

ПЛОСКОСТИ РАЗЛОМОВ КРОНОЦКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 5 ДЕКАБРЯ 1997 г.**Кролевец А.Н.***Камчатский государственный университет, г.Петропавловск-Камчатский, an@kgpu.ru***Введение**

В работе [5] представлен детальный обзор результатов исследований Кроноцкого землетрясения. Механизмы очагов основного события и/или сильнейших афтершоков исследованы также в работах [6, 7, 9-12]. В [5] отмечается, что определённые *одной группой исследователей* [11] «механизмы основного события... и большинства афтершоков очень хорошо согласуются между собой». С другой стороны, вычисление углов между нормальными близкими по ориентации нодальных плоскостей определённых разными группами (методами) только лишь для одного основного события [5] даёт расхождения, достигающие до 40° . Таким образом, определение ориентации плоскости скольжения даже основного события, выполнено весьма неоднозначно.

По нашему мнению, одна из возможных причин этого заключается в том, что механизмы очага определяются, основываясь на моделях излучателя сейсмических волн расположенного в сплошной среде. Возможность излучения из среды изначально рассечённой разломами [8], или имеющей блоковое строение [4] не рассматривалась. Принятие во внимание блокового строения среды с одной стороны, усложнит картину излучателя, поскольку относительное движение частей среды, начавшись на одной из граней блока, имеет шанс продолжиться и на других. То есть в движение, в течение короткого времени, сравнимого со временем пробега упругой волны по блоку, придёт весь блок. С другой стороны, более детальная модель излучателя, которую при этом придётся создавать, возможно, улучшит согласие теории с наблюдательными данными. Оправданием для усложнения модели могут послужить лишь данные, указывающие на изначально блоковое строение очаговой зоны. Грани блоков должны соответствовать зонам с пониженными характеристиками прочности среды и поэтому должны группировать на себе гипоцентры землетрясений, в том числе и афтершоковых. Таким образом, плоскости группирования, будь они обнаружены, могли бы стать весомыми аргументами в пользу блокового строения среды, излучающей сейсмические волны.

Целью работы был поиск **плоскостей** группирования гипоцентров Кроноцкого землетрясения и его афтершоков, определение пространственного положения плоскостей, интерпретация результатов.

Исходные данные, временное и пространственное окно.

В работе использовался уточнённый региональный каталог Камчатских землетрясений ГС РАН. Оценка точности определения координат землетрясений этого каталога представлена в работе [2]. Отбирались землетрясения каталога класса не ниже 11, произошедшие с момента основного события по 1 сентября 2004, попадающие также в *пространственное окно* с центром в точке $\varphi_0=54.15^\circ\text{N}$, $\lambda_0=162.05^\circ\text{E}$ близкое по форме к эллипсу. Для этого, сначала для каждого землетрясения с координатами эпицентра λ (долгота) и φ (широта) вычислялись вспомогательные параметры $l=(\lambda-\lambda_0)\cdot\cos(0.56) + (\varphi-\varphi_0)\cdot\sin(0.56)$ и $f=(\lambda-\lambda_0)\cdot\sin(0.56) - (\varphi-\varphi_0)\cdot\cos(0.56)$. Затем отбирались землетрясения, для которых выполняется условие $l^2/1.8^2 + f^2/0.8^2 \leq 1$. «Угол» разворота (0.56) осей симметрии фигуры окна, её поперечные «размеры» (1.8, 0.8) подобраны такими, чтобы при минимальных «размерах» внутрь фигуры попадала бы подавляющая часть землетрясений класса 11 и выше, из последовавших за Кроноцким землетрясением в пределах 300 километровой зоны от его эпицентра. Выбранная для формальной пространственной фильтрации, фигура при наложении практически совпадает с эллипсом работы [3].

Упорядочение данных, декартовы координаты. Отобранные землетрясения **сортировались в порядке убывания энергетических классов**, а для одинаковых классов по датам в порядке возрастания. Каждому событию приписывались, декартовы координаты (x,y,z). Начало координатной системы было выбрано в точке $\lambda_0=162^\circ\text{E}$, $\varphi_0=53.956^\circ\text{N}$. Направление осей OX - на восток, OY - на север, OZ - к зениту. Переход от (λ, φ) к (x, y) осуществлялся по формулам $x=R_0(\lambda-\lambda_0)\cos(\varphi_0)$, $y=R_0(\varphi-\varphi_0)$, где радиус Земли R_0 был принят равным 6378 км, а градусы координат переведены в радианы. Погрешность, обусловленная заменой угла φ на φ_0 в аргументе косинуса, не превышает 1.5 км. Z координата землетрясений принималась равной глубине с заменой знака.

Первые 40 событий отсортированного каталога вместе с декартовыми координатами представлены в таблице 1. В первом столбце таблицы указан номер землетрясения *в порядке выполненной сортировки*, во втором – номер по Гарвардскому каталогу механизмов [11], если такой определялся. Далее, координаты и класс.

Таблица 1. Кронцкое землетрясение и его афтершоки, попадающие в выбранное пространственное окно.

№	#Harv	Дата	Долгота	Широта	X, км	Y, км	Z, км	K
1	120597C	05.12.97 11:26	162.55	54.64	36.0	76.1	-10	15.5
2	120597N	05.12.97 18:48	161.85	53.68	-9.8	-30.7	-24	14.2
3		05.12.97 11:35	161.19	53.86	-53.1	-10.7	-32	13.9
4	120797I	07.12.97 17:56	163.17	54.6	76.6	71.7	-22	13.8
5		06.12.97 6:37	163.26	54.72	82.5	85.0	-17	13.7
6	120697O	06.12.97 10:59	162.03	53.85	2.0	-11.8	-7	13.6
7		05.12.97 11:48	162.46	54.29	30.1	37.2	-10	13.5
8	050802C	08.05.02 19:45	160.93	53.73	-70.1	-25.2	-35	13.5
9	041404B	14.04.04 1:54	162.82	55.11	53.7	128.5	-39	13.5
10	042602C	26.04.02 7:15	160.99	53.36	-66.2	-66.3	-57	13.4
11	120697P	06.12.97 12:37	162.24	54.82	15.7	96.2	-21	13.2
12	083098F	30.08.98 14:34	162.09	53.56	5.9	-44.1	-32	13.2
13		06.12.97 6:38	160.83	54.07	-76.6	12.7	0	13.1
14	120697N	06.12.97 10:05	162.42	53.78	27.5	-19.6	-13	13.1
15	120797K	07.12.97 23:05	162.07	53.66	4.6	-32.9	-23	13.1
16	032004F	20.03.04 8:53	160.74	53.74	-82.5	-24.0	-31	13.1
17		05.12.97 19:04	161.72	53.82	-18.3	-15.1	-8	13
18		05.12.97 11:45	161.97	54.97	-2.0	112.9	-11	12.9
19	120897I	08.12.97 21:06	162.17	53.69	11.1	-29.6	-21	12.9
20	120897J	08.12.97 22:19	161.99	53.71	-0.7	-27.4	-7	12.9
21	121097A	10.12.97 8:08	163.28	54.74	83.8	87.3	-15	12.9
22	120697H	06.12.97 5:09	162.42	54.82	27.5	96.2	-21	12.8
23	120797C	07.12.97 8:10	162.8	54.19	52.4	26.0	-24	12.8
24	012499F	24.01.99 13:15	161.77	54.33	-15.1	41.6	-41	12.8
25		05.12.97 11:42	161.8	53.54	-13.1	-46.3	-37	12.7
26		06.12.97 12:43	161.64	53.61	-23.6	-38.5	-6	12.7
27	010198D	01.01.98 20:03	162.46	53.47	30.1	-54.1	-24	12.7
28		05.12.97 14:23	161.85	53.56	-9.8	-44.1	-19	12.6
29		05.12.97 20:30	161.93	53.57	-4.6	-43.0	-2	12.6
30	120997E	09.12.97 13:02	162.08	53.88	5.2	-8.5	-19	12.6
31		05.12.97 11:51	161.5	53.9	-32.7	-6.2	-19	12.5
32		05.12.97 21:19	162.3	53.7	19.6	-28.5	-14	12.5
33	120697C	06.12.97 0:25	161.78	53.62	-14.4	-37.4	-13	12.5
34	121197A	11.12.97 4:00	162.78	54.88	51.1	102.9	-15	12.5
35		11.12.97 14:55	163.13	54.79	74.0	92.8	-15	12.5
36		05.12.97 21:24	161.74	53.61	-17.0	-38.5	-43	12.4
37		07.12.97 13:56	162.05	53.81	3.3	-16.3	-16	12.4
38		08.12.97 18:17	162.08	53.72	5.2	-26.3	-4	12.4
39		26.12.97 4:50	161.96	53.77	-2.6	-20.7	-30	12.4
40	122697B	26.12.97 5:02	162.09	53.72	5.9	-26.3	-13	12.4

Ссылки на номера землетрясений далее по тексту соответствуют столбцу 1 таблицы 1.

Плоскости, группирования гипоцентров землетрясений

Визуализация данных и вычисления выполнялись с помощью компьютерной программы *Maple 9*. Гипоцентры землетрясений в последовательности табл.1 изображались в виде точек в объеме трёхмерных диаграмм. Полученные изображения рассматривались под всевозможными углами. В случае если, при некоторой ориентации рассматриваемого объёма, несколько гипоцен-

тров визуально оказываются, на одной прямой, то эти гипоцентры в пространстве лежат в одной плоскости.

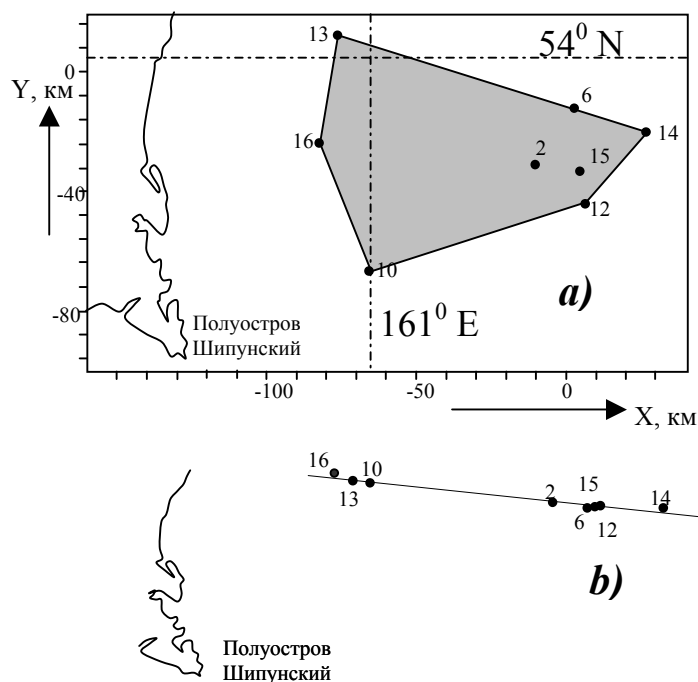


Рис.1. Пример «группирования» гипоцентров на одной плоскости:

- проекция гипоцентров плоскости $j=1$ (нумерация точек - гипоцентров согласно табл.1), описывающего их многоугольника, меридиана, параллели и береговой линии на **горизонтальную плоскость**;
- плоскость проектирования провернута** вокруг параллели на 53° (нормаль плоскости проектирования отклонена к северу). Прямая – проекция плоскости группирования №1 (строка 1 табл. 2).

Группа землетрясений, принадлежащих одной плоскости, считалась обнаруженной, если к ней можно было отнести не менее четырех гипоцентров. Для каждой (j -ой) группы землетрясений определялось уравнение j -ой плоскости группирования $z = A_j x + B_j y + C_j$. Коэффициенты A_j, B_j, C_j определялись из условия минимизации суммы квадратов невязок $\sum_i (A_j x_i + B_j y_i + C_j - z_i)^2$, взятой по

всем землетрясениям группы (i - номера всех землетрясений, группы j). Вычислялись вектор $\vec{N}_j = \langle -A_j, -B_j, 1 \rangle$, перпендикулярный j -ой плоскости, вектор $\vec{n}_j = \vec{N}_j / N_j$ - единичной нормали и расстояния $d_{ij} = \vec{n}_j \cdot \vec{r}_i + C_j / N_j$ от i -ых гипоцентров j -ой группы до визуально определённой j -ой плоскости. Здесь $\vec{r}_i$ - радиус вектор, проведенный к гипоцентру i -го землетрясения. Допустимым принималось отклонение гипоцентра от плоскости до 3 км. Если оказывалось, что $|d_{ij}|$ для какого-либо гипоцентра превышало 3 км, то i -е землетрясение исключалось из j -ой группы, и если в группе по-прежнему оставалось не менее четырех землетрясений близких классов, вектор нормали к плоскости группы вычислялся заново. Площадь S_j г плоскости определяли как площадь выпуклого многоугольника, вершинами которого являются гипоцентры j -ой группы. Они вычислялись, как сумма площадей треугольников, на которые разбивается многоугольник. Параметры пятнадцати плоскостей, на которые попадают гипоцентры землетрясений **наивысших классов** приведены в табл.2. В столбцах: 1 – j номер плоскости; 2- номера землетрясений, попадающих на плоскость {в фигурных скобках номера в том порядке, в каком они образуют замкнутый выпуклый многоугольник}; 3 – стандартное отклонение расстояний землетрясений группы от плоскости; 4,5,6 – компоненты вектора нормали $\vec{n}_j$; 7 – расстояние от плоскости до начала координат; 8,9 – углы падения и простирания (градусы); 10 – площадь плоскости. Оценки погрешности определения ориентации вектора нормали выполнялись по формуле $\delta \alpha_j = \frac{\delta d_j}{\sqrt{S_j}}$. Результат переведен в градусную меру (столбец 11).

Вероятность случайного попадания гипоцентров на плоскости. Оказалось, что из отобранных землетрясений, 16 взятых подряд сильнейших можно отнести всего к первым четырём плоскостям (см. таблицы 1, 2). Оценим вероятность того, что все 16 гипоцентров окажутся вблизи четырёх найденных плоскостей случайно. Суммарная площадь указанных четырёх плоскостей составляет, примерно, 18460 км^2 . Объем прилегающей к плоскостям области по 3 км с каждой стороны составляет $v = 18460 \cdot 6 \approx 111000 \text{ км}^3$. Заниженная оценка объема области, занимаемой гипоцент-

Таблица 2. Плоскости группирования афтершоков

№	Номера землетрясений группы (соотв. табл. 1)	Ст.откл δd_j , км	Вектор нормали			C_j/N_j , км	DP	STK	S, км ²	$\delta\alpha^\circ$
			n_x	n_y	n_z					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	{6,14,12,10, 16,13}, 2,15	1.4	-0.124	-0.599	0.791	-0.6937	39.9	100.1	6397	1.0
2	{1,9,14}, 7	0.8	0.899	-0.087	0.428	-20.6	64.7	5.5	1601	1.2
3	{1,5,4,10, 16}, 3, 8	0.2	0.217	-0.443	0.870	34.5	29.6	63.9	7735	0.1
4	{1, 11, 15, 14}, 7	1.0	-0.457	0.020	0.889	23.5	27.2	182.5	2736	1.1
5	{19,20,26,25}	0.6	0.379	-0.849	0.367	-21.1	68.4	66.0	728	1.3
6	{25,28,29,32}	0.7	-0.498	0.865	0.069	35.3	86.0	240.1	562	1.6
7	{24,31,26,30}, 37,40	0.6	0.034	0.395	0.918	21.3	23.4	274.9	1671	0.8
8	{21,24,22, 34,35}	0.3	-0.136	-0.253	0.958	47.8	16.7	118.3	2125	0.4
9	{30,39,36,31}	0.5	-0.025	-0.610	0.792	10.4	37.6	92.3	638.9	1.1
10	{33,65,38, 66,74}	0.1	-0.555	0.813	0.177	24.8	79.8	235.6	347.9	0.4
11	{53,59,83,97,38,41,33}	0.4	-0.104	-0.523	0.846	-10.3	32.2	101.2	710.7	0.8
12	{1, 6, 20, 13, 18}, 17	1.6	0.082	0.017	0.996	7.5	4.8	348.2	7974	1.0
13	{25, 45, 46, 38, 54}, 44	0.7	0.616	-0.775	0.141	-22.4	81.9	51.5	1817	1.0
14	{4, 9, 47, 10, 27, 62}, 36, 45, 46, 12	1.4	-0.339	0.118	0.934	37.9	21.0	199.2	14885	0.7
15	{1, 4, 9, 18}, 71, 81	0.4	0.321	0.379	0.868	-32.3	29.8	310	2780	0.5

рами афтершоков, даёт значение $V \approx 320000 \text{ км}^3$. Достаточно гипоцентров шести землетрясений {1, 9, 10, 14, 15, 16} из шестнадцати, чтобы указать все четыре плоскости: например, проведенные через четыре разные тройки {14, 15, 16}, {1, 9, 14}, {1, 10, 16}, {1, 14, 15}. Следовательно, оценка вероятности того, что все 10 остальные сильнейшие афтершоковые землетрясения попадут в объём v случайно, составляет $(v/V)^{10} = (11/32)^{10} \approx 2.3 \cdot 10^{-5}$. На самом деле эта вероятность завышена, поскольку землетрясения в среднем расположены ближе к плоскостям, объём v завышен, а объём V занижен. Последний принят равным объёму пирамиды, у которой основание – многоугольник-плоскость 14 (табл.2), а вершина – гипоцентр землетрясения №13. На завышенное значение объёма v указывает, во-первых, то, что стандартное отклонение расстояний δd шестнадцати землетрясений от всех четырёх плоскостей составляет не 3, а всего 0,93 км. Во вторых, при оценке объёма v , пересечения объёмов шестикилометровых по толщине слоёв, примыкающих к плоскостям, учитывались, более одного раза.

Основные результаты

Группы плоскостей. При совместном анализе таблиц 1 и 2 обнаруживается, что среди всех плоскостей выделяется группа с $1^{\text{ой}}$ по $4^{\text{ю}}$ – «первая» (рис. 2). Примечательным является то, что на эти плоскости попадают гипоцентры, как основного события, так и всех мощнейших афтершоков с классами выше 13. «Вторая» группа – это плоскости 12, 14 и 15. Плоскость 14 является, как бы, нижней гранью-границей **области, занимаемой остальными плоскостями**, 12 – её верхней гранью, а 15 – грань-граница с северо-востока. Лишь очень небольшая часть гипоцентров землетрясений классов 11-13 выбранного пространственного окна оказываются над плоскостью 12 и под плоскостью 14. Большая часть гипоцентров землетрясений такого класса, расположенных над 12 и под 14 плоскостями при проектировании их на плоскости группирования оказываются и за пределами соответствующих многоугольников. Таким образом, плоскости второй группы в определённом смысле можно рассматривать как пограничные, поскольку они частично очерчивают некий *объём* наиболее масштабных подвижек. «Третья» группа – плоскости с пятой по одиннадцатую и тринадцатая являются, как бы, антиподами первой: на эти плоскости не попадает ни одного события класса выше 12.9.

Сопоставление ориентации нодальных плоскостей механизмов землетрясений, векторов подвижки и найденных плоскостей группирования. Сопоставим векторы $\vec{n}_j$ с определёнными в других работах нормальными $\vec{n}_k$, к нодальным плоскостям. Это оправдано тем, что точность определения ориентации $\vec{n}_k$ заметно ниже, чем $\vec{n}_j$. Для нодальных плоскостей механизмов землетрясе-

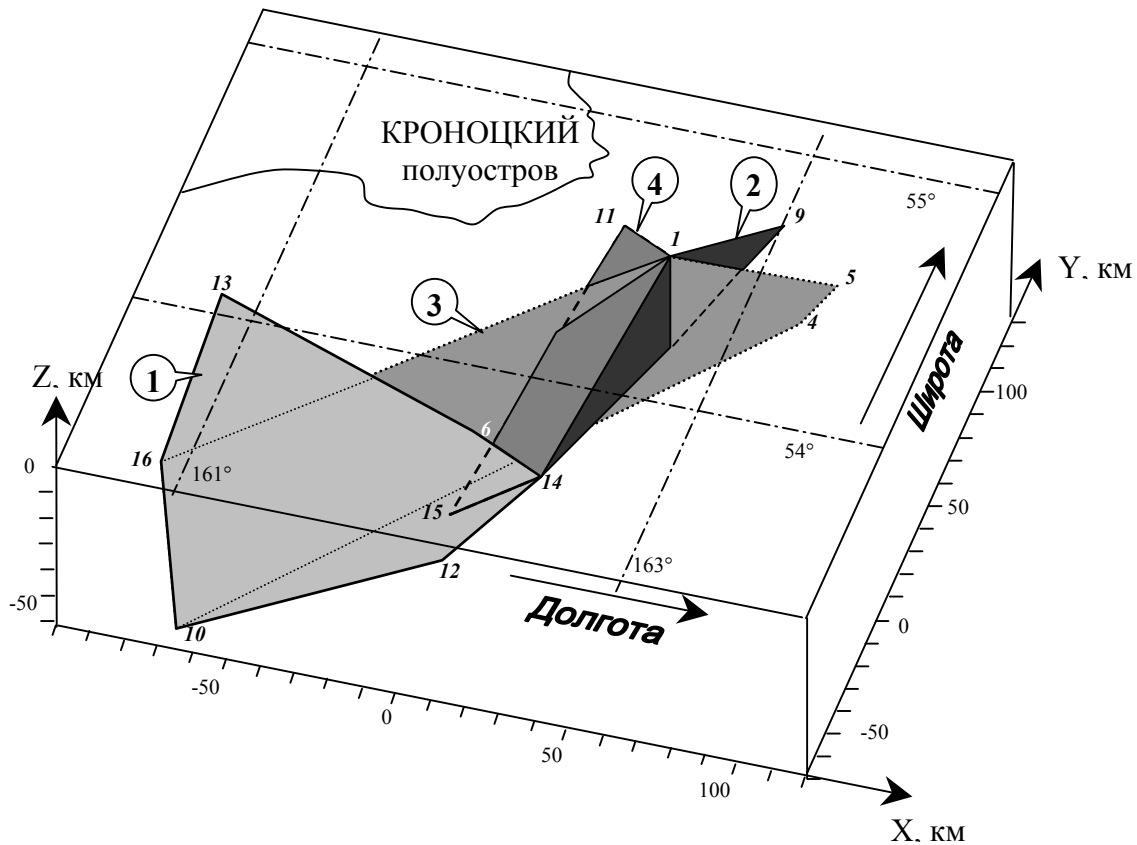


Рис.2. Четыре плоскости группирования землетрясений. В выносках – номера плоскостей-многоугольников. Вершины – гипоцентры афтершоков. Номер у каждой из вершин соответствует номеру события (таблица 1). Гипоцентры, попадающие внутрь плоскостей-многоугольников, не показаны.

ний компоненты векторов нормали $\vec{n}_k$ и ориентации единичных векторов u_k в направлении подвижки могут быть вычислены по значениям углов падения D_k , простирания Φ_k и уклона Λ_k [1]:

$$\vec{n}_k = \langle \sin(D_k)\cos(\Phi_k), -\sin(D_k)\sin(\Phi_k), \cos(D_k) \rangle, \quad u_k = \langle \cos(\Lambda_k)\sin(\Phi_k), -\cos(D_k)\sin(\Lambda_k)\cos(\Phi_k), \cos(\Lambda_k)\cos(\Phi_k) + \cos(D_k)\sin(\Lambda_k)\sin(\Phi_k), \sin(\Lambda_k)\sin(D_k) \rangle.$$
Мерой совпадения $\vec{n}_j$ с $\vec{n}_k$ являются углы α_{jk} между ними: $\alpha_{jk} = \arccos(\vec{n}_j \cdot \vec{n}_k)$. Поскольку точность определения ориентации вектора $\vec{n}_j$ составляет $\delta\alpha_j \approx 1^\circ$, что примерно на порядок лучше точности для $\vec{n}_k$, можно ожидать, что пока α_{jk} заметно больше $\delta\alpha_j$ (табл.2), меньшие углы α_{jk} будут указывать на лучшую точность определения ориентации нодальной плоскости.

Определять дополнительно углы β_{jk} между нормальными к плоскостям (табл.2) и векторами $\vec{u}_k$, нет необходимости: $\vec{u}_k$ одной из пары нодальных плоскостей совпадает с $\vec{n}_k$ сопряжённой. При точном определении $\vec{n}_j$ и $\vec{u}_k$, углы β_{jk} должны быть близки к 90° . Это условие является необходимым, но не является достаточным. В таблице 3 представлены значения углов α и β , для различных комбинаций нормалей **каждой из трёх плоскостей группирования, на которые попадает основное событие**, с нормальными нодальных плоскостей, определённых разными авторами и/или по разным методикам. Результат следует понимать так: если плоскостью скольжения является первая из сопряжённых нодальных плоскостей (NP1), то в столбце под NP1 приведен угол α_{jk} , а под NP2 – угол β_{jk} . Если же плоскостью скольжения является NP2, то в столбце под NP1 приведен угол β_{jk} , а под NP2 – угол α_{jk} .

Таблица 3. Углы α_{j1} (β_{j1}) в градусах между нормальными к плоскостям группирования землетрясений и нормальными к нодальным плоскостям (NP) для основного события ($k=1$).

Механизм землетрясения опубликован в работе... ¹	№	Плоскость группирования $j=2$		Плоскость группирования $j=3$		Плоскость группирования $j=4$	
		NP1	NP2	NP1	NP2	NP1	NP2
[6]	1	61	85	81	58	33	74
[7]	2	85	22	45	49	7*	85
[12]	3	81	39	41	49	11*	83
[11]	4	87	41	49	77	9*	88
[10] ²	5	85	31	46	44	8*	88
[1]	6	86	26	53	42	16*	89
[10] ³	7	77	51	62	32	15*	77

Примечание. ¹ – Значения углов падения и простираения для расчетов углов α (β), ссылки на литературу в данной таблице заимствованы из работы [5]; ² – косейсмика, точечный источник; ³ – полная подвижка, точечный источник; * – совпадения ориентации нормалей с отклонениями не более 20^0 .

В таблице 4 представлены углы α для комбинаций нормалей к плоскостям группирования с нормальными к нодальным плоскостям **тех афтершоков, гипоцентры которых попадают на соответствующую плоскость.**

Таблица 4. Углы между векторами нормалей к плоскостям группирования (таблица 2) и векторами нормалей нодальных плоскостей α (векторов подвижек β), механизмы которых опубликованы в [11]

j=	1							2			3				
k=	2	6	10	12	14	15	16	1	9	14	1	4	8	10	16
$\alpha_{jk} (\beta_{jk})$	47	49	50	47	46	55	59	87	33	27	49	42	58	53	61
$\beta_{jk} (\alpha_{jk})$	73	53	51	56	57	67	49	31	63	89	42	52	33	37	32

Таблица 4. Продолжение

j=	4					5		7		
k=	1	10	11	14	15	19	20	24	30	40
$\alpha_{jk} (\beta_{jk})$	9*	10*	10*	7*	15	83	34	36	35	24
$\beta_{jk} (\alpha_{jk})$	88	85	87	89	89	27	77	65	67	84

α , β без скобок, если плоскостью скольжения является NP1. В скобках – если NP2.

Поскольку, как видно из таблицы 4 и рис.3, ориентации векторов нормалей нодальных плоскостей близки к ориентации лишь четвертой плоскости группирования, в таблице 5 представлены углы α и β для комбинаций нормалей к плоскостям группирования с нормальными и подвижками нодальных плоскостей для всех **афтершоков** Кроноцкого землетрясения, для которых удалось найти определения механизмов Гарвардской группой сейсмологов [11].

Таблица 5

Углы между вектором нормали ПГЗ №4 и векторами нормалей (n), подвижек (v) [11] нодальных плоскостей землетрясений, гипоцентры которых **не попадают на** плоскость группирования №4. Номер землетрясения соответствует таблице 1, а для не попавших в таблицу 1, ещё и номеру каталога механизмов землетрясений [11].

№ ЗТ	1	2	4	6	8	9	12	16	19	20	21	22	23	24	27	30
$n_1 (v_2)$	2	13	14	9	12	82	15	18	17	22	16	12	11	17	66	9
$n_2 (v_1)$	3	82	84	86	81	79	76	79	80	71	89	82	88	76	29	23

1	33	34	40	47	62	78	90	117	118	128
				120697T	022504B	041000A	040803A	121700A	052902B	120697G
2	6	13	13	19	7	6	24	58	29	12
3	86	78	79	83	85	84	90	81	87	79

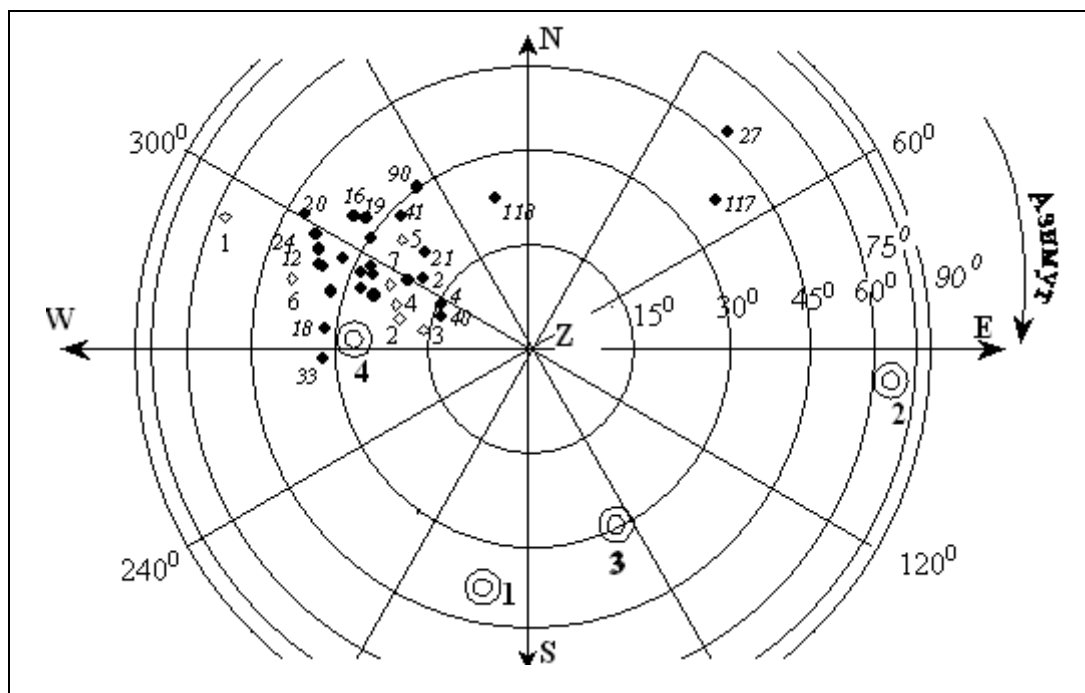


Рис.2. Вид снаружи и сверху на единичную сферу, на которую попадают концы векторов нормалей (пронумерованы). Направления: Z – зенит, N, E, S, W – стороны света. Углы в градусах: азимут (от севера) и зенитное расстояние (от зенита). ○ - нормали к плоскостям группирования землетрясений, номера плоскостей; ◇ - нормали к НП определённым разными авторами (по разным методикам) для основного события 5.12.97 г., нумерация источника в таблице 3; ♦ - нормали к НП афтершоковых землетрясений (землетрясения пронумерованы в таблице 2), в соответствии с механизмами, определёнными в [11].

Обсуждение результатов

Модель среды. Небольшое число плоскостей, на которые попадают все сильнейшие афтершоки вместе с основным событием, свидетельствует о существовании «памяти» среды. Среда не «залечивает» разломы, по крайней мере, в течение всего промежутка времени, начиная с момента основного события, и до окончания афтершокового процесса. Возможно, хотя прямых свидетельств этому пока нет, выявленные разломы или их часть существуют задолго до и много позже момента основного события. Любой разлом это нарушение непрерывности механических свойств. Такая особенность, однако, до настоящего времени не учитывалась при определении механизмов афтершоковых землетрясений.

Блочность среды или иерархическая сетка разломов? Плоскости группирования землетрясений, как правило, интерпретируют как проявление разломов. При таком подходе [8], на определённой плоскости можно обнаружить землетрясения **широкого спектра энергий, начиная с определённого класса и ниже**. Иерархический ранг разлома определяется энергией самых сильных землетрясений, какие в течение достаточно длительного промежутка времени поддерживают его активность. С точки зрения иерархической модели [4], плоскости естественно интерпретировать как *границы* смежных блоков. Энергия, выделяемая в момент землетрясения на грани, должна быть порядка предельной, накапливаемой смежным грани блоком. Если принять, что плоскость группирования землетрясений это грани блоков, близких иерархических рангов, то можно ожидать, что разброс энергий землетрясений в пределах определённой плоскости, не может составлять несколько порядков: **в пределах одной плоскости не должно наблюдаться землетрясений, существенно различающихся по энергиям**. Именно это и **наблюдается для землетрясений на плоскостях первой и отдельно третьей групп**. Последнее свидетельствует в пользу гипотезы блочности. Плоскости же второй группы могут состоять из граней смежных блоков, разных рангов иерархии.

Нодальные плоскости и плоскости группирования. Можно ожидать, что подвижка в момент землетрясения происходит [1] по одному из тех разломов, на которое попадает гипоцентр. В свою очередь, это позволяет предполагать близость нормали одной из нодальных плоскостей и нормали к плоскости группирования (или одной из них), которой принадлежит гипоцентр. Совместный анализ рис.3, таблиц 4 и 5 показывает, что *нормали некоторых из нодальных плоскостей оказываются близкими только лишь к нормали плоскости группирования №4*, независимо от того,

на какую из плоскостей группирования попадает гипоцентр землетрясения. Это можно понимать так, будто, определённый по сейсмическим данным вектор подвижки не обязательно лежит в плоскости разлома, на котором находится гипоцентр. По нашему мнению, это самый неожиданный результат данной работы.

Возможная интерпретация. Плоскости группирования расчленяют объём среды, попадающий в промежуток между плоскостями 12 и 14 на *блоки*. Одной из граней каждого блока является плоскость 4. В момент землетрясения, среда приходит в движение на месте любой грани блока, которая не обязательно совпадает с плоскостью 4. В течение времени, сравнимого со временем движения упругой волны по блоку, в движение приходит, весь блок с преимущественным направлением подвижки вдоль плоскости 4. Таким образом, гипоцентр землетрясения попадает на одну грань блока, а алгоритмы определения механизма землетрясения, опирающиеся на модели двойного диполя [1] указывают на подвижку в плоскости, близкую к другой грани этого же блока.

Выводы

1. Гипоцентры сильнейших афтершоковых землетрясений пространственно группируются на небольшом числе плоскостей. Ориентация крупнейших плоскостей может быть установлена с точностью около 1°.

2. Выявленные плоскости группирования можно разбить по ряду признаков на родственные группы: а) мощнейших афтершоков; б) более умеренных по мощности; в) ограничивающих зону затихия до Кроноцкого землетрясения.

3. Ориентация одной из нодальных плоскостей основного события и подавляющего числа афтершоковых землетрясений близка к ориентации лишь одной плоскости группирования, независимо от того попадает или нет гипоцентр землетрясения на эту плоскость. Отмеченные выше особенности свидетельствуют в пользу гипотезы строения геофизической среды в виде иерархии не вложенных блоков.

Список литературы

1. Аки К, Ричардс П. Количественная сейсмология. М. Мир. 1983. 530 с.
2. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеницын В.И., Шевченко Ю.И., Яшук В.В. Система сейсмологических наблюдений. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. // Под ред. Гордеева Е.И., Чеброва В.Н. 2004. С. 11-42.
3. Гусев А.А., Левина В.И., Салтыков В.А., Гордеев Е.И. Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект. Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. // Под ред. Гордеева Е.И. 1998. С. 32-49.
4. Кролевец А.Н. Иерархическая модель активной геофизической среды. // Вулканология и сейсмология. 2003. №6. С. 71-80.
5. 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. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $MW=7.8$, $I_0=8$ (Камчатка). Землетрясения Северной Евразии в 1997 году // Под ред. Старовойт О.Е. Обнинск: 2003. С. 251-271.
6. 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. В сб. . Землетрясения Северной Евразии в 1997 году // Под ред. Старовойт О.Е. Обнинск: 2003. Раздел III. С. 160-191 (Файл на CD: C17_Kamchatka_Komandor_97.doc).
7. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 1997 год. 1997-1998. // Отв. Ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: Изд-во ЦОМЭ ИФЗ РАН.
8. Уломов В.И. Моделирование зон возникновения землетрясений на основе решеточной регуляризации // Физика Земли. 1998 №9. С. 20-38.
9. Bulletin of the International Seismological Centre (for 1997). 1999-2000. Berkshire, ISC.
10. 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.
11. <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>
12. USGS National Earthquake Information Center U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center (Monthly Earthquake Data Report (EDR) Files)