

КРОНОЦКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 5 декабря 1997 года с $M_w=7.8$, $I_0=8$ (Камчатка)*Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Левин В.Е., Рябинин Г.В.,**Хаткевич Ю.М., Гусева Е.М., Салтыков В.А., Зобин В.М.*

5 декабря 1997 г. в 11^h26^m у Тихоокеанского побережья Камчатки вблизи Кроноцкого полуострова произошло самое сильное в этом районе за время детальных сейсмологических наблюдений (1961-1997 гг.) землетрясение с магнитудой $M_w=7.8$. Сводка определений параметров землетрясения, полученные из различных источников, приведена в табл. 1. На побережье Камчатки землетрясение ощущалось с интенсивностью до 7 баллов.

Таблица 1. Сводка определений параметров очага Кроноцкого землетрясения

t ₀ , ч мин с	Гипоцентр			M ₀ *10 ²⁰ , Н·м	Магнитуды	Нодальные плоскости						Источник
	φ°, N	λ°, E	h, км			NP1			NP2			
						STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
11 26 51.0					M _c =7.7	203	57	13	106	79	146	[1]
11 26 54.8	54.881	161.947	33	2.2	MPSP=7.0; MPLP=7.2; MS=7.9	193	20	76	28	71	95	[2]
11 26 53.8	54.804	162.006	25		m _b =6.1; M _S =7.4							[3]
11 26 54.7	54.841	162.035	33	4.1	m _b =6.3; M _S =7.6; M _w =7.7	190	16	56	45	77	99	[4]
11 27 21.3	54.31	161.91	34	5.3	M _w =7.8	202	23	74	39	68	97	[5] ¹
	54.31	161.91	33.6	6.2	M _w =7.8	198	21	70	39	70	97	[6] ²
	54.25	161.56	25	6.24	M _w =7.8	220	25	96	34	66	87	Наст.ст. ³
	54.3	161.9	30	11.4	M _w =8.0	196	39	50	63	62	117	[6] ⁴

Примечание. ¹ – время и координаты центра тяжести излучателя; ² – косейсмика, точечный источник; ³ – косейсмика, протяженный источник, приведены координаты центра площадки очага; ⁴ – полная подвижка, точечный источник.

Сейсмичность района очага. Очаг землетрясения возник под континентальным склоном Камчатки у побережья Кроноцкого полуострова, где на протяжении всего периода детальных сейсмологических наблюдений регистрировались как одиночные сильные ($K_S \geq 11.6$) события, так и группы землетрясений (рис. 1). Большинство групп землетрясений локализовались в океане к востоку и северо-востоку от Кроноцкого полуострова и только 6 групп землетрясений из 24 произошли в юго-западной части очага будущего сильного землетрясения. Одиночные сильные землетрясения возникали, в основном, вдоль береговой линии Камчатского полуострова на изобатах 1000 и 3000 м. Последний рой землетрясений зафиксирован за 5 лет до Кроноцкого землетрясения – 27-30 ноября 1992 г. в непосредственной близости от северо-восточной оконечности Кроноцкого полуострова.

По многолетним данным (1961-1996 гг.), имеющимся в региональном каталоге Камчатки и Командорских островов, а также по материалам 1997 г. были построены для исследуемого района кумулятивные графики повторяемости (рис. 2.) Представительным нижним уровнем в этом каталоге за весь период наблюдений в выделенном районе является $K_S=8.5$. Наклон графика повторяемости за весь период равен 1.25 (прямая 4 на рис. 2). Этот же наклон сохраняется и для первых 11-ти месяцев 1997 г. (прямая 6). А для землетрясений декабря 1997 г. наблюдается излом на графике в области $K_S=11$. Если прямую 4, полученную по многолетним данным, привести к уровню данных декабря 1997 г. (прямая 5), то можно предположить, что число землетрясений с $K_S \geq 8.6$ в декабре могло доходить до 4000, в то время как обработано 1396. Возможная причина в том, что с 5 декабря произошло значительное усиление сейсмической активности в исследуемом районе и выделение слабых толчков стало затруднительным (без пропусков регистрировались землетрясения лишь с $K_S \geq 11$).

Развитие сейсмического процесса в очаговой зоне Кроноцкого землетрясения. В течение 01.01.-30.11.1997 г. в исследуемом районе были зарегистрированы несколько

землетрясений с $K_S \geq 11.6$ (5,10,13,17 на рис. 3), в том числе землетрясение 9 февраля ($18^{\text{h}}57^{\text{m}}$, $h=40$ км, $K_S=12.7$, $M_S=5.6$) (5). После этого события поздние афтершоки распространились с запада на восток (затемненные треугольники на рис. 3), обозначив место возникновения форшоков Кроноцкого землетрясения 5 декабря.

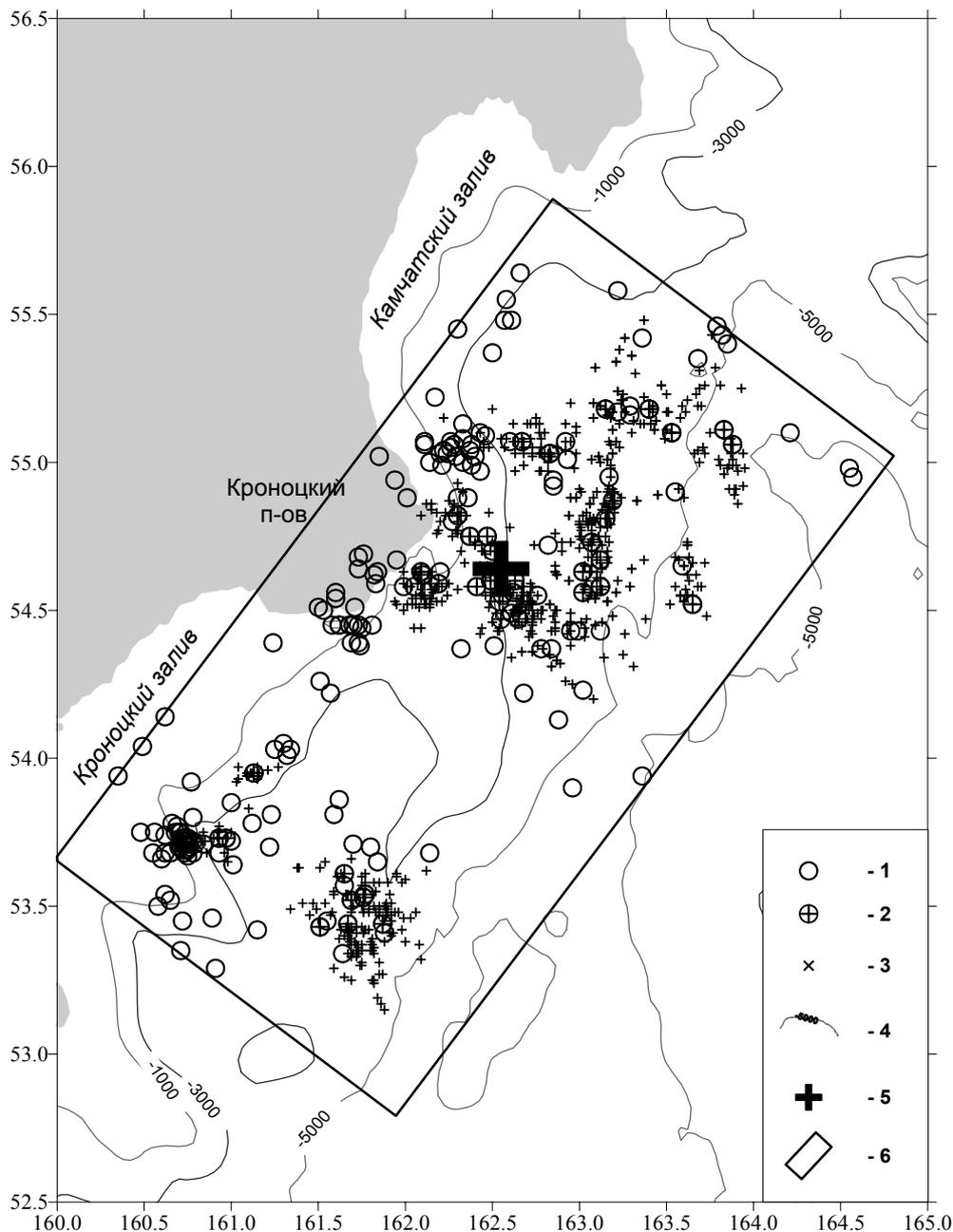


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений района очага Кроноцкого землетрясения за 1962-1996 гг.

1 – одиночные землетрясения с $K_S \geq 11.6$; 2,3 – эпицентры групповых землетрясений с $K_S \geq 11.6$ и ≤ 11.5 соответственно; 4 – изобата (м); 5 – эпицентр Кроноцкого землетрясения; 6 – границы исследуемого района.

Форшоковая активность в очаге началась 3-5 декабря в восточной части очаговой зоны февральского землетрясения (рис. 3). Всего произошло 99 землетрясений с $K_S=8.6-12.8$, из них 10 сильных (23-32). Облако эпицентров форшоковых землетрясений представляет собой компактную область, вытянутую в юго-восточном направлении (рис. 3,а, врезка). Развитие форшокового процесса во времени показано на рис. 3,б (врезка).

Главный толчок с $M_W=7.8$ произошел через 46 часов после начала форшоковой активности, несколько южнее форшоковой зоны, на глубине 10 км. Инструментальный эпицентр определен по 28 фазам Р-волн и по 3-м фазам S-волн, зарегистрированных региональной сетью сейсмических станций КОМСП [1].

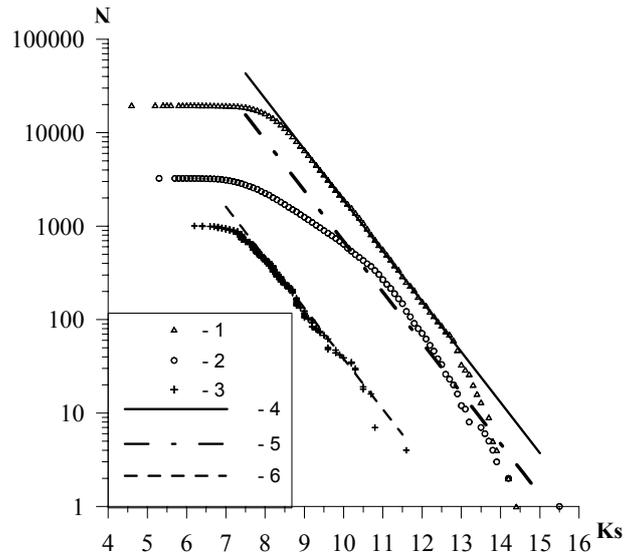


Рис. 2. Кумулятивные графики повторяемости землетрясений в районе Кроноцкого очага 1-3 – за периоды 1962-1996 гг., 01.12-31.12.1997 г., 01.01.-30.11.1997 г., соответственно; 4 – линия регрессии по данным 1962-1996 гг.; 5,6 – та же линия, но смещенная по вертикали для сравнения с двумя другими группами данных.

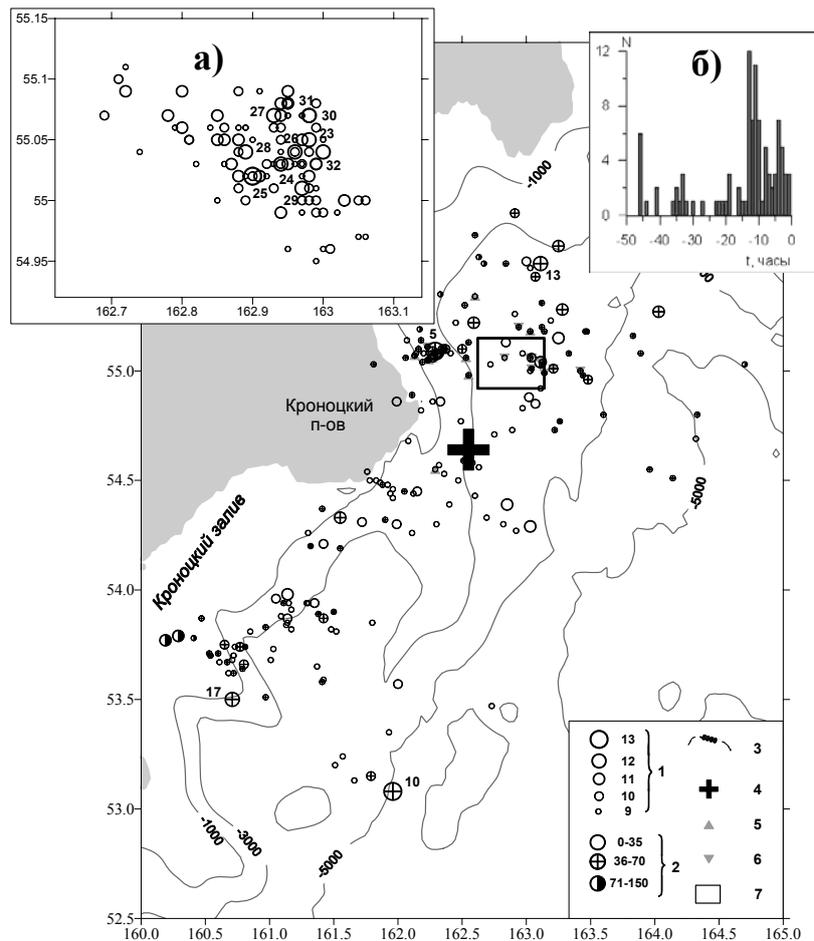


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений за 01.12.-02.12.1997 г.

1 – энергетический класс K_S ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – изобата (м); 4 – эпицентр Кроноцкого землетрясения; 5,6 – эпицентры землетрясений февральских роев 9-10 февраля и 26-28 февраля, соответственно; 7 – район форшоков. На врезках: а) – карта эпицентров форшоков; б) – почасовое распределение их числа (начало отсчета соответствует времени в очаге для главного толчка). Здесь и далее числа указывают номера землетрясений по каталогу [1].

Афтершоковая активность началась сразу же после главного события и распространилась на глубины $h=1-50$ км. По афтершокам первых восьми часов активности была проведена оценка размеров его очаговой области. Из рис. 4 видно, что разрыв в первый час распространился в юго-западном направлении, обозначив практически всю очаговую область (прямые кресты). Затем в юго-западной части очага возникла активизация поперечной структуры (с северо-запада на юго-восток), которая была существенно более активна, чем северо-восточный край, где находился инструментальный эпицентр землетрясения [1]. Варианты решения эпицентра по данным мировой сети (табл. 1) сдвинуты относительно регионального примерно на 20 км к северо-западу. Этот сдвиг связан с известными систематическими ошибками мировой сети [7]. Очаговую область в плане можно описать эллипсом с осями: $a=220$ км ($AZM=37^\circ$), $b=140$ км, центр которого имеет координаты $54.15^\circ N, 162.10^\circ E$. Размеры очаговой области и ее положение практически не отличаются от таковых, определенных по оперативным данным [8].

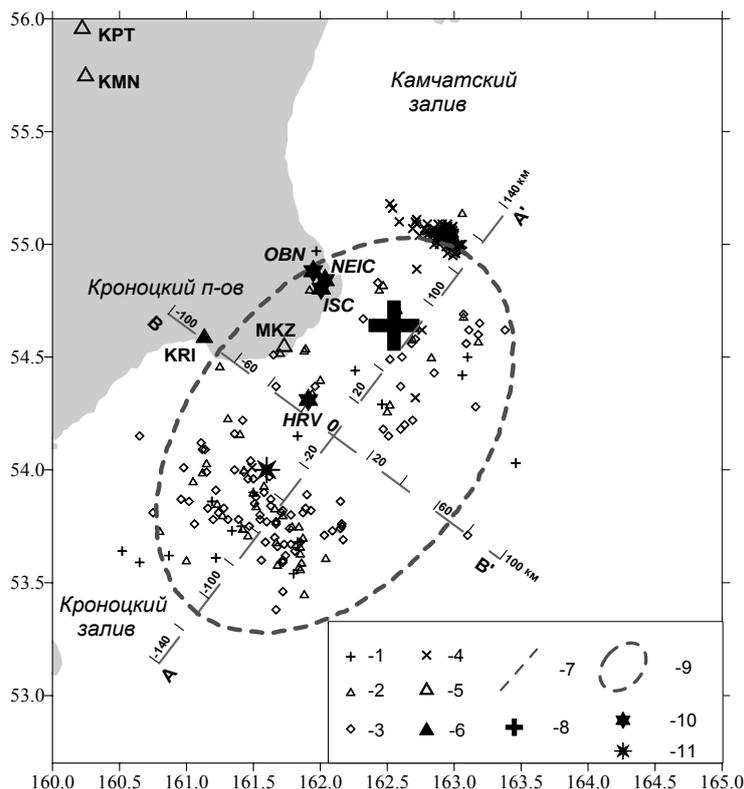


Рис. 4. Карта эпицентров афтершоков Кроноцкого землетрясения, происшедших 5 декабря (в первые восемь часов)

1-3 – эпицентры афтершоков за периоды времени $11^h27^m-12^h26^m$, $12^h27^m-15^h26^m$ и $15^h27^m-19^h26^m$, соответственно; 4 – форшок; 5,6 – сейсмическая станция, радиотелеметрическая и аналоговая с регистрацией на фотобумагу, соответственно; 7 – осевая линия; 8 – инструментальный эпицентр по [1]; 9 – очаговая зона; 10 – варианты решения эпицентра разными сейсмическими службами из табл. 1; 11 – центр тяжести высокочастотного излучателя (рис. 7).

За период времени 03.12–31.12 в исследуемом районе обработано 1396 событий с $K_S \geq 8.6$, из них 126 сильных $K_S \geq 11.6$. Ежесуточное число землетрясений в этот период более чем на порядок превысило среднее с начала года, а сейсмическая энергия, выделившаяся за этот месяц, превысила таковую за одиннадцать предыдущих месяцев на два порядка и составила $3.9 \cdot 10^{15}$ Дж [9].

В течение декабря было зафиксировано 32 ощутимых землетрясения из очаговой зоны [1].

Очаговая зона, оцененная по афтершокам первых восьми часов, хорошо соответствует последующей активности очага в декабре 1997 г. (рис. 5). Хорошо видно относительно низкое заполнение эпицентрами центральной части очаговой зоны и сгущение их в северо-западной части. Развитие процесса в очаге связано с активизацией тектонических структур как северо-восточного, так и юго-восточного простирания. Структуры юго-восточного простирания в северо-восточной части очага были довольно активны и в предыдущие годы (рис. 1), в отличие от таковых в юго-западной части. Во время развития очага Кроноцкого землетрясения произошла сильная активизация разломов в юго-западной части.

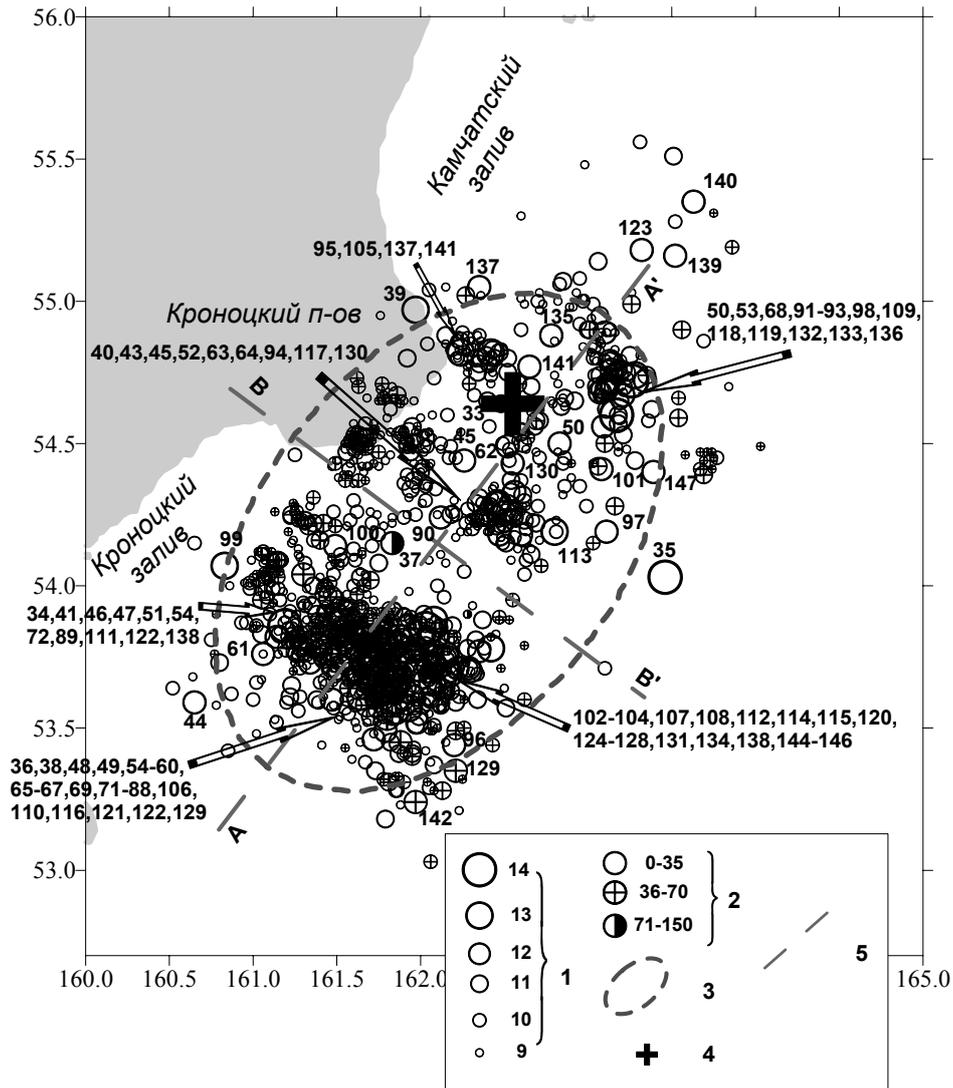


Рис. 5. Карта эпицентров всех афтершоков Кроноцкого землетрясения

1 – энергетический класс K_S ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – контур очаговой зоны; 4 – инструментальный эпицентр по [1]; 5 – осевая линия.

Конфигурация очаговой области на глубине определялась по трем вертикальным разрезам области афтершоков с рис. 5: один разрез вдоль большой оси (рис. 6,а), и два – вдоль малой, по разные стороны от нее – на северо-восток (рис. 6,б) и юго-запад (рис. 6,в). Отчетливо видно неравномерное заполнение очаговой области: образовались две группы афтершоков, расположенные по разные стороны от малой оси очаговой зоны. Анализируя рис. 6, можно предположить, что очаговая область представляет собой сложную фигуру, расположенную вдоль фокальной зоны, заметно расширяющуюся с глубиной. При этом конфигурация северо-восточной части очага отличается от юго-западной. Нижняя граница очага расположена на глубине около 40 км. Размер зоны на поверхности составил 200×50 км, а в нижнем горизонте – 200×100 км. В центре очаговой зоны наблюдается четко выраженная асейсмичная область субширотного простирания размером около $50 \times 30 \times 15$ км (рис. 5, ба).

Реконструкция распространения разрыва в очаге главного толчка, проведенная путем инверсии широкополосных записей Р-волн, полученных мировой сетью станций [10], позволяет ассоциировать отмеченные зоны сгущения афтершоков с зонами неоднородностей, разрушенными в процессе землетрясения. Юго-западная зона неоднородностей с величиной средней подвижки до 90 см характеризуется повышенной активностью афтершоков. В то же время в северо-восточной зоне неоднородностей с более высокой величиной подвижки (до 240 см) афтершоковая активность была существенно более низкой.

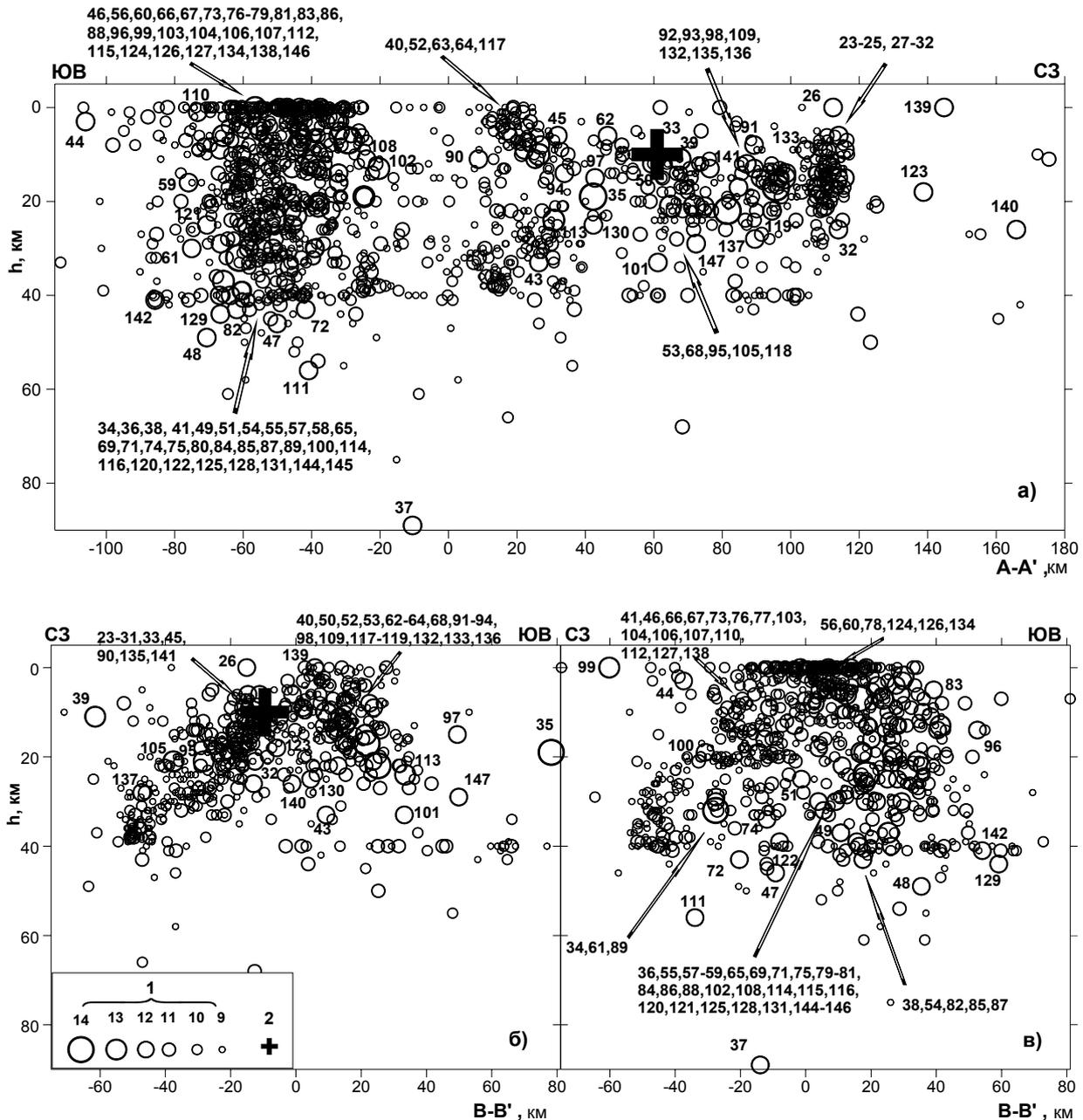


Рис. 6. Вертикальные разрезы совокупности афтершоков Кроноцкого землетрясения

а – по оси А-А' (см. рис. 5); б, в – по оси В-В' для землетрясений в северо-западной и юго-восточной части очага, соответственно.

Параметры высокочастотного излучателя в очаге. В [11] решена задача определения пространственно-временных характеристик высокочастотного излучателя в очаге Кроноцкого землетрясения. Далее дана лишь краткая сводка результатов из этой работы. Методика данной работы следующая. Сначала для коррекции искажений сигнала мощности объемных волн, связанных с рассеянием в Земле, выполняется обратная фильтрация этого сигнала. Для построения обратного фильтра используется сигнал мощности от относительно слабого землетрясения (афтершока). Данный подход является, в сущности, использованием метода эмпирических функций Грина, но не для амплитуд, как обычно, а для сглаженных квадратов амплитуд. По реконструированным сигналам мощности на достаточном числе станций оцениваются нормированные пространственно-временные степенные моменты излучателя 1-го и 2-го порядков, которые представляют собой его важнейшие пространственно-временные параметры. Далее по степенным моментам можно оценить некоторые модельно-зависимые параметры очага, например, длину линейного очага с постоянной по длине светимостью.

Практически были получены оценки временной функции мощности очагового сигнала Р-волн в полосе 0.5-2.0 Гц по данным следующих телесеismicических станций: "Обнинск" (OBN), "Inuvik" (INK), "Lisbon" LBNH, "Sadowa" (SADO), "Victorville" (VTV), "Кипара" (KIP) и "Charters Towers" СТАО. Далее методом степенных моментов были определены следующие важнейшие параметры высокочастотного излучателя:

- запаздывание временного центра тяжести излучения относительно времени в очаге (т.е. относительно начала процесса разрыва): 22 ± 2 с;
- вектор "инструментальный эпицентр – центр тяжести излучателя": длина 87 ± 35 км, азимут $AZM=220^\circ \pm 22^\circ$ (юго-запад);
- эквивалентная длительность излучателя с постоянной мощностью (при прямоугольной огибающей): 47 с;
- длина эквивалентного прямоугольного излучателя с однородной светимостью: 187 км;
- скорость распространения разрыва: 4.0 км/с;
- направление вспарывания: к юго-западу.

Локализация, размеры и характер развития излучателя находятся в хорошем согласии с геометрией облака афтершоков (рис. 7) и с необычно малой эффективной длительностью ("Допплер-эффект") огибающих акселерограмм, записанных к юго-западу от очага (см. ниже).

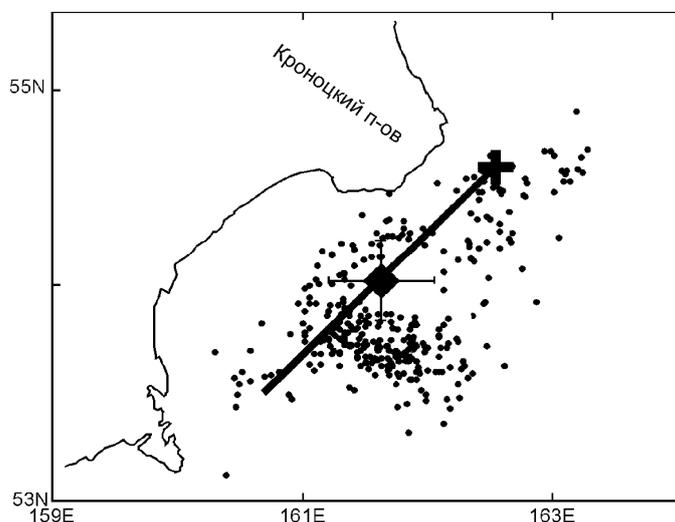


Рис. 7. Результаты восстановления пространственных характеристик высокочастотного (0.5-2.0 Гц) очага Кроноцкого землетрясения по телесеismicическим записям Р-волн

Крест – инструментальный эпицентр, ромб – восстановленный центр тяжести высокочастотного излучателя (линейные отрезки показывают доверительные 1σ -области для координат этой точки; жирная черта – реконструированный очаг в приближении линейного излучателя с постоянной по длине "светимостью"; черные точки – афтершоки.

Механизм очагов. Для 35 землетрясений определены механизмы очагов по знакам вступлений Р-волн на станциях мировой сети и региональной. Полученные данные приведены в [12] и на рис. 8,а,б,в. Механизмы, определенные по первым вступлениям, отражают ориентацию начального участка разрыва в очаге землетрясения. На рис. 8,г показаны механизмы основного толчка, форшоков и афтершоков, определенные по тензору момента центраида [5]. Эти механизмы отражают ориентацию разрыва в целом, которая может отличаться от таковой на начальном участке разрыва.

Механизмы двух форшоковых землетрясений (25,31) имеют сдвиговый характер с незначительной взбросовой компонентой (рис. 8,а). Оси напряжения сжатия в обоих очагах расположены близгоризонтально, одна из нодальных плоскостей расположена вдоль фокальной зоны, другая вкрест. Главное событие (33) имеет аналогичный тип подвижки и расположение нодальных плоскостей, а именно: дислокация в очаге типа взбросо-сдвиг, одна из плоскостей разрыва почти вертикальна и имеет северо-восточное простираие, другая направлена вкрест геоморфологических структур района. Оси сжатия и растяжения имеют близгоризонтальное расположение.

В течение первых суток активности произошло 60 афтершоков с $K_S \geq 11.6$ (рис. 8б). Анализ механизмов очагов 15 из них показывает, что афтершоки первых суток имели сдвиговый (40, 55, 69, 81, 102) или взбросо-сдвиговый тип подвижки в очаге (33, 34, 41, 73, 84, 88, 89, 95, 98, 103) с незначительной взбросовой компонентой (средние значения углов погружения осей Р и Т равны $12^\circ (\sigma^2=7)$ и $38^\circ (\sigma^2=16)$, соответственно). Одна из нодальных плоскостей большинства землетрясений имеет северо-восточное простирание, другая – пролегает вкост существующим геоморфологическим структурам.

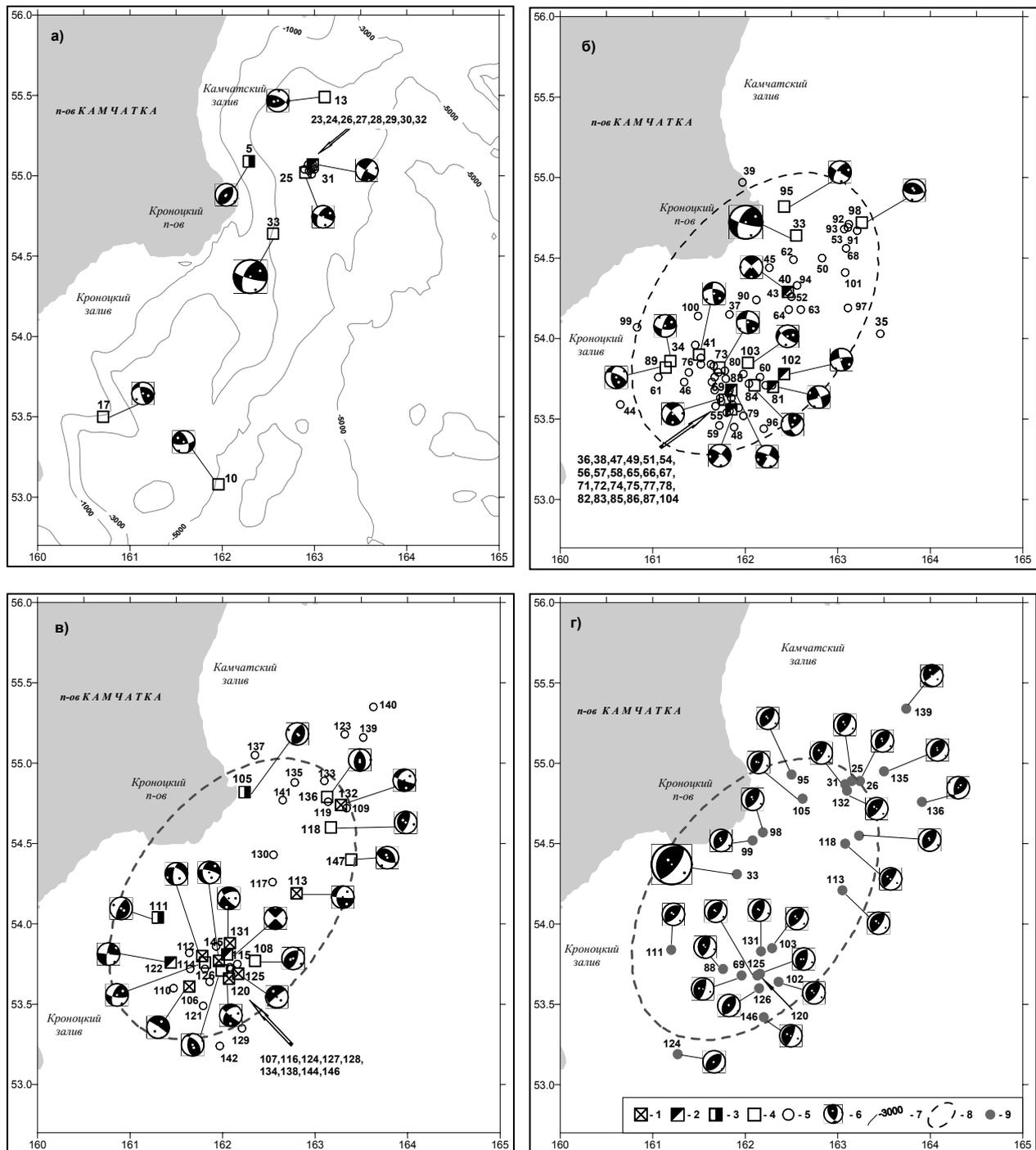


Рис. 8. Карта механизмов очагов сильных ($K_S \geq 11.6$) землетрясений района очага Кроноцкого землетрясения за разные периоды времени: с 01.01.1997 г. по 11^h27^m 5 декабря (а); за первые сутки после основного толчка (б); 06.12.-31.12.1997 г. (в); по каталогу [5] за 05.12.-31.12.1997 г. (г).

1-4 – тип подвижки в очаге: сбросо-сдвиг, сдвиг, взброс и взбросо-сдвиг, соответственно; 5 – механизм не определен; 6 – диаграмма механизма очага в стереографической проекции нижней полусферы; 7 – изобаты (м); 8 – контур области очага Кроноцкого землетрясения; 9 – эпицентры Гарвардского каталога [5].

В течение последующих трех недель зарегистрировано еще 43 афтершока с $K_s \geq 11.6$ (рис. 8,в). Тип подвижки в очаге определен для 18 из них. Здесь преобладают подвижки типа сбросо-сдвиг (106, 112, 113, 120, 125, 131, 132, 145). Взбросо-сдвиговые афтершоки (108, 118, 114, 126, 136, 147) имеют уже более существенную взбросовую компоненту (средний угол погружения оси Т равен $62^\circ (\sigma^2=13)$). Землетрясений, имеющих чисто сдвиговый тип подвижки, всего два (115, 122). Основные тенденции процесса в области роя, происшедшего под воздействием сжимающих напряжений, сохранились: одна из плоскостей разрыва имеет северо-северо-восточное простирание, как и в первые сутки.

На рис. 8,г представлены данные о механизмах землетрясений, полученных в группе А. Дзевонского в Гарвардском Университете [5]. Механизмы основного события (33), форшоков (25,26,31) и большинства афтершоков очень хорошо согласуются между собой. Их можно интерпретировать либо как типичный "субдукционный" взброс с наклоном сместителя $20-30^\circ$ с левосторонней сдвиговой компонентой, либо как близвертикальный взброс по сопряженному разлому, с подъемом океанического блока. Простирание разрыва в обоих случаях северо-восточное, и оно хорошо согласуется с облаком афтершоков и с ориентировкой главных структур островной дуги. Согласованность механизмов очагов основного события и афтершоков указывает на единый характер геомеханического процесса в зоне очага.

Механизмы очагов, определенные по знакам первых вступлений Р-волн, характеризуют лишь начальный разрыв в очаге и, возможно, поэтому нет столь согласованной картины афтершокового процесса (рис. 8,а-в), как по расчетам тензора момента центра (рис. 8,г). Но основные черты (взбросовый характер подвижки, северо-восточное простирание одной из плоскостей разрыва и близгоризонтальное расположение осей сжатия) наблюдаются в обоих случаях.

Макросейсмическое обследование эпицентральной зоны включено ред. по [8]. "9 декабря был проведен облет на вертолете эпицентральной зоны по маршруту: Петропавловск-Камчатский – пос. Жупаново – мыс Козлова – мыс Кроноцкий – Петропавловск Камчатский. Ниже приведены результаты визуальных наблюдений с воздуха и во время посадок, а также материалы опроса очевидцев.

Озеро Карымское: озеро замерзло частично, вероятно из-за вулканического подогрева; лед тонкий (от 5 до 10 см). Во льду тонкие прямолинейные трещины, (около 6 баллов?).

Метеостанция "Жупаново": во время землетрясения одноэтажный деревянный дом скрипел, кровать подпрыгивала, посуда с места не сдвинулась. С полки упали два баллончика, на каменной печи в штукатурке появились тонкие трещины. Колебания длились ~ 30 с (грунты средние).

Район бывшего Жупановского рыбокомбината: следов цунами нет. В устье одного из ручьев шириной 1-2 м битый лед около 20 м. Вдоль протоки в устье реки некоторые трещины разошлись до 0.5 м. Толщина льда 10-15 см.

Сейсмическая станция "Кроноки": во время сильных колебаний спавшие проснулись, в панике выбежали на улицу. Земля колыхалась. Деревянный дом скрипел, всяческие предметы сильно раскачивались, попадали предметы с полок. Сильно сдвигались с места легкие, тяжелые и очень тяжелые предметы. В доме появились трещины штукатурки у косяков, местами порваны обои. Под домом произошел порыв водопровода. Образовались многочисленные трещины шириной до 1 см в мерзлом верхнем слое земли и шириной до 5 см в мерзлом песке вдоль берега р. Татьяна.

База лесников в пос. Кроноки: в поселке три ветхих одноэтажных деревянных дома, один из них полуразрушен. В одном из жилых домов упала труба, в другом – развалилась старая кирпичная печь, оторвалась от дымохода. Во второй печи, более новой, появились трещины, у основания отвалилась штукатурка. Общая оценка интенсивности в пос. Кроноки – 6-7 баллов, грунт средний, обводненный.

Мыс Козлова: в деревянном одноэтажном доме печь на цементном растворе без повреждений. На мысе свежий небольшой скальный обвал. На пляже видны следы заплеска, высота которого на 0.5 м выше заплеска среднего шторма. (Не выше 6-7 баллов, грунт скальный.)

Маяк Кроноцкий: в одноэтажном шлакоблочном доме сильно задрожали потолки. В одной из комнат образовалась трещина по стыку перекрытия со стеной. Все выбежали на улицу. Аппарат вращения линзы светового маяка вышел из строя на несколько десятков секунд. В доме появились небольшие трещины на стыках между бетонными плитами перекрытия. В печи из цементной кладки волосные трещины. (6-7 баллов, грунт скальный). "

Макросейсмические проявления на территории Камчатской области включено ред. по [8].

"Мыс Шипунский": ощущали 15-25 с в одноэтажном деревянном здании и на открытом воздухе. Спавшие люди проснулись, в испуге выходили из домов. В доме скрипели полы и потолки, открывались двери, дребезжала посуда и стекла окон, скрипела мебель, всяческие предметы колебались, стоящие – сдвигались с места, падали. В районах выхода скальных пород на побережье произошли осыпи. На озере во льду толщиной 40 см образовались многочисленные трещины. Был слышен тихий с постепенным нарастанием подземный гул.

Заозерный: Люди в испуге выходили из домов. В крупноблочном здании на пятом этаже скрипели полы, открывались двери, дребезжала посуда, сильно раскачивались всяческие предметы, предметы сдвигались с места, на потолке повредилась штукатурка.

Петропавловск-Камчатский: ощущали ~40 с в зданиях и на открытом воздухе. В домах скрипели перекрытия и мебель, сильно раскачивались всяческие предметы, незакрепленная мебель, открывались двери, дребезжала посуда и стекла окон, падали неустойчивые предметы. В некоторых зданиях образовались трещины в штукатурке и стенах.

Рыбачий: ощущали ~40 с. Люди в испуге выходили из домов. Скрипели полы, потолки и мебель; раскачивались всяческие предметы. Мебель отодвигалась от стен, открывались дверцы шкафов, падали легкие неустойчивые предметы. Появились трещины в штукатурке.

Крутоберегово: ощущали ~60-70 с на втором этаже деревянного здания. Спавшие проснулись. Скрипели полы и потолки, дребезжали посуда и стекла домов, скрипела мебель, колебались всяческие предметы.

Сейсмическая станция "Крутоберегово": ощущали в течение 50-60 с в состоянии покоя в здании на первом этаже. Наблюдалась плавная раскачка, треск здания; скрипели полы и потолки, дребезжала посуда, колебались всяческие предметы. Образовались трещины на потолке и стенах шириной 1 мм. Остановился маятник. Сбило зеркало в гальванометре.

Паратунка: ощущали 60 с на пятом этаже панельного здания. Спавшие проснулись. Люди в испуге выходили из домов. Скрипели полы и потолки, открывались двери, дребезжала посуда, скрипела мебель, всяческие предметы колебались, стоячие – сдвигались с места, падали на столе и полках.

Усть-Камчатск: ощущали ~60-70 с в блочном здании на втором этаже. Люди в испуге выходили из домов. Скрипели полы, потолки и мебель. В штукатурке образовались тонкие трещины, в стенах – волосные.

Мыс Сиамо, маяк "Круглый": ощущали в течение 65 с в одноэтажном шлакоблочном здании. Был слышен рокочущий, напоминающий шум камнепада, подземный гул, еле слышный вначале (за 5 сек до землетрясения) и хорошо – во время землетрясения. В здании скрипели полы и потолки, дребезжала посуда и стекла окон, предметы сдвигались с места, а также повредилась штукатурка (образовались тонкие трещины и обвалы кусков).

Мыс Африка: ощущали, стоя в одноэтажном деревянном здании. Колебались всяческие предметы. Люди в испуге покидали помещения.

Сейсмическая станция "Козыревск": ощущали ~150 с в одноэтажном деревянном здании. Закрывались двери, колебались всяческие предметы.

Милюково: ощущали как продолжительные плавные колебания. Люди в испуге выходили из домов. В одноэтажном деревянном доме дребезжала посуда, колебались всяческие предметы, скрипели двери, покачивалась кровать.

Никольское: ощущали довольно долго в деревянном здании. Все "ходило ходуном": скрипели полы, дребезжала посуда, раскачивались всяческие предметы.

ГМС Водопадная: ощущали в течение 60 с как колебания в направлении с востока на запад. В одноэтажном здании колебались всяческие предметы.

Начики: ощущали в течение 10 с в состоянии покоя на первом этаже. Слегка колебались всяческие предметы.

Эссо: ощущали в течение 70 с в состоянии покоя. Дребезжала посуда, колебались всяческие предметы.

Соболево: ощущали как легкое мелкое колебание в направлении с севера на юг в состоянии покоя на втором этаже. Было ощущение легкого головокружения. Колебалась люстра.

Тигиль: качались люстры, позванивала посуда

Ощущения, наблюдавшиеся в Тихом океане (54.67°N, 162.45°E) на плавбазе *"Комсомольск-на-Амуре"*: Судно шло со скоростью 11-12 узлов в спокойном море. Около 23^h26^m местного времени судно начало испытывать сильную смешанную вибрацию, похожую на слеминг,

которая продолжалась примерно одну минуту. Суда, находящиеся на расстоянии 5-12 миль, ощущали то же самое. За сутки до этого на судне ощущались неоднократные толчки.

Кроноцкое землетрясение вызвало небольшое цунами на побережье Кроноцкого полуострова (высота заплеска до 1.5 м), на Алеутах, в Японии и Гавайских островах".

Карта изосейст. Землетрясение вызвало сотрясения на территории Камчатки интенсивностью до 7 баллов. Оценки макросейсмической интенсивности в баллах, полученные в результате облета эпицентральной зоны на вертолете, а также из других источников, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Макросейсмические данные о Кроноцком землетрясении 5 декабря 1997 г. в 11^h26^m ($M_w=7.8$)

№	Пункт	Δ,км	№	Пункт	Δ,км
	<u>7-8 баллов</u>			<u>4 балла</u>	
1	Маяк Кроноцкий (для среднего грунта)	31	18	Ключи	215
2	Мыс Козлова (для среднего грунта)	54	19	Никольское	228
	<u>6-7 баллов</u>		20	Козыревск	232
	Маяк Кроноцкий (для скального грунта)	31	21	Мильково	253
	Мыс Козлова (для скального грунта)	54		<u>3-4 балла</u>	
3	ГМС Кроноки	92	22	Коряки	324
4	Сейсмостанция Кроноки	92	23	ГМС Водопадная	434
5	Мыс Шипунский	238		<u>3 балла</u>	
	<u>6 баллов</u>		24	Эссо	283
6	ГМС Жупаново	177	25	Начики	358
7	бухта Калыгирь	218	26	мыс Сиамо	402
	<u>5-6 баллов</u>		27	Апача	404
8	Заозерный	307	28	Тигиль	424
9	Институт	312	29	Соболево	431
10	Рыбачий	327	30	Паужетка	522
	<u>5 баллов</u>		31	Озерновский	535
11	Усть-Камчатск	176		<u>2-3 балла</u>	
12	Мыс Африка	176	32	Усть-Хайрюзово	455
13	Крутоберегово	181	33	Северо-Курильск	620
14	Елизово	318		<u>2 балла</u>	
15	Паратунка	339	34	Усть-Большерецк	462
16	База Родниковая	361		<u>Не ощущалось</u>	
17	Маяк Круглый	402	35	Оссора	514

Обращает на себя внимание тот факт, что для ближайших к инструментальному эпицентру пунктов "Маяк Кроноцкий" (№1) и "Мыс Козлова" (№2), расположенных на скальном грунте, значения балльности вблизи эпицентральной зоны очага с $M_w=7.8$, неправдоподобно низки – $I=6-7$ баллов. Несомненная причина этой аномалии – грунтовые условия. Для приведения к среднему грунту следует прибавить 1 балл. Полученное в результате значение интенсивности $I=7-8$ баллов более приемлемо, но все же должно рассматриваться как необычно низкое. Материалы табл. 2, включая приведенные к среднему грунту оценки для упомянутых выше двух пунктов, были использованы для построения карты изосейст Кроноцкого землетрясения (рис. 9). Изосейсты на карте сильно сглажены из-за малого объема данных. Вытянутость изосейст вдоль очага и вдоль структур островной дуги в северо-восточном направлении является типичной для Камчатских землетрясений. Дополнительно к эффекту вытянутости имеет место определенная ассиметрия изосейст относительно очага. Они вытянуты к юго-западу, что указывает на вероятный эффект направленности излучения больших амплитуд колебаний в этом направлении.

Макросейсмическая магнитуда. Большой интерес представляет сопоставление уровня балльности с магнитудой. Зафиксировав положение макросейсмического эпицентра в центре очаговой зоны ($\varphi=54.15^\circ N$, $\lambda=162.1^\circ E$) и приняв глубину точечного источника высокочастотного "макросейсмически активного" излучения, равного средней глубине гипоцентров (20 км) основной

массы афтершоков, можно рассчитать по баллу значение магнитуды типичного камчатского землетрясения, порождающего такой уровень интенсивности ("макросейсмическую магнитуду"). Опираясь на эмпирическую зависимость балла от расстояния

$$I=1.5M - 2.63 \lg r - 0.0087 r + 2.5 \quad (1),$$

полученную С.А. Федотовым и Л.С. Шумиловой [14], и имея наблюдаемые значения баллов, можно оценить значение макросейсмической магнитуды. Оно оказалось равным 7.3 (сплошная кривая на рис. 10). Значения балльности для пунктов, расположенных южнее очаговой зоны, существенно выше значений в симметрично расположенных пунктах севернее очага. Интенсивность в юго-западном секторе приближается к теоретическим значениям, рассчитанным по формуле (1) для магнитуды $M_S=7.9$. Это может говорить о выраженном эффекте направленности излучения на юго-запад.

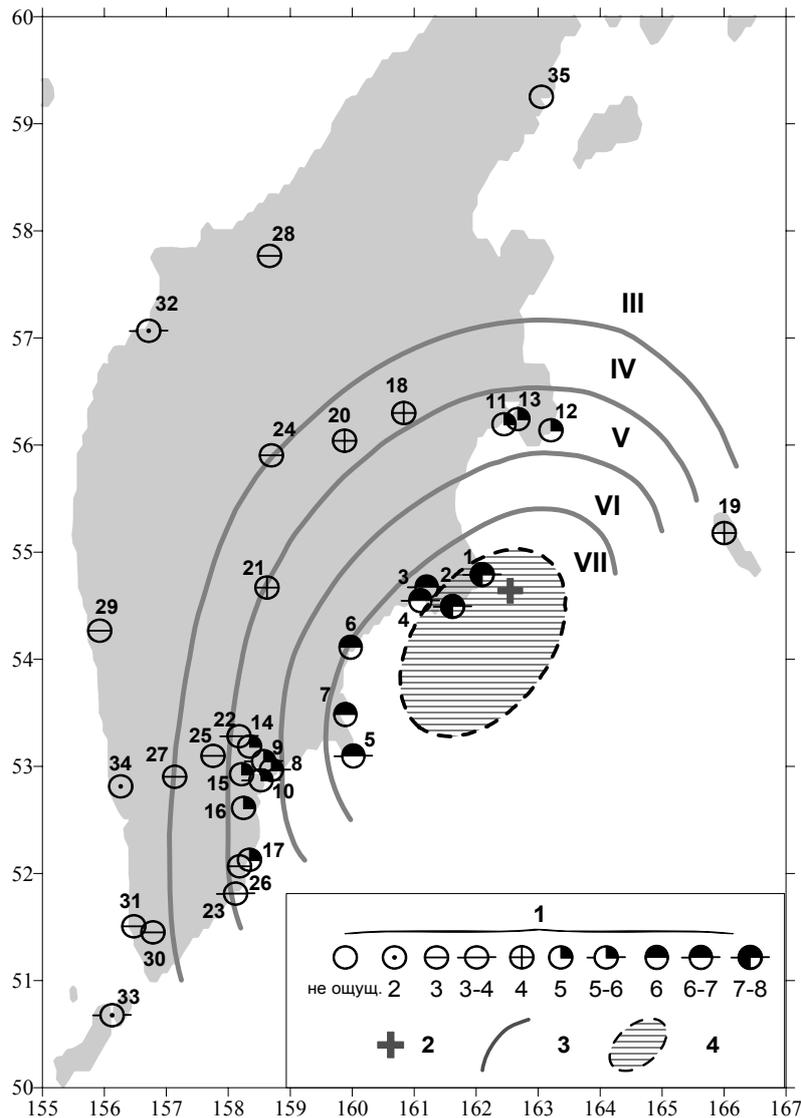


Рис. 9. Карта изосейст Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. в $11^{\text{h}}26^{\text{m}}$ с $M_w=7.8$

1 – интенсивность сотрясений I в баллах по шкале MSK-64; 2 – эпицентр по инструментальным данным; 3 – изосейста; 4 – плейстосейстовая область.

Сильные движения. Записи основного землетрясения приборами сильных движений получены на нескольких аналоговых станциях в г. Петропавловск-Камчатский, а также на ст. "Шипунский". Запись акселерографа широкополосной цифровой станции "Петропавловск" некондиционна; он, однако, записал несколько афтершоков. В табл. 3 даны зарегистрированные максимальные ускорения грунта (без коррекции за АЧХ прибора). На рис. 11 показаны

нескорректированные записи и спектры Фурье (с коррекцией за прибор) для ст. "Шипунский", а также для ст. "Институт" (в г. Петропавловск-Камчатский).

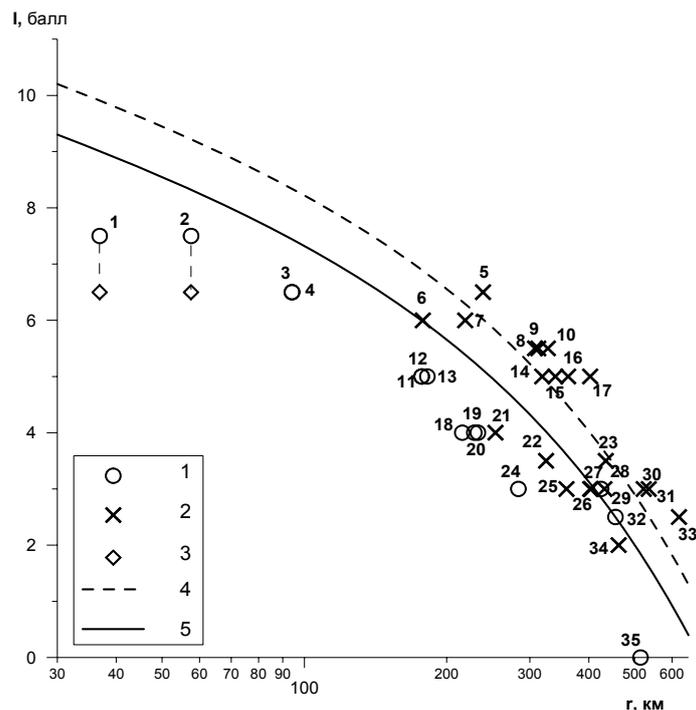


Рис. 10. График затухания интенсивности сотрясений

1,2 – населенные пункты, расположенные северо-восточнее и юго-западнее малой оси эллипса, соответственно; 3 – интенсивность сотрясений для скального грунта; 4,5 – кривая затухания интенсивности сотрясений для магнитуды MS=7.9 и 7.3, соответственно.

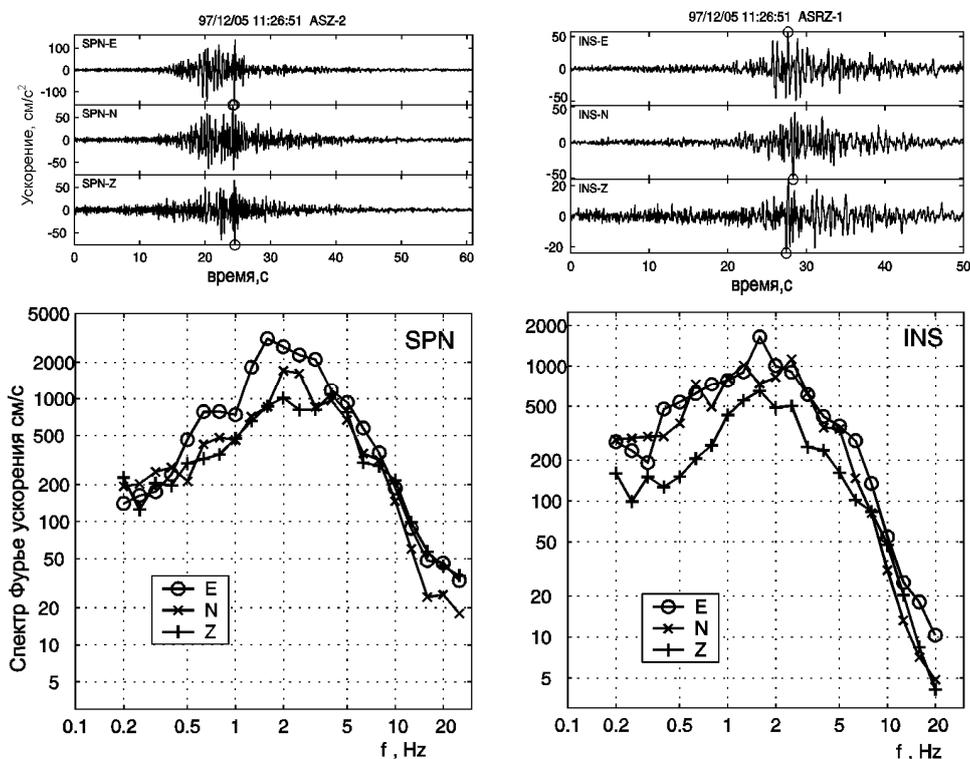


Рис. 11. Акселерограммы Кроноцкого землетрясения по записям сейсмических станций "Шипунский" и "Институт" и ниже их сглаженные спектры Фурье

Обращает на себя внимание малая длительность максимальной фазы записи, около 10-15 с, в то время как оценка длительности очагового излучения высоких частот составляет 45-50 с (см. выше). Данное различие вполне закономерно, оно связано со сжатием импульса излучения для приемников в юго-западных азимутах за счет эффекта Доплера.

Таблица 3. Максимальные ускорения грунта (без коррекции за АЧХ прибора)

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	M_W	Станция	Прибор	Компо- нента	г, км	a_{\max} , см/с ²
33	05.12	11 26 51.0	7.8	Аэрологическая, 14 км	ССРЗ-М	Е	314	32.7
						N		8.52
						Z		14.1
				Дачная	АСРЗ-1	Е	311	47.5
						N		40.3
						Z		20.2
				Институт	АСРЗ-1	Е	312	57.0
						N		50.8
						Z		23.8
				Маяк Петропавловский	ССРЗ-М	Е	319	39.4
						N		28.8
						Z		21.3
				Никольская	ССРЗ-М	Е	314	36.6
						N		37.6
						Z		17.6
м.Шипунский	АСЗ-2	Е	239	158				
		N		77.1				
		Z		77.2				
69	05.12	18 48 21.2	6.6	с/ст Петропавловск	IRIS-LG	Е	226	1.63
						N		0.862
						Z		0.553
103	06.12	10 59 07.6	6.5	с/ст Петропавловск	IRIS-LG	Е	242	0.279
						N		0.296
						Z		0.168

Примечание. Номер землетрясения в графе 1 соответствует таковому в каталоге [1].

Деформационные процессы. Начиная с 1997 г. на Камчатке проводятся непрерывные измерения деформаций земной поверхности сетью GPS-станций (рис. 12). Все GPS-пункты оснащены автоматическими системами, информация с которых поступает в центр обработки данных (РЕТР) как по модемной связи, так и по локальной сети или на ZIP-дискетах. Методика наблюдений и технические вопросы построения постоянных GPS-станций приведены в работе [15].

При помощи Камчатской GPS-сети удалось зарегистрировать процессы, происходившие в период подготовки и развития Кроноцкого землетрясения. На восьми GPS-пунктах были получены ряды измерений (рис. 13), на которых хорошо выражены пресеismicкие, косейсмические и постсейсмические деформации, связанные с этим событием.

Важным фактом в деформациях, связанных с Кроноцким землетрясением, были деформации, которые предшествовали моменту землетрясения. Региональной Камчатской GPS-сетью обнаружена большая величина медленной деформации, максимальная амплитуда которой составляла до 20 мм перед землетрясением. Эти деформации возникли почти за месяц до землетрясения и наиболее явно выражены на станциях "Ключи", "Эссо" и "Крутоберегово" (рис. 13). Предвестниковая деформация на станции "Крутоберегово" имела прямо противоположное направление движения по сравнению с косейсмической деформацией. Таким образом, обнаружены аномалии в деформациях земной поверхности по GPS наблюдениям, которые можно рассматривать, как предвестники сильного землетрясения.

Косейсмические деформации, связанные с Кроноцким субдукционным землетрясением, позволяют провести инверсию с целью определения механизма очага (тензора сейсмического момента). Такая инверсия была сделана в работе [6] для точечного очага, где представлены два варианта обработки по двум вариантам исходных данных. В первом варианте использовали перемещения GPS-станций, определенные, как различия между среднесуточными позициями за сутки, примыкающие к моменту землетрясения. Во втором варианте использовали изменения смещений за период времени 18 суток до и после момента землетрясения (детали см. [6]). В случае первого варианта решения оказалось, что механизм точечного источника практически совпадает с механизмом, определенным Гарвардской группой по сейсмограммам мировой сети широкополосных сейсмических станций. В работе [6] также был рассмотрен вариант

протяженного очага, ориентация которого совпадает с ориентацией полого падающей плоскости. Во втором варианте обработки определяли параметры тензора сейсмического момента для полной подвижки за месяц, включавшей пресейсмическую, косейсмическую и постсейсмическую компоненты. Оказалось, что полная подвижка по ориентировке достаточно близка к косейсмической, а по величине заметно больше. Сейсмический момент косейсмической подвижки составляет всего 35-40% от полной подвижки. Основной вклад в деформацию (45-50%) дала постсейсмическая подвижка. Вклад пресейсмической подвижки порядка 10-15%. Моментная магнитуда, определенная для полной подвижки, равна $M_w=8.0$.

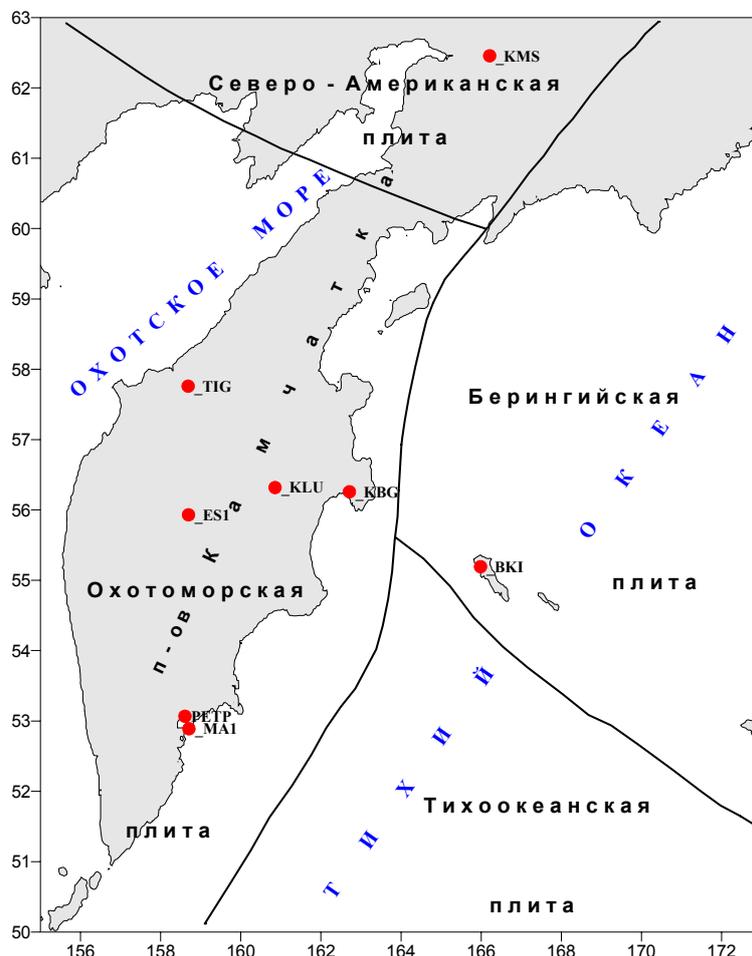


Рис. 12. Схема Камчатской GPS-сети

Названия и коды станций: "Каменское" (KMS), "Тигиль" (TIG), "Ключи" (KLU), "Эссо" (ES1), "Крутоберегово" (KBG), "Никольское" (VKI), "Петропавловск Камчатский" (PETR), "Маяк" (MA1). Жирными линиями показаны границы плит.

Дополнительно к этим результатам в данной работе уточнены характеристики протяженного очага, который дает наилучшее согласие с геодезическими наблюдениями по критерию минимальной среднеквадратической относительной ошибки (СКОО). Полагаем, что очаг является прямоугольной площадкой, длинная сторона которой горизонтальна, с длиной L и шириной W , с центром в координатах φ_c , λ_c на глубине h_c . Ориентация площадки задается азимутом простираения AZM длинной стороны и углом ее падения DP . Считаем, что статическая (окончательная) подвижка одинакова для всех точек очага. Очаг расположен в упругом полупространстве с плотностью 3.3 т/м^3 , скоростью поперечных волн $v_s=4.2 \text{ км/с}$ и модулем сдвига $\mu=5.7 \cdot 10^{10} \text{ Н·м}^2$. Полагаем, что параметры Ламе равны ($\lambda=\mu$). Положение и размеры площадки очага определены путем подбора. При фиксированном положении и размерах очага ориентация подвижки в плоскости очага и ее величина определяются в результате решения задачи минимизации СКОО. Последняя – сводится к задаче линейной инверсии, при решении которой были использованы формулы работы [16].

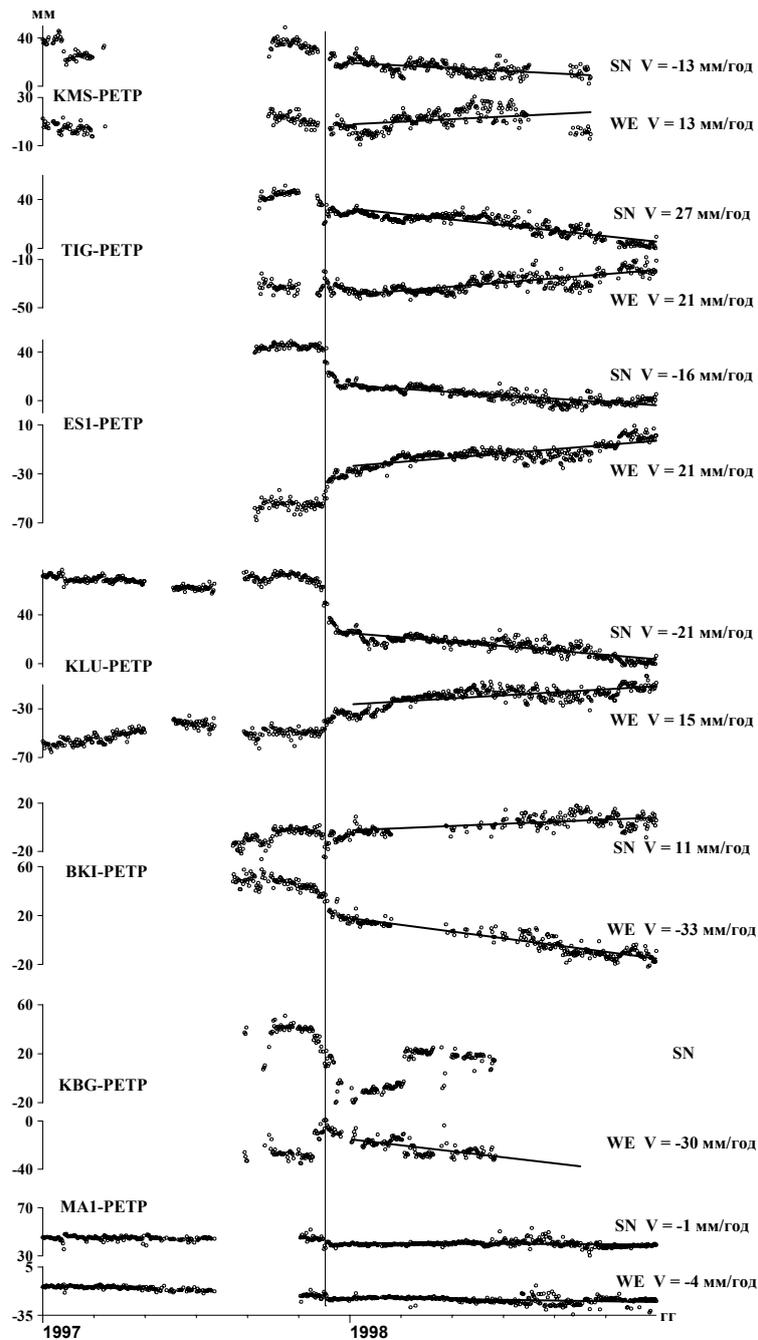


Рис. 13. Смещения пунктов относительно станции "Петропавловск-Камчатский" по направлениям север-юг (NS) и запад-восток (WE)

Вертикальная линия соответствует моменту Кроноцкого землетрясения, сплошные линии на графиках – тренды.

На рис. 14,а приведены результаты интерпретации косейсмических деформаций (горизонтальных смещений) в рамках описанной модели. Получены следующие оптимальные характеристики очага: центр площадки имеет $\phi_{ц}=54.25^\circ$, $\lambda_{ц}=161.56^\circ$, $h_{ц}=25$ км; ориентация площадки: $AZM=220^\circ$, $DP=25^\circ$, размеры: $L=180$ км, $W=50$ км, средняя подвижка равна 120 см, скалярный сейсмический момент $M_0=6.24 \cdot 10^{20}$ Н·м. При этом инструментальный гипоцентр практически совпадает с северо-восточной вершиной площадки очага. Подвижка ориентирована по падению плоскости очага, что отражено в механизме очага. Значение относительной остаточной ошибки равно $SKOO=12\%$. Полученный наклон площадки 25° хорошо согласуется с конфигурацией проекций гипоцентров на вертикальную плоскость, перпендикулярную направлению простирания очага (рис. 14,б), что позволяет выбрать в качестве действующей полого наклонную под сушу плоскость разрыва. Инверсия, проведенная для сопряженной плоскости разрыва, дает существенно большие значения ошибок.

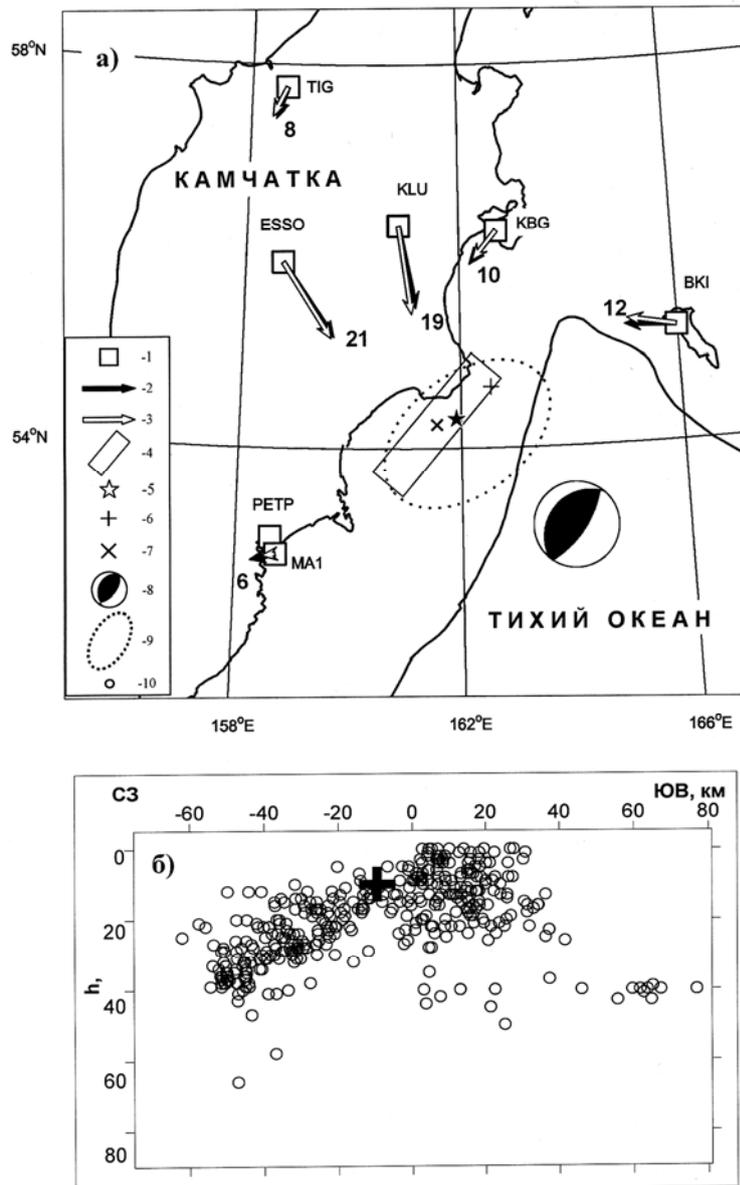


Рис. 14. Результаты восстановления характеристик статического очага Кроноцкого землетрясения по косейсмическим смещениям (горизонтальные компоненты), зарегистрированным GPS-станциями: положение статического очага и вектора горизонтальных смещений относительно станции "Петропавловск Камчатский" (а); проекции на вертикальную плоскость, ориентированную вкост фокальной зоны, гипоцентров афтершоков за период 5-31 декабря, в определении координат которых обязательно участвовали фазы P- и S-волн на ближайшей к очагу станции (б).

1 – GPS-станции; 2 – наблюдаемые векторы смещений (числа возле стрелок указывают длину вектора в мм); 3 – векторы, рассчитанные по модели; 4 – проекция прямоугольной площадки очага (180x50 км) на горизонтальную плоскость; 5 – положение центра тяжести излучателя по [5] ($h=34$ км); 6 – инструментальный эпицентр Кроноцкого землетрясения по [1] ($h=10$ км); 7 – проекция центра площадки очага ($h=25$ км); 8 – механизм статического очага в стереографической проекции нижней полусферы; 9 – контур облака афтершоков; 10 – положение гипоцентров афтершоков на вертикальной плоскости..

Рис. 14,а демонстрирует очень хорошее согласие между наблюдениями и расчетом. Причем и величина сейсмического момента, и механизм очага, полученные из GPS наблюдений, достаточно близки к Гарвардскому решению для тензора момента [5]. Этот факт важен: с одной стороны, он подтверждает надежность всей системы GPS измерений и, особенно, вполне хорошую точность данных GPS, полученных в измерениях на коротких интервалах времени. С другой стороны, этот факт означает, что и само Гарвардское решение для тензора момента является надежной оценкой истинного сейсмического тензора момента очага землетрясения.

Одним из важных процессов, возникающих после сильных землетрясений в зоне субдукции, является постсейсмический деформационный процесс. В зависимости от величины землетрясения он может продолжаться месяцы и даже годы. Постсейсмические деформации (рис. 13) наиболее сильно выражены на ближайших к очагу землетрясения пунктах наблюдений (KLU, ES1, ВК1 и TIG). Эти деформации связаны с вязко-упругой релаксацией напряжений, созданных сильным землетрясением в верхней мантии. Высокие скорости деформации наблюдались также в течение последующих месяцев. Величины горизонтальных смещений GPS-пунктов за год приведены на рис. 13. Эти данные показывают наличие упругой реакции Охотоморской и Берингийской плит на движение Тихоокеанской плиты и указывает на достаточно высокий уровень их сцепления (каплинга) с субдущурующей Тихоокеанской плитой.

Изменения в режиме подземных вод. Наиболее значительные изменения режима подземных вод, зафиксированные в 1997 г., были связаны с Кроноцким землетрясением. Это сейсмическое событие явилось сильнейшим за весь период гидросейсмологических наблюдений, начатых в 1977 г. Схема гидрогеологического полигона представлена на рис. 15.

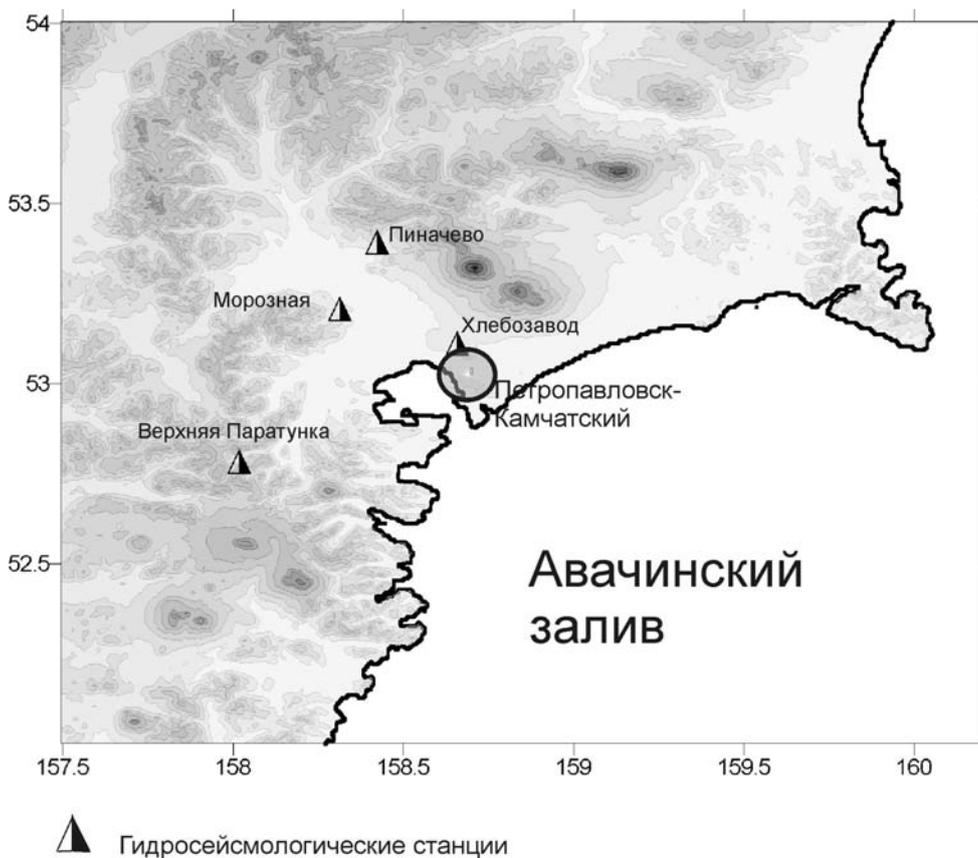


Рис. 15. Схема сети гидрогеологических станций Камчатского полигона

Несмотря на существенную удаленность эпицентра (до ближайшего пункта наблюдений 300 км), в режиме подземных вод фиксировались аномальные возмущения, имевшие место как до, так и после этого землетрясения. Наиболее яркие предвестниковые эффекты наблюдались в вариациях глубинной хлор-натриевой составляющей гидрохимического режима скважины ГК-1 (ст. "Пиначево") и скважины Г-1 (ст. "Хлебозавод"). Примеры таких вариаций для хлор-иона (Cl^-) приведены на рис. 16,а,б. В этих же скважинах отмечалось изменение среднего содержания растворенного и свободного газа бутана C_4H_{10} (рис. 16,в), предшествующее землетрясению. Стоит отметить, и это видно из рис. 16,б, что уменьшение концентраций хлор-иона и натрий-иона в воде скважины Г-1 носят необратимый характер. Это свидетельствует о нарушении равновесия в системе пласт-скважина и скачкообразном переходе ее в другое более устойчивое состояние. Подобные эффекты для гидрогеологических объектов наблюдаются достаточно редко и связаны, как правило, с наиболее сильными или катастрофическими землетрясениями. Самые сильные постсейсмические возмущения, как и в случаях других землетрясений, фиксировались в режиме источника №1 (ст. "Пиначево"). Пример таких аномалий приведен на рис. 16,г.

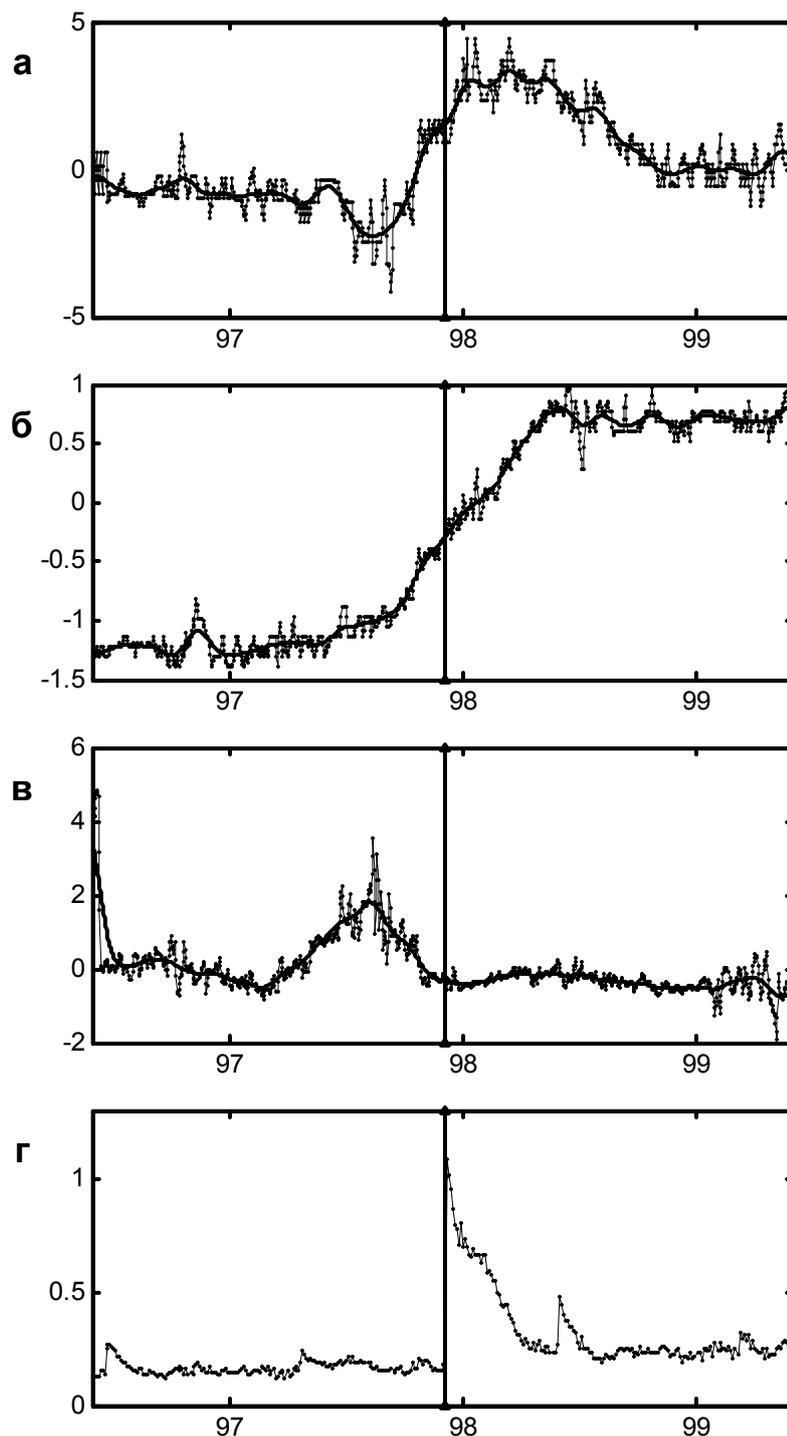


Рис. 16. Примеры аномальных вариаций режима подземных вод в связи с Кроноцким землетрясением

а) – стандартизированные значения вариаций содержания хлор-иона (CL^-) в воде скважины ГК-1 на ст. "Пиначево";
 б) – то же, в воде сважины Г-1 на ст. "Хлебозавод"; в) – стандартизированные значения концентрации свободного газа бутана (C_4H_{10n}) в воде скважины ГК-1 на ст. "Пиначево"; г) – постсейсмическое изменение расхода Q (л/с) источника №1 на ст. "Пиначево". Жирной линией на графиках обозначено изменение среднего значения, вертикальная линия соответствует моменту Кроноцкого землетрясения.

Высокочастотный сейсмический шум. Начиная с 1996 г. в КОМСП проводится контроль вариаций приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума (ВСШ, частота – первые десятки Гц, амплитуды – 10^{-9} - 10^{-12} м) в оперативном режиме с целью своевременного выделения предвестников сильного землетрясения.

При ретроспективном анализе связи ВСШ и приливов использовались ряды непрерывных наблюдений, ведущихся на Камчатке с 1992 г. [17-20]. Рассматривалась огибающая ВСШ, из которой выделялись компоненты, обусловленные приливным воздействием. Показано, что фазовый сдвиг между приливами и приливными компонентами ВСШ не является постоянной величиной, т. е. отклик ВСШ на приливное воздействие нестабилен. С другой стороны, выделяются достаточно продолжительные интервалы времени, в течение которых этот фазовый сдвиг не меняется. В частности, перед каждым сильным землетрясением с магнитудой больше 6.0 и с эпицентральной расстоянием до 250 км от пункта регистрации ВСШ в пос. Начики (таких землетрясений в 1992-1996 гг. было 10) наблюдалась стабилизация фазы приливной компоненты, длившаяся до 1-2 месяцев. После всех этих землетрясений наблюдалось резкое изменение фазы приливной компоненты ВСШ, вплоть до инверсии фазы. Это подтверждает зависимость отклика ВСШ на приливное воздействие от напряженного состояния среды, меняющегося в результате землетрясения. Было предложено использовать гипотезу о связи вариаций фазы приливной компоненты ВСШ с подготовкой сильных землетрясений для среднесрочного прогноза таких землетрясений. Фазовый сдвиг между приливами и приливными компонентами ВСШ выступает в этой ситуации как прогностический параметр.

Рассматривается воздействие на ВСШ приливной волны O_1 с периодом 25.82 часа. Эта волна является одной из наиболее мощных в приливе и помехоустойчивой, что важно при выделении приливной компоненты в условиях помех, многие из которых имеют 24-часовой или кратный 24 часам период. Методика расчета фазы ВСШ детально рассмотрена в [19] и сохранена без изменений: в скользящем временном окне шириной 28 суток из ряда огибающей ВСШ выделяется компонента с периодом волны O_1 ; рассчитывается ее фазовый сдвиг относительно волны O_1 приливного потенциала; полученное значение привязывается к концу временного окна. Характерным признаком подготовки сильного землетрясения является стабилизация фазы на одном из выделенных ранее уровней в течение не менее трех недель. Ожидаемое время землетрясения достигает 2 месяцев.

Перед Кроноцким землетрясением также наблюдалась стабилизация фазы приливной компоненты ВСШ (рис. 17). По уровню стабилизации фазы район ожидаемого землетрясения был определен тот же, что и перед землетрясением 21 июня 1996 г. – сейсмоактивная зона в диапазоне 51.5° – 53.0° N. Землетрясение произошло через 9 дней после подачи сообщения о возможности его возникновения в Совет по прогнозу землетрясений ИВ ДВО и КОМСП ГС.

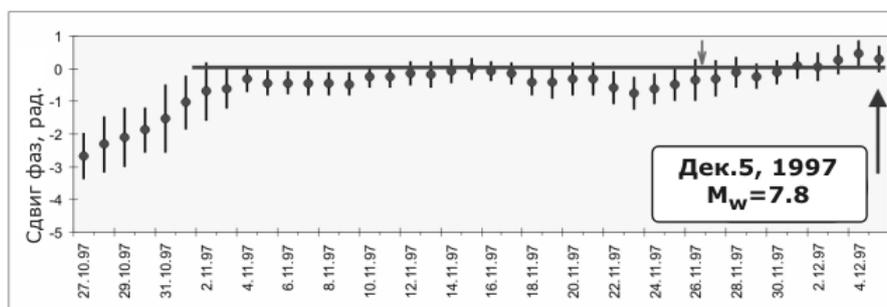


Рис. 17. Вариации фазы компоненты ВСШ, соответствующей приливной волне O_1 перед Кроноцким землетрясением

Горизонтальной линией отмечен участок стабилизации фазы. Вертикальная черта соответствует 68%-ному доверительному интервалу. Стрелками отмечены моменты землетрясения и подачи предупреждения о возможном сильном землетрясении.

Однако, если рассматривать этот прогноз по времени и величине землетрясения можно как удачный, то место было указано неправильно. Причина этого в том, что за время регистрации ВСШ землетрясения с $M>6.0$ в этой зоне не наблюдались, поэтому по данной методике рассматривать ее, как потенциально опасную, оснований не было. Землетрясение имеет очаг длиной около 200 км, который захватывает северную часть сейсмогенной области, вошедшей в 250-километровую зону, то есть Кроноцкое землетрясение произошло в зоне действия рассматриваемого предвестника. Таким образом, данное землетрясение подтвердило возможность использования ВСШ для среднесрочного прогноза сильных землетрясений: предвестник землетрясения с $M>6.0$ проявил себя четко и был выявлен своевременно, время ожидаемого землетрясения на расстоянии до 250 км от пункта регистрации определено верно.

Л и т е р а т у р а

1. Левина В.И., Лепская Т.С. (отв. сост.), Антипова О.Г., Зенина С.А., Кобзева А.А., Кривогорницына Т.М., Митюшкина С.В., Пилипенко Л.В., Шевченко Н.А. Камчатка и Командорские острова. См. раздел III в наст. сб. (на CD).
2. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 1997 год. 1997-1998. / Отв. ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: Изд-во ЦОМЭ ИФЗ РАН.
3. Bulletin of the International Seismological Centre (for 1997). 1999-2000. Berkshire, ISC.
4. USGS National Earthquake Information Center U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center (Monthly Earthquake Data Report (EDR) Files)
5. <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>
6. Gordeev E. I., Gusev A. A., Levin V. E., Bakhtiarov V. F., Pavlov V. M., Chebrov V. N., Kasahara M. 2001. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate function from GPS data // Geophys. J. Int. 147. P. 189-198.
7. Гусев А.А. 1974. Ошибки определения параметров очага землетрясений Камчатки // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука (СО). С. 66-81.
8. Гусев А.А., Левина В.И., Салтыков В.А., Гордеев Е.И. 1998. Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камч. Гос. академии рыбопромысл. флота. С. 32-54.
9. Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И. Камчатка и Командорские острова. См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.
10. Zobin V.M., Levina V.I. 2001. The rupture process of the M_w 7.8 Cape Kronotsky, Kamchatka, earthquake of 5 december 1997 and its relationship to foreshocks and aftershocks // Bull. Seism. Soc. Am. V.91. №6. P. 1619-1628.
11. Гусев А.А., Павлов В.М. 1998. Предварительное определение параметров высокочастотного излучателя в очаге Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камч. Гос. академии рыбопромысл. флота. С. 68-79.
12. Иванова Е.И. Камчатка и Командорские острова. См. раздел IV в наст. сб. (на CD).
13. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). 1965. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР. 11 с.
14. Федотов С.А., Шумилина Л.С. 1971. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки // Физика Земли. №9. С. 3-15.
15. Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М. 2002. Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. №1. С. 3-11.
16. Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. Am. V.75. №4. P. 1135-1154.
17. Салтыков В.А. 1995. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл. РАН. Т.341. №3. С. 406-407.
18. Салтыков В.А. 1995. Возможные механизмы воздействия земных приливов на высокочастотный сейсмический шум // Вулканология и сейсмология. №3. С. 81-90.
19. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. 1997. Изучение высокочастотного сейсмического шума по данным режимных наблюдений на Камчатке // Физика Земли. №3. С. 39-47.
20. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. 1997. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // Вулканология и сейсмология. №4. С. 73-83.