

АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОИСКА ПЛОСКОСТЕЙ ГРУППИРОВАНИЯ ГИПОЦЕНТРОВ ПО ФОРМАЛЬНЫМ КРИТЕРИЯМ.

А.М. Макеев¹, А.Н. Кролевец²

¹*Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
Петропавловск-Камчатский, 683032, ул. Пограничная, 4,
факс (415-2) 41-08-33, e-mail: kamgu@kamgu.ru*

²*Дальневосточный федеральный университет, филиал в городе
Петропавловске-Камчатском, 683031, ул. Тушканова 11/1, факс 23-35-53,
e-mail: dvgtu@inbox.ru*

Введение

В данной работе описаны результаты апробации программы поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров землетрясений. Детали строения геофизической среды сейсмоактивных зон и выбор их адекватных моделей могут быть установлены путем выявления плоскостей группирования гипоцентров землетрясений [1, 2]. Разработан алгоритм и реализующая его компьютерная программа, позволяющая осуществлять поиск таких плоскостей, с использованием каталогов землетрясений. Программа по формальным критериям отыскивает пространственное положение плоскостей разломов земной коры – границ блоков. Сами критерии могут быть найдены лишь методом проб и ошибок из сопоставления получаемых результатов с наблюдательными данными.

В работе представлены результаты поиска плоскостей группирования, определены параметры плоскостей. Сделана попытка идентифицировать ряд найденных плоскостей в качестве границ блоков. Обсуждается вопрос – является ли группирование на некоторых из найденных плоскостей случайным. Исследования выполнены с использованием сейсмических данных ГС РАН для Камчатского региона.

Выявленные особенности пространственного распределения гипоцентров землетрясений в перспективе могут быть использованы для прогноза мест будущих землетрясений, в частности при составлении карт сейсмического районирования.

Методика и особенности исследования

Исходными данными для анализа являлись записи каталога землетрясений. Отбирались землетрясения энергетического класса не ниже 10, произошедшие с 01.01.1962 по 01.01.2009, попадающие также в пространственное окно с границами по широте $51^{\circ}\text{N} \leq \varphi_0 \leq 57^{\circ}\text{N}$, по долготе $156^{\circ}\text{E} \leq \lambda_0 \leq 166^{\circ}\text{E}$. Всего было отобрано около 11 000 событий. Для поиска плоскостей использовались декартовы координаты [2]. Начало координатной системы помещалось в точку на поверхности Земли с географическими координатами $\lambda_0=162^{\circ}\text{E}$ и $\varphi_0=53.956^{\circ}\text{N}$. Ось Ox направлена на восток, Oy – на север, Oz – к зениту. Для найденных плоскостей определялись расстояния до плоскостей от начала координат d , векторы нормали \mathbf{n} верхней полусферы, углы падения (DP) и простираания (STK). Во время поиска использовались следующие критерии-параметры:

- $D = 5$ км - допустимый разброс значений d , соответственно значения $D/2$ являются допустимыми отклонениями гипоцентров от плоскости;
- $M = 50$ - минимальное число гипоцентров с расстояниями d ;
- $\beta = 5^{\circ}$ - максимально допустимый шаг угла дискретизации ориентаций векторов нормали.

Как правило, при значении параметра $M=50$, программа отыскивала наиболее крупные по площади плоскости. Для более детального поиска параметр M уменьшался до $M = (50, 40, \dots 10)$, тем самым позволяя выявить оставшиеся плоскости, меньшие по размеру.

Поиск и критерии отбора плоскостей

Алгоритм поиска плоскостей группирования гипоцентров землетрясений, подробно описан в работе [4]. Алгоритм включает в себя:

- Загрузку базы данных гипоцентров в оперативную память.
- Ввод в программу исходных параметров для поиска.
- Разбиение области поиска на подобласти по географическому принципу.
- Запуск поиска плоскостей для каждой из подобластей: начало перебора ориентаций векторов нормалей к плоскостям.

- Вычисление проекций радиус-векторов к гипоцентрам подобласти поиска на направление вектора нормали. Создание сортированного по значениям проекций списка гипоцентров.

- Идентификация пространственных плоскостей с количеством гипоцентров не меньше заданного в параметрах поиска. Отбор плоскостей с максимальным количеством гипоцентров. Исключение плоскостей, найденных для одного и того же множества гипоцентров, имеющих близкие, но разные ориентации векторов нормалей. Сохранение параметров всех найденных плоскостей.

В результате работы алгоритма программы, были найдены множества плоскостей близких друг к другу по ориентациям (\mathbf{n}), значениям d , наборам гипоцентров. Можно предположить, что значительная часть этих плоскостей выявляется программой не из-за того, что они объективно существуют в среде, а потому, что координаты гипоцентров, использованные для их поиска, случайным образом смещены вследствие ошибок их определения или по другим причинам. Вполне возможно, что часть из отбрасываемых плоскостей, объективно существует в пространстве, однако, на сегодняшний день, у нас нет жесткого критерия, позволяющего однозначно отфильтровать плоскости, существующие в среде, от случайных. Для последующей фильтрации, использовались следующие дополнительные критерии.

«Критерий L ». Удалялись плоскости, в которых более заранее установленной доли L гипоцентров принадлежит также и другим плоскостям с большим числом гипоцентров. Для применения «критерия L » последовательно перебирались пары плоскостей. Вычислялась доля l , как отношение числа гипоцентров, принадлежащих одновременно обеим плоскостям к числу гипоцентров, принадлежащих плоскости с меньшим их числом. Теперь, если оказывалось, что $l > L$, то плоскость с меньшим числом гипоцентров исключались из дальнейшего рассмотрения. При апробации программы вводилось $L=0,5$.

«Критерий k_{pl} ». На следующем этапе выполнялось вычисление и сравнение пространственных «плотностей» гипоцентров P_{pl} и P_0 (рис. 1). Здесь $P_{pl} = N / V_{pl}$ - плотность в объеме $V_{pl}=D \cdot S$, N - полное число гипоцентров у плоскости площадью S , в пределах $\pm D/2$. $P_0 = N_0 / V_0$ - плотность гипоцентров в объеме цилиндра, теперь в пределах $\pm 10D$ от плоскости, V_0 - объем этого цилиндра, за вычетом V_{pl} и части, выступающей над поверхностью Земли V_{out} , а N_0 - число гипоцентров в этом объеме, за вычетом N .

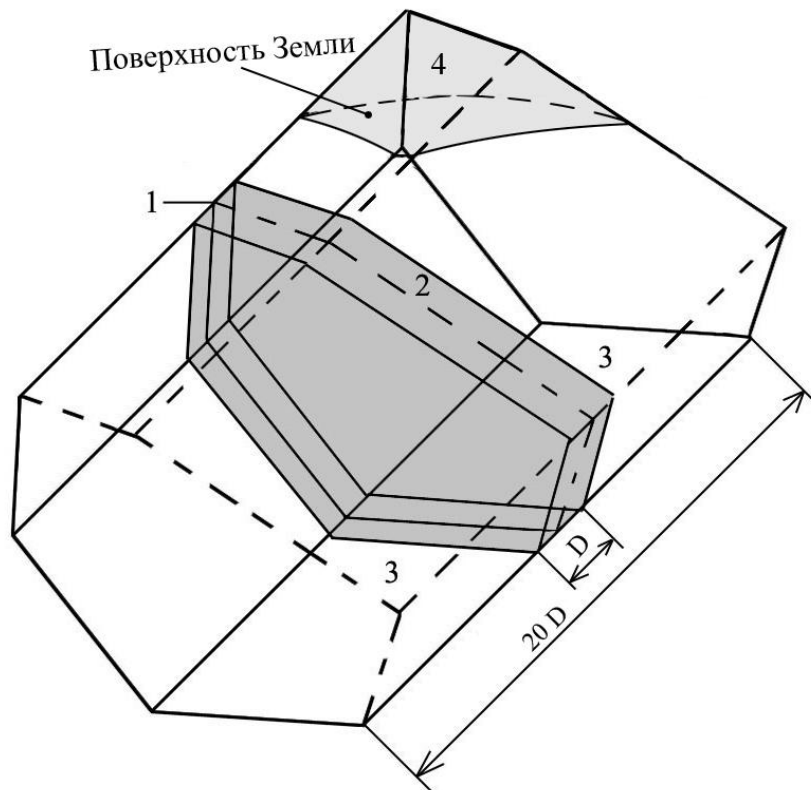


Рис. 1. Цилиндр, для которого выпуклый многоугольник, охватывающий плоскость группирования, является образующей: 1 - выпуклый многоугольник в найденной плоскости; 2 - объем V_{pl} , прилегающий к плоскости; 3 - объем V_0 ; 4 - объем V_{out} , выступающий над Земной поверхностью.

Мы полагали, что найденная по формальным критериям плоскость, действительно существует в пространстве, если «плотность» P_{pl} оказывается существенно большей, чем P_0 . Коэффициент k_{pl} «критерия k_{pl} » показывающий, во сколько раз вероятность попадания гипоцентров в объём толщиной D , прилегающий к плоскости, выше вероятности попадания в «цилиндр», высотой $19D$, вычислялся по формуле $k_{pl} = P_{pl} / P_0$. Большие значения k_{pl} указывают, на неслучайность найденных плоскостей. При апробации программы принималось $k_{pl} = 19$.

У плоскости со значением коэффициента $k_{pl} < 19$, параметр D последовательно увеличивался с шагом $\Delta D = 1$ км. Для каждого нового D , заново производился отбор по «критерию L » и вычислялся коэффициент k_{pl} . Возможно, что на очередном шаге цикла при применении «критерия L », плоскость отсеивалась, в противном же случае, поиск останавливался либо при достижении приемлемого значения критерия k_{pl} , либо, если параметр D увеличивался до размеров цилиндра поиска и группа гипоцентров не могла рассматриваться как плоскость.

При последующих уменьшениях значения M , из каталога поиска исключались гипоцентры, составляющие найденные плоскости. Таким образом, в области поиска было найдено 113 плоскостей группирования. Выходными параметрами работы программы поиска плоскостей являлись: координаты вектора нормали к плоскости, расстояние от начала координат до плоскости, список координат гипоцентров, описывающих плоскость по периметру, площадь S выпуклого многогранника (вершины – гипоцентры, расположенные на плоскости), углы падения и простираения плоскости.

Результаты и их обсуждение

Возможность варьирования параметрами k_{pl} и L позволили сделать поиск более гибким и избавиться от привязки к статическим параметрам поиска D и M . Из найденных программой 113 плоскостей, для детального анализа были отобраны 18, найденных при $M = 50$ (табл. №1) и (рис. 2а, 2в).

Четыре из них (с номерами по таблице 1: 15, 16, 17, 18) расположены у южного побережья Камчатки, в районе мыса Лопатка, три плоскости (12, 13, 14) – у мыса Шипунский, пять плоскости (6, 7, 9, 10, 11) в Кроноцком заливе, четыре (1, 2, 3, 8) в Камчатском заливе в области Кроноцкого полуострова и две (4, 5) возле Командорских островов. В объёме, прилегающем к каждой из плоскостей, в пределах расстояния $\pm D/2$, регистрировались новые события и после 01.01.2009 г. (крайней даты каталога использованного для поиска плоскостей). Объёмы, прилегающие к пяти (9, 10, 12, 15, 17) из найденных 18 плоскостей, являются частью сейсмофокальной зоны [5, 6]. Геометрия сейсмофокальной зоны обозначенная в работе [6] с углом падения около 50° под побережье Камчатки на протяжении 600 км от мыса Лопатки до Кроноцкого полуострова, соответствуют значениям найденным программой поиска плоскостей. Остальные 13 плоскостей можно интерпретировать как границы смежных клавиш-блоков [3]. Помимо плоскостей, найденных в зоне субдукции, четыре плоскости расположены вкост фокальной зоны, три из них (11, 13, 16) не пересекают её, плоскость 14 разрезает плоскость 12, расположенную в Авачинском заливе, и целиком попадающую в фокальную зону.

В итоге, можно указать следующие группы плоскостей, формирующие грани полученных клавиш-блоков (рис. 2а, 2в): (16, 15, 14), (14, 12, 13), (13, 10, 11), (11, 9, 6). Данные клавиши-блоки объединены между собой смежными гранями-плоскостями, пересекающими зону субдукции, на которых, по сравнению с остальными найденными плоскостями, наблюдается повышенная сейсмическая активность. Объёмная плотность гипоцентров в зонах, прилегающих в пределах $\pm D/2$ к плоскостям (7, 11, 13) оказывается большей ближе к поверхности Земли. Плоскости (1, 2, 3) и (6, 7, 8) образуют отдельные блоки в Камчатском заливе. Под Командорскими островами расположены друг напротив друга плоскости (4, 5), которые возможно также могут являться границами одного блока.

Около 50 процентов гипоцентров из используемого для поиска каталога расположены в пределах $\pm D/2$ от найденных 113 плоскостей. Анализ блоковой структуры по всем найденным 113 плоскостям является предметом дальнейших исследований. Можно предположить, что и остальные гипоцентры, так же расположены на плоскостях, параметры которых пока невозможно установить, в силу «зашумленности» исходных данных.

Заключение

Проведена предварительная идентификация ряда найденных плоскостей в качестве границ блоков. Параметры плоскостей представлены в таблице 1, а сами плоскости на рисунке 2. Апробация программы продемонстрировала эффективность описанной в данной работе процедуры поиска, выявила резервы кратного уменьшения времени вычислений при увеличении объёма обрабатываемых данных. Выявлен ряд плоскостей и представлены их параметры: углы падения, простираения, площа-

ди и др. Рассчитан коэффициент «случайности» найденных плоскостей. На основе полученных результатов сделаны предположения об особенностях блокового строения геофизической среды.

Описанный в работе алгоритм может быть использован для анализа пространственной структуры и других сейсмоактивных зон, а результаты для уточнений долгосрочного сейсмопрогноза. Применение программы может быть переопределено на решение задач в других областях науки, которые более эффективно выполняются с использованием параллельных кластерных вычислений или требуют больших вычислительных мощностей. Код программы имеет модульную структуру, и каждый из модулей может быть использован по отдельности с другими программами для решения целого класса подобных задач.

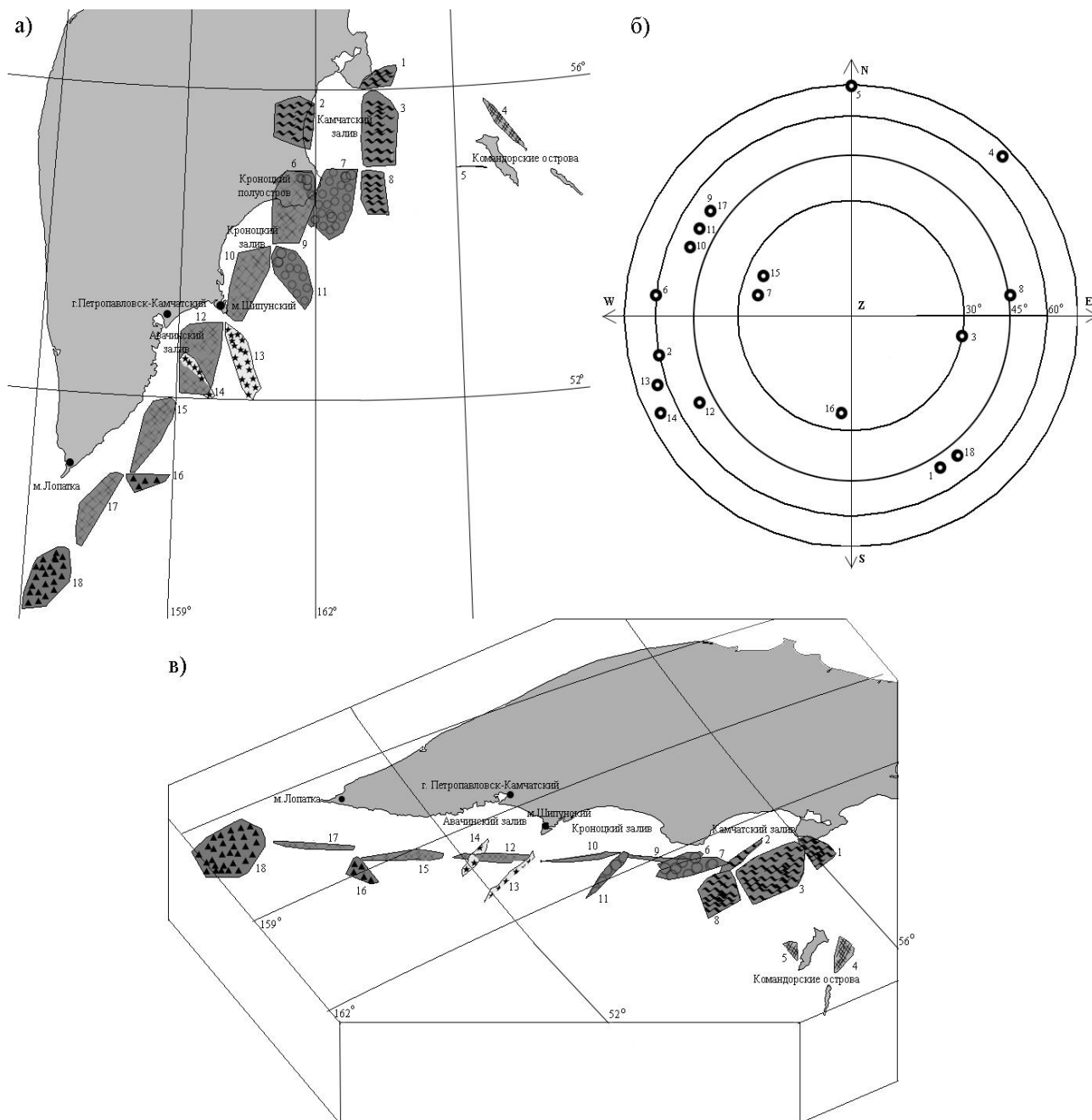


Рис. 2. Найденные плоскости группирования гипоцентров землетрясений: а) - вид сверху; б) - вид снаружи и сверху на единичную сферу, на которую попадают концы векторов нормалей (пронумерованы), направления: Z – зенит, N, E, S, W – стороны света; в) - вид сбоку.

Таблица 1. Параметры найденных плоскостей: S – площадь плоскости; M – количество гипоцентров на плоскости; D – разброс расстояний гипоцентров от плоскости; ΔH – диапазон глубин; φ – широта, λ – долгота; K_{max} – максимальный энергетический класс события, зарегистрированного на найденной плоскости.

№	Компоненты вектора нормали к плоскости			DP	STK	S, тыс км ²	M	D, км	ΔH, км	Координаты гипоцентра с минимальной глубиной		K _{max}
	n _x	n _y	n _z							φ	λ	
1	0.395	-0.656	0.643	50	149	1.6	100	22	5 - 34	56.06	163.18	14
2	-0.848	-0.174	0.5	60	-102	7.3	115	13	52 - 162	55.85	161.98	15.4
3	0.492	-0.087	0.866	30	100	6.2	246	34	4 - 42	55.18	163.17	15.4
4	0.667	0.689	0.259	75	44	3	178	10	14 - 71	55.52	166.21	13.6
5	0	0.996	0.087	85	0	1.1	116	14	6 - 47	54.94	165.92	13.4
6	-0.861	0.088	0.5	60	-84	6.2	242	22	15 - 126	54.66	161.99	13.4
7	-0.413	0.088	0.906	25	-78	5.4	302	21	2 - 30	54.41	162.65	15.5
8	0.702	0.087	0.707	45	83	3.1	112	23	5 - 42	54.67	163.07	13.8
9	-0.62	0.45	0.643	50	-54	8.4	252	12	6 - 93	54.03	161.64	13
10	-0.706	0.298	0.643	50	-67	6.7	347	15	18 - 81	53.74	160.9	13.9
11	-0.667	-0.377	0.643	50	-119	5	363	31	0 - 52	53.81	161.71	13.9
12	-0.667	0.377	0.643	50	-60	9	294	20	5 - 103	52.21	159.63	13.9
13	-0.855	-0.3	0.423	65	-109	6	598	33	2 - 58	52.82	160.41	14.6
14	-0.841	-0.419	0.342	70	-116	4.5	235	39	5 - 86	52.07	159.81	13
15	-0.386	0.172	0.906	25	-66	3.7	68	7	43 - 63	51.62	158.83	14.6
16	-0.044	-0.42	0.906	25	-174	1.2	57	5	51 - 66	50.96	158.27	13.5
17	-0.62	0.45	0.643	50	-54	5.1	260	29	26 - 77	50.33	157.22	14.2
18	0.468	-0.607	0.643	50	142	6.5	249	36	28 - 100	49.89	156.55	14.5

Список литературы:

1. *Кролевец А.Н.* Иерархическая модель активной геофизической среды // Вулканология и сейсмология. 2003. №6. С. 71-80.
2. *Кролевец А.Н.* Плоскости разломов Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17 – 18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 32– 39.
3. *Лобковский Л. И., Баранов Б. В.* Клавишная модель сильнейших землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Докл. АН СССР. - 1984. - Т. 275. - № 4. - С. 843–847.
4. *Макеев А.М., Кролевец А.Н.* Компьютерная программа поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров камчатских землетрясений // ВЕСТНИК КРАУНЦ. Серия «Физико-математические науки». 2011. №2 (3). С. 69-79.
5. *Селиверстов Н.И.* Структура сейсмофокальной зоны Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1 (9). С. 10-26.
6. *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.