

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОКОНТУРИВАНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ
ОБЛАСТЕЙ С НАСТРАИВАЕМЫМИ СРЕДСТВАМИ ВВОДА/ВЫВОДА
И АППРОКСИМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ВЫБОРКИ
ГИПОЦЕНТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПЛОСКОСТЬЮ**

А.Н. Мансуров, Н.А. Сычева

Анализируются методы и средства оконтуривания сейсмоактивных областей и аппроксимации пространственно-локализованной выборки гипоцентров сейсмических событий плоскостью. Продемонстрирована возможность выполнения такой обработки каталога сейсмических событий по данным Киргизской сейсмологической сети (KNET) при помощи специально разработанного программного пакета SeismopointsContour.

Ключевые слова: программа; алгоритм; землетрясение; выборка; оконтуривание; область; плоскость; аппроксимация

Введение. Сейсмический процесс тесно связан с разломными зонами, которые чаще всего являются зонами разрядки упругих напряжений. По расположению сейсмических событий вдоль разлома можно оценить некоторые его пространственные характеристики. Эта задача требует инструмента, позволяющего оконтуривать некоторую область расположения сейсмических событий, формировать соответствующую выборку и аппроксимировать ее плоскостью. Существует большое количество программных систем, решающих задачи оконтуривания и аппроксимации точек плоскостью в том или ином виде. Однако все они либо – для решения данной задачи в ходе других расчетов, либо изначально приспособлены для широкого круга задач, что затрудняет их настройку и использование. В работе продемонстрирована аппроксимация плоскостью области концентрации сейсмических событий вдоль разломной зоны с помощью специально разработанного программного комплекса.

Теоретическая часть и методика

Оконтуривание точек – определение принадлежности точек замкнутому многоугольнику (контур), посредством определения количества оборотов точки, обходящей контур, вокруг оконтуриваемой точки. Метод основывается на том, что точка, движущаяся по замкнутой кривой (пройдя все точки кривой ровно 1 раз) совершает вокруг всех точек внутри этой кривой оборот в $\pm 2\pi$, а вокруг точек вне этой кривой – оборот в θ . При этом при движении по отрезку прямой величина оборота по модулю всегда меньше π , что позволяет однозначно определять его величину по положению начала и конца отрезка при помощи обратных тригонометрических функций. Если A – комплексное число, определяющее положение оконтуриваемой точки, а B – вектор из n комплексных чисел, описывающих вершины многоугольника, а аргумент рассчитывается из условия $-\pi < \arg(z) \leq \pi$, то принадлежность точки A многоугольнику B выражается как:

$$P(A, B) \Leftrightarrow \sum_{i=0}^{n-1} [\arg(B_{(i+1) \bmod n} - A) - \arg(B_i - A)] = \pm 2\pi. \tag{1}$$

Алгоритм оконтуривания. Входные параметры:

- *const Point *this* – точка, для которой проверяется принадлежность фигуре,
- *const Point *a* – массив точек – вершин прямоугольника,
- *int fig_pnt_cnt* – количество точек в массиве a .

Выходные параметры:

- *returns* – 1, если точка **this* принадлежит фигуре (a, fig_pnt_cnt), иначе 0.

Блок-схема этого алгоритма представлена на рис. 1.

Уточнение положения гипоцентров. Как известно, скоростная модель литосферы позволяет оценить время пути сейсмического луча от источника до регистрирующей станции. В реальности же структура Земли намного сложнее, чем ее описывает любая скоростная модель. Поэтому в рассчитанном времени пробега волны от события к сейсмической станции появляются ошибки вследствие отклонения скоростной модели от строения и свойств реальной среды. Для сглаживания подобного рода несоответствий и корректировки гипоцентров используется метод двойных разностей (МДР), идея и технология применения которого подробно изложена в [1, 2]. Для обработки данных в рамках исследования использовалась готовая реализации метода двойных разностей – программа НутоDD, разработанная Феликсом Валдхаузером (Felix Waldhauser) [3, 4].

Аппроксимация множества точек плоскостью – построение в пространстве плоскости таким образом, чтобы значения определенного критерия для этой плоскости и данного набора точек было минимальным. Обычно в качестве критерия выбирается некоторая функция от расстояния от каждой из точек до плоскости.

Однако если в качестве критерия выбрать, например, сумму квадратов расстояний от точек до плоскости, то такой критерий окажется очень сложным для обработки аналитическими методами. Поэтому было принято компромиссное решение: методом перебора подобрать такой поворот системы

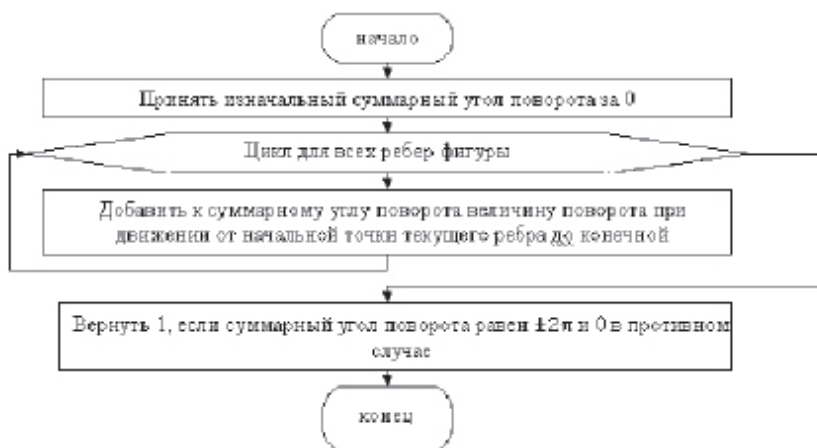


Рис. 1. Блок-схема работы алгоритма оконтуривания по методу 2

координат, чтобы в новой системе координат аппроксимирующая плоскость была близка к плоскости Oxy , а в качестве критерия выбрать сумму квадратов разностей аппликат множества точек и их проекций на аппроксимирующую плоскость вдоль оси z . Это позволяет применить регрессионный анализ (Метод наименьших квадратов [5, 6]) для поиска аппроксимирующей плоскости.

Для поворота точки вокруг начала координат по углам Эйлера α , β и γ следует умножить матрицу поворота (2) на ее радиус-вектор (3) [7].

$$M(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = M(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для получения уравнения плоскости, аппроксимирующей множество точек в виде $z = ax + by + c$ требуется решить систему уравнений (4), где $S(f(x, y, z))$ – сумма указанных функций координат всех точек множества.

$$\begin{aligned} a \cdot \sum(x^2) + b \cdot \sum(xy) + c \cdot \sum(x) &= \sum(x \cdot z) \\ a \cdot \sum(xy) + b \cdot \sum(y^2) + c \cdot \sum(y) &= \sum(y \cdot z) \\ a \cdot \sum(x) + b \cdot \sum(y) + c \cdot \sum(1) &= \sum(z) \end{aligned} \quad (4)$$

При обратном повороте плоскости ее уравнение в виде $Ax + By + Cz = D$ получается путем упрощения выражения (5), где A_R, B_R, C_R, D_R – параметры уравнения плоскости $Ax + By + Cz = D$ после применения к ней поворота по матрице $M(\alpha, \beta, \gamma)$.

$$\begin{bmatrix} A_R & B_R & C_R \end{bmatrix} \cdot M(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = D_R \quad (5)$$

Программный комплекс Seismopoints Contour включает в себя следующие возможности:

- Оконтурирование:
 - ☞ наглядное отображение карты расположения сейсмических событий (точек), подлежащих оконтурированию и контура;
 - ☞ удобство задания контура пользователем;
 - ☞ сохранение контура для последующего использования;
 - ☞ сохранение выборки, выделенного контура;
 - ☞ гибкость в отношении форматов входных файлов (каталогов).
- Аппроксимация:
 - ☞ наглядное отображение множества точек и аппроксимирующей плоскости в трехмерном пространстве;
 - ☞ расчет и вывод углов азимута и наклона аппроксимирующей плоскости и точки, чрез которую она проходит.

Входными данными для комплекса является файл с каталогом событий и графический файл расположения точек (карта) с привязкой к координатам, согласно которым далее осуществляется выбор из каталога. Для универсализации программы введена открытая архитектура с поддержкой плагинов ввода-вывода (*плагин* к программе – это библиотека, разработанная отдельно от программы, добавляющая программе новые возможности или изменяющая интерфейс). Поэтому программа способна работать с любым форматом входного файла после написания соответствующего плагина. В качестве *выходных данных* выступают положение и параметры аппроксимирующей плоскости.

Комплекс состоит из основной программы (*point_in_fig*), библиотек-плагинов для нее и скрипта для системы Matlab (*approximate_3d_points*), который осуществляет аппроксимацию точек плоскостью и вычисляет ее положение в пространстве. Основная программа имеет графический пользовательский интерфейс, а плагины предоставляют ей функции ввода. Matlab-скрипт запускается после осуществления выборки основной программой и дополнительной обработки этой выборки. Ниже описаны некоторые алгоритмы, которые были использованы в основной программе.

Программа point_in_fig. Основная форма программы представлена на рис. 2. Большую часть формы занимает рабочая область с текущей картой, которая при ее наличии в рабочем пространстве пользователя загружается автоматически или может быть загружена после вызова программы. В качестве такой карты на рис. 3 представлена территория Тянь-Шаня и расположение сейсмических событий, зарегистрированных сетью KNET за 1994–2008 гг. В левой части формы расположена панель элементов управления. Верхняя часть панели обеспечивает возможность загрузки графического файла и настройки значений ее конечных координат (широта и долгота). Остальная часть панели позволяет управлять процессом оконтуривания и сохранять конечный результат.

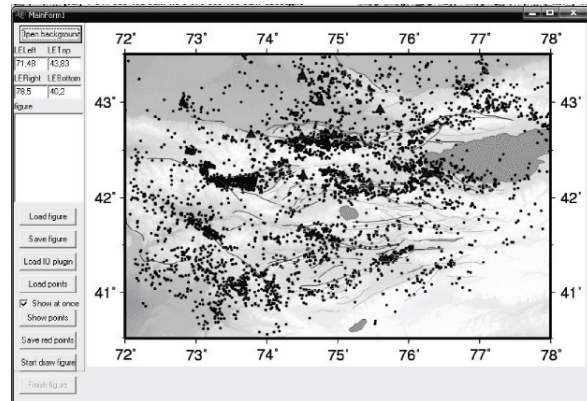


Рис. 2. Главная форма программы

Пример использования программы

- При необходимости загрузить новую карту и указать координаты вершин (Open background – слева на главной форме).
- В случае нестандартного формата файлов с входными точками загрузить необходимый плагин нажатием кнопки Load plugin.
- Загрузить список точек из файла (Load points).
- Переключиться в режим ввода фигуры и задать необходимый многоугольник (Start draw figure).
- Завершить процесс ввода фигуры (Finish figure).
- Нажать кнопку Show points (если флажок Show at once не установлен).
- Сохранить список точек нажатием кнопки Save red points.
- Если необходимо обработать другие фигуры, вернуться к шагу 4.

Проведено функциональное тестирование разработанного программного обеспечения, которое проводилось на основе каталога сейсмических событий, полученного по данным сети KNET, установленной на территории Кыргызстана. Вид фрагмента окна программы на момент тестирования представлен на рис. 3а, который показывает события из каталога (черный цвет) и события, выделенные в некоторой области (серый цвет). На рис. 3б показана зона выделенных событий, имеющая более сложную форму. Как видно на рис. 3 алгоритм определения принадлежности точек многоугольнику работает хорошо как для выпуклых, так и для невыпуклых многоугольников.

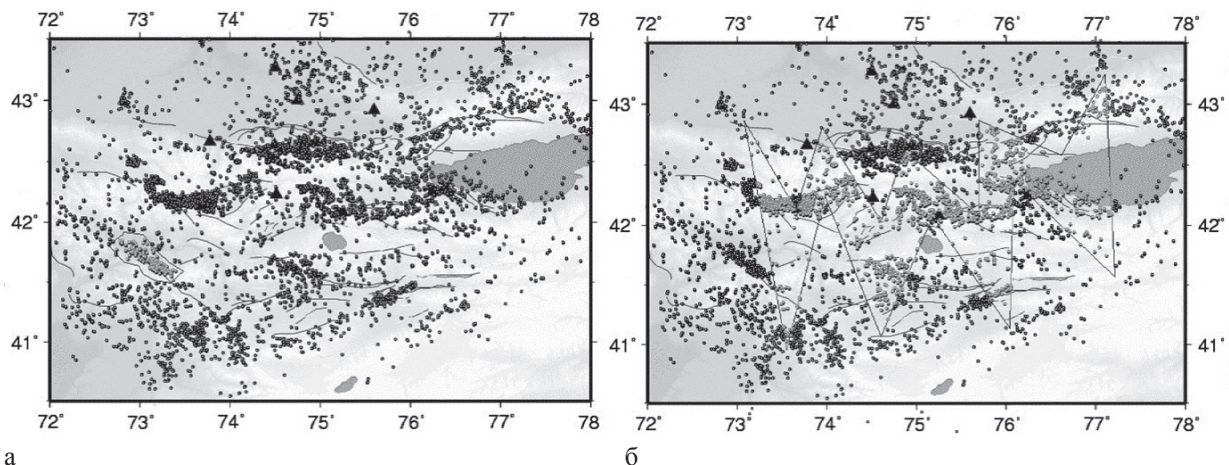


Рис. 3. Пример выделения событий из каталога по данным сети KNET:
а – область в районе Таласско-Ферганского разлома; б – произвольная область

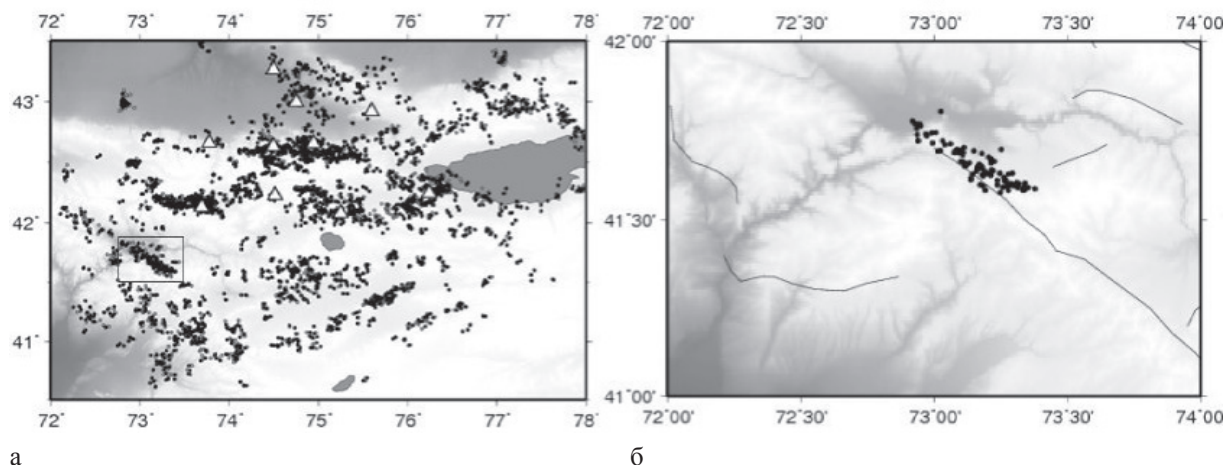


Рис. 4. Выборка гипоцентров событий в северо-западной части Таласско-Ферганского разлома [8]: а – расположение выделенной зоны на территории Тянь-Шаня; б – события, попавшие в выделенную зону

Пример вывода программы `point_in_fig` для множества гипоцентров, находящихся в северо-западной части Таласско-Ферганском разлома представлен на рис. 4.

Matlab-скрипт `approximate_3d_points`. Как было отмечено, разработанный скрипт выполняется в среде Matlab, в результате строится графическое отображение множества точек и аппроксимирующей плоскости, а также определяются параметры, характеризующие положение этой плоскости в пространстве (азимут и угол наклона). Для запуска скрипта необходимо подготовить файл со списком положений гипоцентров в формате <широта> <долгота> <глубина> и передать его имя как параметр функции `approximate_3d_points`. Пример вывода скрипта представлен на рис. 5. Географические координаты начала отсчета – 41.6565, 73.1584. Азимут плоскости – 120° , наклон – 37° от оси Oz .

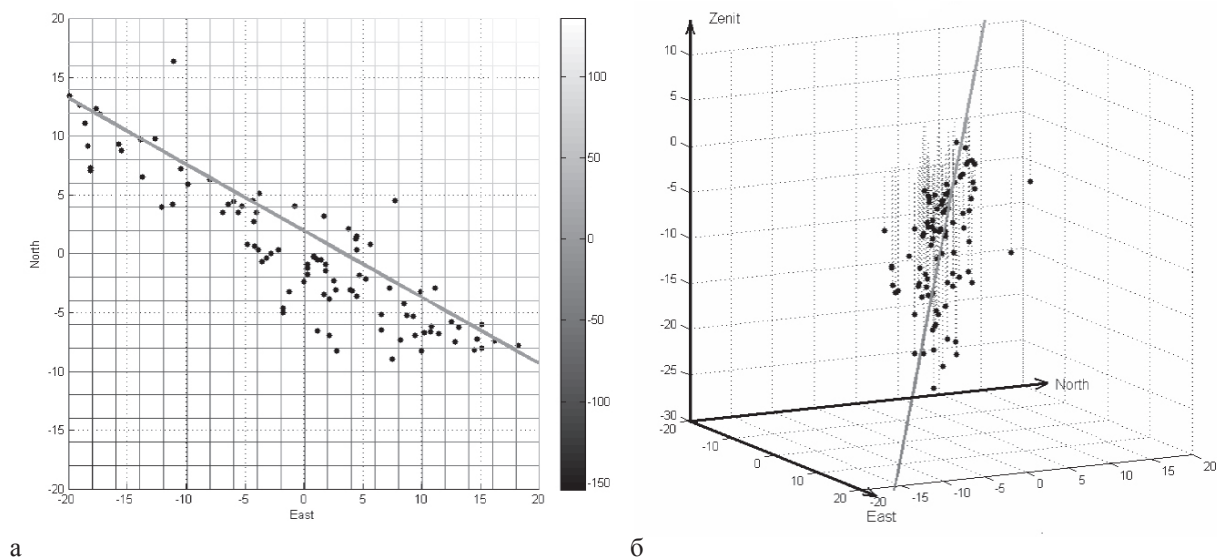


Рис. 5. Аппроксимация гипоцентров событий в северо-западной части Таласско-Ферганского разлома [7]: а – вид в плоскости Оху, черные маркеры – гипоцентры событий, градиентно-окрашенная решетка – аппроксимирующая плоскость, глубина увеличивается от белого к черному, серая линия – пересечение плоскости с уровнем мирового океана; б – вид вдоль аппроксимирующей плоскости

Показана возможность решения некоторых задач взаимосвязи сейсмичности и разломообразования, с помощью разработанного программного комплекса. Комплекс позволяет осуществлять выборку точек из каталога по признаку принадлежности задаваемому пользователем многоугольника, наглядно отображать точки, фигуру и выборку поверх любого изображения в произвольном масштабе, а так же аппроксимировать плоскостью сформированный набор сейсмических событий.

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы №1 фундаментальных исследований Президиума РАН “Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID” и Государственного контракта №02.740.11.0730 федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”, а также по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 09-05-0687-а.

Литература

1. *Waldhauser F. and Ellsworth W.L.* A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Hayward Fault, California // *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90. 1353–1368. 2000.
2. *Waldhauser F. and Ellsworth W.L.* Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations // *J. Geophys. Res.* 2001.
3. *Waldhauser F.* HypoDD: A computer program to compute double-difference hypocenter locations. // *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.* 01-113. 25 P. 2001.
4. <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of01-113/>
5. <http://www.delphinkingdom.com/asp/viewitem.asp?catalogid=1368>
6. *Корн Г. и Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. Раздел 20.8-5 Метод наименьших квадратов.
7. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961. 824 с.