

АЛГОРИТМ ПОИСКА ПЛОСКОСТЕЙ ГРУППИРОВАНИЯ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Кролевец А.Н.

Камчатский государственный университет, Петропавловск-Камчатский, an@kamgri.ru

Введение

Особенностям изучения пространственного распределения гипоцентров землетрясений посвящено множество работ. Обычно считается, что гипоцентры группируются у границ литосферных плит и меньших, составляющих их блоков. Вопрос о том, что представляют собою эти границы, до конца не выяснен. Оказываются ли они плоскими, "кусочно плоскими" или же, эти границы являются фрактально-шероховатыми и представление их в виде плоскостей является недопустимо грубым приближением? Ответ на этот вопрос можно было бы получить, выяснив, оказываются ли гипоцентры землетрясений пространственно на плоскостях или же положение гипоцентров оказывается скорее случайным. Помехой к такому прямому решению проблемы являются, как обычно считается, значительные погрешности определения координат гипоцентров. Приведенные в региональном каталоге землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН оценки [1, 3] таких погрешностей составляют от 5-10 до нескольких десятков километров. По нашему мнению, значения погрешностей, по крайней мере, для землетрясений наивысших энергетических классов (13 и выше), могут быть завышенными. Действительно, в работе [2] показано, что гипоцентр Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. и пятнадцати сильнейших афтершоков попадают всего на четыре плоскости с отклонениями, не превышающими 3 км. Вероятность случайного попадания составляет не более 10^{-4} . Эти исследования, с одной стороны, дают независимую оценку погрешности определения координат гипоцентров сильных землетрясений, а с другой - указывают на то, что плоскости-разломы действительно существовали, по крайней мере, десятки месяцев после сильнейшего Кроноцкого землетрясения. Возникает естественный вопрос: можно ли ожидать подобного группирования и для других сильных камчатских землетрясений и для больших временных промежутков.

Поиск плоскостей группирования гипоцентров в работе [2] осуществлялся визуально с помощью графических возможностей программы Maple. Такая процедура является весьма трудоёмкой. В случае анализа большего числа гипоцентров возникает вероятность пропуска значительной части плоскостей группирования. Решением проблемы оказывается компьютерная программа, отыскивающая плоскости группирования по формальным признакам. В данной работе описывается алгоритм работы такой программы.

Подготовка данных для обработки

Декартовы координаты. Для поиска плоскостей группирования удобнее всего использовать декартовы координаты. Важно, чтобы переход от географических координат гипоцентров к декартовым не вносил искажений, связанных с кривизной Земли. Переход осуществлялся в несколько этапов. Вначале географические координаты пересчитывались в декартовы, причём начало координат помещалось в центр Земли, ось z_1 направлялась к полюсу, оси x_1 и y_1 в плоскости экватора к нулевому меридиану и меридиану 90° . Далее осуществлялся переход от тройки (x_1, y_1, z_1) к тройке (x_2, y_2, z_2) вращением координатных осей y_1, z_1 вокруг оси z_1 на угол $\lambda_0=162^\circ$ к востоку. В результате ось x_1 оказывается направленной к меридиану одной из точек Камчатки. Новое вращение осей, уже вокруг оси y_2 на угол $\varphi_0=53.956^\circ$ к северу приводит к тому, что новые координатные оси z_3 и z_3 оказываются параллельными поверхности Земли в точке с географическими координатами φ_0, λ_0 , и близки к параллельным в других точках Камчатского региона. Наконец, параллельный перенос координатной системы на расстояние равное среднему радиусу Земли к её поверхности в точку φ_0, λ_0 и переобозначение осей приводят к тому, что ось Ox последней координатной системы направлена на восток, ось Oy – на север, Oz – к зениту (рис. 1). Окончательные координаты гипоцентров далее обозначаем без индексов просто x, y, z .

Отбор данных. Анализировались землетрясения, произошедшие с 1.01.1962 г. по 1.09.2004 г., координаты эпицентров которых попадают в диапазоны по широте $46.9 < \varphi < 61.8$, долготе $148.5 < \lambda < 171.1$, энергетического класса $K > 12$. Сам отбор данных и пересчёт

географических координат в декартовы осуществлялся с помощью программы Excel.



Рис. 1. Ориентация координатных осей и положение начала декартовой системы координат относительно береговой линии полуострова Камчатка. Плоскость Oxy является касательной к поверхности сферической Земли в точке $\varphi = 53.196^\circ N$, $\lambda = 162^\circ E$.

Описываемый ниже алгоритм позволяет работать с данными любого региона и класса, выбор точки φ_0, λ_0 является вполне произвольным.

Формальные критерии для поиска плоскостей группирования гипоцентров. Помимо уже упомянутых интервалов географических координат эпицентров, дат и энергетических классов землетрясений более существенными параметрами для поиска плоскостей являются *минимальное число M гипоцентров*, принадлежащих найденным плоскостям и *допустимый интервал D расстояний* гипоцентров от плоскостей.

Алгоритм

Алгоритм программы включает ряд вложенных циклов.

Перебор всевозможных ориентаций плоскостей осуществляется с помощью двух самых внешних циклов. Каждой возможной ориентации соответствует вектор нормали (перпендикуляр) к плоскости. Концы же всех векторов нормали попадают на верхнюю единичную полусферу. В работе [2] представлена оценка точности $\delta\alpha$ определения ориентации найденных в работе плоскостей группирования. Значение составляет около 1 – 2 градуса. По этой причине достаточно анализировать ориентации, представленные конечным числом векторов нормалей, заполняющих полусферу. Важно лишь, чтобы угловое расстояние между ближайшими по ориентации нормальями не превышало 2° . Перебор ориентаций нормалей осуществлялся с помощью сферических полярных координат θ и ψ . Начальным минимальным значением θ было выбрано $1/300$ радиана, а каждое последующее было большим предыдущего на $1/120$ радиана. Для каждого θ окружность постоянного θ , но разных ψ на единичной полусфере делилась на целое число частей n_ψ . Само число разбиений n_ψ определялось так. Длина на единичной сфере $2\pi \sin(\theta)$ окружности постоянного θ сперва делилась на $1/120$ радиана, а полученное число округлялось в большую сторону до ближайшего целого. Шаг $\delta\psi$ по азимутальному углу получался делением длины $2\pi \sin(\theta)$ окружности постоянного θ на n_ψ . На рисунке 2 представлены первые 463 из 91 072 концов векторов нормалей на поверхности единичной сферы, которые попадают на первые 12 окружностей постоянного θ .

Поиск плоскостей, имеющих определённую ориентацию осуществлялся во внутренних циклах. Для каждого из векторов \mathbf{n}_j нормалей программно определялось, имеются ли плоскости группирования соответствующей ориентации, удовлетворяющие формальным критериям для поиска. Для этого вначале вычислялись проекции $d_{ji} = \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{r}_i$ радиус-векторов $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ каждого i -го гипоцентра до начала декартовой системы координат (рис. 3). Затем выполнялась сортировка записей о землетрясениях в порядке возрастания значений проекций d_{ji} . В отсортированном списке отбирались а) землетрясение с минимальным (с учётом знака числа) значением проекции (то есть первое в списке) и б) M -ное в списке. Вычислялась разность $|d_{jM} - d_{j1}|$. Здесь штрихи означают, что номер землетрясения соответствует не номеру по каталогу, а номеру в списке.

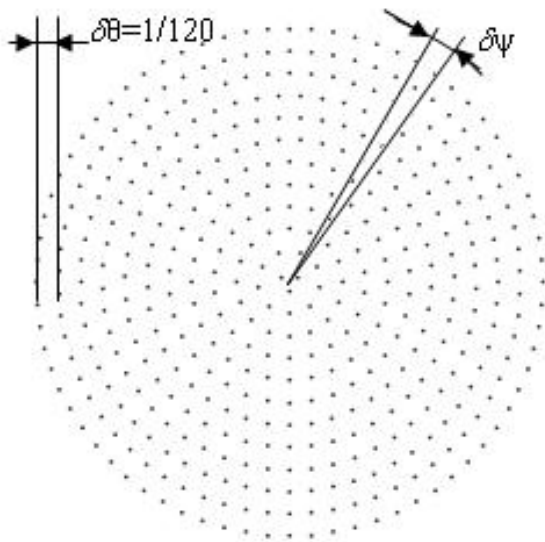


Рис. 2. Концы части векторов нормалей, попадающих на единичную полусферу (вид сверху). Представленный на рисунке интервал $\delta\psi$ соответствует лишь самой внешней окружности ($\theta = 0.095 \approx 5^\circ$).

Если разность оказывалась меньше $2D$, то все M первых гипоцентра оказываются на одной плоскости. Если же это не так, то тестировалась разность $|d_{jM+1}' - d_{j2}'|$ и т.д. до конца списка. Если в общем случае оказывалось, что гипоцентры с номерами, начиная с t' и по $(t + M - 1)'$ принадлежали с точностью $\pm D$ одной плоскости, список расширялся, и проверялось, не принадлежит ли

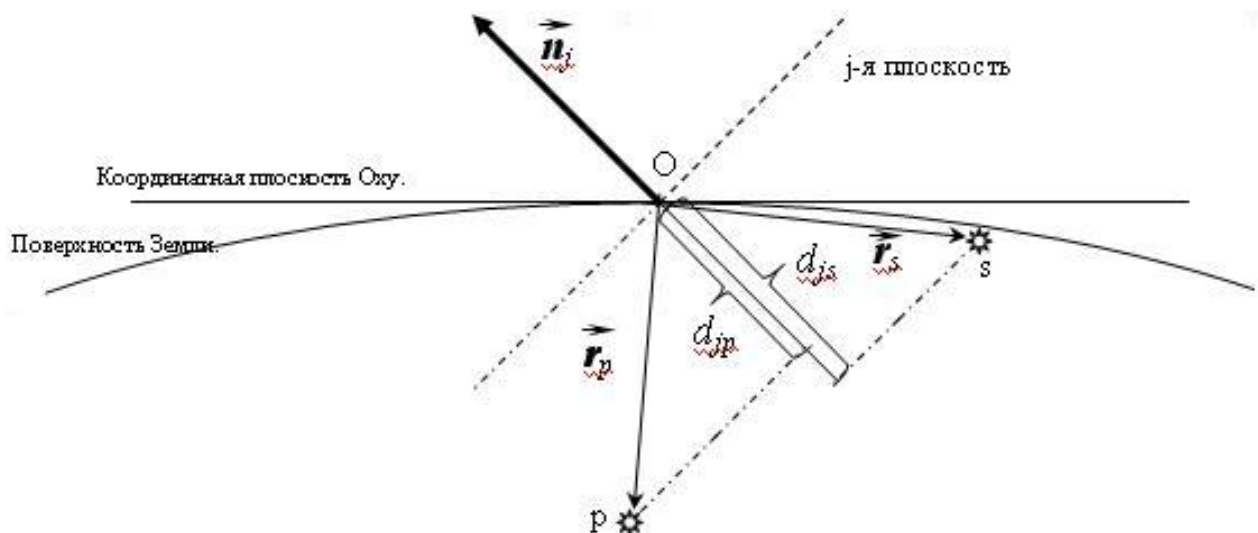


Рис. 3. Пояснение обозначений, использованных в тексте. p и s – какие либо из гипоцентров, O – начало декартовой системы координат (рис. 1), r_p и r_s – радиус-векторы, d_{jp} , d_{js} – их проекции на направление нормали n_j . Если разность $|d_{jp} - d_{js}|$ не превышает удвоенного допустимого расстояния D от j -ой плоскости, гипоцентры s и p могут оказаться на одной плоскости такой же ориентации, как и j -ая. Чтобы плоскость считалась обнаруженной, таких гипоцентров должно набраться не менее M .

плоскости ещё и гипоцентр, следующий в списке, то есть с номером $(t + M)'$. Для всей группы землетрясений, принадлежащих плоскости далее по методике, описанной в работе [2] определялись параметры плоскости: компоненты вектора нормали, расстояние от плоскости до начала координат, которые заносились в список плоскостей.

Завершающая часть программы вне всех циклов обрабатывает список найденных плоскостей. Во-первых, выполняется исключение повторяющихся записей. Такие могут быть, поскольку одни и те же группы гипоцентров могут выявляться для двух, и более близких по ориентации векторов нормали n_j . Во-вторых, отыскиваются разные, но очень близкие по ориентации плоскости группирования обнаруженные по двум группам гипоцентров, причём одна из групп является подмножеством другой. В этом случае исключается запись, соответствующая меньшей группе. Отдельного исследования требуют случаи, когда две или большее число групп гипоцентров образуют близкие по составу, но не полностью перекрывающиеся множества. На данный момент принято решение все такие группы объединять, рассчитывать параметры

плоскости объединённой группы, однако в примечании к списку пометать, что не все гипоцентры данной группы оказываются в пределах допустимых расстояний ($\pm D$) от плоскости.

Пример найденной группы гипоцентров и плоскости

Параметры одной из нескольких десятков групп гипоцентров, для землетрясений энергетического класса 13 и выше, найденных с помощью программы, реализующей описанный выше алгоритм, сведены в представленной ниже таблице 1. Как и в работе [2] плоскость представляется в виде выпуклого многоугольника, вершинами которого являются гипоцентры. В таблице 2 представлены параметры плоскости–многоугольника, определённой по группе гипоцентров таблицы 1. На рисунке 4 представлены горизонтальная и косая проекции плоскости многоугольника и одновременно береговая линия полуострова Камчатка.

Таблица 1. Одна из групп сильных землетрясений, лежащих на одной плоскости, выявленная программой по описанному выше алгоритму. В заголовках столбцов: K – энергетический класс; x, y, z – декартовы координаты гипоцентра; невязки – расстояния гипоцентра от плоскости, положительные – вдоль вектора нормали.

№	Дата	Широта	Долгота	Глубина, км	K	x , км	y , км	z , км	Невязка, км
1	10.04.1962 10:31	50.7	158.13	15	13.1	-272.0	-354.0	-30.7	0.1
2	26.12.1964 14:30	51.6	157.36	145	14.1	-313.2	-246.0	-157.7	0.5
3	29.11.1973 17:59	53.23	152.29	518	13.3	-591.6	-33.6	-548.0	-0.2
4	15.05.1974 18:59:00	50.07	156.67	25	13.4	378.8	-416.3	-50.0	-1.0
5	06.01.1976 21:08	51.33	159.69	3	14.1	-160.6	-289.5	-11.6	-1.0
6	06.01.1976 21:45	51.36	159.69	8	13.4	-160.3	-285.9	-16.4	0.2
7	06.01.1976 22:17	51.36	159.69	5	13.7	-160.4	-286.0	-13.4	-0.9
8	27.07.1992 19:34	51.2	157.64	91	13	-299.5	-293.1	-105.0	1.0
9	12.06.1993 20:33	50.98	158.21	40	13.5	-263.8	-322.0	-53.7	0.5
10	27.06.1993 11:56	51.15	159.03	19	13.1	-206.7	-307.0	-29.8	0.4
11	21.06.1996 13:57	51.27	159.63	2	13.9	-165.0	-296.0	-11.0	-1.1
12	29.05.2003 5:59	50.65	157.53	40	13.2	-313.2	-355.6	-57.7	-1.3

Таблица 2. Параметры плоскости–многоугольника: C_j/N_j – расстояние от плоскости до начала координат [2], DP, STK – углы падения и простирания (градусы), δd – стандартное отклонение расстояний гипоцентров землетрясений таблицы 1 до плоскости.

Компоненты вектора нормали			C_j/N_j , км	DP	STK	δd , км	S , км ²
n_x	n_y	n_z					
-0.458	0.600	0.655	107.9	49	323	0.65	89100

Уравнение плоскости в декартовых координатах: $z = -164.7 + 0.6994x - 0.9156y$. Уравнение этой же плоскости, в котором глубина h гипоцентра выражается через широту и долготу эпицентра: $h = 1983.21 + 99.01\varphi - 44.21\lambda$.

Заключение

Описан алгоритм поиска групп гипоцентров, пространственно расположенных в объёме, прилегающей к какой либо плоскости. Составлена компьютерная программа на языке Си, работающая по описанному алгоритму. Для компилирования, компоновки и отладки программы использовался пакет "Open Watcom". Программа протестирована для поиска плоскостей группирования гипоцентров Камчатских землетрясений. Тестирование показало работоспособность алгоритма и программы. Программа выполняется за приемлемое время (до 1 минуты), если число гипоцентров не превышает 100. При бóльшем числе анализируемых одновременно гипоцентров время работы резко возрастает и это нельзя считать приемлемым.

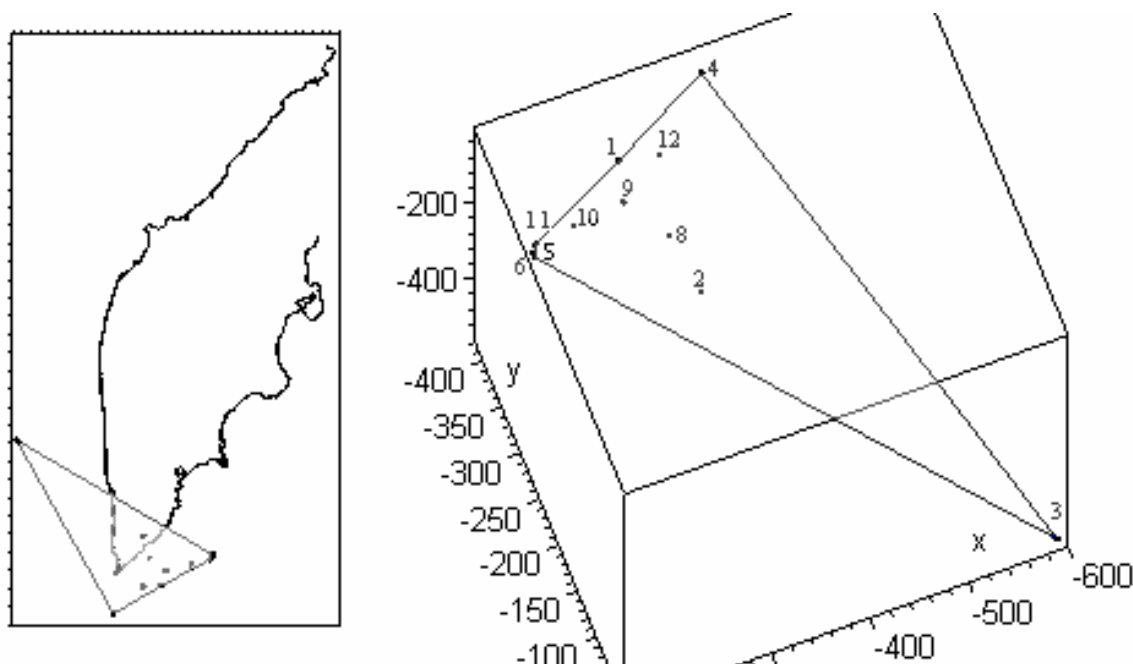


Рис. 4. Пространственное положение плоскости-многоугольника. Пометки на координатных осях – значения декартовых координат в км. Гипоцентры помечены точками с указанием номеров, согласно табл. 2. Координаты гипоцентров землетрясений с номерами 6 и 7 близки, поэтому гипоцентр 7 на рисунке не помечен.

"Узким местом" программы являются операции сортировки, реализованные с помощью встроенного в язык программирования Си оператора sort. Сортировка выполняется по методу "всплывающего пузырька" и не гарантирует, как показали тестирования, эффективную работу. Мы надеемся усовершенствовать программу, используя более эффективные алгоритмы сортировки.

Алгоритм и программа не гарантируют, что найденные плоскости группирования соответствуют реально существующим в природе структурам и не являются проявлением случайного совпадения. Для выявления среди найденных плоскостей реально существующих структур были выполнены дополнительные исследования. Результаты этих исследований – являются предметом отдельной публикации.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеницын В.И., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 11-42.
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: Изд-во Отгиск, 2006. С. 32-39.
3. Левина В.И., Иванова Е.Н., Митюшкина С.В., Лепская Т.С. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов: пересмотр событий 1971-1988 гг. // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции, 17 – 18 января 2006 г., Петропавловск-Камчатский: Изд-во Отгиск, 2006. С. 21-28.