



Общероссийский математический портал

А. М. Макеев, А. Н. Кролевец, Компьютерная программа поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров камчатских землетрясений, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2011, выпуск 2(3), 69–79

DOI: <http://dx.doi.org/10.18454/2079-6641-2011-3-2-69-79>

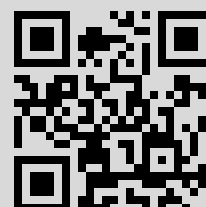
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 77.82.206.18

19 июля 2016 г., 17:47:07



УДК 550.8.05

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ПОИСКА ПЛОСКОСТЕЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГРУППИРОВАНИЯ ГИПОЦЕНТРОВ
КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Макеев А.М.¹, Кролевец А.Н.²

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, 683032, ул. Пограничная, 4

² Филиал Дальневосточного Федерального государственного университета, 683031, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Тушканова, 11/1

E-mail: an@kamgpu.ru

Детали строения геофизической среды сейсмоактивных зон и выбор их адекватных моделей могут быть установлены путем выявления плоскостей группирования гипоцентров землетрясений. Разработан алгоритм и реализующая его компьютерная программа, позволяющая осуществлять поиск таких плоскостей, с использованием каталогов землетрясений.

Ключевые слова: плоскости разломов, группирование, гипоцентры, сейсмопрогноз, алгоритм, моделирование

© Макеев А.М., Кролевец А.Н., 2011

MSC 86A17

**COMPUTER PROGRAM OF REVEALING THE KAMCHATKA'S
EARTHQUAKES HYPOCENTERS SPATIAL GROUPING PLANES**

Makeev A.M.¹, Krolevets A.N.²

¹ Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4

² Branch of the Far Eastern Federal State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky, Tushkanova st., 11 / 1, Russia

E-mail: an@kamgpu.ru

The active seismic zone geophysical structure features and its models identification can be fixed by revealing planes on which the earthquake hypocenters are grouping. The algorithm and computer program are developed, to search the planes on the basis of the earthquake catalogue.

Key words: planes rupture, grouping, hypocenters, seismic forecast, algorithm, modelling.

© Makeev A.M., Krolevets A.N., 2011

Введение

Особенности пространственного распределения гипоцентров землетрясений можно использовать для прогноза мест будущих землетрясений, в частности при составлении карт сейсмического районирования. Поэтому, таким особенностям посвящено множество работ. Обычно считается, что гипоцентры группируются у границ литосферных плит и меньших составляющих их блоков [1]-[3]. Вопрос о том, что представляют собой эти границы, до конца не выяснен. Одни авторы считают их плоскими [2], другие «кусочно-плоскими» [4], фрактально-шероховатыми [3]. По нашему мнению, 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 данной проблемы являются, как обычно считается, значительные погрешности определения координат гипоцентров и отсутствие эффективных компьютерных программ такого поиска.

Приведенные в региональном каталоге землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН оценки [5]-[6] 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 [7] показано, что гипоцентры Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. и пятнадцати сильнейших афтершоков попадают всего на четыре плоскости с отклонениями, не превышающими 3 км. Вероятность такого случайного группирования составляет не более 10^{-4} . Эти результаты, 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 для других сильных, в том числе Камчатских, землетрясений и для больших временных промежутков.

В данной работе описаны алгоритм и программа поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров землетрясений. Программа по формальным признакам отыскивает плоскости группирования гипоцентров, однако до последнего времени открытым оставался вопрос – не является ли группирование на некоторых из найденных плоскостей случайным. Данная работа посвящена исследованию этого вопроса с использованием сейсмических данных Камчатского региона.

Исходные данные и алгоритм поиска плоскостей

Идея алгоритма. Уравнение плоскости в декартовых координатах можно записать в виде $ax + by + cz = d$. Здесь $(a, b, c) = \mathbf{r}$ – компоненты единичного вектора нормали \mathbf{n} к плоскости, $(x, y, z) = \mathbf{r}$ радиус-вектор, проведенный к произвольной точке на плоскости, а d – проекция вектора \mathbf{r} на направление \mathbf{n} . Абсолютная величина d является расстоянием до плоскости от начала координат (рис. 1).

Пусть некоторая группа гипоцентров принадлежит одной плоскости. Если i – номер записи о событии в каталоге землетрясений, а x_i, y_i, z_i – декартовы координаты гипоцентров указанной группы, то формально можно ожидать, что все комбинации $ax_i + by_i + cz_i$ будут иметь одно и то же значение. На самом деле, из-за погрешно-

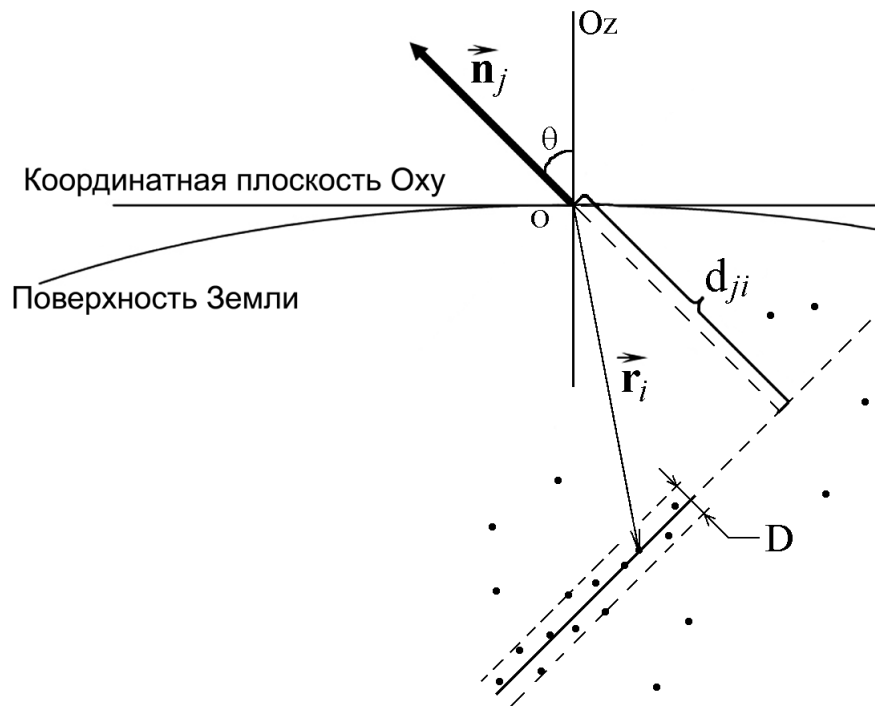


Рис. 1. Положение векторов и координатных осей во время поиска.

стей определения координат гипоцентров, можно допускать близость этих значений. Поэтому предложенный нами алгоритм поиска плоскостей группирования должен сводиться к:

а) перебору всевозможных ориентаций n_j единичных векторов с дискретным шагом;

б) вычислению расстояний d_{ji} от начала координат до каждого i -го гипоцентра вдоль вектора n_j ;

в) определению всех «групп» d_{ji} , имеющих близкие в рамках каждой из групп значения. Сам критерий близости устанавливает исследователь, исходя из оценок точности определения координат гипоцентров. Каждый из гипоцентров в рамках группы оказывается на плоскости с нормалью n_j и расстоянием, равным среднему значению d_{cp} по множеству d в группе.

В случае если найдено сразу множество очень близких по своим параметрам (n , d) плоскостей, производится отбор из них такой плоскости, на которой группируется максимальное число гипоцентров.

Входящие параметры поиска. До начала поиска следует ввести данные каталога землетрясений и параметры-критерии поиска. Обработываемые программой записи из каталога включают, декартовы координаты гипоцентров и номера записей. Остальные данные программой игнорируются, поэтому отбор записей для каталога поиска должен выполняться предварительно, исходя из других соображений, с использованием, например, временных критериев или критериев энергетического класса. К параметрам-критериям поиска относятся:

- D - допустимый разброс значений d_{ji} , соответственно значения $D/2$ являются допустимыми отклонениями гипоцентров от плоскости;

- M - минимальное число гипоцентров с расстояниями d_{ji} , отличающимися не более чем на D , при выявлении которых группировку можно считать обнаруженной;

- β - максимально допустимый шаг угла дискретизации ориентации векторов нормали.

При реализации вычислений параллельными потоками в соседних областях должны быть также предусмотрены критерии, по которым определяется возможность объединения плоскостей. В нашем случае это:

- $\Delta\gamma$ - максимально допустимая величина угла между нормальными объединяемых плоскостей соседних областей;

- ΔD - максимально допустимое отличие значений расстояний от начала координат до каждой из плоскостей;

- параметры разбиения области поиска (и всего каталога) на подобласти (подкаталоги).

Особенности обработки записей сейсмограмм приводит к тому, что значения глубин гипоцентров «привязаны» к «круглым значениям километров»: 1, 2, ... 15, 20, 25 и т.д. Вследствие этого, гипоцентры группируются на горизонтальных плоскостях, расположенных на соответствующих глубинах. Скорее всего, физических причин для такого группирования нет. Поэтому горизонтальные и близкие к горизонтальным плоскостям изначально должны исключаться, вследствие чего, имеет смысл находить плоскости с углами падения:

- α не меньше наперед заданной величины. Угол падения совпадает с отклонением вектора нормали от вертикали.

Подготовка данных для обработки. Исходными данными для работы программы являются записи каталога землетрясений. Как правило, в каталогах используются *географические* координаты положения гипоцентров землетрясений. Для поиска плоскостей группирования удобнее пользоваться *декартовыми* координатами. Переход от географических координат гипоцентров к декартовым осуществляется в несколько этапов и не должен вносить искажений, связанных с кривизной Земли. Вначале географические координаты, взятые из каталога землетрясений, 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 λ_0 к востоку. В результате, ось x_1 оказывается направленной к меридиану λ_0 . Новое вращение осей, уже вокруг оси y_2 на угол ϕ_0 к северу, приводит к тому, что новые координатные оси z_3 и y_3 оказываются параллельными поверхности Земли в точке с географическими координатами ϕ_0, λ_0 . Наконец, параллельный перенос координатной системы на расстояние равное 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, оси Oy – на север, Oz – к зениту. Окончательные координаты гипоцентров далее обозначаем без индексов, просто x, y, z . Описываемый ниже алгоритм позволяет работать с данными любого региона и класса, а выбор точки ϕ_0, λ_0 является произвольным.

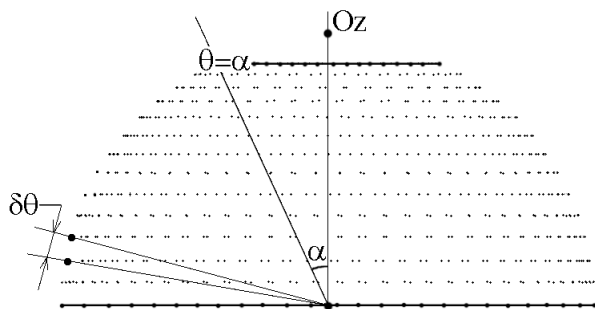
Алгоритм поиска. Реализация поиска осуществляется параллельными потоками, которые могут выполняться как на отдельном компьютере, так и на компьютерах, объединенных в локальную сеть. Каталог землетрясений разбивается на подкаталоги для подобластей, отобранных по географическому принципу, и покрывающих всю область поиска. Для каждой из подобластей создается класс потока, который содержит в оперативной памяти динамический список параметров гипоцентров подобласти. Далее, поиск выполняется в каждом из подкаталогов, после чего производится

проверка, имеют ли плоскости, найденные по одному из подкаталогов, продолжения в подкаталогах соседних подобластей. При обнаружении таких продолжений, множества гипоцентров разных подобластей (подкаталогов), попадающие на плоскости с достаточно близкими значениями (\mathbf{n}, \mathbf{d}) , должны объединяться, а границы найденных плоскостей расширяться.

В рамках каждого из потоков для подобласти начинается перебор всех возможных ориентаций \mathbf{n}_j единичных векторов нормали с дискретным шагом. Это осуществляется с помощью вложенных циклов. Во внешнем цикле производится движение вектора нормали от близкой к вертикальной ориентации ($\theta = \alpha$) по направлению к плоскости Oxy (рис. 1) с шагом $\Delta\theta \leq \beta$ (рис. 2) до значения $\theta = \pi/2$.

Во вложенном цикле конец вектора нормали \mathbf{n}_j вращается горизонтально с постоянным дискретным шагом. Число разбиений s_β для этого определяется так: длина окружности постоянного θ на единичной сфере, равная $2\pi\sin(\theta)$ делится на $\delta\theta$. Полученное число округляется в большую сторону до ближайшего целого и полагается равным s_β . Шаг по азимутальному углу $\delta\beta = 2\pi\sin(\theta)/s_\beta$. В результате, концы всех векторов нормали достаточно равномерно заполняют верхнюю единичную полусферу (рис. 2).

а) вид сбоку



б) вид сверху

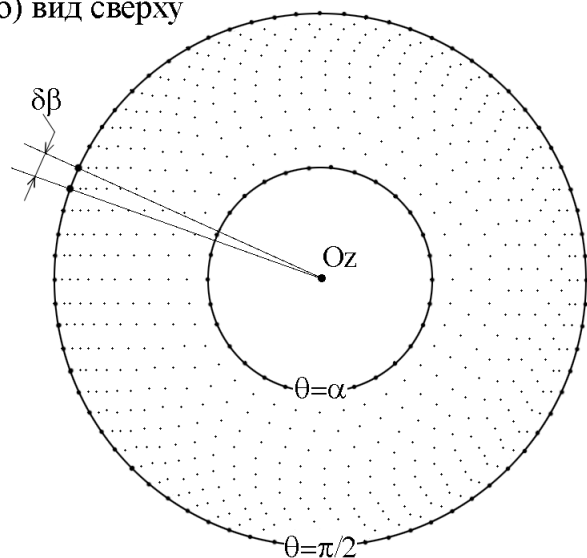


Рис. 2. Концы векторов нормали на верхней единичной полусфере. Входные параметры $\alpha = 25^\circ$ и $\beta = 5^\circ$. $\delta\beta$ показано для крайнего значения $\theta = \pi/2$

Во внутреннем цикле для очередной ориентации \mathbf{n}_j осуществляется поиск плоскостей группирования гипоцентров. Вычисляются проекции $d_{ji} = \mathbf{n}_j \mathbf{r}_i$ радиус-векторов \mathbf{r}_i , проведенных ко всем гипоцентрам подобласти (рис. 1). Далее, создается связанный динамический список *slist*. Записями в нем служат полученные значения проекций d_{ji} , номера гипоцентров по каталогу землетрясений и указатели на адреса ячеек памяти следующих записей. Список заполняется с одновременной сортировкой по возрастанию значений d , всего k элементами, по числу записей подкаталога.

Работа с полученным списком заключается в следующем: для всевозможных p' вычисляются разности $\Delta d(p',) = |d_{j,(M+1)} - d_{j'}|$. Здесь штрихи означают, что индекс $'$ соответствует не номеру записи по подкаталогу, а номеру в отсортированном списке. Определяются номера $'$, для которых выполняются неравенства $\Delta d(p',) \leq D$ (рис.

3). Каждому такому номеру j' соответствует группа из M гипоцентров, имеющая близкие в пределах D значения проекций на направление \mathbf{n}_j , то есть лежащих на одной плоскости. Далее, для каждой такой группы на принадлежность к плоскости последовательно тестируются гипоцентры, записи о которых оказываются соседними в списке. Им соответствуют ближайшие, но большие значения d . Заново проверяется выполнение неравенств $\Delta d(p', +t) \leq D$, при $t = 1, 2, \dots, (k - M)$.

В итоге, для фиксированного значения n_j будет получен набор из групп номеров гипоцентров, оказывающихся на плоскостях одинаковых ориентаций, но на разных расстояниях от начала координат. Некоторые из групп могут частично перекрываться, однако их объединение невозможно, так как при этом разности расстояний между крайними элементами объединенной группы оказываются превышающими D . В таких случаях из частично перекрывающихся групп должна быть отобрана лишь одна, с максимальным числом элементов.

Рис. 3 поясняет принцип отбора множеств гипоцентров, удовлетворяющих формальному критерию $\Delta d(p',) \leq D$. Для каждой новой ориентации вектора нормали список $slist$ составляется заново и описанная процедура поиска групп с максимальным числом элементов повторяется.

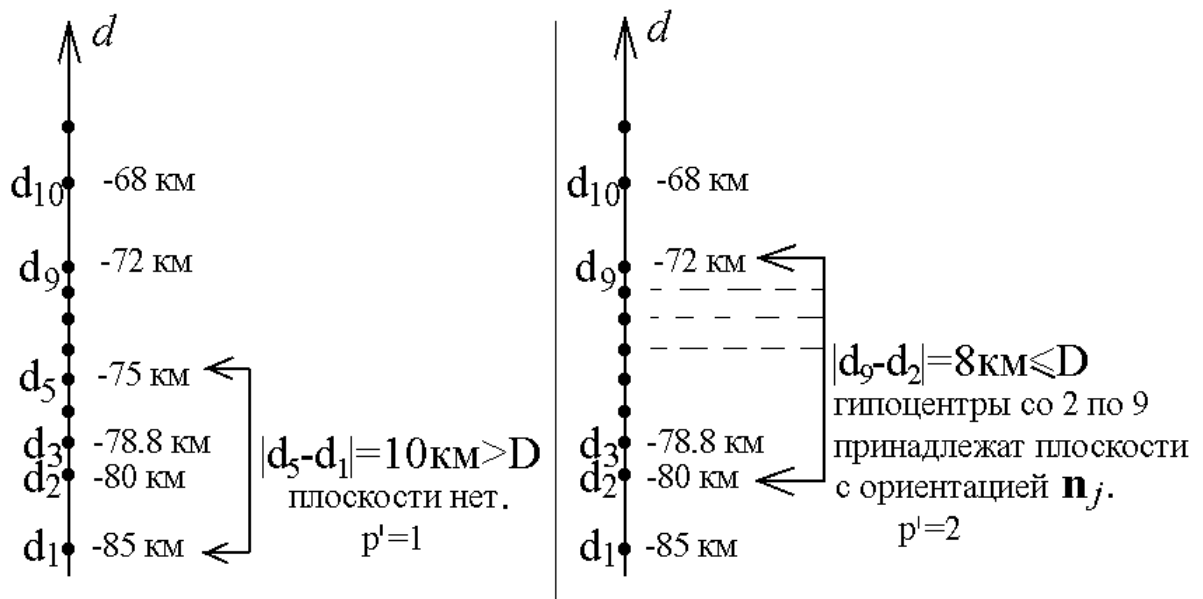


Рис. 3. Пример поиска плоскостей группирования гипоцентров при $M = 5$, $D = 8$ км. Ось d – проекции радиус-векторов к гипоцентрам на направление j -го вектора нормали.

Каждой найденной группе ставится в соответствие пространственная плоскость, имеющая вектор нормали \mathbf{n}_j , расположенная на расстоянии d_{cp} от начала координат. В созданном ранее динамическом списке $rfound$ сохраняются параметры d_{cp} , \mathbf{n}_j и список гипоцентров, выявляющих плоскость.

Далее, множества гипоцентров, выявляющих плоскость, проходят проверку на совпадения или принадлежность какому-нибудь из множеств, найденных ранее при других, близких ориентациях вектора \mathbf{n} . В случае принадлежности исключаются множества, включающие меньшее число гипоцентров, а при совпадениях исключаются

ются множества, найденные последними. Тем самым исключаются возможные повторы. По каждому из множеств гипоцентров, идентифицирующих плоскость, строился выпуклый многоугольник с вершинами в точках гипоцентров, включающий все гипоцентры множества. Далее вычислялась площадь S многоугольника, как сумма площадей смежных треугольников с вершинами в точках гипоцентров периметра.

После завершения цикла выявления множеств гипоцентров, идентифицирующих плоскости для всех \mathbf{n}_j и параллельных вычислений во всех географически разделенных подобластях, выявляются плоскости с близкими в рамках критериев $\Delta\gamma$ и ΔD параметрами \mathbf{n} , d_{cp} в смежных подобластях. Для исключения возможности идентификации случайного группирования гипоцентров с реально существующей плоскостью необходимо определить - имеет ли плоскость продолжение, ещё хотя бы в одной из смежных подобластей. В случае если плоскость имеет продолжение, то она считается найденной. Далее определяются параметры объединенных плоскостей. К таким параметрам относятся:

- вектор нормали \mathbf{n} и d_{cp} для объединённой плоскости;
- список гипоцентров идентифицирующих плоскость в объединенных подобластях;
- площадь выпуклого многогранника с вершинами на объединённой плоскости;
- угол падения и угол простираения плоскости.

Методика исследования

По описанному алгоритму составлена компьютерная программа [8] на языке Object Pascal. Программа тестировалась с использованием регионального каталога землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН. Отбирались землетрясения энергетического класса не ниже 9, произошедшие с 01.01.1962 по 01.01.2004, 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 27 000 событий. Для вычислений декартовых координат гипоцентров, 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.

В процессе поиска были выбраны следующие критерии-параметры: $D = 6$ км, $M = 50$, $\beta = 5^\circ$. Для найденных плоскостей определялись расстояния от начала координат d и векторы нормали \mathbf{n} верхней полусферы.

В области поиска было найдено 290 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.

Есть основания полагать, что на части из найденных плоскостей гипоцентры группируются случайно, для исключения таких «случайных» плоскостей были предусмотрены дополнительные критерии отбора. Во-первых, плоскости заново отыскивались в независимых подкаталогах. Для их формирования отобранный каталог с гипоцентрами землетрясений был разделен на два подкаталога: «четный» и «нечетный», в один попали записи с нечетными номерами, а в другой - с четными. Поиск плос-

костей осуществлялся в каждом из подкаталогов. При этом поиске параметр M принимался в 2 раза меньшим, чем при поиске по записям всего каталога, поскольку количество гипоцентров сократилось вдвое. В результате, для каждого из каталогов были получены списки с найденными плоскостями. Результаты поиска в «четном», «нечетном» и общем каталоге сравнивались и далее обрабатывались данные только о тех плоскостях, которые оказывались найденными в каждом из подкаталогов. Плоскости считались идентичными, если максимальное расстояние плоскостей друг от друга $\Delta d \leq 10$ км, а угол между нормальными $\alpha_M \leq 10^\circ$.

Во-вторых, использовался дополнительный критерий. Вычислялись и сравнивались пространственные «плотности» количества землетрясений P_{pl} и P_0 . Здесь P_{pl} - плотность в объеме V_{pl} , непосредственно прилегающем к плоскости в пределах ± 5 км, а P_0 - в объеме V_0 в пределах ± 100 км от плоскости. При этом $P_{pl} = N_{pl}/V_{pl}$ и $P_0 = N_0/V_0$, где N_{pl} - количество гипоцентров землетрясений каталога с 2004 по 2009 года попадающих в единицу объема, в пределах ± 5 км, а N_0 - их количество, попадающее за тот же промежуток времени в единицу объема в пределах ± 100 км. Мы полагали, что плоскость, найденная по каталогам до 2004 года, действительно существует в пространстве, если «плотность» P_{pl} оказывается существенно большей, чем P_0 . Коэффициент $k_P = P_0/P_{pl}$ показывает, насколько мала вероятность плоскости, оказаться «случайной». При больших k_P соответствующая вероятность оказывается меньшей. Форма объемов V_0 и V_{pl} принималась цилиндрической. Образующей цилиндра являлся периметр плоскости (рис. 4).

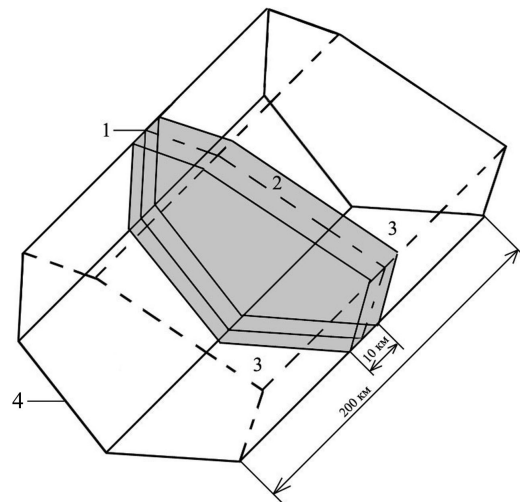


Рис. 4. Цилиндр, для которого найденная плоскость является образующей: 1 – найденная плоскость; 2 – объем V_{pl} , прилегающий к плоскости; 3 – объем V_0 ; 4 – периметр найденной плоскости.

Высота цилиндра принималась равной 200 км, плоскость находилась в центре. Объем части цилиндра, выступающий над земной поверхностью, из всего объема исключался. Объем V_{pl} вычислялся по формуле $V_{pl} = DS_{pl}$. Коэффициент k_P , так же показывает, во сколько раз вероятность попадания гипоцентров в объем толщиной D , прилегающий к плоскости, выше вероятности попадания в 200-километровый «цилиндр».

В объеме плоскость может находиться не одна. В случае если плоскость определялась и в «четном», и в «нечетном» и в общем каталогах гипоцентров, а так же

имела высокий коэффициент $k_p > 4$, подмножество гипоцентров такой плоскости, не являющееся частью других плоскостей, вычиталось из множества гипоцентров объема, в котором она находилась и в расчетах коэффициентов k_p других плоскостей не участвовало. Тем самым исключалось необоснованное завышение или занижение коэффициента k_p всех плоскостей.

Результаты и их обсуждение

Дополнительные жёсткие критерии позволили из 290 плоскостей, найденных с использованием формальных критериев поиска, отобрать лишь 15 плоскостей (рис. 5).

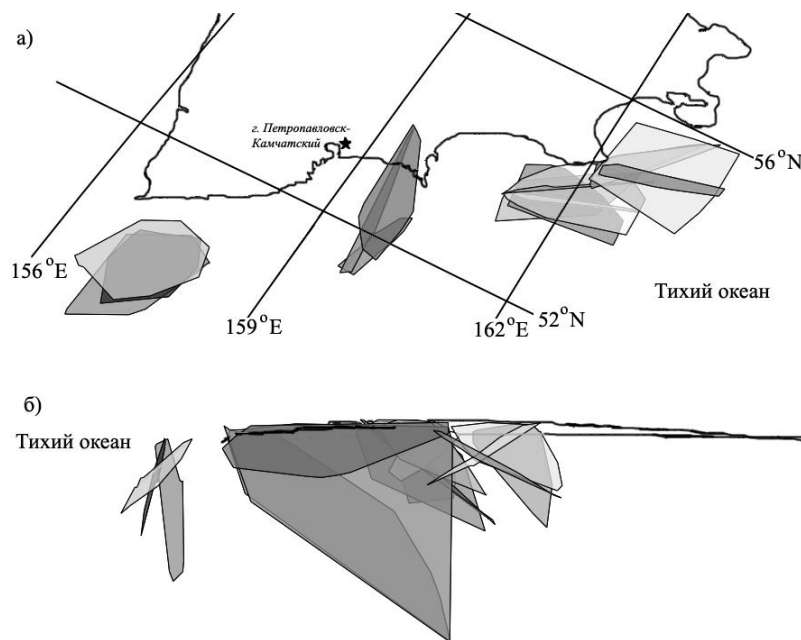


Рис. 5. Общий вид 15 найденных плоскостей (а – вид сверху, б – вид сбоку).

Из них три (первая группа) расположены у южного побережья Камчатки, в районе мыса Лопатка, три плоскости (вторая группа) расположены возле мыса Шипунский, пять плоскостей (третья группа) - в Кроноцком заливе и четыре (четвёртая группа) в Камчатском заливе в области Кроноцкого полуострова (рис. 6).

Плоскости каждой из указанных областей пересекают друг друга. 3 из 15 плоскостей являются частью зоны субдукции. Найденные группы плоскостей разбивают сейсмоактивную зону на области, которые можно трактовать как блоки. Данные результаты согласуются с результатами, полученными ранее другими исследователями [1, 2, 9, 10]. Всего просматривается четыре области (далее нумеруются римскими цифрами I - IV).

Плоскости 1, 2, 3, расположенные на юге полуострова (рис. 6, I), пересекаются между собой, образуя своеобразную «розетку». Такую же, «розетку» формируют плоскости 4, 5, 6, 7, 8 расположенная в районе Кроноцкого полуострова (рис. 6, II), но в последнем случае «розетка» полностью рассечена плоскостью №5 (табл.; рис. 6, III), которую можно трактовать как границу блоков. Продолжение некоторых плоскостей из III области переходит в IV, как например плоскость №8 в III области и №13 в IV.

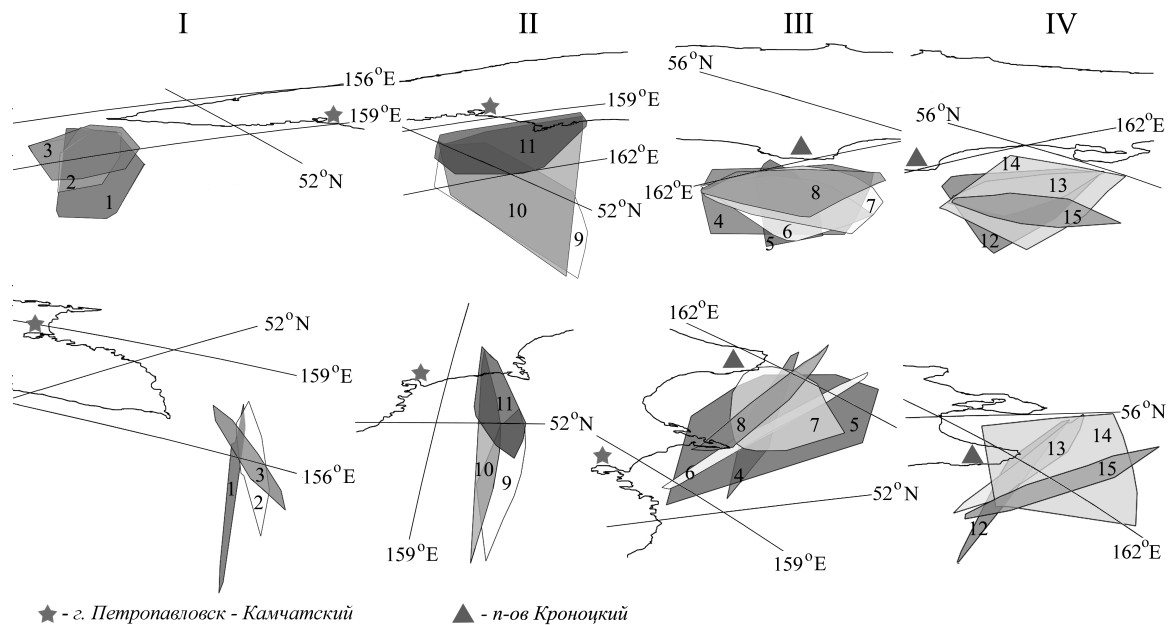


Рис. 6. Структура найденных плоскостей (см. табл.).

№	n_x	n_y	n_z	k_p	DP	STK	S, тыс. км ²	d, км	Кол-во гипоцентров
1	-0.597	0.79	0.14	8.15	82	323	11.4	-93	185
2	0.407	-0.881	0.242	4.24	76	155	6	181	127
3	0.429	-0.621	0.656	4.17	49	145	8.1	55.5	143
4	-0.721	0.666	0.191	9.62	79	313	9.6	41.4	251
5	0.295	0.909	0.292	15.88	73	18	9	38.4	166
6	-0.301	0.521	0.799	8.22	37	330	15	-0.1	174
7	0.387	-0.461	0.799	10.49	37	140	8	-54	219
8	-0.494	0.411	0.766	10.64	40	310	11	9.6	379
9	-0.91	0.233	0.342	7.42	70	284	18.7	85.4	200
10	-0.994	-0.104	0.035	6.13	87	265	31.5	172	200
11	0.755	0	0.656	8.64	49	90	10.6	-133	184
12	-0.708	0.514	0.485	4.86	61	306	9	48.4	139
13	-0.545	0.254	0.799	5	37	295	9.2	-1	128
14	0.179	-0.483	0.857	4.67	31	159	11	-91	184
15	-0.25	0.397	0.883	5.83	27	328	13	17	143

Плоскость №6 в III области имеет, параллельную себе плоскость и в IV области №15. Таким образом, каждая из областей состоит из блоков, напоминающих по форме многогранные призмы и пирамиды различной формы. К примеру, в области II плоскости 9, 10, 11 очерчивают пирамиду с треугольным основанием. В свою очередь, плоскости «розеток» других областей можно рассматривать как грани блоков – призм более сложных форм. Вероятно, что геометрия каждой из «розеток» указывает на особенности движения литосферных плит в месте их сочленения. Можно предположить, что ориентации осей пересечения плоскостей (осей «розеток») – отражают особенности напряжённого состояния среды в соответствующих областях.

Заключение

В работе описан алгоритм и результаты тестирования компьютерной программы поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров Камчатских землетрясений ГС РАН. Предложен и использован критерий, позволяющий минимизировать вероятность отбора плоскостей со случайным группированием гипоцентров. Выявлен ряд плоскостей. Представлены параметры найденных плоскостей: углы падения, простирания, площади и др.

Алгоритм и реализующая его программа продемонстрировали свою работоспособность. 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.

Библиографический список

1. Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сегментация Камчатской зоны суб-дукции и оценка сейсмической активности сегментов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. Вып. 15. С. 69 – 89.
2. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 151 с.
3. Кейлис-Борок В.И., Габриэлов А.М., Левшина Т.А., Шапошников В.А. Блоковая модель динамики литосферы // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 192. С. 168 – 178.
4. Кролевец А.Н. Иерархическая модель активной геофизической среды // Вулканология и сейсмология. 2003. №6. С. 71-80.
5. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск – Камчатский, 2004. С. 11 – 42.
6. 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. 2006. С. 21-28.
7. 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.
8. Кролевец А.Н., Макеев А.М. Компьютерная программа поиска плоскостей группирования гипоцентров землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции // ГС РАН. Петропавловск-Камчатский. 2010. С. 358-362.
9. Селиверстов Н.И. Структура сейсмофокальной зоны Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1 (9). С. 10-26.
10. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмологическое районирование СССР. Москва. 1968. С. 121-150.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 26.11.2011