) [11]. Здесь был обнаружен единственный разрыв, по которому произошла подвижка типа взброса. Таким образом, характер вертикальных деформаций, произошедших в этой области, был, по-видимому, такой же, как у блока 1. В то же время горизонтальное смещение этого блока, как свидетельствуют геодезические данные, произошло в противоположном направлении – на восток-юго-восток [12]. Амплитуда смещения составила от 35 до 95 см, увеличиваясь, как и на блоке 1, с севера на юг. Структурные границы данного блока на севере и на юге, как и у блока 1, проходят, по-видимому, вдоль границ кальдер Карымской и Академии Наук. На западе он граничит с блоком 2, а на востоке его граница не ясна.

О других блоках на рассматриваемой территории приходится говорить менее определенно, так как данных о них меньше. Обширная область проредания к юго-востоку от вулкана Карымский может рассматриваться как отдельный блок 4 (рис. 8). Пункты геодезических наблюдений, расположенные в пределах этого блока, испытали разнонаправленные горизонтальные перемещения [12]. Западную границу блока 4, скорее всего, необходимо проводить между геодезическими пунктами 20 и 47, где происходит резкое изменение направления горизонтальных смещений. Восточная и южная границы описываемого блока проходят, по-видимому,

вдоль разломов, ограничивающих с юго-востока кальдеру Карымская. Северные границы этого блока остаются неопределенными.

Представленные выше данные о разрывах, сформировавшихся в долине руч. Карымский, позволяют предположительно выделить еще один блок (блок 5, рис. 8), сложенный массивом вулкана Академии Наук. С востока, юга и юго-запада этот блок ограничен дуговым разломом, проходящим по краю кальдеры вулкана Однобокий (рис. 8). Северную границу этого блока скрывает Карымское озеро. Блок имеет, по-видимому, изометричные очертания и размеры примерно 4 × 5 км. Перемещения блока были небольшие, так как ни вертикальных, ни горизонтальных смещений по разрывам, обнаруженным на его границах, не установлено. Подвижки геодезических пунктов, расположенных в вершинной части вулкана Академии Наук, дают основание считать, что блок испытал горизонтальное смещение на восток примерно на 30 см [12].

В целом, приведенные данные показывают, что есть все основания считать, что деформации, произошедшие в начале января 1996 г. вблизи Карымского вулкана, были блоковыми. Отдельные блоки имели размер в поперечнике обычно от 1 до 4–5 км и испытали самые разнообразные перемещения – подъем, опускание, наклон или смещение по горизонтали. Границами блоков в большинстве случаев являлись разломы, при этом многие из них возникли в зонах более старых нарушений, которые, по-видимому, активизировались неоднократно как в течение голоцена, так и на более ранних этапах. Приведенные выше данные о разрывах и об изменении характера смещений по ним позволяют также считать, что и в подвижках блоков было два этапа. На первом этапе преобладали вертикальные движения – поднятия и значительно меньше, по-видимому, опускания блоков (рис. 8а), а на втором этапе – опускания и горизонтальные смещения (рис. 8б).

**Обсуждение результатов.** Предполагаемый механизм произошедших деформаций. Приведенное выше описание разрывов и условий, в которых они образовались, а также данные геодезических работ, проведенных в этом районе [11, 12], позволяют говорить о целом ряде особенностей, которые характерны для произошедших деформаций. Отметим основные из них.

1. Деформации проявились на обширной территории размером не менее 14 × 7 км, при этом они не были ограничены какими-то локальными поверхностными структурами – постройками вулканов или кальдерами, они как бы наложались 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  $20^\circ$ 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. Границами блоков в большинстве случаев явились, соответственно, границы кальдер и более старые разломы, которые активизировались в результате произошедших деформаций.

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. Некоторые блоки испытали существенные горизонтальные перемещения: блок 1, расположенный на западе изученного района, сместился на запад–северо-запад, блок 3, расположенный на востоке, сместился на восток–юго-восток.

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 [18], который показал, что первопричиной произошедших событий могло явиться повышение давления в промежуточном магматическом очаге, расположенном на глубине 13–23 км. В результате последовавшего вслед за этим внедрения магмы в верхние этажи земной коры должно было появиться избыточное дополнительное давление, постепенно повышающееся и достигающее 300 бар на глубине 5 км [18]. По мнению С.А. Федотова, внедрение магмы из глубокого очага произошло по трещине – дайке, мощность и горизонталь-

ная протяженность которой на глубине 0–5 км составляли, соответственно, 2,5 и 2900 м.

Что вызвало формирование многочисленных разрывов и блоковые подвижки на поверхности? Магматический очаг, расположенный на глубине 13–23 км, сам по себе не мог быть источником деформации для района, имеющего на поверхности размеры всего  $14 \times 7$  км. Такой источник деформации должен был находиться гораздо ближе к поверхности Земли. Могла ли источником деформации быть дайка? Такой вариант рассмотрен в [6]. Авторы реконструировали источники упругих деформаций по относительным смещениям геодезических пунктов на поверхности. Был сделан вывод, что основные смещения произошли в данном районе в связи с внедрением дайки, которая и привела к растяжению и расхождению крыльев разрывов на поверхности с амплитудой 3.2 м [6]. Экспериментальные работы показывают, что при внедрении даек в верхние этажи земной коры на поверхности могут формироваться просадки, грабены, трещины растяжения и сбросы [25, 27, 28]. Однако полевое изучение даек в Исландии показывает, что напряжения, связанные с их внедрением, слишком малы, чтобы вызвать формирование крупных разломов или грабенов на поверхности [24]. В [26] приведены результаты изучения верхних частей мелких базальтовых вулканов и даек, связанных с ними, и сделан вывод, что зона влияния даек на глубине менее 50 м составляет не более 110 м (вкост простирания дайки). Таким образом, результаты этих полевых работ однозначно свидетельствуют, что базальтовые дайки не могут служить причиной поверхностных деформаций обширных площадей с поперечными размерами в 10 км и более, как мы наблюдаем в районе Карымского вулкана.

Детальные работы по изучению деформаций земной поверхности были проведены в 1970-ые годы XX в. в районе Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) [19]. В начальный эксплозивный период деятельности Первого конуса БТТИ обширный район (в поперечнике не менее 6–7 км) испытал относительное поднятие на высоту нескольких метров. После прорыва лавовых бокк это поднятие сменилось опусканием. Был сделан вывод, что эти деформации явились, скорее всего, следствием силлообразного внедрения магмы, которое произошло на глубине нескольких километров от поверхности [19].

Поднятия обширных территорий и взбросы обычны в тех случаях, когда моделируются сводовые поднятия или складки поперечного изгиба, возникающие над достаточно обширными линзообразными источниками [2, 10, 15]. Как отмечается в [15], в таких случаях на сводах складок сверху вниз нарастают сбросы, а на крыльях снизу вверх – взбросы. Последние ориентированы веерообразно и поперек слоя; они возникают у краев штампа

(площадки, которая создает давление). Уменьшение мощности деформируемого слоя и увеличение площади штампа ведут к раздвоению максимума напряжений на своде.

Как было показано выше и видно на рис. 2 и 8, среди разрывов, возникших в 1996 г. вблизи Карымского вулкана, обособляются две группы взбросов, веерообразно расходящихся снизу вверх и расположенных западнее и восточнее Карымского озера. Сравнение этих данных с результатами экспериментов [15] позволяет предполагать, что деформации, произошедшие вблизи Карымского вулкана, могли быть связаны с повышением давления в обширном силлообразном теле (уплощенном 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 [3, 21]). 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. Возможно, также, что именно существование этого очага привело к тому, что появилось два источника давления, расположенных по краям озера. Накопление магмы базальтового состава и повышение давления привели в итоге к взламыванию кровли очага и к наблюдавшимся на поверхности блоковым подвижкам.

Изложенные представления, однако, не дают ответа на вопрос – почему разрывы, сформировавшиеся на поверхности, не имеют осесимметричного распространения? Это должно было бы быть, если бы появление разрывов было связано только с действием избыточного давления в очаге. Но, как было показано выше, большинство вновь сформировавшихся разрывов имеет устойчивое северо-северо-восточное простирание и это, скорее всего, связано с действием регионального поля напряжений, имеющего на Камчатке северо-северо-восточную ориентировку оси максимального горизонтального сжатия [7]. Это позволяет представить поле напряжений, существовавшее на первом этапе деформаций, в следующем виде: ось максимального напряжения ( $\sigma_1$ ) его была ориентирована вертикально (ее 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).

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 ее 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.

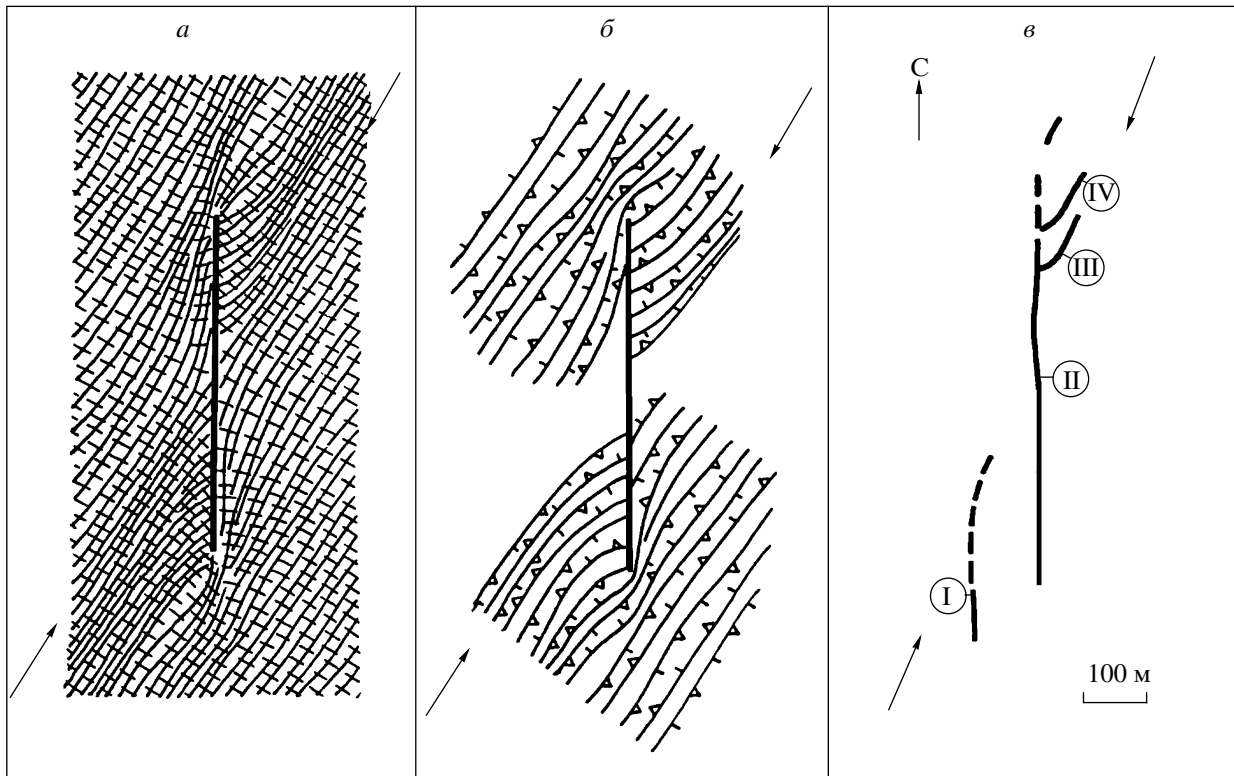
События, которые произошли в районе Карымского вулкана в начале января 1996 г., хорошо согласуются с изложенными представлениями. Извержение в Карымском озере, начавшееся в зоне разломов, сформировавшихся на первом этапе деформаций, быстро прекратилось [14], а горизонтальные смещения, возникшие непосредственно вслед за этим, на втором этапе деформаций, имели преимущественно восток–юго-восточное и запад-северо-западное направления [12].

То, что извержение Карымского вулкана, начавшееся на первом этапе деформаций, продолжалось и после переориентировки общей системы напряжений (и продолжается до настоящего времени), свидетельствует об особых условиях, в которых находится данный вулкан. Эти условия могут быть связаны с наличием в его недрах магматического очага, расположенного на глубине  $\sim 1.5$  км ниже уровня моря [5, 21]. Очаг создает, по-видимому, свою локальную систему напряжений, которая трансформирует региональное поле.

Локальным изменением регионального поля напряжений можно объяснить также появление оперяющих нарушений на концах образовавшихся при описываемых деформациях меридиональных разрывов. Поскольку простирание этих разрывов не совпадает с ориентировкой оси максимального горизонтального сжатия ( $\sigma_{H_{max}}$ ), то, как показывают результаты моделирования подобных структур [15, 22], на концах меридиональных разрывов должны появиться определенным образом ориентированные разрывы второго порядка (рис. 9). Реально образовавшиеся оперяющие разрывы полностью совпадают с предполагаемыми по результатам моделирования, что свидетельствует о правдоподобности предложенного механизма.

Влияние локального поля напряжений сказывается, по-видимому, и вблизи нового центра извержений в Карымском озере. Как было показано выше, плоскость сместителя у меридиональных разрывов, сформировавшихся в истоках реки Карымская, почти на всем протяжении имеет падение к западу, а разрывы представляют собой взбросы. В то же время на южном их окончании, вблизи





**Рис. 9.** Сопоставление поля напряжений и разрывов, прогнозируемых на основе моделирования и теоретического анализа и выявленных в ходе проведенных работ. *а* – двумерное локальное поле напряжений в окрестностях плоского разрыва, ориентированного под углом  $\alpha = 30^\circ$  по отношению к оси наибольшего сжатия исходного поля, по [15, 22]; *б* – схема прогнозируемых вторичных нарушений в массиве, окружающем разрыв, показанный в левой части рисунка, по [15]; *в* – схема разрывов, выявленных в верховьях р. Карымская, в кружках указаны их номера: II – основной разрыв, I, III, IV – разрывы второго порядка (опережающие). 1 – разрыв; 2 –  $\sigma_{\min}$ ; 3 –  $\sigma_{\max}$ ; 4 – тип перемещений по вторичным разрывам. Стрелки указывают направление оси наибольшего сжатия исходного поля напряжений ( $\sigma_1$ ).

нового центра извержений в Карымском озере, плоскость сместителя пропеллерообразно изгибается, и все встреченные здесь разрывы представляют собой сбросы. Очевидно, что подобное искривление плоскости сместителя связано с особыми условиями, которые существовали вблизи нового центра извержений. Скорее всего, прорыву магмы на поверхность в этом месте сопутствовало локальное растяжение, которое и привело к трансформации регионального поля напряжений.

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 [3], по-видимому, менее удачны, так как остается не ясным, какова природа этих тектонических движений. Если считать, что основной причиной являлось региональное горизонтальное поперечное растяжение, как предполагается в [4, 20], то это не согласуется с преимущественно взбро-

совой 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  $M = 6.9$  [3]. Сдвиговых перемещений в данном районе ни по старым, ни по новым трещинам обнаружено не было [8, 9]. Описанные деформации не позволяют также говорить о протяженном едином разломе, который мог образоваться при произошедшем сильном землетрясении. Все разрывы, сформировавшиеся на поверхности, имели длину не более 1.5 км и они были рассредоточены на большой площади.

## ВЫВОДЫ

1. Большинство разрывов, сформировавшихся вблизи Карымского вулкана в начале января 1996 г., являются взбросами. При этом подвижка по многим из них совмещает взброс и раздвиг. Меньшее значение имеют разрывы, по которым произошли сбросовые перемещения – все они приурочены к уз-

кой меридиональной зоне в центре района, испытавшего деформации.

2. Среди образовавшихся нарушений преобладают разрывы с северо-северо-восточным простиранием (около 20°ССВ). Разрывы других направлений – меридионального, северо-восточного, северо-западного – встречаются реже и лишь в зонах более старых разломов, которые испытали активизацию в связи с произошедшими в районе деформациями.

3. Произошедшие подвижки имели блоковый характер, при этом выделившиеся блоки, имеющие размер в основном от 1 до 4–5 км, не были новыми образованиями, все они сформировались на предыдущих этапах развития района. Движения блоков не были однородными: часть из них была поднята, часть – опущена, часть – сдвинута по горизонтали.

4. Установлено, что формирование разрывов в рассматриваемом районе происходило в два этапа. На первом этапе, на фоне общего поднятия территории были сформированы разрывы взбросового типа. На втором этапе часть территории в центре района опустилась, произошли горизонтальные перемещения; сформировавшиеся при этом разрывы имели характер сбросов и раздвигов.

5. Предложен вероятный механизм произошедших деформаций. Разрывы и блоковые подвижки в верхнем 3–4-километровом слое земной коры, как предполагается, произошли вследствие взламывания кровли над неглубоким магматическим очагом, имеющим большую площадь и плоскую, силлоподобную форму. Взламывание кровли очага, произошедшее вследствие повышения в нем давления, сопровождалось извержениями и сильными землетрясениями (с магнитудой до  $M = 6.9$ ). При этом, после взламывания произошла переориентировка осей главных напряжений и возникли условия, благоприятные для внедрения магмы в горизонтальном направлении. Предполагается, что ориентировка вновь возникавших разрывов определялась региональным полем напряжений, существующим в верхних этажах земной коры на Камчатке.

Автор благодарен всем, кто помогал в работе, поделился своими наблюдениями и материалами. Особая благодарность В.В. Юдину, Я.Д. Муравьеву и А.М. Пашенко, наблюдения которых помогли в поиске разрывных нарушений, начальнику Карымской экспедиции М.А. Магуськину и начальнику Геофизического отряда В.В. Иванову, которые оказали организационную помощь при проведении работ.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ № 96-05-66243, 02-05-64979, 05-05-64730 и 08-05-00453 (научный руководитель С.А. Федотов), а также по проектам ДВО РАН № 06-1-П16-062 и 06-III-A-08-329.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура) / Под ред. Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1980. 238 с.
2. *Гзовский М.В.* Перспективы тектонофизики // Деформации пород и тектоника. М.: Наука, 1964. С. 128–146.
3. *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.
4. *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.
5. *Зубин М.И., Иванов Б.В., Штейнберг Г.С.* Глубинное строение Карымского вулкана на Камчатке и некоторые вопросы генезиса кальдер // Геология и геофизика. 1991. № 1. С. 73–81.
6. *Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др.* Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
7. *Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.
8. *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.
9. *Леонов В.Л., Иванов В.В.* Землетрясения Карымского вулканического центра и их связь с тектоникой // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 24–40.
10. *Лучицкий И.В., Бондаренко П.М.* Эксперименты по моделированию сводовых поднятий Байкальского типа // Геотектоника. 1967. № 2. С. 3–19.
11. *Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтияров В.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.
12. *Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф.* Деформации, связанные с сильным ( $M = 6.9$ ) землетрясением, прорывом магм и извержениями в Карымском вулканическом центре в 1996–2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 5. С. 22–40.
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. *Селянгин О.Б.* Петрогенезис базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулканоструктур. М.: Наука, 1987. 148 с.
17. *Ушаков С.В., Фазлуллин С.М.* Морфометрические характеристики Карымского озера в связи с подводным извержением // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 130–137.
18. *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.
19. *Федотов С.А., Энман В.Б., Никитенко Ю.П. и др.* Геодезические исследования // Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. С. 472–513.
20. *Флоренский И.В., Трифонов В.Г.* Новейшая тектоника и вулканизм Восточной вулканической зоны Камчатки // Геотектоника. 1985. № 4. С. 78–87.
21. *Широков В.А., Иванов В.В., Степанов В.В.* О глубинном строении вулкана Карымский и особенно в  
стях его сейсмичности по данным локальной сети // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 71–80.
22. *Ярошевский В.* Тектоника разрывов и складок. М.: Недра, 1981. 245 с.
23. *Dzurisin D., Yamashita K.M., Kleinman J.W.* Mechanisms of crustal uplift and subsidence at the Yellowstone caldera, Wyoming // *Bul. Volcanol.* 1994. V. 56. № 4. P. 261–270.
24. *Gudmundsson A.* Surface stresses associated with arrested dykes in rift zones // *Bul. Volcanol.* 2003. V. 65. № 8. P. 606–619.
25. *Head J.W., Wilson L.* Lunar graben formation due to nearsurface deformation accompanying dike emplacement // *Planet. Space Sci.* 1993. V. 41. P. 719–727.
26. *Keating G.N., Valentine G.A., Krier D.J., Perry F.V.* Shallow plumbing systems for small-volume basaltic volcanoes // *Bul. Volcanol.* 2008. V. 70. № 5. P. 563–582.
27. *Mastin L.G., Pollard D.D.* Surface deformation and shallow dike intrusion processes at Inyo Craters, Long Valley, California // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № B11. P. 13221–13235.
28. *Rubin A.M.* Dike-induced faulting and graben subsidence in volcanic rift zones // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № 2. P. 1839–1858.

## The Faults Appearing near Karymskii Volcano, Kamchatka on January 1–2, 1996: Geometry and Mechanism of Generation

© 2009 г. V. L. Leonov

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

Unusual events occurred near Karymskii Volcano, Kamchatka in the early January of 1996: a swarm of large earthquakes, simultaneous eruptions of two volcanoes, and the generation of numerous faults on the ground surface. This paper is concerned with these faults, examining their positions, structure, and character of slip. The faults were studied with the help of trenches that were dug across these and revealed their internal structure. Crosswise profiles were constructed on some of the faults to analyze the variation of their geometry along strike. We found the specific features of the slip episodes and whether these were multiple, established their sequence, suggested a mechanism of their generation, and the overall mechanism responsible for the deformation.