

Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, С.Л. Юнга

ГЕОИНФОРМАТИКА В СТАТИСТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЕТАМ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Введение

В последние годы получили широкое распространение работы по изучению сейсмотектонического деформирования земной коры с использованием данных о механизмах очагов землетрясений. Начало этим работам положили развитые Ю.В. Ризниченко представления о сейсмическом течении горных масс как о результате усреднения множества подвижек, каждая из которых происходит при возникновении отдельного сейсмического события [1, 2]. В этих и последующих работах [3-8] был развит статистический подход, позволяющий перейти от смещений непосредственно в очагах, т.е. по месту разрывов сплошности, к деформации некоторого объема, охватывающего все эти очаги. Результирующая усредненная деформация обусловлена совокупностью очаговых подвижек (землетрясений), и ее предложено называть сейсмотектонической деформацией (СТД). Расчет параметров очагов и усредненных величин СТД, характеризующих деформацию объема геосреды, представляет собой весьма трудоемкую процедуру. К настоящему времени предложено несколько вариантов рационального выполнения расчетов СТД [4, 5, 9]. В недавних работах по этому вопросу, было обращено внимание на то, что для характеристики СТД коры сейсмоактивных регионов способы представления результатов расчета тензорных параметров СТД в наглядной и компактной форме важны в такой же степени, как и сами статистические расчеты [5, 9, 10]. Настоящая работа синтезирует описание программного продукта для выполнения статистических расчетов СТД с изложением используемых средств визуализации получающихся распределений СТД, включая элементы ГИС – картографирование. Представлены некоторые результаты исследований СТД с применением созданного программного комплекса (на примере Северного Тянь-Шаня). Программное обеспечение разрабатывалось в связи с задачами современной геодинамики. Однако в силу его особенностей (вовлечение событий умеренной или даже слабой силы при относительно небольшом числе станций), оно может быть адаптировано и для задач контроля горно-тектонических ударов, техногенной сейсмичности при взрывных работах на карьерах или откачке/закачке скважин.

Методика исследований.

Не останавливаясь здесь на физических и теоретических предпосылках расчета скорости деформаций, перейдем к изложению расчетных формул, изложенных в последних работах С.Л. Юнга [5, 10].

Выражение для тензора скорости сейсмотектонической деформации ϵ_{ij} [1] определяется суммой тензоров сейсмических моментов, нормированных на время, объем и модуль сдвига:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{\mu VT} \sum M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (1)$$

где μ – модуль сдвига; V – элементарный объем; T – период исследования; $M_0^{(\alpha)}$ – сейсмический момент землетрясения с номером (α) ($\alpha = 1, 2, \dots, N$); N – общее число событий, m_{ij} – направляющий тензор механизма.

Каждый рассматриваемый механизм $m_{ij}^{(\alpha)}$ характеризуется ориентировкой главных осей растяжения $t^{(\alpha)}$ и сжатия $p^{(\alpha)}$.

$$m_{ij}^{(\alpha)} = (t_i^{(\alpha)} t_j^{(\alpha)} - p_i^{(\alpha)} p_j^{(\alpha)}) / 2 \quad (2)$$

где $t^{(\alpha)}$ и $p^{(\alpha)}$ – единичные вектора, компонентами которых являются направляющие косинусы осей растяжения и сжатия индивидуального механизма землетрясения.

Компоненты единичных векторов t и p (номер α далее явно не указан, но подразумевается) в географической системе координат X_1, X_2, X_3 , где ось X_1 направлена вертикально вверх, ось X_2 – по меридиану на север, ось X_3 – на восток, выражаются через параметры сферической системы координат следующим образом:

$$\begin{aligned} t_1 &= \cos \varphi_t \\ t_2 &= \sin \varphi_t \cos \alpha_t \\ t_3 &= \sin \varphi_t \sin \alpha_t \\ p_1 &= \cos \varphi_p \\ p_2 &= \sin \varphi_p \cos \alpha_p \\ p_3 &= \sin \varphi_p \sin \alpha_p \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_t и φ_p – углы с вертикалью осей растяжения t и сжатия p , α_t и α_p – азимутальные углы этих же осей, отсчитываемые от направления на север по часовой стрелке. Здесь оси растяжения t и сжатия p берутся в верхней полусфере.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях вместо этого выражения можно попытаться использовать следующее [5].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \cdot \langle m_{ij} \rangle = I_{\Sigma} \langle m_{ij} \rangle, \quad (4)$$

здесь $\langle m_{ij} \rangle$ – матрица среднего механизма,

$$\langle m_{ij} \rangle = \frac{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}}{\sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)}}$$

где $w = w^{(\alpha)}$ – весовая функция, а I_{Σ} (интенсивность) определяется выражением:

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)}. \quad (5)$$

Отдельные компоненты тензора средней сейсмотектонической деформации дают представление об изменении размеров ячейки осреднения в направлении координатных осей или их формы в соответствующих координатных плоскостях. Однако по этим данным достаточно трудно представить себе деформацию элементарной ячейки в целом. Обойти эту трудность позволяет использование некоторых параметров, описывающих характер деформирования в рамках теории упругости, в частности коэффициента Лоде-Надаи. Коэффициент Лоде-Надаи, введенный в сейсмологическую практику в работах [5, 11] определяет вид деформации и выражается через главные значения тензора деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ следующим образом:

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}. \quad (6)$$

Коэффициент Лоде-Надаи может выступать в качестве статистической характеристики. В случае, когда рассеяние осей t вокруг их среднего положения, определяемого осью T , существенно меньше (больше) рассеяния осей p вокруг оси P , коэффициент Лоде-Надаи равен -1 ($\mu_{\varepsilon} = +1$) и имеет место процесс деформирования типа одноосного растяжения (сжатия). При таком деформировании вдоль определенного осью T (осью P) направления происходит максимальная по величине деформация, а по любому направлению, ортогональному указанному, деформация вдвое меньше по величине и имеет другой знак. В другом случае, при котором распределение осей $\{t\}$ относительно главных осей среднего механизма (T, B, P) в точности такое же, как и распределение осей $\{p\}$ относительно осей (P, B, T), коэффициент Лоде-Надаи равен нулю, и реализуется процесс деформирования типа чистого сдвига. Таким образом, коэффициент Лоде-Надаи позволяет количественно выразить распространен-

ные качественные представления о связи с видом деформации характера распределения осей и по отношению к их средним положениям. И так, при $\mu_{\varepsilon} = 1$ деформация имеет вид простого сжатия, при $\mu_{\varepsilon} = -1$ деформация имеет вид простого растяжения при $-0,2 < \mu_{\varepsilon} < 0,2$ имеет деформацию сдвига.

Классификация режимов сейсмотектонической деформации

Для классификации режимов сейсмотектонической деформации в работе Юнга С.Л. [10] представлена следующая схема классификации, в которой выделяется 11 режимов (см. рис. 1).

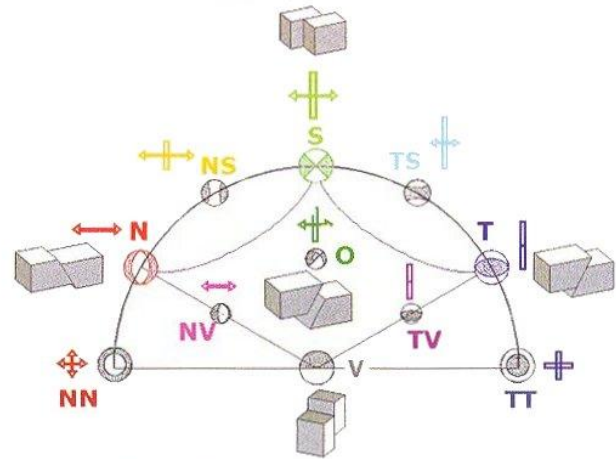


Рис. 1. Классификации режимов сейсмотектонической деформации

В первую очередь учитываются четыре основных режима: сжатия T (от англ. Thrust fault), растяжения N (от англ. Normal fault), сдвиговый S (от англ. Strike-slip fault), перерезывающий или вертикальный взрез/срез V (от англ. vertical fault). Два режима могут характеризоваться как предельные: двустороннего сжатия TT (формируется как бы двумя разрывами типа взбросов – Thrust fault) или растяжения NN (формируется как бы двумя разрывами типа сбросов – Normal fault). Одна деформационная обстановка, отвечающая режиму косоугольного сдвига O (от англ. oblique fault), может рассматриваться как переходная от вертикального режима к сдвигу и в некотором роде является нейтральной, поскольку в равной степени отстоит от четырех основных режимов. Наконец, выделяются четыре других переходных режима: два переходных от вертикального режима к обстановке сжатия TV или растяжению NV (от англ. undertensional) и два переходных режима от сдвига к сжатию ST (в английской терминологии – transpressional) или растяжению SN (в английской терминологии – transtensional). Здесь основные режимы выделены одним символом, предельные – двумя повторяющимися, и переходные – двумя неповторяющимися.

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка удобного инструмента для расчета СТД, который позволил бы не только проводить сложные математические расчеты СТД, а также визуализировать эти расчеты на основе современной классификации режимов СТД с привязкой к топографической основе. Приведенная на рис. 1. система классификации и соответствующие обозначения в дальнейшем должны быть использованы при картировании сейсмотектонической деформации. Все это позволит в дальнейшем их использования в ГИС.

При исследовании геодинамических процессов важно не только рассчитать и картировать СТД, но так же важно оценить сейсмический режим исследуемой территории. Поэтому требования к интерфейсу программного продукта были расширены до построения различных карт сейсмичности с возможностью отображения различных географических, геологических и геофизических объектов (реки, озера, разломы, измерительные пункты и т.д.).

Проектирование системы

Для создания модели системы использовался унифицированный язык моделирования (UML) [12] и для ее разработки была выбрана среда Rational Rose. В качестве языка программирования был выбран C# – новый объектно-ориентированный язык программирования [13, 14], во многом унаследованный от C++ и Java. В него входит много полезных особенностей – простота, объектная ориентированность, типовая защищенность, «сборка мусора», поддержка совместимости версий и многое другое. Данные возможности позволяют быстро и легко разрабатывать приложения.

Visual Studio.NET инструмент, представляющий собой комбинацию нескольких продуктов (Visual C++, Visual Basic, Visual InterDev и Visual J++), стал одним из самых популярных средств разработки. Visual Studio позволяет создавать приложения для целого ряда платформ: Win32, MFC, COM, ActiveX, Active Template Library (ATL), Java, DirectX и для Web. На этом основании в качестве среды программирования была использована Visual Studio.NET.

Разделение процесса исследования на анализ сейсмичности и на расчет и картирование СТД позволил разработать две диаграммы вариантов использования системы, которые позволяют моделировать диалог между активным субъектом и системой и отображают функции последней, предоставляемые в распоряжение субъекта. В качестве такого субъекта на схемах представлен сейсмолог, пользующийся разработанным программным продуктом.

Диаграммы, представленные на рис. 2 и рис. 3 легли в основу разрабатываемой системы.

Режим построения карт сейсмических событий

Для этого режима были определены следующие варианты использования (рис. 2):

- создать пустую карту в конической проекции. Карта может быть создана в единственном экземпляре (1);
- добавить сейсмические события из каталога на карту. Одновременно можно работать только с одним каталогом (1);
- добавить легенду магнитуды. Опция доступна, только если на карту уже были добавлены сейсмические события;
- добавить легенду глубины. Опция доступна, только если на карту уже были добавлены сейсмические события;
- добавить объект. На карту может добавляться любое количество объектов (0...1);
- добавить контур. На карту может добавляться любое количество контуров (0...1).

В любой момент можно отредактировать, добавленный на карту элемент, пользуясь теми же формами настройки параметров, что и при добавлении. Программа так же позволяет удалять содержащиеся на карте элементы.

Режим построения карт сейсмотектонических деформаций

Диаграмма, представленная на рис. 3 содержит несколько вариантов использования, которые включены в предыдущую схему, поэтому остановимся только на отличиях в этих схемах.

– Добавить СТД на карту – добавить на карту визуальный результат расчета СТД, используя для отображения схему классификации режимов СТД. Расчет СТД включает в себя варианты использования «Расчитать по методу скользящего окна» и «Расчитать по методу узловых точек», каждый из которых в свою очередь включает в себя варианты использования «Использовать значение сейсмического момента для определения веса» или «Использовать весовую функцию».

Выбор метода расчета СТД скользящим окном требует от пользователя задание размера окна и шаг сдвига. Это оправдано, если в каждое из таких окон попадает достаточное число сейсмических событий. При этом результат отображения привязывается к точке, которая является центром окна.

Метод узловых точек требует предварительного их определения перед началом работы. В качестве узловых точек могут быть координаты крупных землетрясений на этой территории, репера других геофизических методов (например, GPS пункты

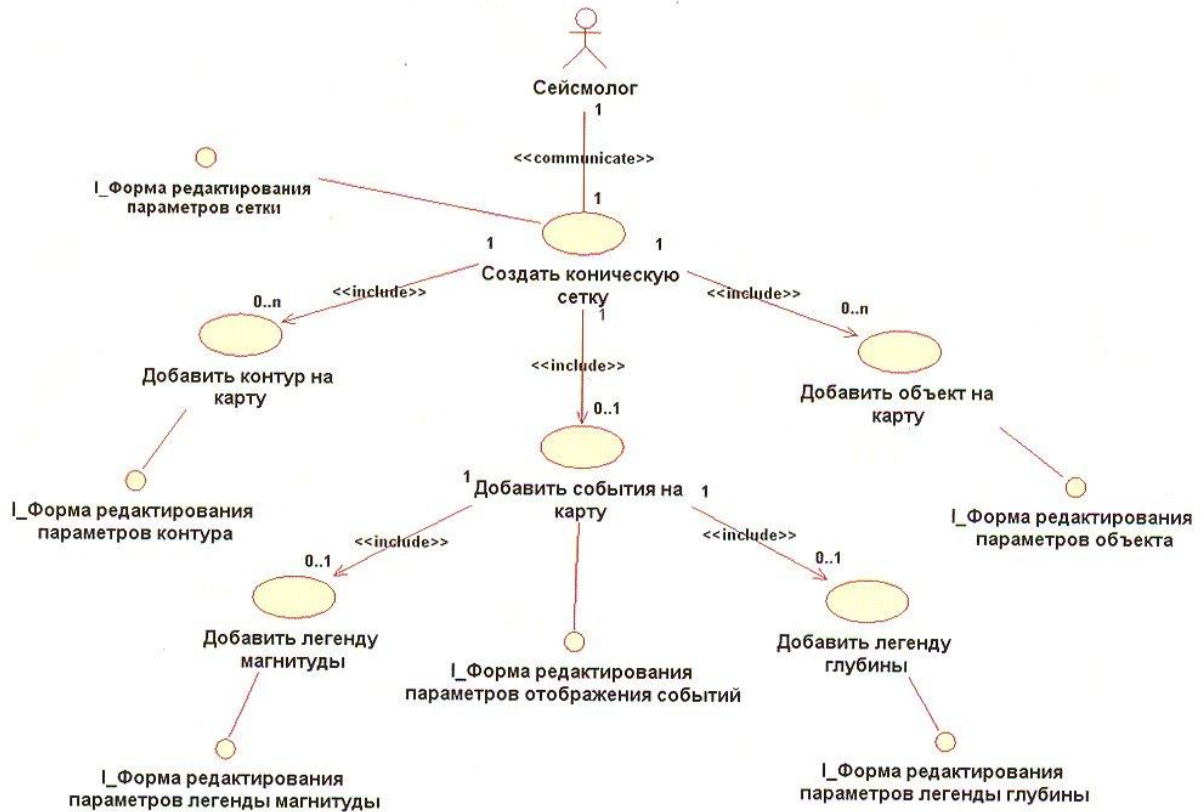


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования режима построения карт сейсмических событий

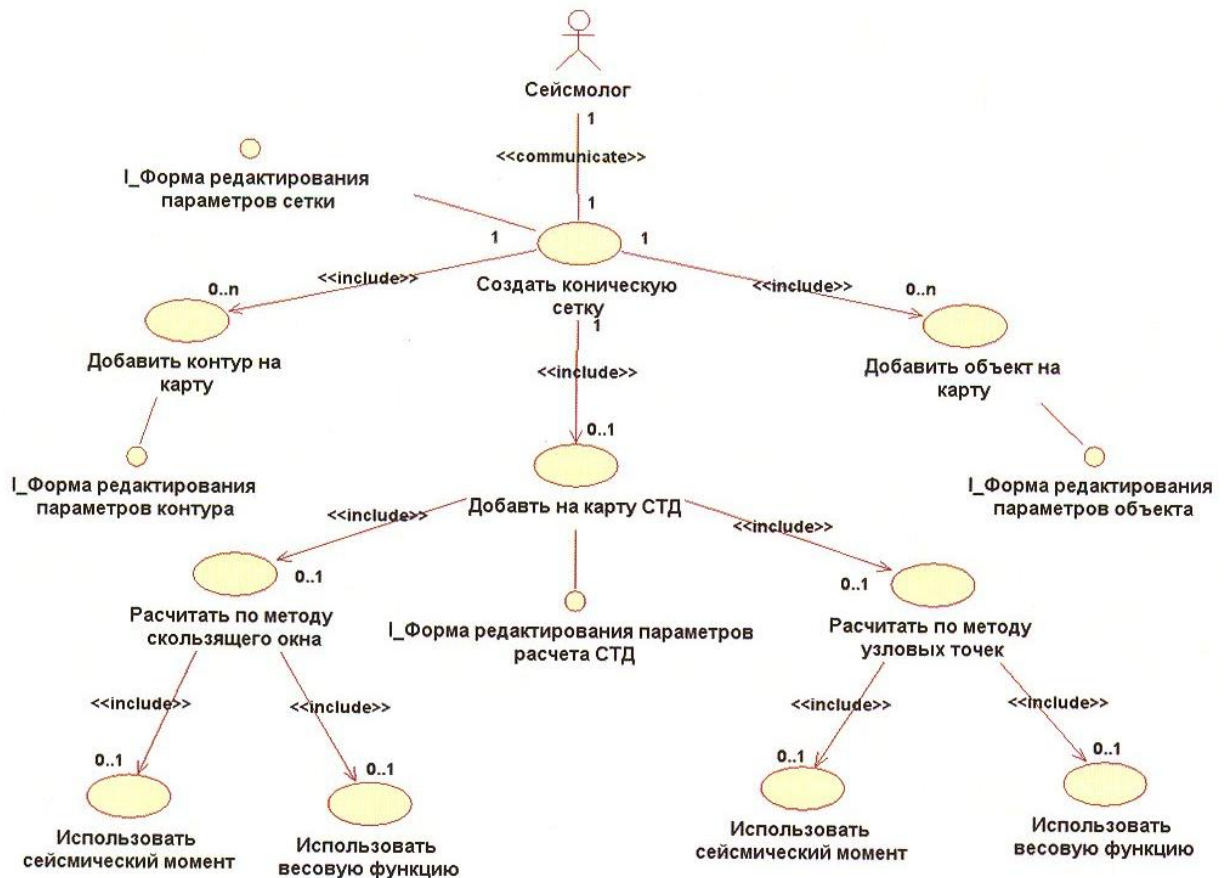


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования режима построения карт сейсмотектонических деформаций

рис. 4) и др. Тогда весь расчет ведется по круговой области с радиусом R и с центром, координаты которого совпадают с координатами узловой точки и к ней же привязывается результат расчета. Величина R задается пользователем во время работы программы по запросу.

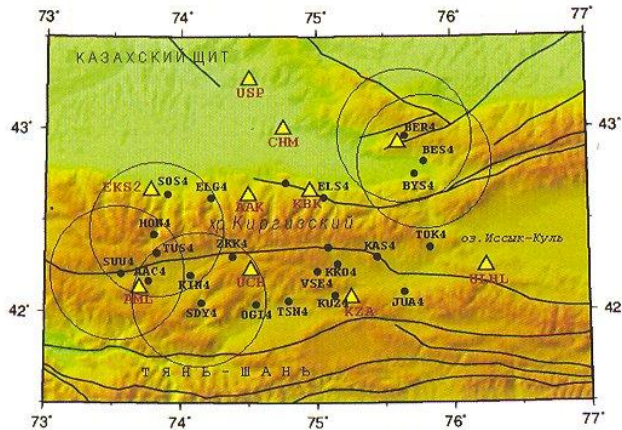


Рис. 4. Пример набора узловых точек (пункты GPS) для расчета СТД. Окружности – области расчета

Результат расчета СТД во многом зависит от выбора методики определения веса для каждого события при расчете среднего механизма и может зависеть от фактуры исследуемого материала. В работах [1, 2] Ризниченко Ю.В. предлагает в качестве веса использовать значение сейсмического момента. В работе [10] была описана методика определения весовой функции на основании исследования механизмов очагов по всему земному шару. Используя эту методику, каждый исследователь может определить региональную весовую функцию и в дальнейшем использовать ее при расчете СТД.

Потоки данных

Режим построения карт сейсмических событий. На рис. 5 представлена структура входных данных используемых для построения карты сейсмичности и там же представлены выходные данные, которые могут быть получены при построении карты.

Входные данные.

1. **Начальные параметры карты** представлены в конфигурационном файле EventsMap.config, который содержит начальные установки параметров карты:

1. Нижняя граница карты по широте.
2. Верхняя граница карты по широте.
3. Нижняя граница карты по долготе.
4. Верхняя граница карты по долготе.
5. Масштаб карты.

Пример такого файла приведен ниже:

```

altitudeN 43.50
latitudeS 41.50
longitudeE 77.00
longitudeW 73.00
centralMer 75.00
scale 2
    
```

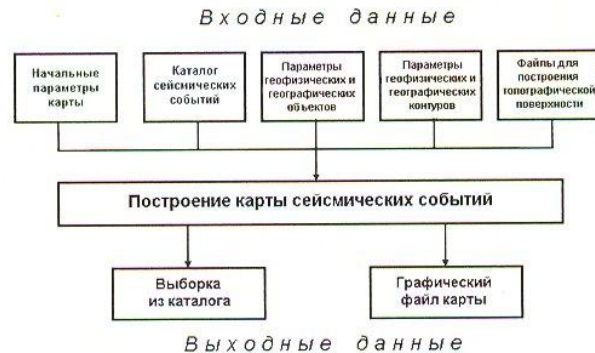


Рис. 5. Структура входных данных, используемых при построении карты сейсмических событий и возможные выходные данные, которые могут быть сформированы после выполнения режима построения

2. **Каталог сейсмических событий.** Требования к каталогу сейсмических событий:

- формат – текстовый (Юникод);
- колонки разделены пробелом или знаком табуляции;
- наличие заголовочной строки. Заголовочная строка должна содержать заголовки полей: **Дата, Широта, Долгота, Глубина, Класс и/или Магнитуда.** Последовательность колонок не имеет значения. Наличие дополнительных полей допускается, их порядок не имеет значения.

3. **Параметры географических и геофизических объектов.** В качестве таких объектов могут быть координаты городов, измерительных станции и др. информация. Требования к файлу:

- формат – текстовый (Юникод);
- колонки разделены пробелом или знаком табуляции;
- заголовочная строка – отсутствует;
- порядок колонок: Широта Долгота. Любой объект, который отображается на карте, имеет координаты – широту и долготу (выбор графического представления объекта производится в самой программе).

4. **Параметры географических и геофизических контуров.** В качестве контуров могут быть реки, контуры озер, разломы и др. информация. Требования к файлу:

- формат – текстовый (Юникод);
- колонки разделены пробелом или знаком табуляции;

- заголовочная строка – отсутствует.
- порядок колонок: Широта Долгота. Любой файл контура, должен содержать список координат (широты и долготы), путем аппроксимации которых и рисуется контур. Выбор графического представления объекта производится в самой программе. Для отображения контуров могут использоваться те же файлы, что и для построения объектов, но если при отображении объектов каждая строка файла рассматривалась как координаты отдельного объекта, то при отображении контура весь файл – это список координат одного единственного контура. Предусмотрена возможность использования файлов контуров в формате MIF (формат векторной графики, используемый в MapInfo).

5. **Файлы для построения топографической поверхности.** В данной программе реализована возможность построения карт с отображением рельефа (по желанию пользователя). Информация о рельефе исследуемой территории содержится в файлах формата *.GRD и *.CPT. Файл *.grd содержит значения широты и долготы и соответствующее им значение высоты. Значения приводятся с шагом в 0,5 географической минуты. Файл *.cpt содержит диапазоны высот и соответствующие им диапазоны цветов. Цвета представлены по схеме RGB. Так как в файле *.grd как правило хранится информация либо о рельефе всего земного шара, либо о его довольно большой части, то целесообразно перед добавлением рельефа на карту вырезать интересующую исследователя часть. Эту функцию выполняет сама программа, вызывая необходимые для этого модули пакета GMT и используя граничные координаты карты.

Выходные данные.

1. Выборка из входного каталога – текстовый файл (в формате Юникод), содержащий те же поля, но содержащий меньшее количество записей.
2. Графическое изображение построенной карты – графический файл (в форматах bmp, gif, jpg, png по выбору), содержащий карту сейсмических событий.

Режим построения карт сейсмотектонических деформаций. На рис. 6 представлена структура входных данных используемых для построения карты СТД и там же представлены выходные данные, которые могут быть получены при расчете СТД и построении карты СТД.



Рис. 6. Структура входных данных, используемых при построении карты сейсмических событий и возможные выходные данные, которые могут быть сформированы после выполнения режима построения

Входные данные.

1. **Начальные параметры карты.** Описан выше.
2. **Каталог фокальных механизмов.** Требования к каталогу:
 - формат – текстовый (Юникод);
 - колонки разделены пробелом или знаком табуляции;
 - наличие заголовочной строки. Заголовочная строка должна содержать заголовки полей: *Дата, Широта, Долгота, Глубина, Класс и/или Магнитуда, Paz, Ppl, Taz, Trpl* (Paz, Ppl, Taz, Trpl – четыре дополнительных поля, которые содержат информацию об осях сжатия и растяжения – азимут (azimuth) и угол погружения (plunge)).
3. **Параметры географических и геофизических объектов.** Описан выше.
4. **Параметры географических и геофизических контуров.** Описан выше.
5. **Файл Мод СТД** – Cappa.config, который содержит значения Моды (М) и критические значения параметра К (интенсивность результирующей матрицы), соответствующие разным кумулятивным вероятностям и объему выборки (N) [5]. Вид этого файла представлен на рис. 7. Этот файл используется при расчете СТД и должен находиться в рабочей директории.

Выходные данные.

Наряду с выходными файлами, представленными на рис. 5, при расчете СТД рассчитываются и формируются следующие файлы:

1. Файл **RSLTSTD.afm** содержит компоненты матрицы среднего механизма по всем исследуемым объемам земной коры (узловые точки и радиус или ширина окна элементарных ячеек

Cappa.config				
N	M	90%	95%	
2	0.856	0.883	0.921	
3	0.596	0.755	0.801	
4	0.489	0.659	0.708	
5	0.400	0.597	0.645	
6	0.419	0.546	0.591	
7	0.347	0.507	0.551	
8	0.318	0.477	0.515	
9	0.292	0.449	0.488	
10	0.284	0.424	0.463	
11	0.273	0.406	0.442	

Рис. 7. Вид входного файла со значением моды

определяют этот объем). Первые два столбца содержат широту и долготу узловой точки, третий столбец содержит число событий, попавших в исследуемый объем. Остальные 6 столбцов содержат рассчитанные компоненты матрицы среднего механизма.

2. Файл и RSLTGEN.dat содержит дополнительные параметры СТД для каждого исследуемого объема, такие как каппа, коэффициент Лоде-Надаи, главные значения матрицы (Тета1, Тета2, Тета3), азимуты осей (Р, Т, В), углы с вертикалью (Трl, Ррl, Врl), азимут максимального горизонтального сжатия, угол вида плоской деформации, угловое соотношение плоскости и вертикали, азимут N плоскости максимального взреза/среза.
3. Файл MAGNITUDE.AFM
4. Файл OUTF.TXT
5. Файл STDCLLEG.TXT
6. Файл RSLTTCL.DAT
7. Файлы режимов СТД

Все файлы 3-7 фиксируют различные промежуточные параметры расчета СТД и используются при построении карты СТД.

Интерфейс программы

Главная форма программы «Seismotectonic INFO» (рис. 8) предоставляет возможность сейсмологу выбрать один из реализованных режимов:

- новая карта сейсмических событий;
- новая карта СТД.

Построение любой из карт это последовательный процесс ее развития; поэтапное добавление различной информации на нее и по необходимости ее редактирование в процессе построения.

Наиболее важными формами программы являются форма настройки параметров карты и форма установки параметров расчета СТД. Эти формы представлены на рис. 9 и рис. 10.

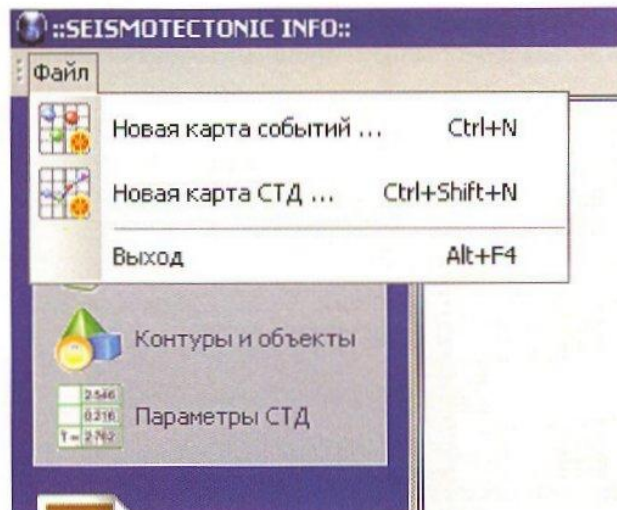


Рис. 8. Главная форма программы

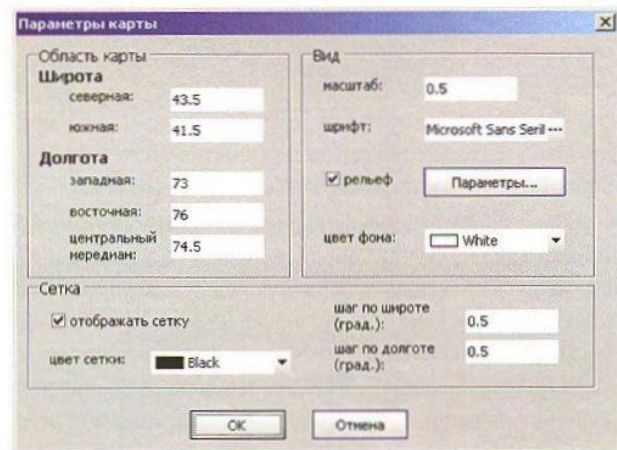


Рис. 9. Окно установки параметров построения карты

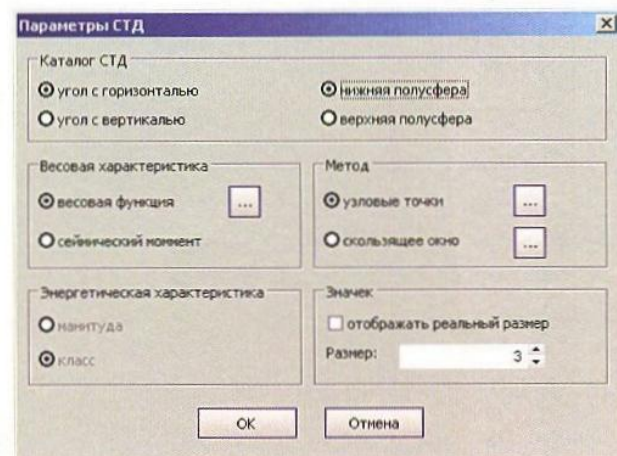


Рис. 10. Окно установки параметров расчета СТД

Первая форма позволяет установить все необходимые параметры карты перед ее построением, вторая форма позволяет последовательно настроить все параметры расчета СТД (определить методику расчета)

На рис. 11 и рис. 12 приведены примеры карт, которые были построены с использованием разработанной программы «Seismotectonic INFO».

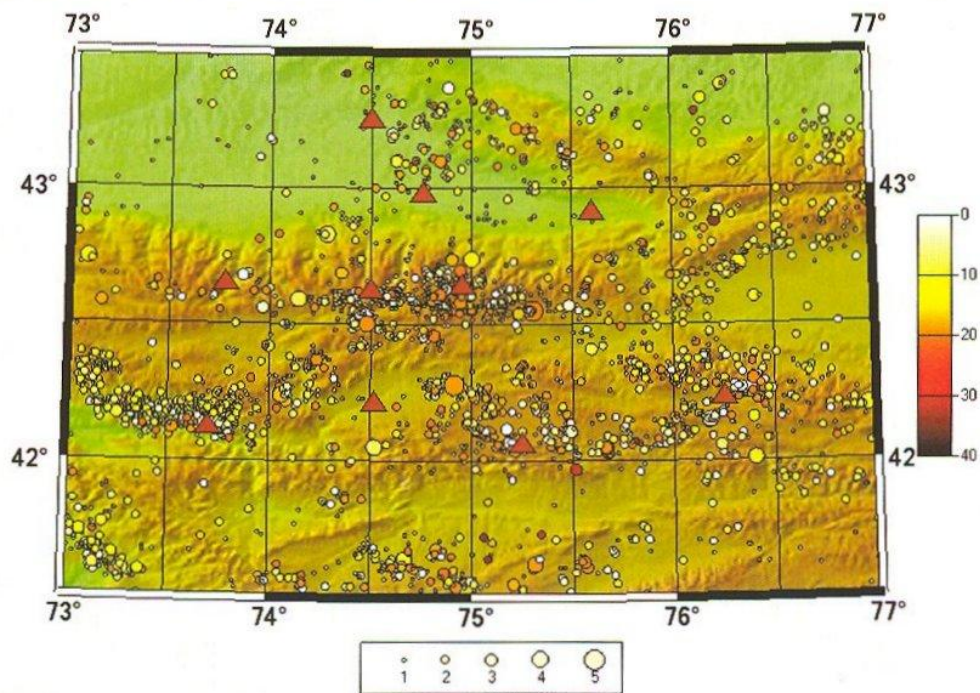
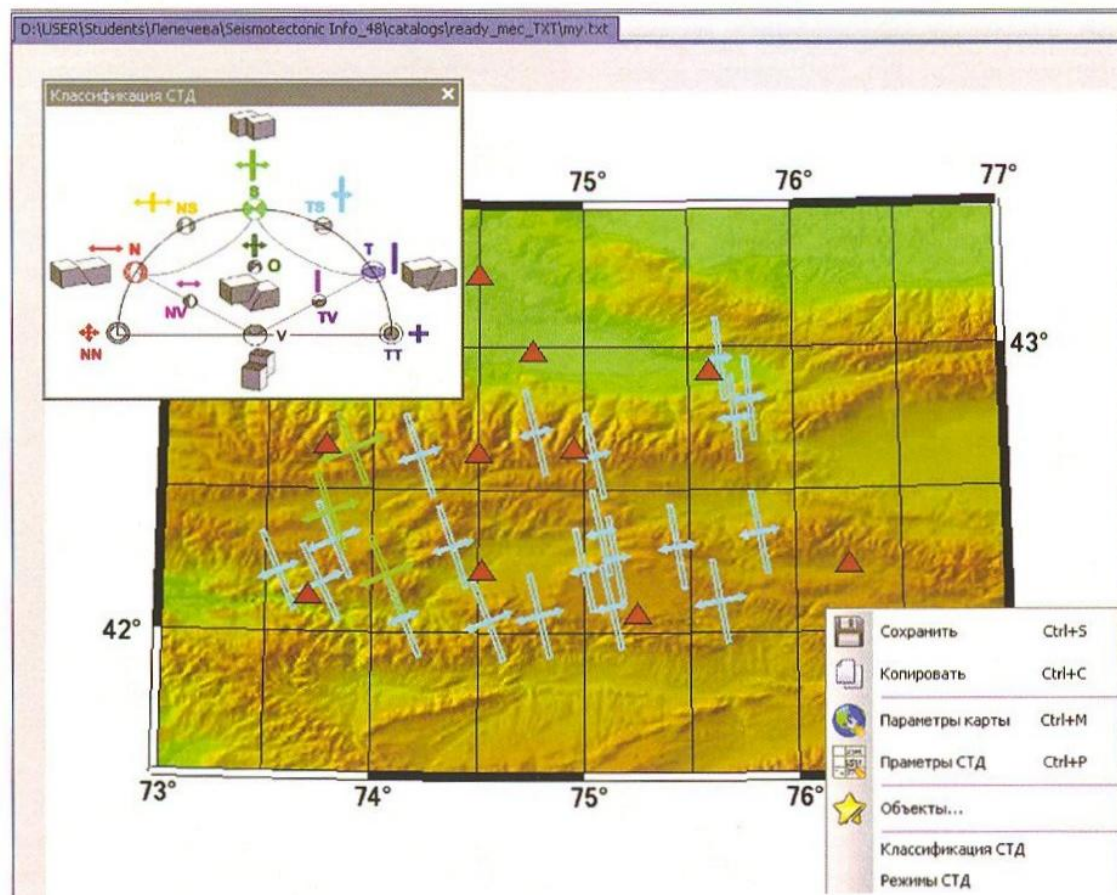


Рис. 11. Пример карты сейсмических событий, построенной программой «Seismotectonic INFO»



Результаты исследования

Разработанный программный продукт «Seismotectonic INFO» позволил провести исследование не только СТД коры Тянь-Шаня, но и некоторых методических вопросов расчета СТД. Результаты анализа методических аспектов представлены в работе [16]. Поскольку расчет СТД предполагает статистический метод, то для того, чтобы все события могли участвовать в расчете СТД, перед расчетом необходимо определиться с выбором весовой функции в операции определения среднего механизма. Для этого можно выбрать уже имеющиеся весовые функции, либо рассчитать региональную весовую функцию для исследуемого региона. Методика расчета этой функции дана в работе [10]. В дальнейшем, возможно определение весовых функций более общего вида по сравнению с линейной по магнитуде. Это, вероятно, позволит, сохраняя очевидные достоинства весового подхода устранить неточность, свойственную его простейшей изложенной версии (недооценка вклада сильнейших событий).

Использование новых методик в расчетах средних механизмов СТД позволило построить более детальные карты сейсмотектонических деформаций Тянь-Шаня на основании более 5000 механизмов очагов землетрясений, которые произошли на этой территории за 1961-1994 годы (рис. 13). Выделены зоны, характеризующиеся определенным режимом СТД; проанализированы проявления СТД на разных глубинах и энергетических уровнях; получены площадные распределения некоторых параметров, характеризующих СТД данного региона: угла вида

напряженного состояния, коэффициента Лоде-Надаи, вертикальной компоненты. Установлено, что минимальные значения угла вида напряженного состояния соответствуют области к западу от Таласо-Ферганского разлома, а наиболее высокие значения – для зоны сочленения Тянь-Шаня и Памира. Площадное распределение коэффициента Лоде-Надаи указывает на то, что практически вся исследуемая территория подвержена сжатию, причем ориентация осей сжатия в разных частях региона не одинакова и меняется от северо-западного направления к северо-восточному. Характер распределения по площади вертикальной компоненты свидетельствует о том, что значительная часть рассматриваемой территории испытывает поднятие, что особенно заметно в районе Чаткальского хребта.

На основе каталога института сейсмологии МОН РК, куда вошли более 3000 механизмов землетрясений, которые произошли за 1996-2006 годы, исследована территория Казахского Тянь-Шаня (рис. 14). Отмечено, что для рассматриваемой территории установлено наличие нескольких режимов СТД, которые проявляются каждый на своей определенной территории. Например: Кунгей Алатау и Терской Алатау, которые расположены по разные стороны озера Иссык-Куль, имеют отличающиеся режимы СТД: сжатие для первого и переходный режим от вертикального (Vertical) к режиму сжатия (Thrust) для второго. Анализ значений параметра Лоде-Надаи, определенных для средневзвешенных тензоров СТД, так же свидетельствует о сжатии значительной части исследуемой территории. Вычисленная для

Моделирование геобъектов и геопроцессов

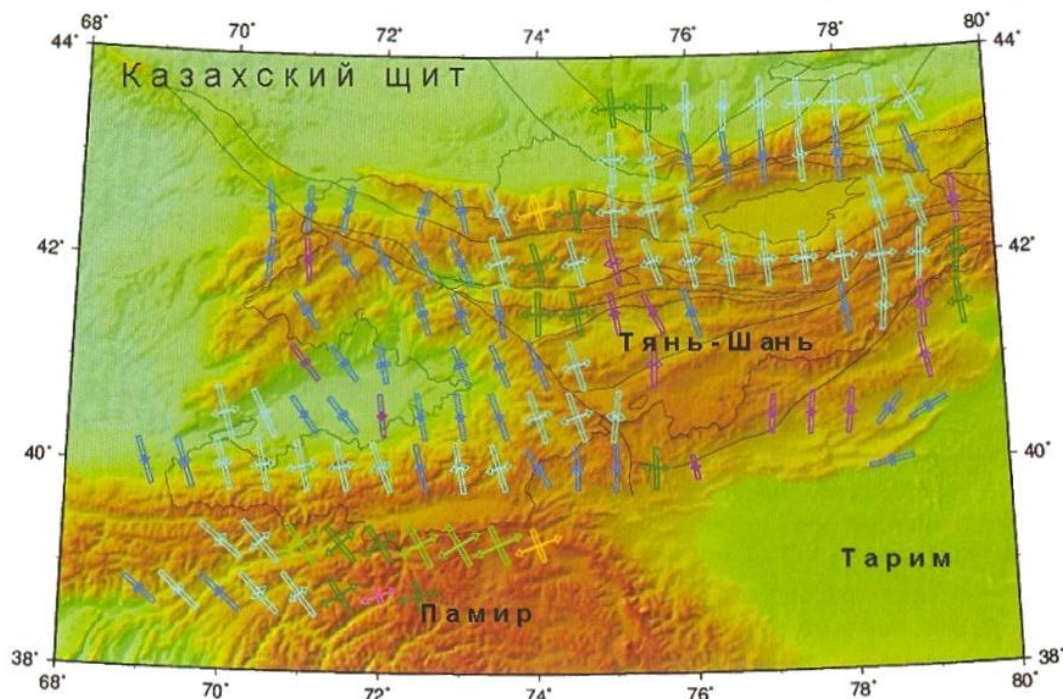
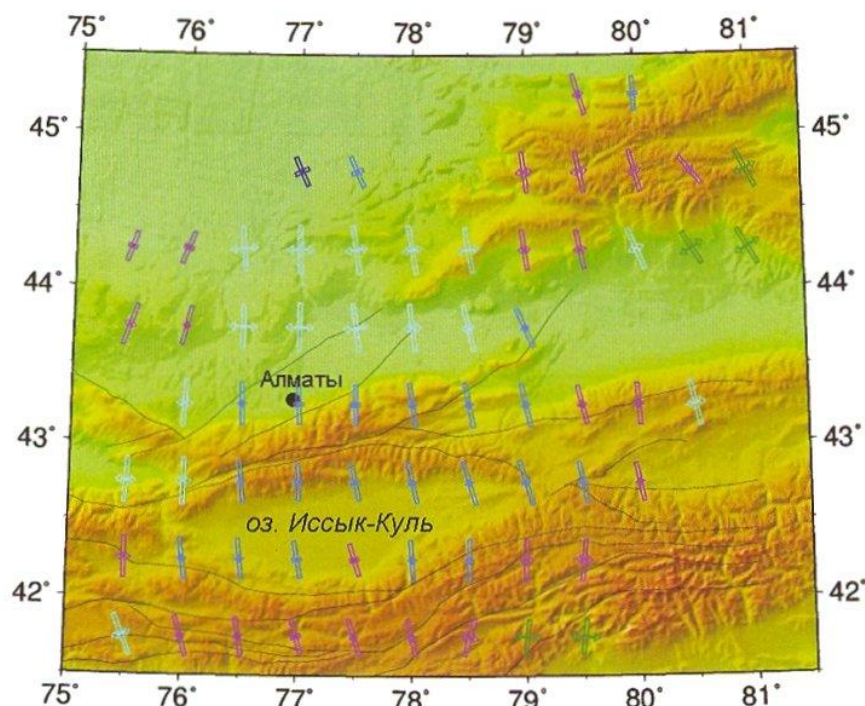


Рис. 13. Карта СТД Тянь-Шаня


 Рис. 14. Карта СТД
 Казахского Тянь-Шаня

исследуемой территории среднегодовая скорость сейсмоструктурной деформации меняется в зависимости от территории в пределах $(10^{-10}-10^{14})$ год⁻¹. Наиболее высокие значения характерны для южной зоны исследуемой территории. $(1-5) \cdot 10^{-10}$ год⁻¹ [17].

При исследовании сейсмоструктурных деформаций территории Бишкекского геодинамического полигона на основе более 700 решений по фокальным механизмам очагов землетрясений было определено, что для рассматриваемой территории характерны два типа режимов СТД (рис. 15): для западной части – сдвиговый, для восточной – переходный режим от сдвига к сжатию (транспрессия). При этом оси сжатия имеют северо-северо-западную ориентацию, а оси растяжения – восточно-северо-восточную.

Исследования СТД для различных слоев земной коры показали, что направления главных осей СТД меняются в зависимости от глубины. С увеличением глубины ось сжатия разворачивается в северном направлении, а ось растяжения – в восточном, при этом основная часть территории характеризуется переходным режимом от сдвига к сжатию и на небольшой территории отмечается сдвиговый режим.

Анализ значений параметра Лодэ-Надаи, определенных для средневзвешенных тензоров СТД, также свидетельствует о том, что значительная часть исследуемой территории подвержена сжатию, сдвиги отмечены в районе Суусамырской впадины. Для исследуемой территории среднегодовая скорость сейсмоструктурной деформации имеет порядок 10^{-9} год⁻¹. Найденное значение среднегодовой скорости СТД оказалось примерно на порядок меньше скорости деформации, определяемой по данным GPS [9].

Приведенные результаты позволяют рассчитывать на их дальнейшее использование при изучении движений поверхности и деформаций земной коры на территории Тянь-Шаня.

Заключение

Разработанный программный комплекс «Seismotectonic INFO» позволяет быстро и эффективно проводить расчет сейсмоструктурных деформаций, получать различные характеристики СТД и визуализировать результаты расчета с применением современных методик и с привязкой к топографической основе. Программный продукт может быть использован для исследования СТД других сейсмоактивных районов, таких как Кавказ, Байкальская рифтовая зона и др.

Авторы выражают признательность Лепечевой М.Л. за помощь в реализации алгоритмов, использованных в ПО «Seismotectonic INFO».

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы № 15 фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID» и частично поддержана грантом РФФИ 07-05-00436 и программой ОНЗ РАН № 6.

Ключевые слова: сейсмоструктурная деформация (СТД), региональная весовая функция, программа «Seismotectonic INFO», Тянь-Шань

ЛИТЕРАТУРА

1. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М. : Наука 1985 – 408 с

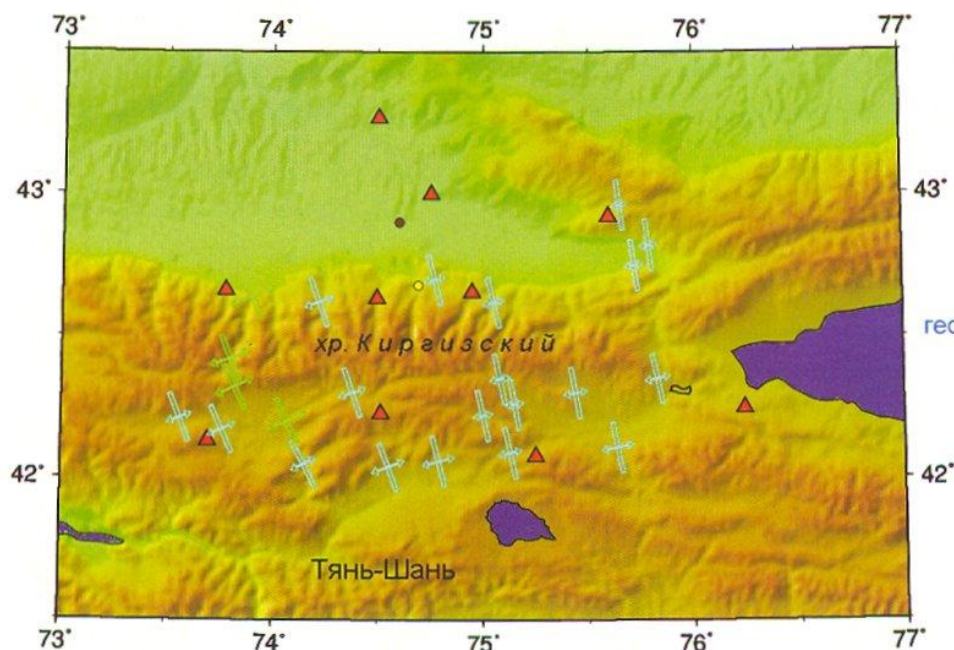


Рис. 15. Карта СТД Бишкекского геодинамического полигона по данным сети KNET

2. Ризниченко Ю.В. О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры. М. : Наука, 1965. – С. 56-63.

3. Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1979. – № 10. – С. 4-23.

4. Ризниченко Ю.В., Соболева О.В., Кучай О.А., Михайлова Р.С., Васильева О.Н. Сейсмотектоническая деформация земной коры юга Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – №10. – С. 90-104.

5. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. – М. : Наука, 1990. – 191 с.

6. Степанов В.В. Количественная оценка тектонических деформаций // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М. : Наука, 1979. – С. 67-71.

7. Lukk A., Yunga S.L., Shevchenko V., Humburger M.W. Earthquake focal mechanisms, deformation state, and seismotectonic of Pamir-Tien Shan region, Central Asia // J. Geophys. Res. – 1995. – Vol. 100. – P. 20321-20343.

8. Грачев А.Ф., Магницкий В.А., Мухамадиев Ш.А., Юнга С.Л. Об определении максимальных магнитуд платформенных землетрясений на основе анализа сейсмотектонических и неотектонических деформаций // Докл. РАН. – 1995. – Т. 346. – № 1.

9. Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли. – 2005. – № 11. – С. 62-78.

10. Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // Докл. РАН. – 1997. – Т. 352. – № 2. – С. 253-255.

11. Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. – 1975. – Т. 225. – № 3. – С. 557-560.

12. М. Фаулер, К. Скотт. UML. Основы. – СПб. : Символ-Плюс, 2002. – 102 с.

13. Учебник по С# [Электронный ресурс] // DotSITE : сайт для .NET разработчиков. – СПб. : DotSITE Ltd. Co, cop. 2000-2009. – URL: <http://dotsite.ru/Tutorials/CSharp/> (дата обращения 14.05.2009).

14. Дж. Прайс, М. Гандэрлой. Visual C# .NET. Полное руководство : [пер. с англ.]. – Компьютерное издательство «Век», 2004. – 960 с.

15. Pal (Paul) Wessel [School of Ocean and Earth Science and Technology University of Hawai'i at Manoa], Walter H.F. Smith [Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/NODC]. The Generic Mapping Tools. GMT. Version 3.4. Technical Reference and Cookbook. April 2001. – URL: <http://www.seismo.ethz.ch/gmt/doc/html/tutorial/tutorial.html> (дата обращения 11.03.2009).

16. Лепечева М.Л., Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Юнга С.Л. Об устойчивости алгоритма расчета сейсмотектонической деформации среднего механизма // Вестник КРСУ (Кыргызско-Российский Славянский университет). – 2006. – № 8. – С. 71-78.

17. Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Полешко Н. Н., Ли А.Н., Бейсенбаев Р.Т. Сейсмотектонические деформации земной коры Иссыкульской зоны и казахского Тянь-Шаня // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли : материалы 2-го Междунар. симп., Новосибирск, 12-16 ноября 2005 г. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – С. 344-350.