

УДК 550.34+551.21+91

© 1998 г. ГОРДЕЕВ Е.И., ДРОЗНИН Д.В., КАСАХАРА М.,
ЛЕВИНА В.И., ЛЕОНОВ В.Л., МИЯМАЧИ Х., ОКАЯМА М.,
САЛТЫКОВ В.А., СИНИЦЫН В.И., ЧЕБРОВ В.Н.

**СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗВЕРЖЕНИЯМИ
ВУЛКАНОВ В КАРЫМСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ
В 1996 г.**

Исследование сейсмичности, предварявшей и сопровождавшей извержения в Карымском вулканическом центре, позволило определить взаимосвязь между сейсмическими процессами, вызванными локальными тектоническими условиями, и извержениями вулкана Карымский и в кальдере Академии Наук. Очередное извержение вулкана Карымский послужило спусковым механизмом для сильного Карымского землетрясения ($M = 7,0$) 1 января 1996 г. Сильное коровое тектоническое землетрясение активизировало разлом, по которому начала внедряться магма, вызвавшая извержение в кальдере Академии Наук в северной части Карымского озера. По распределению гипоцентров землетрясений под вулканом Карымский выделяется некоторый объем вещества с аномальными свойствами, которые вызваны, по-видимому, наличием магматического расплава, и верхняя граница этого объема находится на глубине 4-5 км.

SEISMIC PHENOMENA, CONNECTED WITH VOLCANOES ERUPTIONS IN THE KARYMSKY VOLCANIC CENTRE IN 1996, by Gordeev E.I.*, Droznin D.V.* Kasahara M.**, Levina V.I.*, Leonov V.L.***, Miyamachi H.****, Okayama M.**, Saltykov V.A.*, Sinitsyn V.I.* and Chebrov V.N.* The relation between big earthquake ($M = 7,0$) and the eruptions of the Karymsky and in the Akademia Nauk caldera was revealed by the analysis of the previous and following seismicity. The periodicity of Karymsky volcano eruption is 10-15 years. The big earthquake in this area has reaping time of many hundreds of years. The extra pressure in magma chamber below Karymsky volcano was the trigger for this big earthquake. The fault reanimated by the big earthquake opened the way for magma, which started eruption in the Karymsky lake (the Akademia Nauk caldera). The hypocenter's distribution shows a big gap under the Karymsky volcano, that can be interpreted as a magma chamber. The upper border of this magma chamber can be estimated from the distribution of hypocenters is 4-5 km deep.

(Received August 12, 1997)

* *Kamchatka Experimental and Methodical Department, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

** *Hokkaido University, Sapporo, Japan*

*** *Istitute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

Kagoshima University, Kagoshima, Japan

Детальные исследования сейсмичности Камчатки и Командорских островов начались в 1962 г., когда была организована региональная сеть сейсмических станций. С 1962 г. по настоящее время каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов насчитывает более 50 000 событий и позволяет определять многие пространственные и временные особенности сейсмических процессов в зоне субдукции и в материковой части Камчатки. По распределению гипоцентров уточнены пространственная геометрия и тонкая структура зоны субдукции [14, 15, 22]. Основное количество

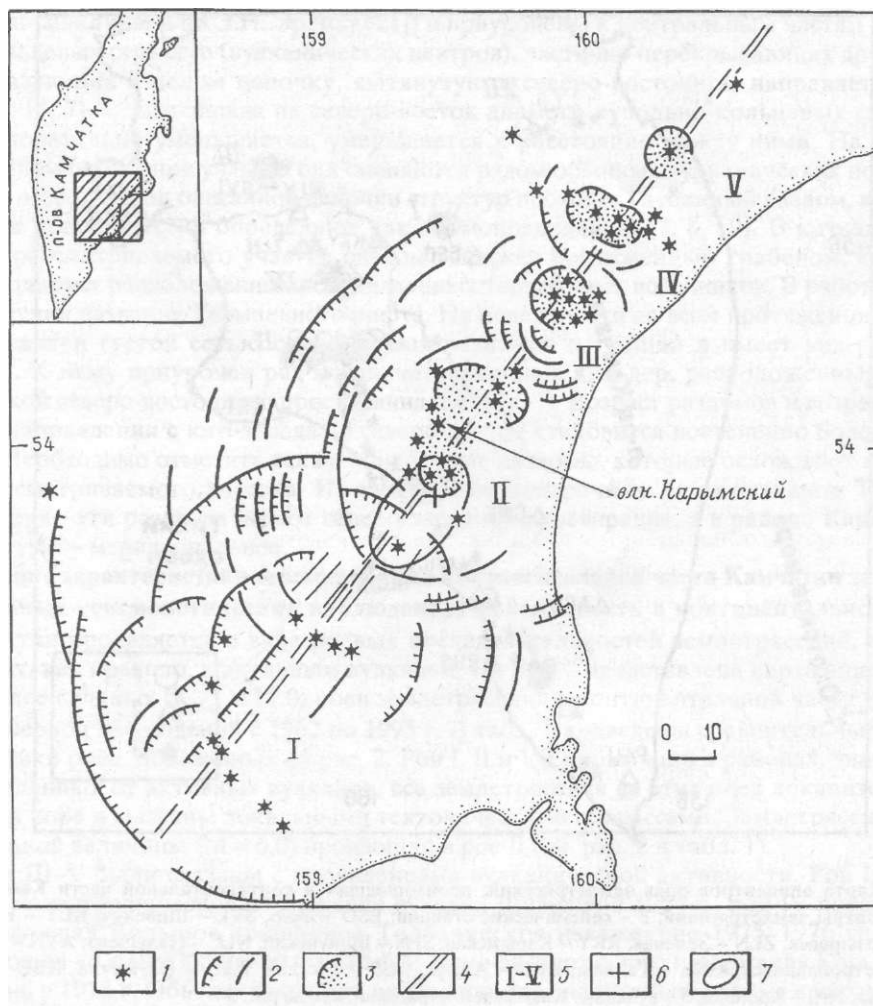


Рис. 1. Тектоническая схема Центрального участка Восточного вулканического пояса (составлена Леоновым В.Л.): 1 - четвертичные вулканы; 2 - разломы (а - с вертикальным смещением, б - трещины); 3 - позднечетвертичные кальдеры; 4 - осевая линия глубинного магмоподводящего разлома; 5 - вулканические центры (I - Налачевский, II - Карымский, III - Большесемячинский, IV - Узон-Гейзерный, V - Крашенинникова); 6 - положение инструментального эпицентра землетрясения 01.01.1996 г.; 7 - очаговая область землетрясения

землетрясений происходит в фокальном слое и максимальная глубина гипоцентров достигает 650 км. На материковой части Камчатки также происходят землетрясения, но их количество во много раз меньше, чем в фокальном слое, и они, в основном, связаны с деятельностью вулканов. Интенсивные рои вулкано-тектонических землетрясений сопровождают практически каждое сильное извержение вулканов. В отличие от зоны субдукции, где максимальная величина землетрясений может достигать магнитуды 8,5-8,6 (максимально возможной на земном шаре), в континентальной части Камчатки отмечены вулкано-тектонические землетрясения с магнитудой $\leq 6,0$ и с глубиной положения гипоцентров ≈ 50 км. В этом ряду землетрясение, произошедшее 01.01.1996 г. с магнитудой 7,0 в Карымском вулканическом центре, и одновременные извержения вулкана Карымский и в кальдере Академии Наук являются событиями необычными и редкими.

(грабен-синклинали по Э.Н. Эрлиху [21]) и приурочены к центральным частям купольно-кольцевых структур (вулканических центров), частично перекрывающих друг друга и образующих в целом цепочку, вытянутую в северо-восточном направлении (см. рис. 1) [4, 7]. С юго-запада на северо-восток диаметр купольно-кольцевых структур последовательно уменьшается, уменьшается и расстояние между ними. На северо-восточном окончании участка они сменяются рядом обычных вулканических построек. Вдоль осевой линии описанной цепочки структур проходит глубинный разлом, который многие исследователи определяют как магмоподводящий [7, 8, 19]. В юго-западной части рассматриваемого участка разлом выражен протяженным грабеном, который контролирует расположение многочисленных термальных источников. В работах [7-9] он получил название Термального рифта. На поверхности на всем протяжении разлом представлен густой сетью современных разломов и трещин и имеет вид раздвига [3, 17]. К нему приурочен ряд позднечетвертичных кальдер, расположенных также цепочкой северо-восточного простирания (см. рис. 1). Возраст разломов и возраст кальдер в направлении с юго-запада на северо-восток становится постепенно более молодым. Необходимо отметить также поперечные разломы, которые осложняют структуру рассматриваемого участка. Их трассируют поперечные ряды вулканов. Преимущественно эти разломы имеют северо-западное простирание, а в районе Карымской структуры - меридиональное.

Общие характеристики сейсмичности в континентальной части Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений. Сейсмичность в континентальной части Камчатки проявляется в виде роевых последовательностей землетрясений, приуроченных, как правило, к активным вулканам. На рис. 2 представлена карта эпицентров наиболее сильных ($K_{\max} > 11,0$) роев землетрясений в континентальной части Камчатки за период наблюдений с 1962 по 1995 г. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики роев, показанных на рис. 2. Рои I, II и VII произошли в районах, значительно удаленных от активных вулканов, все землетрясения из этих роев локализованы в земной коре и вызваны локальными тектоническими процессами. Землетрясение максимальной величины ($M = 6,0$) произошло в рое II (см. рис. 2 и табл. 1).

Рои III—V были связаны с проявлениями вулканической активности. Рой III предвещал катастрофическое извержение вулкана Шивелуч в 1964 г., рой IV предвещал и сопровождал Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. Рой V произошел во время активной фазы эффузивно-эксплозивного извержения Карымского вулкана в 1978 г. Обычно такие рои продолжаются значительное время с нарастающим интенсивности перед извержением, в их составе бывает значительное количество сильных землетрясений почти одинаковой величины. Происхождение таких землетрясений, которые обычно называются вулкано-тектоническими, связано с тектоническими процессами под активными вулканами, вызванными внедрением магмы. Максимальные землетрясения в таких роях обычно не превышают магнитуду 5,5. Землетрясение такой магнитуды произошло в рое, предвещавшем катастрофическое извержение вулкана Шивелуч (см. табл. 1). Единственный рой (VI) вулкано-тектонических землетрясений, который завершился без проявления вулканической активности, произошел в районе вулкана Асача (см. рис. 2 и табл. 1).

Исходя из особенностей роев тектонических и вулкано-тектонических землетрясений, которые происходили в континентальной части Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений, можно заключить, что сейсмические события, начавшиеся в районе вулкана Карымский 01.01.1996 г. и продолжающиеся до настоящего времени, занимают особое место (табл. 1, рой VIII). Во-первых, максимальное землетрясение в этой группе землетрясений имело магнитуду 7,0 - это самое сильное землетрясение, зарегистрированное в континентальной части Камчатки за время инструментальных сейсмологических наблюдений. Во-вторых, эта группа является форшокафтершоковой последовательностью со всеми присущими ей признаками: главному землетрясению предшествовала серия форшоков, сильнейшие последующие события отличались по энергии более чем на единицу (магнитуда сильнейших афтершоков

Параметры роев землетрясений в континентальной части Камчатки

Номер роя	Дата роя	Координаты роя, град		Число землетрясений		Максимальные		Район
		с.ш.	в.д.	$K \geq 8,5$	$K \geq 10,5$	класс	магнитуда	
I	20.11.1962– 18.02.1963	56,0–57,0	158,8–160,0	27	5	12,4	4,8	Пос. Эссо
II	02.04.1963– 14.09.1963	55,0–55,5	159,0–161,0	108	8	14,4	6,0	Р. Шапина
III	02.11.1964– 11.11.1964	56,5–57,0	161,0–162,0	64	13	12,3	5,5	Вулкан Шивелуч
IV	27.06.1975– 05.07.1975	55,3–56,0	160,0–161,0	73	6	11,0	4,7	Вулкан Толбачик
V	25.01.1978– 23.02.1978	53,5–54,2	158,9–159,8	15	5	12,7	5,4	Вулкан Карымский
VI	07.03.1983– 08.04.1983	52,0–52,5	157,0–158,0	212	13	11,8	4,6	Вулкан Асача
VII	10.06.1990– 14.06.1990	56,5–57,5	157,0–159,0	11	2	11,6	4,9	Пос. Тигиль
VIII	01.01.1996– 20.02.1996	53,5–54,2	158,9–159,8	459	34	14,3	7,0	Вулкан Карымский

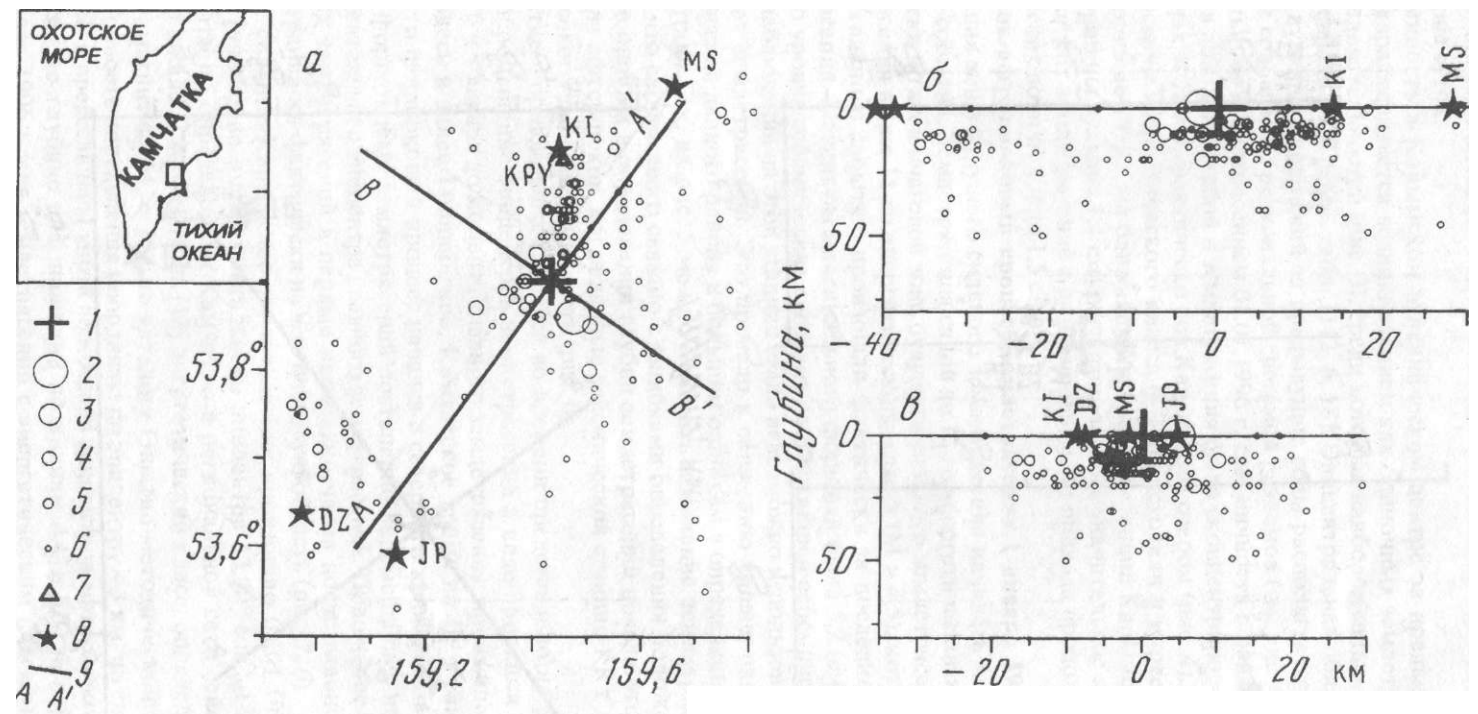


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений (а) и вертикальные разрезы по линиям А-А' (б) и В-В' (в) из района вулкана Карымский за 1962-1994 гг. ($K \geq 7,5$): 1 - положение эпицентра землетрясения 01.01.1996 г.; 2-6 - эпицентры землетрясений (значения K : 2 — 13,3 — 12,4 — 11,5 — 10,6 — 8 и 9); 7 — сейсмические станции; 8 - вулканы (MS - Малый Семячик, KI - Карымский, DZ - Дзенсур, JP - Жупановский); 9 - линии вертикальных разрезов, совпадающие с направлениями большой и малой осей эллипса очаговой зоны землетрясений 01.01.1996 г.

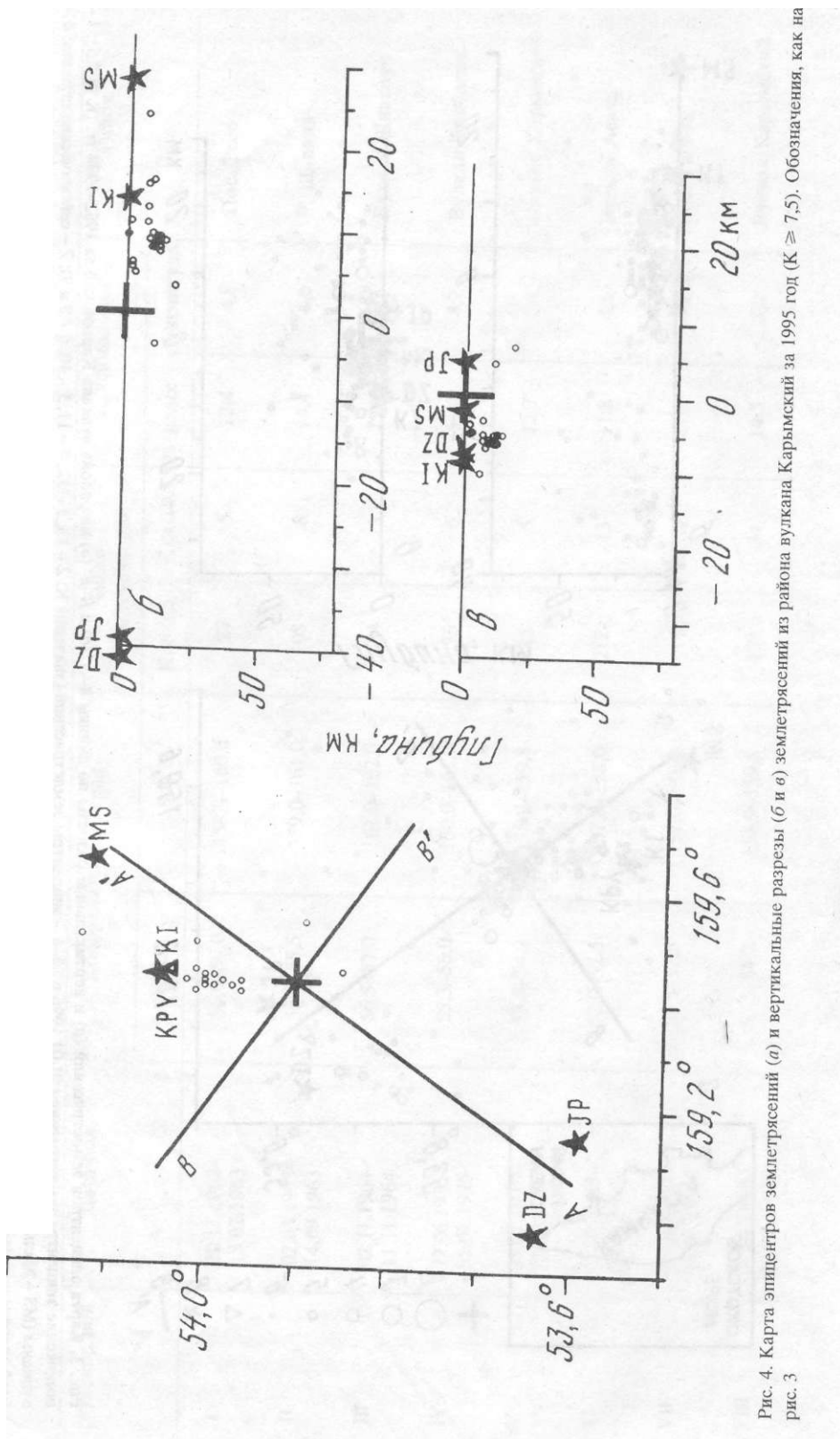


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений (а) и вертикальные разрезы (б и в) землетрясений из района вулкана Карымский за 1995 год ($K \geq 7,5$). Обозначения, как на рис. 3

равнялась 5,5), показатель наклона графика Омори ($N = N_0 T^{-a}$) близок к среднему значению для Камчатки ($a = 1,03$), основное количество афтершоков произошло в первые трое суток.

Сейсмичность в Карымском вулканическом центре за предыдущие годы (1962-1994 гг.) характеризуется возникновением как одиночных землетрясений, так и роевых последовательностей (рис. 3), среди которых наиболее сильный рой произошел в январе-феврале 1978 г. (см. табл. 1) [2, 6, 18]. Эпицентральная область землетрясений в районе вулкана Карымский за предыдущие годы располагается в 10-15 км южнее вулкана и совпадает с региональной системой разломов (см. рис. 1). В последний год перед сильным землетрясением 01.01.1996 г. сейсмичность в районе вулкана Карымский была довольно слабой и землетрясения были сконцентрированы южнее вулкана на глубинах 18 км, фактически под Карымским озером (рис. 4). Небольшие группы землетрясений энергетического класса 8-9 происходили в марте, мае, июле. Кроме этого, в течение 1995 г. на ближайшей к вулкану станции Карымская (KRY) (расстояние до вершины вулкана 1,4 км) регистрировалось значительное количество вулканотектонических землетрясений с разницей времени прихода продольных и поперечных сейсмических волн от 1,0 до 1,5 с.

Форшок-афтершоковый процесс землетрясения 1 января 1996 г. Сейсмическая активизация зоны будущего сильного землетрясения началась за несколько часов до главного события. Землетрясения силой до 12-го энергетического класса происходили фактически по всей очаговой зоне будущего сильного землетрясения (рис. 5). Четыре землетрясения выше 11-го энергетического класса ($M > 4,5$), которые являлись форшоками главного события, произошли фактически за последний час до основного землетрясения. Магнитуда максимального форшока была 5,2 (см. рис. 5). Вследствие высокого уровня сейсмических сигналов на ближайшей сейсмической станции (KRY) данные наблюдений на этой станции стало невозможно использовать при определении координат землетрясений. Это привело к снижению уровня надежной регистрации землетрясений данного района и большим ошибкам в определении глубин положений гипоцентров. Так, на рис. 5 можно отметить появление землетрясений на глубинах ~ 50 км, что скорее всего связано с ошибками определения положения гипоцентров. Такие же ошибки в определении глубин землетрясений появляются при вычислении координат афтершоков, когда данные сейсмической станции KRY не использовались из-за высокого уровня сейсмичности (рис. 6).

Развитие форшокового процесса во времени представлено на рис. 7, а. Здесь показано перемещение эпицентров землетрясений в виде проекции на линию AA' (см. рис. 5) с 6 ч 1 января до момента главного землетрясения, произошедшего в 9 ч 57 мин (время здесь и далее Гринвичское, Камчатское время на 12 ч раньше). Из рис. 7, а видно, что форшоковый процесс начался с северного края очаговой области, и эпицентры форшоковых землетрясений постепенно перемещались на юг к положению инструментального эпицентра главного землетрясения. Положение эпицентров афтершоковых землетрясений в первые несколько часов после главного землетрясения распространилось фактически на всю очаговую область (рис. 7, б).

Итак, сильное Карымское землетрясение произошло 01.01.1996 г. в 9 ч 57 мин 45,6 с. Положение инструментального эпицентра $53,90^\circ$ с.ш., $159,43^\circ$ в.д., глубина гипоцентра по определениям Камчатской региональной сети сейсмических станций 0 км. По шкале С.А. Федотова [13] энергетический класс, определяемый по 5-волне, $K = 14,3$, магнитуда $M_s = 7,0$ (по каталогу Опытной-методической экспедиции ОИФЗ РАН). Точность определения координат: по эпицентру - 3 км, по глубине - 2 км.

На рис. 6 представлены карта положения эпицентров афтершоковых землетрясений и разрезы по глубине для проекций по линиям AA' и BB' за период с 1 января по 20 февраля 1996 г. для землетрясений с энергетическим классом выше 7,5. Всего с 1 января по 20 февраля 1996 г. в очаговой области произошло 459 землетрясений с энергетическим классом $> 8,5$, из них 323 землетрясения - 1-2 января. (Общее коли-

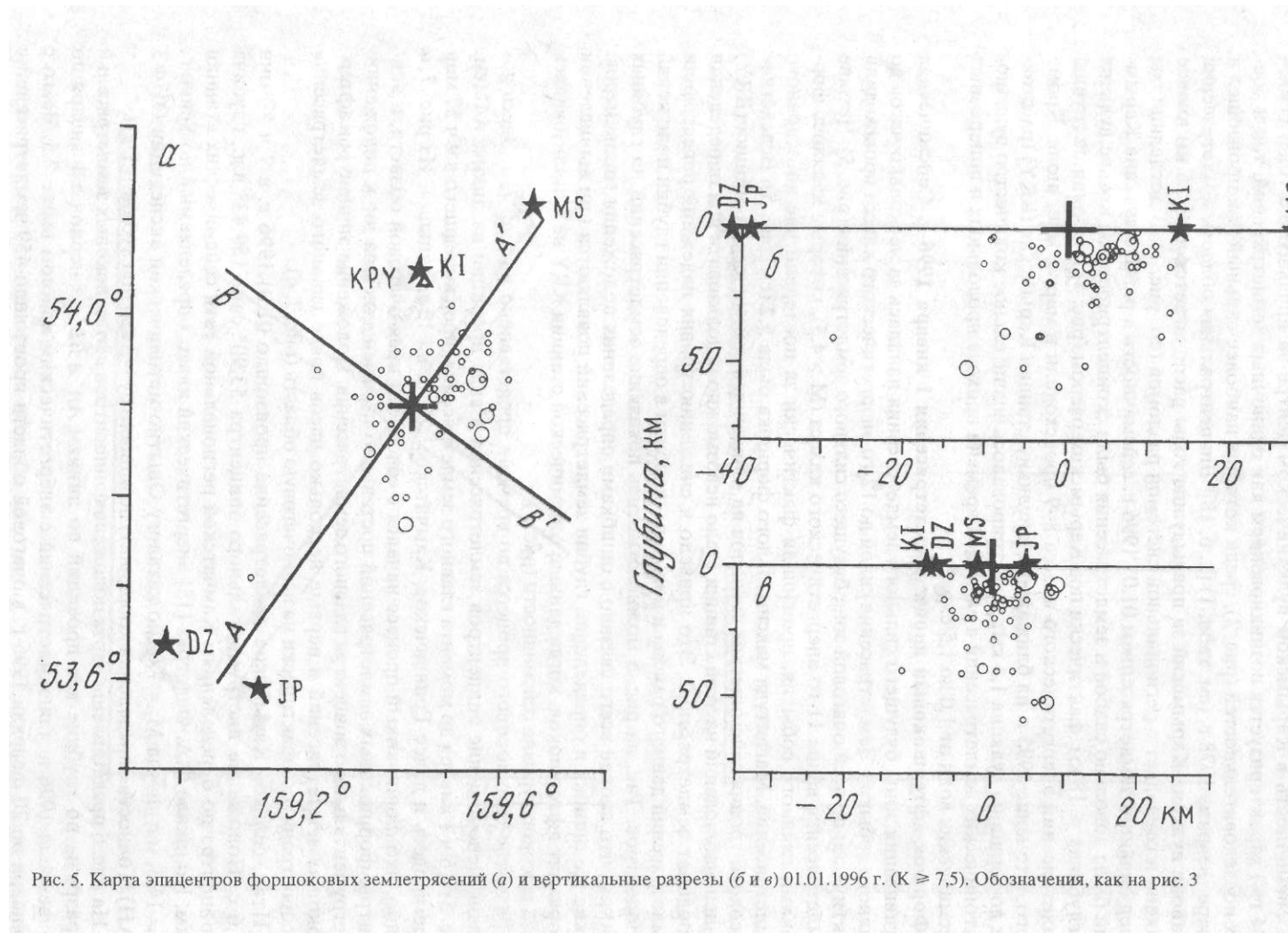


Рис. 5. Карта эпицентров форшоковых землетрясений (а) и вертикальные разрезы (б и в) 01.01.1996 г. ($K \geq 7,5$). Обозначения, как на рис. 3

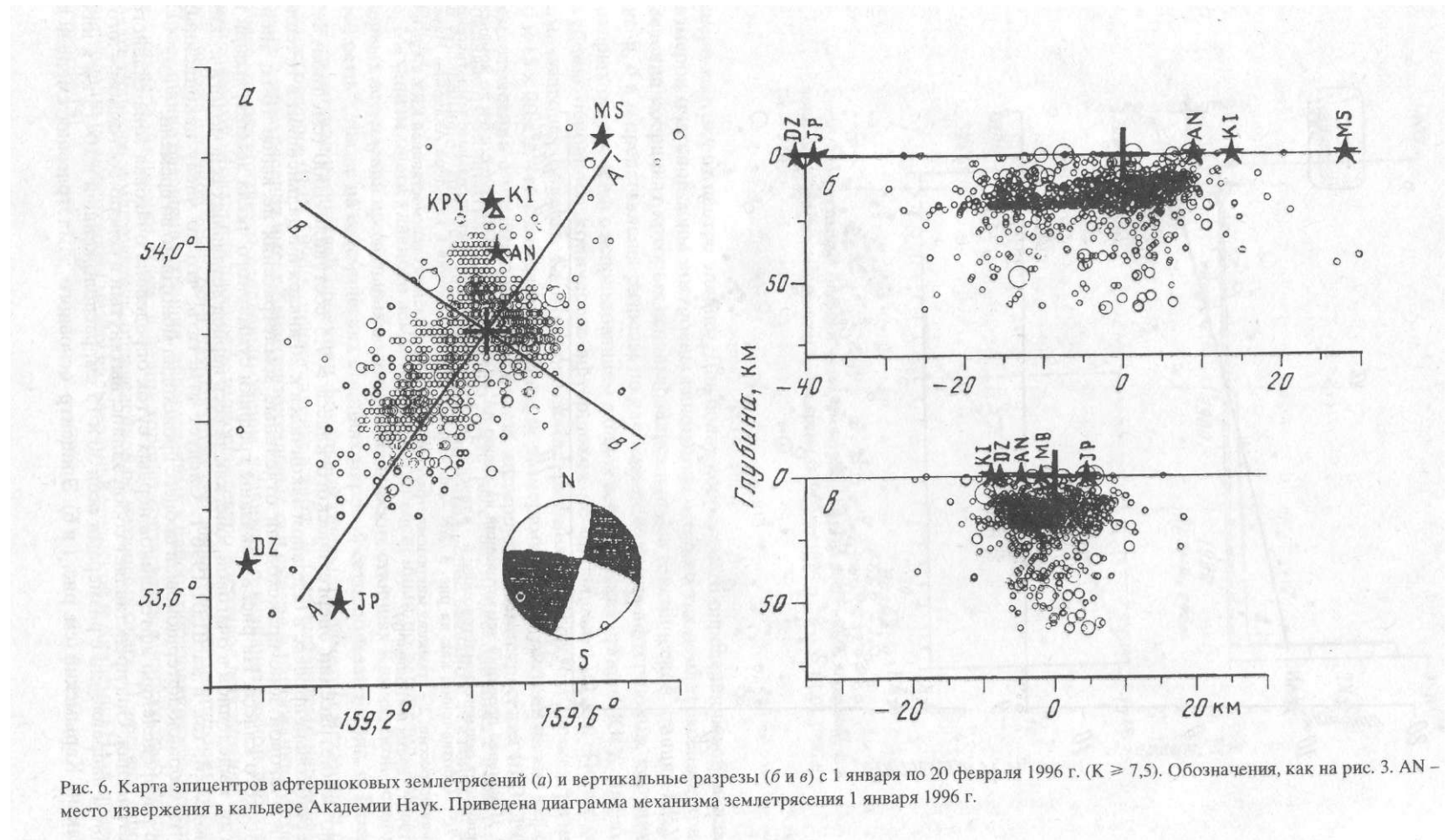


Рис. 6. Карта эпицентров афтершоковых землетрясений (а) и вертикальные разрезы (б и в) с 1 января по 20 февраля 1996 г. ($K \geq 7,5$). Обозначения, как на рис. 3. AN – место извержения в кальдере Академии Наук. Приведена диаграмма механизма землетрясения 1 января 1996 г.

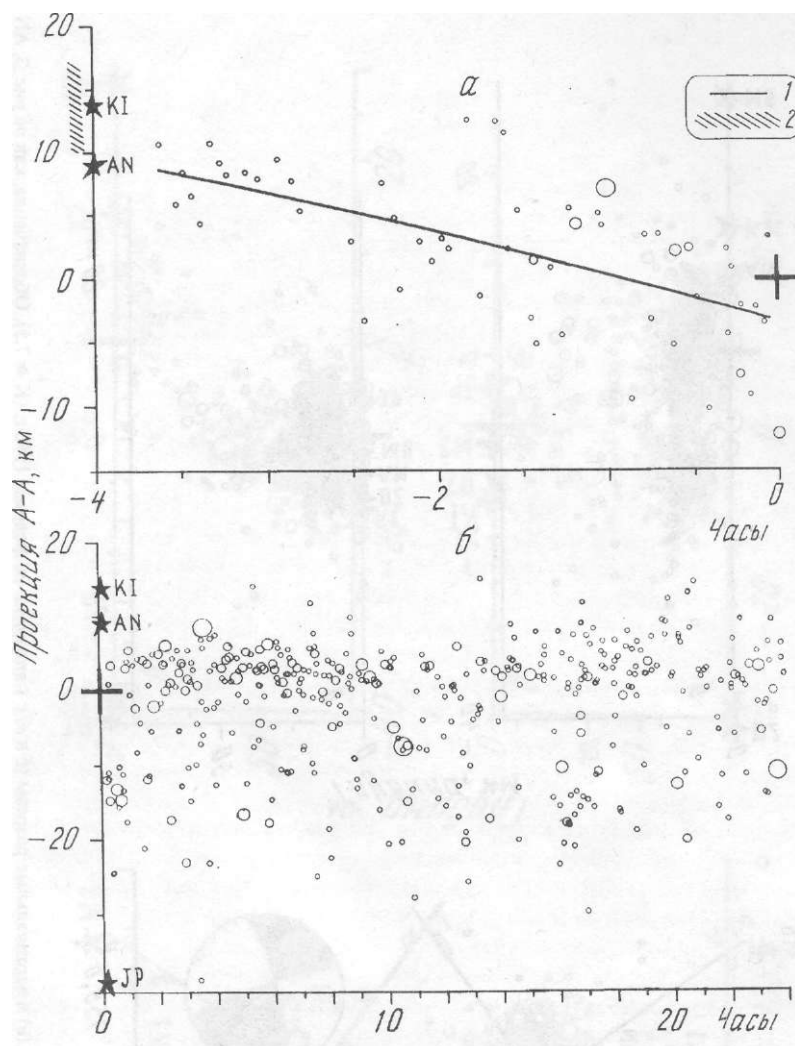


Рис. 7. Изменение проекций землетрясений на линию AA' во времени: а - 01.01.1996 г. с 6 ч до момента возникновения сильного землетрясения; б - в течение 24 ч с момента возникновения сильного землетрясения ($K \geq 7,5$). Обозначения, как на рис. 3. AN - проекция места извержения в кальдере Академии Наук; 1 - линия регрессии; 2 - проекция микроземлетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией KRY с 4 до 6 ч 01.01.1996 г. (время по Гринвичу)

чество землетрясений энергетического класса $> 7,5$ составило 1000 (см. табл. 1.) Афтершоковый процесс в основном закончился к 20 января и в дальнейшем в течение года в очаговой зоне происходили отдельные землетрясения не выше 10-го энергетического класса. На рис. 8 показаны графики суммарного числа землетрясений и энергии, выделенной в очаговой зоне, как за весь период детальных сейсмологических наблюдений, так и за 01.01.1996 г. Следует отметить, что по числу накопленных событий форшок-афтершоковый процесс происходил монотонно во времени.

По распределению афтершоков первых суток определена очаговая зона сильного землетрясения. Она представляет собой эллипс, вытянутый в северо-восточном - юго-западном направлении с размерами осей 30 x 15 км, расположенный в 10-15 км к югу от вулкана Карымский (см. рис. 1 и 6). Эпицентр основного землетрясения смещен к

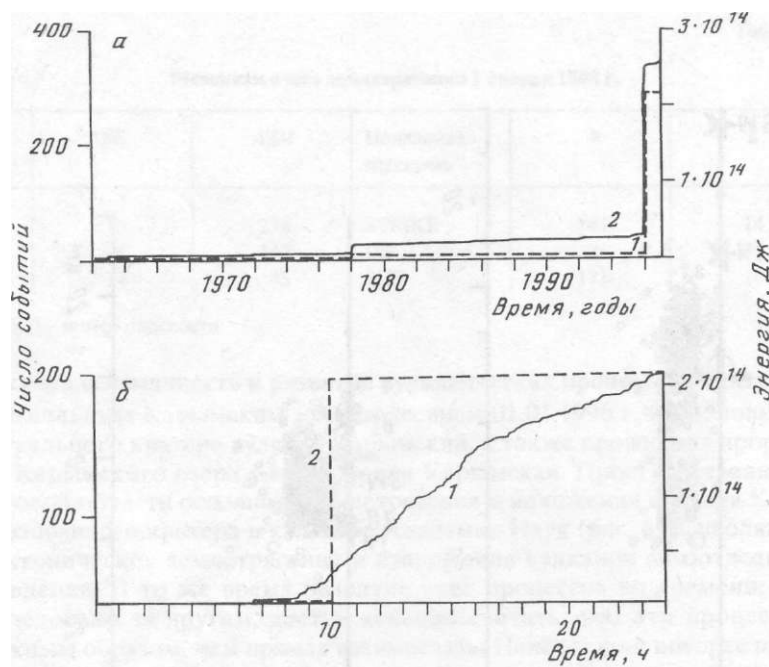


Рис. 8. Кумулятивные графики числа землетрясений (1) и энергии (2), выделенной зоне сильного землетрясения: а - за время с 1962 по 1996 гг., б - за 01.01.1996 ($K \geq 9,0$)

северо-востоку от центра эллипса. Для более корректного определения вертикальных размеров очаговой зоны построены гипоцентры только тех землетрясений, при вычислении координат которых использовались данные сейсмической станции KRY. На рис. 9, б и в представлены разрезы по глубине положения афтершоков, координаты которых определены с использованием данных сейсмических станций KRY. Видно, что глубины основного количества афтершоков не превышают 20 км. Таким образом, очаговая область Карымского землетрясения 01.01.1996 г. имеет размеры 30 x 15 x 20 км, что совпадает со средними размерами очагов тектонических коровых землетрясений с магнитудой ~ 7 . Область афтершоков землетрясения 01.01.1996 г. совпадает с эпицентральной областью землетрясений, происходивших в этом районе за последние 33 года (см. рис. 2 и 3), и их происхождение связано с тектоникой этого района.

Механизм очага главного землетрясения, определенный по распределению знаков первых вступлений продольных волн на сейсмических станциях Камчатской региональной сети, а также на сейсмических станциях мировой сети, показан на рис. 6. Построение проводили на нижней проекции фокальной сферы. Параметры механизма очага землетрясения 01.01.1996 г. представлены в табл. 2. Система снятых напряжений в очаге землетрясения имеет близгоризонтальные оси сжатия и растяжения. Механизм очага характеризуется сдвиговым типом подвижки с незначительной взбросовой компонентой. Нодальная плоскость, имеющая северо-восточное простирание, выбрана в качестве главной плоскости разрыва. По ней наблюдается левосторонний сдвиг. Простирание разрывов и трещин, обнаруженных в районе образования нового кратера в кальдере Академии Наук, в целом хорошо согласуется с плоскостью разрыва в очаге главного землетрясения, определенной по механизму очага. Подробное описание нарушений на поверхности между кальдерами Карымской и Академии Наук приведено в работе [5].

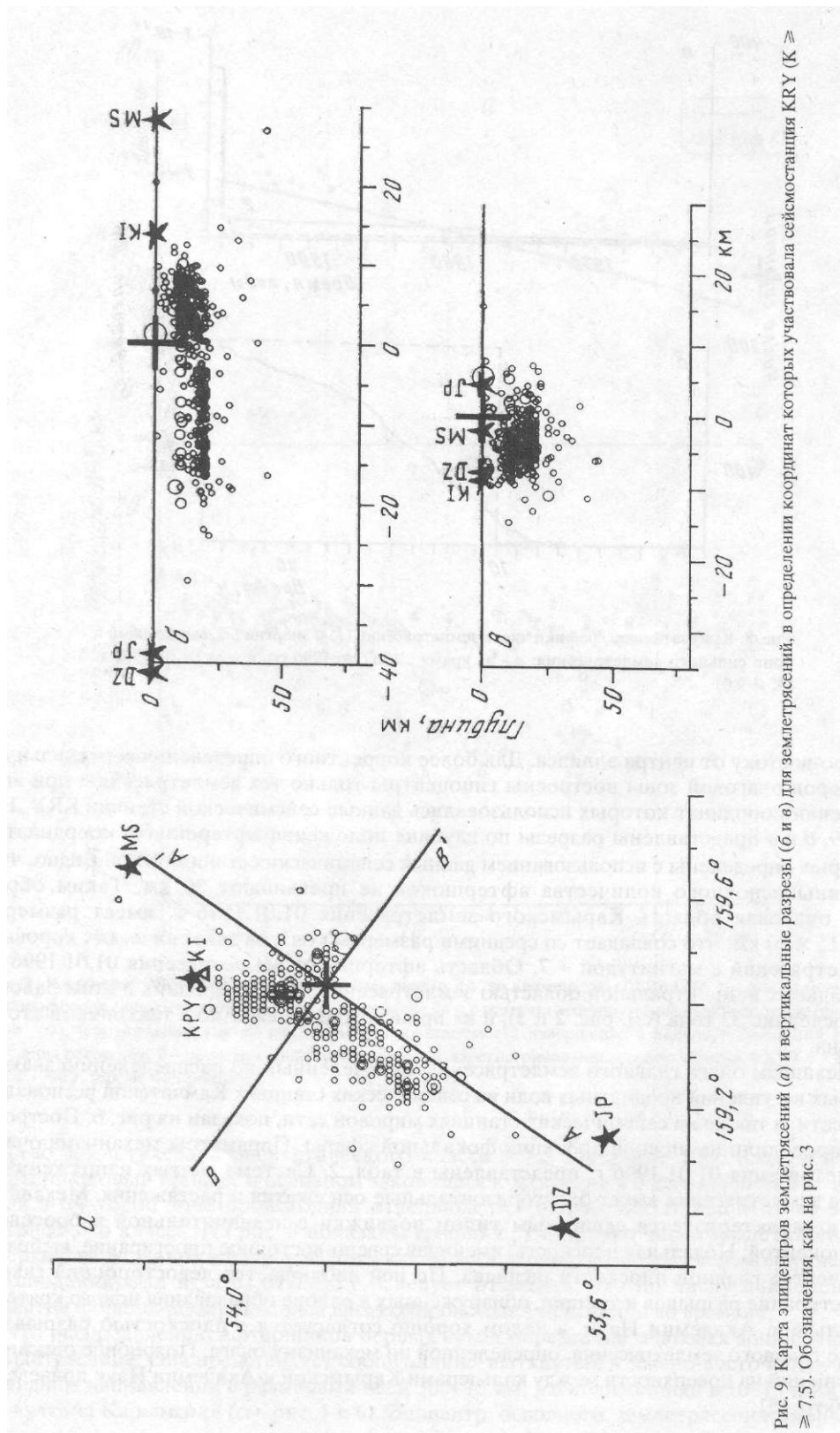


Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений (а) и вертикальные разрезы (б и в) для землетрясений, в определении координат которых участвовала сейсмостанция KRY (K \geq 7,5). Обозначения, как на рис. 3

Механизм очага землетрясения 1 января 1996 г.

Оси главных напряжений	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	Нодальная плоскость	I	II
<i>T</i>	16	238	STRIKE	282	14
<i>P</i>	4	147	DIP	76	81
<i>N</i>	74	45	SLIP	171	14

Примечание. I, II - номер плоскости.

Форшоковая сейсмичность и развитие вулканических процессов. Фактически одновременно с сильным Карымским землетрясением 01.01.1996 г. возобновилась активность центрального кратера вулкана Карымский, а также произошел прорыв в северной части Карымского озера у истока реки Карымская. Пространственное несовпадение очаговой области основного землетрясения и положения вулкана Карымский и вновь образованного кратера в кальдере Академии Наук (рис. 6) позволяют рассматривать тектоническое землетрясение и извержения вулканов как отдельно произошедшие явления. В то же время развитие этих процессов во времени, когда одно явление следовало за другим, дает основание считать, что эти процессы связаны более сложным образом, чем прямая взаимосвязь. Наибольший интерес представляет начало развития указанных процессов, особенно предваряющая сейсмичность. Как уже показано (см. рис. 5 и 7), приблизительно за 4 ч до главного землетрясения в очаговой области произошло значительное количество землетрясений, наиболее сильное из которых имело энергетический класс ~ 12 . В то же время, по данным наблюдений на ближайшей сейсмической станции KRY, за 8 ч до основного события в районе вулкана Карымский начались микроземлетрясения с характерными значениями разности времен пробега продольных и поперечных волн ~ 1 с. Количество микроземлетрясений постепенно нарастало вплоть до того момента, когда они слились в непрерывный сейсмический фон, и данные с сейсмической станции KRY стали непригодны для использования (рис. 10). Для оценки положения гипоцентра этих микроземлетрясений использовано распределение разности времен прихода продольных и поперечных волн и поляризация первых вступлений продольных волн. Для этого выбраны все микроземлетрясения, зарегистрированные на сейсмической станции KRY, для которых можно было определить время вступления продольных и поперечных волн. Разность времен прихода продольных и поперечных волн составляла в среднем 0,95 с (с отклонением $\leq 0,1$ с). Такая устойчивая разность времен прихода продольных и поперечных волн может означать, что все микроземлетрясения происходили фактически в одном месте. Для оценки положения гипоцентров микроземлетрясений необходимо предположить значение скорости продольных волн и соотношение скоростей продольных и поперечных сейсмических волн. По многочисленным оценкам скорости продольных волн в приповерхностных слоях в областях современного вулканизма не превышают 3 км/с [1], а соотношение скоростей продольных и поперечных волн (коэффициент Пуассона) обычно принимается равным 1,73. Для таких величин скоростей максимальное расстояние, на котором были расположены гипоцентры микроземлетрясений, оценивается в ~ 4 км, и разброс этих расстояний из-за вариаций разности времен прихода продольных и поперечных волн ~ 400 м. Более точное положение гипоцентров можно найти по оценке поляризации первых вступлений продольных волн. Для примера на рис. 11, а представлена запись трех компонент типичного микроземлетрясения, зарегистрированного на сейсмической станции KRY за несколько часов до основного землетрясения. Можно отметить почти вертикальное направление первого вступления в продольной волне, что указывает на то, что землетрясение происходило фактически под сейсмической станцией. На рис. 12, а представ-

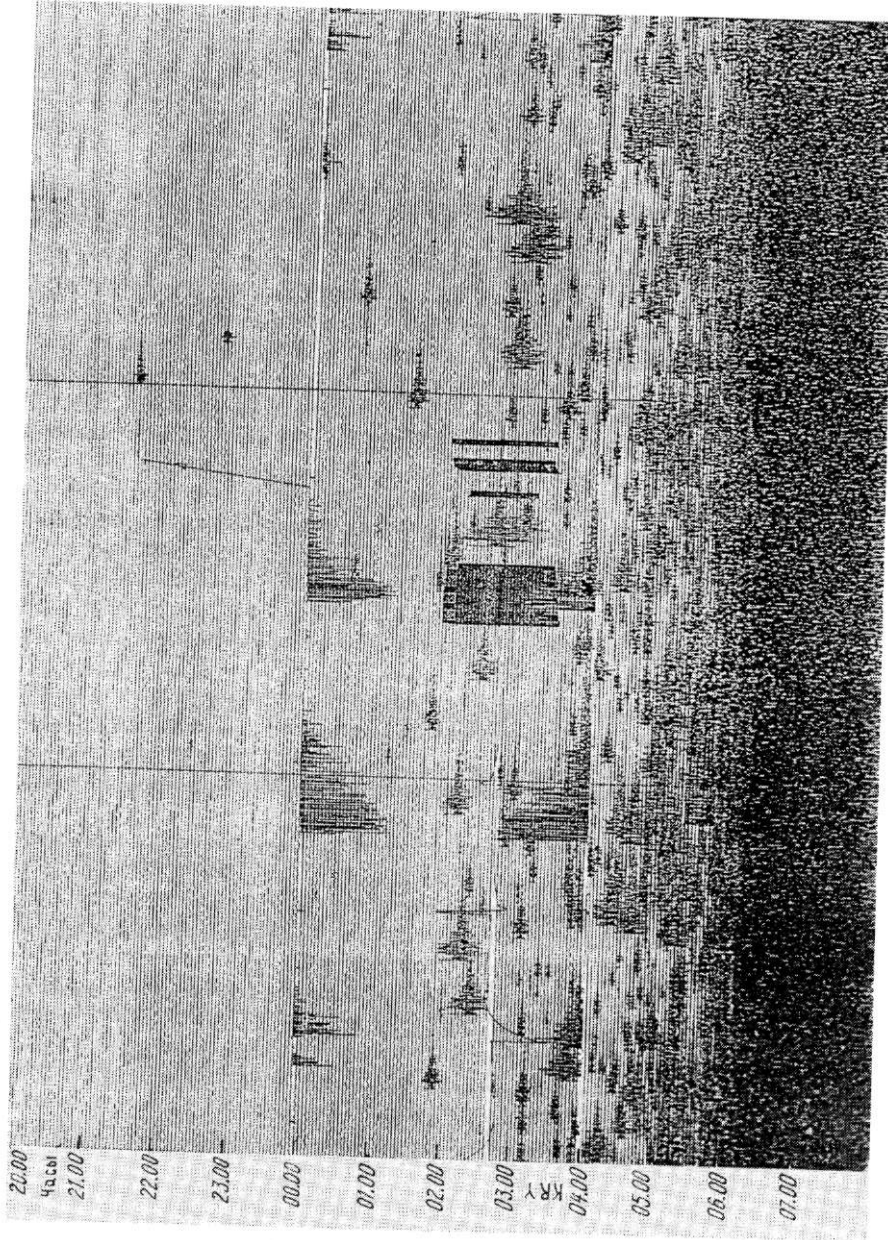


Рис. 10. Сейсмограмма сейсмостанции КРУ (Z-канал) с 20 ч 31.12.1995 г. до 8 ч 01.01.1996 г.

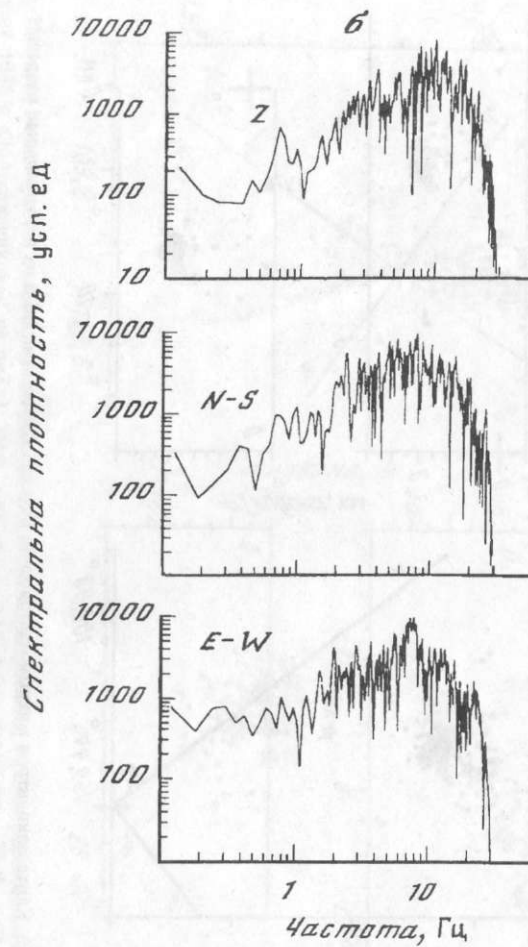
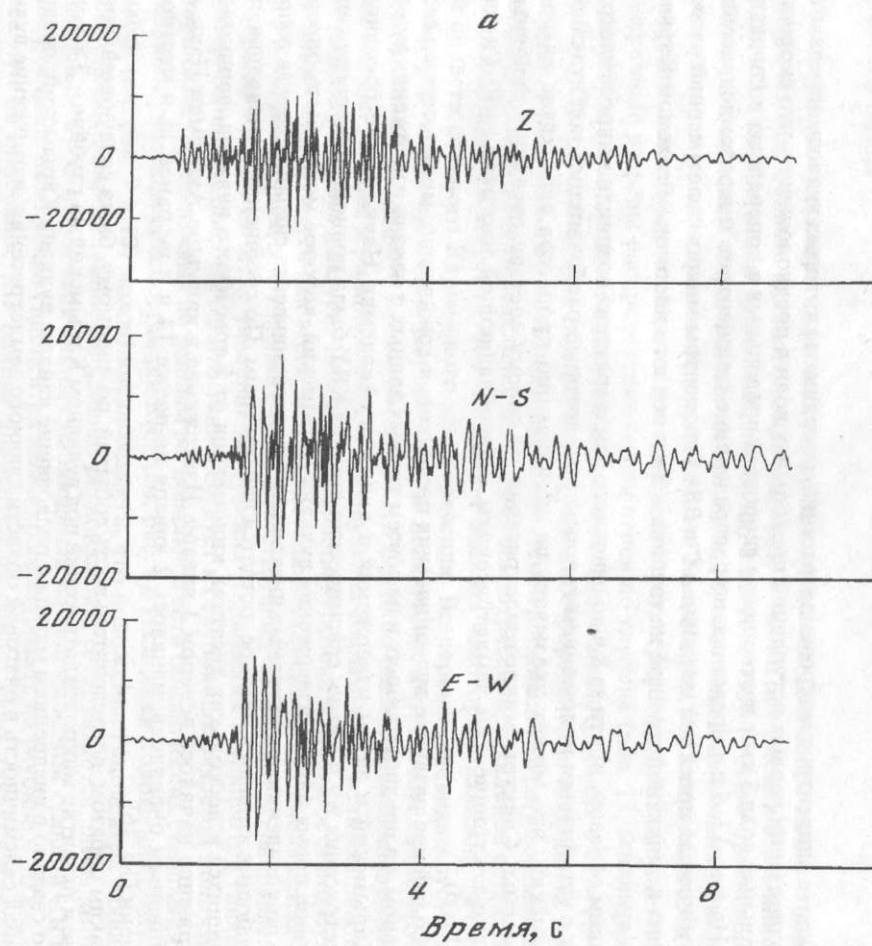


Рис. 11. Образец записи станций KRY (а) типичного микроземлетрясения от вулкана Карымский и его спектры (б)

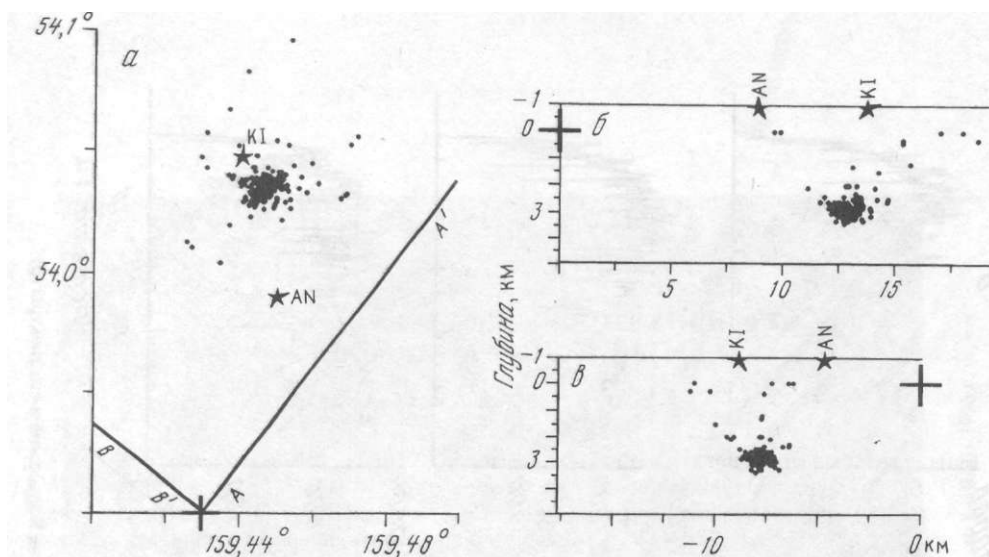


Рис. 12. Карта эпицентров микроземлетрясений вулкана Карымский (а) и их вертикальные разрезы: б-А-А'; в-В-В'

лена карта эпицентров микроземлетрясений, координаты которых удалось определить по поляризации первых вступлений продольных волн в предположении, что скорость продольных волн 3 км/с и отношение скоростей продольных и поперечных волн равно 1,73. На рис. 12, б и в представлено распределение гипоцентров микроземлетрясений по глубине для проекций на линии АА' и ВВ'. Гипоцентры микроземлетрясений расположены компактной группой на глубине ~ 3 км под юго-восточным склоном Карымского вулкана.

Таким образом, почти за 8 ч до основного землетрясения возникли микроземлетрясения с устойчивым положением гипоцентров, которые располагались под вулканом Карымский, что может указывать на активизацию процессов вследствие внедрения магмы. Спектры микроземлетрясений по своему составу отвечают типичным вулcano-тектоническим землетрясениям с преобладающей частотой ~ 10 Гц (см. рис. 11,б).

Дальнейшее развитие вулканических процессов, к сожалению, может строиться, в основном, на предположениях и не совсем точных данных о начале извержения вулкана Карымский и затем извержения в кальдере Академии Наук. После основного землетрясения в 9 ч 57 мин сейсмическая станция КРУ была полностью перегружена, и точное время начала извержения вулкана Карымский, которое могло быть определено по появлению характерных низкочастотных сейсмических сигналов, всегда сопровождающих взрывы в кратере, остается неизвестным. По сообщениям очевидцев, находившихся в нескольких десятках километров от Карымского вулкана, вершинное извержение началось вечером 1 января. Извержение в кальдере Академии Наук, по сообщениям очевидцев, началось 2 января не позже 14 ч и не ранее 11 ч местного времени [10, 16].

Таким образом, последовательность событий, по-видимому, была следующей: появление и развитие микроземлетрясений под вулканом Карымский на глубине ~ 3 км, что было связано с внедрением магмы в подводящие каналы вулкана Карымский; предваряющая сейсмичность в очаговой области главного землетрясения; извержение вулкана Карымский и основное тектоническое землетрясение с магнитудой 7,0; извержение в кальдере Академии Наук.

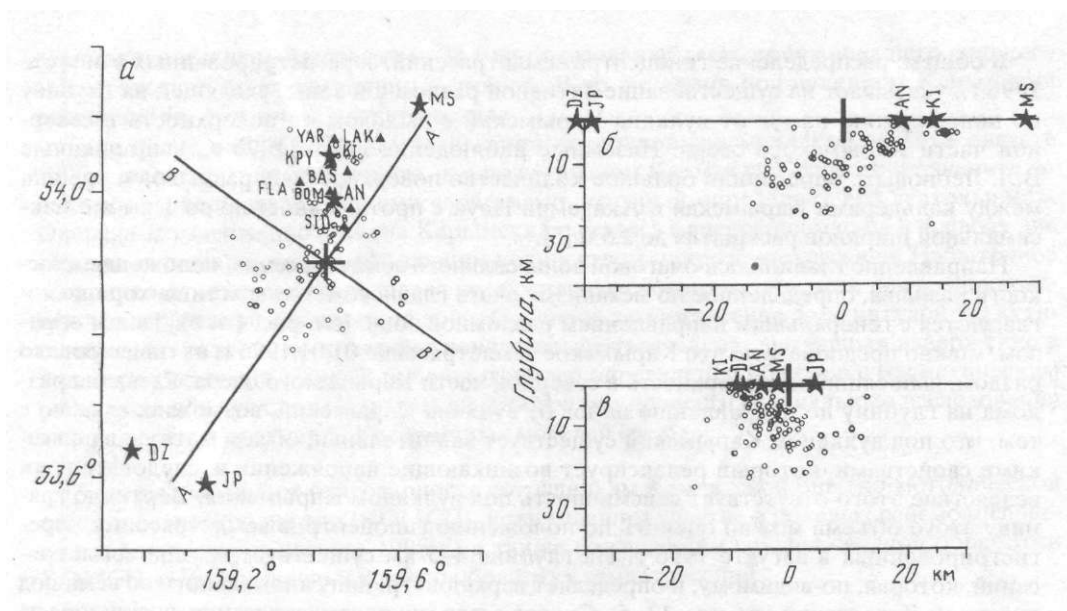


Рис. 13. Карта эпицентров (а) и вертикальные разрезы (б и в) для землетрясений, зарегистрированных в августе 1996 г. Обозначения, как на рис. 3. YAR, LAK, FLA, BAS, BOM, CRE, SID - временные сейсмические станции

Взаимосвязь вулканических и тектонических процессов. Для более точного определения очаговой области главного землетрясения, а также для оценки сейсмичности, связанной с извержением вулкана Карымский, в августе 1996 г. были организованы наблюдения плотной сетью сейсмических станций, состоящей из восьми пунктов с максимальным расстоянием между пунктами ~ 10 км. На рис. 13, а показана сеть сейсмических станций и эпицентры землетрясений, зарегистрированных в августе 1996 г. Поперечные разрезы распределения гипоцентров по глубине (рис. 13, б и в) хорошо согласуются с положением очаговой области главного землетрясения с $M = 7,0$ (см. рис. 6, а). Такое совпадение подтверждает надежное определение координат землетрясений, выполненного по наблюдениям Камчатской региональной сети сейсмических станций. Более точное определение координат землетрясений локальной сетью сейсмических станций в августе 1996 г. позволяет оценить некоторые особенности очаговой области сильного Карымского землетрясения. Во-первых, очевидно отсутствие сейсмичности под вулканом Карымский, за исключением незначительной группы землетрясений на глубине 3-4 км (см. рис. 13, б), что, по-видимому, связано с движением магмы, так как вершинное извержение вулкана Карымский с изливом лавового потока продолжалось в августе 1996 г. (Пониженный уровень сейсмичности под вулканом Карымский отмечен для всего периода детальных сейсмических наблюдений (см. рис. 3 и 4).) Во-вторых, заглублиение очагов землетрясений происходит по направлению с севера на юг или по мере удаления от вулкана Карымский к эпицентру главного землетрясения (см. рис. 13, б), что также следует из глубинных разрезов положения афтершоков, определенных по данным региональной сети сейсмических станций с обязательным участием сейсмостанции KRY (см. рис. 9). Из оценки положения очаговой области (см. рис. 9 и 13) можно предположить, что положение гипоцентра главного землетрясения, определенное по данным региональной сети, является, по-видимому, ошибочным из-за отсутствия данных наблюдений на сейсмической станции KRY, и более реальное положение гипоцентра можно рассматривать на глубине ~ 10 км, тем более что на поверхности в районе эпицентра не обнаружено никаких разрывов, которые несомненно должны были быть вызваны землетрясением с магнитудой 7,0 и с нулевой глубиной.

В общем, распределение гипоцентра землетрясений, зарегистрированных в августе 1996 г., указывает на существование активной разломной зоны, уходящей на глубину по направлению на юг от вулкана Карымский с выходом на поверхность в северной части Карымского озера. Наземные наблюдения летом 1996 г., выполненные В.Л. Леоновым, определили большое количество поверхностных разрывов и трещин между кальдерами Карымская и Академии Наук с протяженностью до 1 км и с максимальной шириной раскрытия до 2,5 м [5].

Направление главной оси очаговой зоны сильного землетрясения, положение плоскости разрыва, определенное по механизму очага главного землетрясения, хорошо согласуются с генеральным направлением разломной зоны (см. рис. 1 и 6). Таким образом, можно предполагать, что Карымское землетрясение 01.01.1996 г. активизировало разлом, вышедший на поверхность в северной части Карымского озера. Развитие разлома на глубину по направлению на юг от вулкана Карымский, возможно, связано с тем, что под вулканом Карымский существует значительный объем материала с вязкими свойствами, который релаксирует возникающие напряжения и, следовательно, вследствие этого отсутствует сейсмичность под вулканом Карымский. Верхнюю границу этого объема можно оценить по положению гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в августе 1996 г. На глубине 4-5 км существует группа землетрясений, которая, по-видимому, и определяет верхнюю границу аномального объема под вулканом Карымский (см. рис. 13, б). Скорее всего микроземлетрясения, возникшие за несколько часов до главного землетрясения, также находились на границе этого объема и были вызваны началом внедрения магмы в подводящие каналы вулкана Карымский. Это внедрение было связано с ростом давления внутри магматического очага, которое, создав дополнительные напряжения в окружающей среде, было причиной возрастания сейсмической активности и возникновения главного землетрясения, подготовленного тектоническими процессами в этой области. Избыточное давление магматических расплавов послужило спусковым механизмом для сильного землетрясения. Активизировавшийся в результате этого землетрясения разлом создал условия для внедрения магмы, которая вышла на поверхность по разлому и инициировала извержение в кальдере Академии Наук. Совпадение таких уникальных природных явлений во времени произошло благодаря накоплению локальных тектонических напряжений, реализованных в результате сильного землетрясения, периодичность которых в этом районе может составлять многие сотни лет, в то время как извержения вулкана Карымский происходят каждые 10-15 лет. В этой связи основной причиной совпадения указанных процессов во времени послужила готовность вулкана Карымский к очередному извержению, и это извержение (внедрение магмы в подводящие каналы) началось первым, что было отмечено усилением микросейсмической активности. Затем избыточное давление магмы послужило спусковым механизмом для форшоковой сейсмичности в очаговой области, которая постепенно перемещалась от вулкана Карымский к эпицентру основного землетрясения (см. рис. 7), что было вызвано распространением напряжений, вызванных избыточным давлением магматического расплава. Главное землетрясение с магнитудой 7,0 сняло основные тектонические напряжения в данном районе и в свою очередь образовало разлом, по которому начала внедряться магма, вызвавшая извержение в кальдере Академии Наук. Таким образом, все процессы были взаимосвязаны и их развитие отражает вулcano-тектоническую ситуацию в районе вулкана Карымский.

Выводы. Извержения вулкана Карымский и в кальдере Академии Наук, а также произошедшее в то же время землетрясение с магнитудой 7,0 представляют уникальные природные явления, взаимосвязь которых может дать более полное представление о вулcano-тектонических процессах, происходящих в этом районе. Несмотря на ограниченные сейсмические данные из-за периодического отсутствия наблюдений на ближайшей сейсмической станции KRY, можно предположить последовательность развития вулканических и тектонических процессов. По данным о распределении гипоцентров землетрясений в районе вулкана Карымский за весь период детальных

сейсмологических наблюдений (~ 33 года) очаговая область произошедшего сильного землетрясения была постоянно активной. В то же время под вулканом Карымский сейсмичность фактически отсутствовала.

Детальные наблюдения землетрясений локальной сейсмической сетью в августе 1996 г. позволяют предположить, что под вулканом Карымский существует значительный объем вещества с вязкими свойствами, который определяет его деятельность. Очередное извержение вулкана Карымский началось с внедрения магмы в подводящие каналы, что сопровождалось большим количеством микроземлетрясений. Избыточное давление магматического расплава послужило спусковым механизмом для возникновения землетрясений в разломной зоне. Основное землетрясение с магнитудой 7,0 активизировало разлом, по которому начала внедряться магма, вызвавшая извержение в кальдере Академии Наук. Для более точного определения объемов с магматическим расплавом под вулканом Карымский необходимо провести специальные исследования для построения трехмерных скоростных моделей среды.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Камчатской опытно-методической сейсмологической партии (КОМСП), принимавшим участие в полевых сейсмологических наблюдениях в августе 1996 г., а также сотрудникам группы сводной обработки КОМСП за тщательную и точную обработку землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балеста С.Т., Каргопольцев А.А., Григорян Г.Б. Строение Новых Толбачинских вулканов по сейсмическим данным // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 225–233.
2. Зобин В.М., Фирстов П.П., Иванова Е.И. Рой землетрясений в районе вулкана Карымский в январе-феврале 1978 года // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 64–73.
3. 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.
4. Леонов В.Л. О некоторых закономерностях развития гидротермальной и вулканической деятельности на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 28–40.
5. Леонов В.Л. Поверхностные разрывы, связанные с землетрясением и извержением, произошедшими в Карымском вулканическом центре 1–2 января 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 113–129.
6. Леонов В.Л., Иванов В.В. Землетрясения Карымского вулканического центра и их связь с тектоникой // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 24–40.
7. Масуренков Ю.П. Структурная позиция Карымского вулканического центра // Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). М.: Наука, 1980. С. 111–116.
8. Масуренков Ю.П. Тектоническое положение и краткая история развития вулканов Восточной Камчатки // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 8–13.
9. Масуренков Ю.П., Комкова Л.А. Геодинамика и рудообразование в купольно-кольцевой структуре вулканического пояса. М.: Наука, 1978. 274 с.
10. 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.
11. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим Карымского вулкана в 1965–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 3–13.
12. Токарев П.И., Фирстов П.П. Сейсмологические исследования вулкана Карымского // Бюл. вулканол. станций. 1967. № 43. С. 9–22.
13. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.

14. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91–107.
15. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 93–109.
16. Фирстов П.П., Филиппов Ю.А. Система хранения и обработки записей волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 1. С. 36–49.
17. Флоренский И.В., Трифионов В.Г. Новейшая тектоника и вулканизм Восточной вулканической зоны Камчатки // Геотектоника. 1985. № 4. С. 78–87.
18. Хренов А.П., Дубик Ю.М., Иванов Б.В. и др. Эруптивная деятельность вулкана Карымский за 10 лет (1970–1980 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 29–48.
19. Шанцер А.Е. Некоторые особенности эволюции тектоно-магматических структур Камчатки в зависимости от ее блокового строения и движения блоков в позднем кайнозое // Бюл. вулканол. станций. 1979. № 57. С. 53–65.
20. Широков В.А., Иванов В.В., Степанов В.В. О глубинном строении вулкана Карымский и особенности его сейсмичности по данным локальной сети // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 71–80.
21. Эрлих Э.К. О структурной приуроченности четвертичного вулканизма Камчатки // Геотектоника. 1965. № 1. С. 93–105.
22. Gorbatov A., Suarez G., Kostoglodov V., Gordeev E. A double-planed seismic zone in Kamchatka from local and teleseismic data // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. № 16. P. 1675–1678.

Камчатская опытно-методическая
сейсмологическая партия,
Геофизическая служба РАН,
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию
12.08.1997

Университет Хоккайдо,
Саппоро, Япония

Институт вулканологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский

Университет Кагошима,
Кагошима, Япония