

**УСТОЙЧИВОСТЬ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА
СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
СРЕДНЕГО МЕХАНИЗМА**

М.Л. Лепечева – магистр

Н.А. Сычева – канд. физ.-мат. наук

Л.М. Богомолов – канд. физ.-мат. наук

С.Л. Юнга – докт. физ.-мат. наук.

Various approaches to computation of seismotectonic deformation as well as of average source mechanism matrix have been compared.

Введение. При исследовании процесса сейсмотектонической деформации, согласно [1], целесообразно выделять три основных типа деформации в широком значении этого термина: 1) *сейсмическое скольжение* (подвижка по разлому, фигурирующая также в модели stick-slip) по зоне глубинного регионального разрывного нарушения, когда деформации сдвига концентрируются в зоне разлома (рис. 1а) [2]; 2) *сейсмическое течение* горных масс, наиболее очевидным признаком которого является разнотипность подвижек по разные стороны от центра исследуемого объема; в результате сейсмогенных подвижек материал как бы вытекает или, иными словами, выдавливается из центральной части области. Этому типу движения присущи подвижки в очагах землетрясений, в определенном смысле противоположные друг другу, например, левосторонние и правосторонние сдвиги, так что совокупность фокальных механизмов землетрясений едва ли можно охарактеризовать каким-либо одним средним механизмом (рис. 1б) [3, 4]; 3) собственно *сейсмотектоническая деформация* (СТД), в узком понимании термина как локальной деформации элементарного объема “макроточки”, в качестве которого выступает сейсмоактивный объем, содержащий достаточно большое число разрывов (рис. 1в) [5–7].

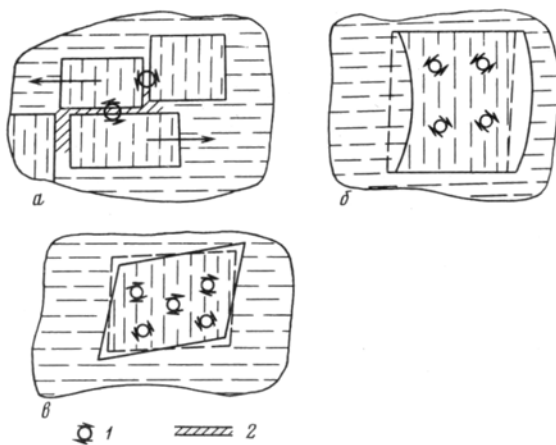


Рис. 1. Схемы движения земной коры (по [1]): а – тектоника малых плит; б – сейсмическое течение; в – сейсмотектоническая деформация. 1 – механизм очага землетрясения (стрелками показано движение противоположных крыльев разрыва в очаге); 2 – трансформный разлом.

Информация о фокальных механизмах, соответствующих отдельным подвижкам, несомненно, полезна при изучении всех трех типов движения среды в ходе геодеформационного процесса. Важный момент исследования в данном случае – определить, какой из деформационных процессов изучается на той или иной территории.

В случае первого типа подвижка отдельного блока может сделать неустойчивой статистическую выборку (образно это иллюстрирует рис. 1а). Для второго типа деформации имеются трудности, связанные с выбором объема, в котором можно было бы рассматривать усредненный механизм очагов. Подробно теоретические вопросы этих типов деформации рассмотрены в монографии С.Л. Юнга [13]. Это позволяет не останавливаться здесь на первых двух типах деформации. А вот методические вопросы, относящиеся к третьему типу – *сейсмотектонические деформации элементарного объема* – будут рассмотрены более подробно. Результаты исследования СТД могут быть активно использованы во многих разделах сейсмологии и геодинамики. Цель данной работы – продемонстрировать возможности нескольких подходов к расчетам сейсмотектонических деформаций (СТД) для выбора наиболее эффективного, применительно к той или иной задаче.

Сравнение методик. Подходы Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнга. В работе [8], посвященной исследованию сейсмотектонической деформации земной коры юга Средней Азии, отмечено: “По определению, данному в работах [9–12], под сейсмическим течением горных масс подразумевается та часть тектонических деформаций земной коры и верхней мантии, которая связана с остаточными смещениями в очагах землетрясений”. Отдельные очаги представляют микроструктурными деталями в общем процессе разрывно-непрерывного деформирования, и вклад каждого очага в этот процесс считается пропорциональным его сейсмическому моменту M_0 .

Формула для скорости деформаций пространственно-временного объема VT при сейсмическом течении горных масс такова [10–12]:

$$v_{ik} = \frac{1}{2\mu VT} \sum_{j=1}^N (M_{0ik})_j, \quad (1)$$

μ – модуль упругости на сдвиг; $(M_{0ik})_j$ – тензоры сейсмических моментов всех очагов землетрясений ($j=1,2,3,\dots,N$), попадающих в

рассматриваемый объем осреднения V за время T ; i,k – индексы компонент тензоров сейсмических моментов M_{0ik} и тензора средней скорости деформаций v_{ik} ($i,k=1,2,3$).

Следуя работам [9–12], выражение (1) удобнее представить так:

$$v_{ik} = \frac{1}{2\mu VT} \sum_{j=1}^N M_{0j} \cdot (\theta_{ik})_j = v\theta_{ik}, \quad (2)$$

$$\text{где } v_{ik} = \frac{1}{2\mu VT} \sum_{j=1}^N M_{0j}, \quad (3)$$

θ_{ik} – единичный направляющий тензор сейсмического момента.

Учет весов отдельных землетрясений проведен в соответствии с работой [12]. Очевидно, что если в рассматриваемый объем осреднения попадают два землетрясения M_0' и M_0'' , таких, как $M_0' \gg M_0''$, то средняя скорость деформации этой области будет полностью определяться большим землетрясением. Для выделения вклада данного события в рассматриваемую компоненту i,k тензора θ_{ik} проводится взвешивание по величинам сейсмических моментов M_0 землетрясений.

$$\bar{\theta}_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^N M_{0j}} \sum_{j=1}^N M_{0j} \cdot (\theta_{ik})_j. \quad (4)$$

Таким образом, формула, по которой проведен расчет компонент скорости деформаций, имеет вид

$$v_{ik} = v\bar{\theta}_{ik}. \quad (5)$$

В другом подходе, развитом С.Л. Юнга в [13], выражение для тензора скорости сейсмотектонической деформации $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ определяется суммой тензоров сейсмических моментов, нормированных на время, объем и модуль сдвига:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (6)$$

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

о подобии СТД на разных масштабных уровнях вместо (6) можно попытаться использовать следующее выражение [13]:

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_{ij} \rangle &= \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \sum_{\alpha=1}^N m_{ij}^{(\alpha)} = \\ &= I_{\Sigma} \cdot \sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)} / \sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)}, \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)}. \quad (8)$$

Применение весовой функции. Выбор весовой функции в процедуре расчетов матриц среднего механизма является весьма существенным моментом для расчетов СТД. В работе [13] автор отмечает, что при использовании значения сейсмического момента в качестве весового коэффициента процедура становится в вычислительном смысле неустойчивой. Вместе с тем, гипотеза о подобии сейсмотектонического деформационного процесса в достаточно широком диапазоне магнитуд позволяет формально использовать любую произвольно выбранную весовую функцию, обеспечивающую устойчивость результатов расчетов. Формулы же, полученные в работах Ю.В. Ризниченко для определения веса каждого сейсмического события, определены на основе интуитивных или качественных соображений.

Методика определения весовой функции на основе анализа мировых данных по фокальным механизмам из каталога СМТ описана в работе [14]. Вид полученной весовой функции представлен выражением

$$w = 0.0689(M + 6). \quad (9)$$

Эта методика была использована в работе [15] и для определения региональной весовой функции. Полученная весовая функция

$$w = 0.147(M - 0.5). \quad (10)$$

В указанной работе расчеты СТД по данным сети KNET были проведены на основе двух подходов: использование сейсмического момента в качестве веса и весовой функции. Построение карт СТД с использованием двух этих подходов позволили наглядно оценить их разницу. Для исследования был использован

каталог фокальных механизмов, полученный по данным сети KNET, который включает 870 сейсмических событий за 1994–2004 гг., произошедшие внутри территории сети KNET. Были построены карты СТД, при этом для расчетов матриц средних механизмов в качестве веса использовались: а) сейсмический момент; б) весовая функция по мировым данным [14]; весовая функция по региональным данным [15]. Карты построены по Ю.В. Ризниченко (сейсмический момент) и по С.Л. Юнгу (весовая функция) (рис. 2) для частично перекрывающихся круговых областей с центрами в узловых точках. Радиус круговых областей принимался равным – $0.5^\circ, 0.4^\circ$ и 0.3° . Изменение размера круговой области ведет к выявлению локального характера деформаций.

Карты СТД для этих подходов представлены режимами сейсмотектонических деформаций, которые отличаются друг от друга для одних и тех же узловых точек и при этом отличаются и направления оси сжатия в этих точках, а изменение размера круговой области ведет к выявлению локального характера сейсмотектонических деформаций.

Обсуждение. Большие отличия в режимах СТД при различных подходах можно объяснить зависимостями веса от магнитуды события для обоих подходов, которые также были определены при расчете СТД (рис. 3). Отмечено, что наибольший вклад при первом подходе определяется для самого сильного события, попавшего в зону исследования (изменения веса происходят по экспоненциальному закону). При втором подходе значения веса для событий с различными энергетическими характеристиками незначительно отличаются друг от друга (изменение веса происходит по линейному закону).

Для доказательства этого были построены карты СТД (первый подход) для двух выборок по данным сейсмологической сети KNET. В одну из них вошли сейсмические события с $K \geq 10$ ($K=10-13.6$, 29 событий), в другую – события с $K < 10$ ($K=5-10$, 844 события) (рис. 4). Как видно из рис. 4а, карта СТД, построенная для первой выборки (29 событий), полностью совпадает с картой,

построенной по всему каталогу (870 событий),
при расчете которых использовался первый

подход, а карта

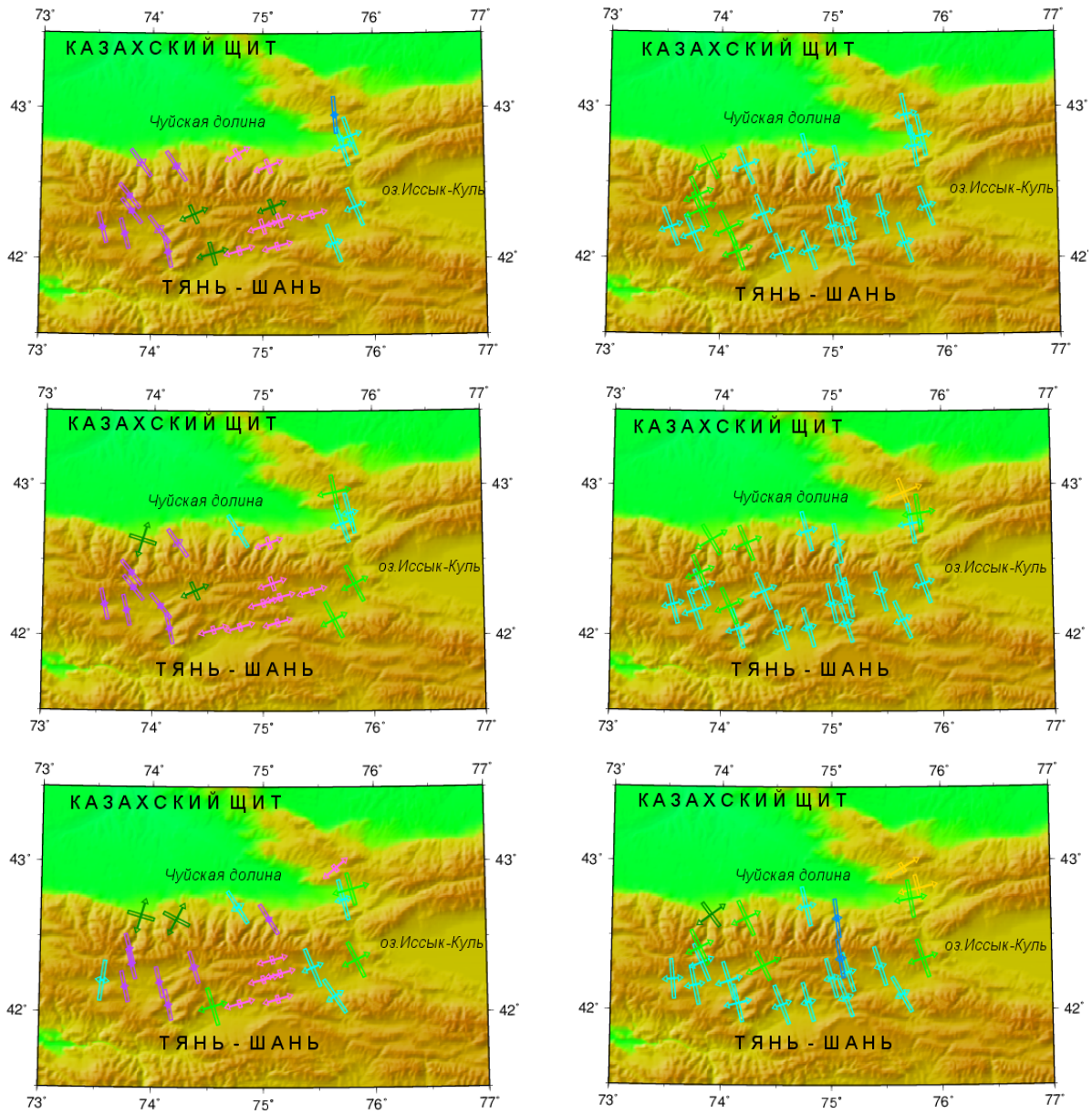


Рис. 2. Карты СТД получены Ю.И. Ризниченко (левый ряд) и С.Л. Юнга (правый ряд) для разных радиусов исследования (1 ряд – 0.5°; 2 ряд – 0.4°; 3 ряд – 0.3°).

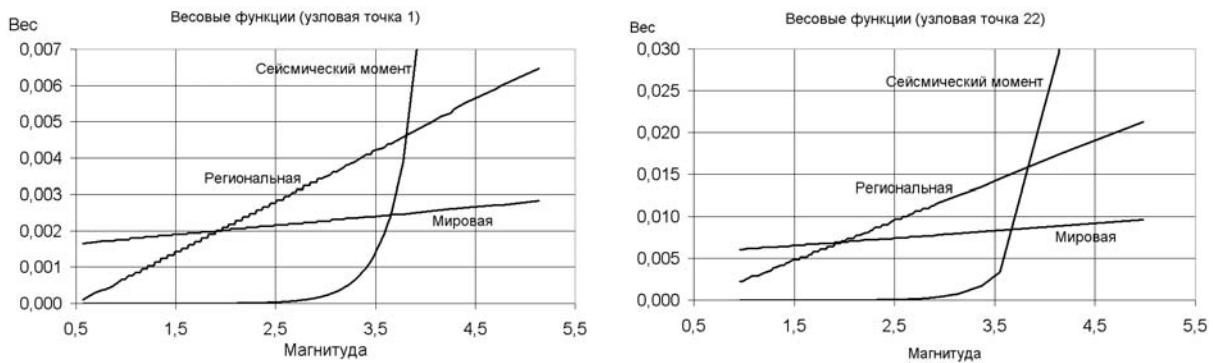


Рис. 3. Распределение веса при различных весовых функциях для разных узловых точек.

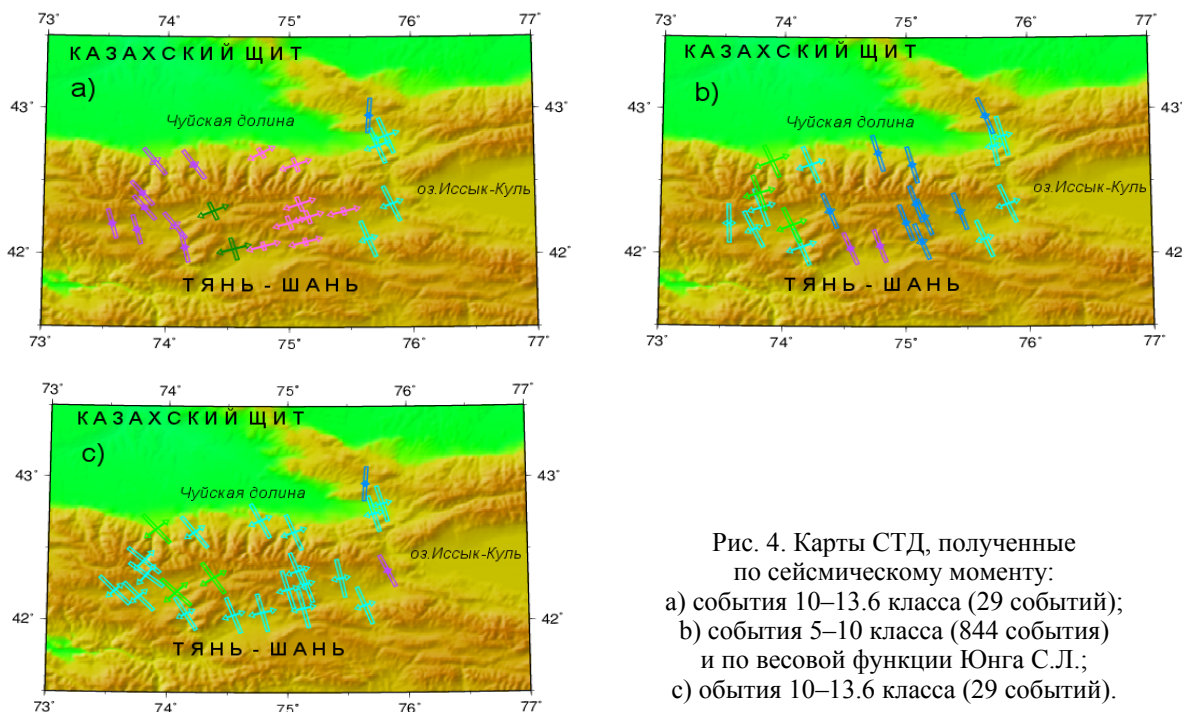


Рис. 4. Карты СТД, полученные по сейсмическому моменту:
 а) события 10–13.6 класса (29 событий);
 б) события 5–10 класса (844 события) и по весовой функции Юнга С.Л.;
 с) события 10–13.6 класса (29 событий).

СТД, построенная по второй выборке (844 события) (рис. 4б), отражает картину СТД для более крупных событий из этой выборки. Построение карты СТД для первой выборки (29 событий), но уже с использованием второго подхода (весовой функции Юнга), позволяет получить результат, отличный от результата на рис. 4а, но близкий к результату, полученному по всему каталогу с использованием второго подхода (рис. 2, правый столбец, первый ряд).

Построение карт СТД с весовыми функциями по мировым данным (Юнга) и по региональной функции (Сычева) показало, что результат имеет устойчивую картину, причем для различных значений радиусов исследования как при одной, так и при другой функции режимы СТД для одних и тех же узловых точек идентичны (рис. 5).

Из проделанной работы можно сделать следующие выводы: прежде чем приступить к расчету СТД, целесообразно определиться –

какой процесс изучается: сейсмическое скольжение, сейсмическое течение или сейсмотектонические деформации в частном смысле этого слова, так как все эти деформации предполагают различный подход при расчете СТД. Все эти подходы описаны в работе [13]. При этом важным шагом является

выбор изучаемой территории и временного интервала.

Исходить только из имеющегося фактматериала, не учитывая вышеуказанные нюансы, может повлечь методические или терминологические недоразумения при последующей интерпретации результатов.

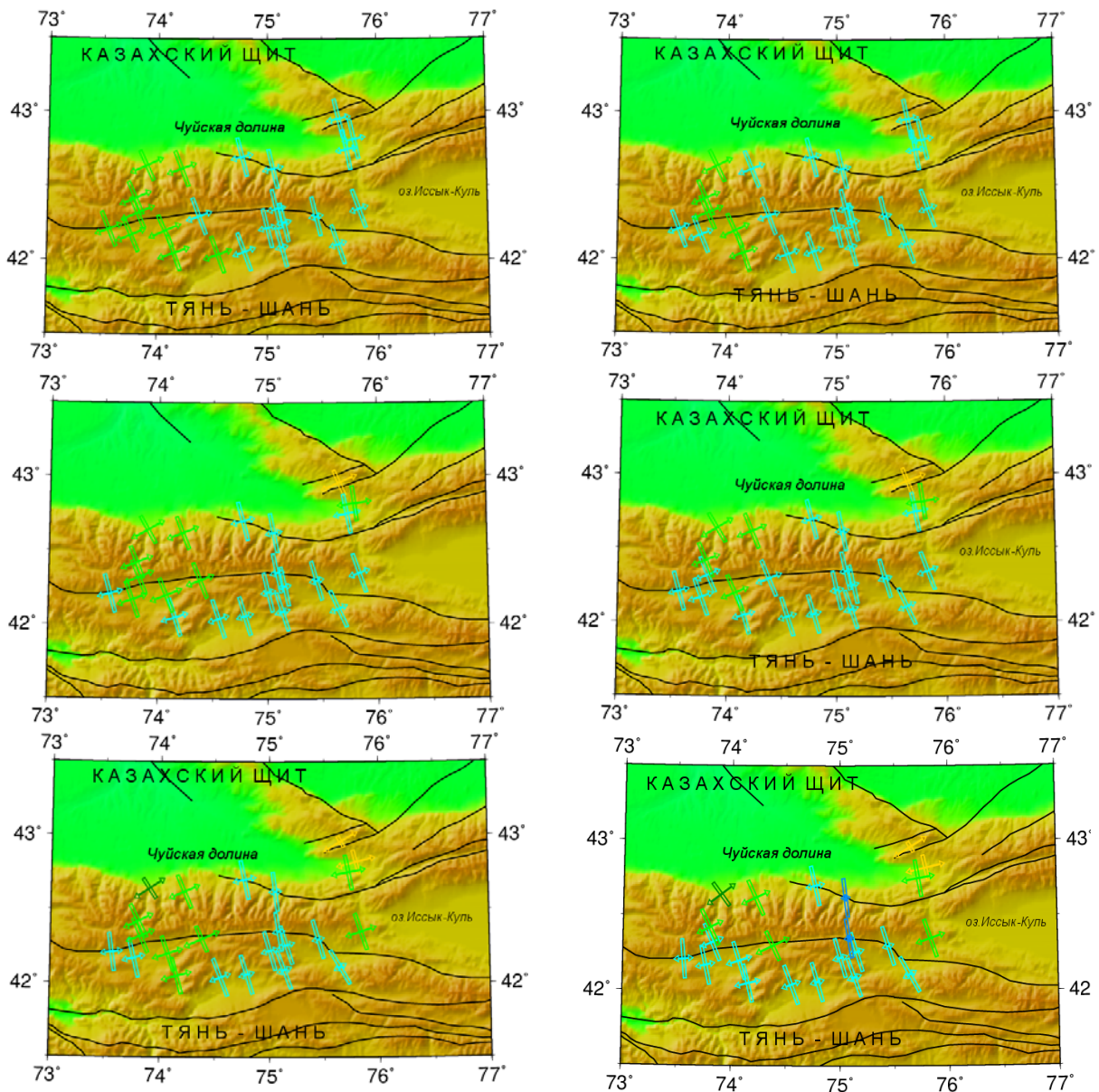


Рис. 5. Карты СТД, полученные с использованием разных весовых функций: мировая (С.Л. Юнга – левая колонка) и региональная для Тянь-Шаня (Н.А. Сычева – правая колонка) для разных радиусов исследования (1 ряд – 0.5°; 2 ряд – 0.4°; 3 ряд – 0.3°).

Если задача соответствует режиму СТД (третий случай – сейсмотектонические деформации элементарного объема), то необходимо определиться в выборе одного из вышеописанных подходов. Подход Ю.И. Ризниченко в выборе веса можно использовать только в том случае, если в исследуемый каталог попадут события с близкими энергетическими классами, что позволит определить удельный вклад для всех сейсмических событий. Если в каталоге находятся события с некоторым разбросом в энергетической характеристике (даже малым), то расчеты СТД будут представлены только событиями с максимальной характеристикой. При этом остается открытым вопрос: может ли полученный таким путем результат характеризовать в целом сейсмотектоническую обстановку в регионе?

В работе [13] отмечено, что анализ сейсмотектонических деформаций, опирающийся, прежде всего, на большую статистику механизмов очагов слабых и средних по силе землетрясений, до последнего времени рядом сейсмологов признавался, главным образом, в качестве метода детального исследования напряженно-деформированного состояния отдельных сейсмоактивных районов, тогда как для подобного исследования регионов более эффективным считался подход, связанный с традиционным изучением сильнейших землетрясений. Наличие подобия движений в совокупности очагов сильных землетрясений, с одной стороны, и во множестве слабых сейсмических событий – с другой, будет означать, кроме всего прочего, что характер движений в очагах сильных землетрясений чрезвычайно разнообразен и требует для своего анализа статистического подхода – точно так же, как это имеет место в случае анализа механизмов очагов слабых землетрясений. Как известно, многочисленные исследования подвижек в очагах сейсмических событий свидетельствуют о многообразии сейсмотектонических движений в пределах однородных геотектонических структур. Поскольку для механизма очагов сильных землетрясений в большинстве сейсмических поясов земного шара отмечается, как правило,

значительное разнообразие типов сейсмических подвижек, накладывающихся на некоторую общую для того или иного региона закономерность, постольку можно считать подобными проявления сейсмотектонического процесса. Требуется, тем не менее, непосредственная проверка гипотезы о подобии подвижек на реальных определениях механизма очагов землетрясений в широком диапазоне энергий. Такого рода проверка проведена нами в ряде работ и, как известно, найдено подтверждение наличия подобия. Эти соображения обосновывают настоятельную необходимость использования статистического подхода к задаче выявления общих закономерностей в развитии тектонического процесса. Выявление таких общих закономерностей лежит, как нам представляется, на пути получения и анализа больших объемов данных по механизму очагов землетрясений во всем доступном диапазоне. Реализация такого пути возможна уже на тех временных интервалах, где для осуществления статистического подхода еще недостаточно наблюдений более редких сильных сейсмических событий. Здесь представления о подобии движений в очагах относительно слабых и более сильных землетрясений позволяют восполнить материал экспериментальных наблюдений за счет повышения детальности их проведения.

Поскольку расчет СТД предполагает статистический метод, то для того чтобы все события могли участвовать в этом расчете 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 [14]. В дальнейшем возможно определение весовых функций более сложных, чем линейная по магнитуде. Это, вероятно, позволит, сохраняя очевидные достоинства весового подхода, преодолеть недостаток, присущий его простейшей обсуждаемой версии (недооценка вклада сильнейших событий). Для анализа возможности синтеза рассмотренных подходов

можно рассмотреть следующее выражение для весовой функции:

$$W \sim a \cdot \operatorname{sh} \alpha(M - h) + C,$$

где a , h , C , α – постоянные параметры, подбираемые при расчете весовой функции.

При больших значениях аргумента $\alpha(M - h)$ гиперболический синус переходит в экспоненциальную зависимость, а при малых – ведет себя практически как линейная зависимость.

Заключение. При исследовании характера СТД в различных регионах в настоящее время используется два подхода из упомянутых в данной работе. Поскольку они по-разному определяют вклад каждого сейсмического события при расчете СТД, то исследователь сам решает, какой из них может быть выбран. В данной работе сделана попытка проанализировать и сравнить результаты, которые дают оба подхода. Принцип подобия деформационных процессов в геологической среде позволяет считать, что суммарные механизмы землетрясений в различных интервалах магнитуд правильно отражают характер СТД для соответствующего пространственного и временного масштаба. При использовании первого подхода характер СТД будет определяться наиболее сильными землетрясениями, входящими в исследуемый каталог (т.е. в узком диапазоне магнитуд). Второй подход адаптирован для исследований СТД по каталогам множества слабых и средних событий.

Настоящая работа выполнялась в совместном учебно-научном центре ИС РАН и КРСУ как часть проекта “Оптимизация научной интрасети и развитие сетевых приложений для анализа пространственно-временных геоданных Тянь-Шаня и прилегающих территорий (как возможного GRID-полигона)” по Программе № 21 фундаментальных исследований Президиума РАН: “Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID”.

Литература

1. *Нерсесов И.Л., Негматулаев С.Х., Лукк А.А., Юнга С.Л.* Проблемы изучения сейсмостектонического деформирования горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 10. – С. 105–110.
2. *Кучай О.А., Юнга С.Л.* Сейсмическое скольжение по Дарваз-Каракульскому разлому // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1984. – № 1. – С. 38–48.
3. *Джибладзе Э.А.* Течение горных масс на Кавказе // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 10. – С. 111–117.
4. *Ризниченко Ю.В.* О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры. – М.: Наука, 1965. – С. 56–63.
5. *Юнга С.Л.* О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – С. 14–23.
6. *Лукк А.А., Юнга С.Л.* Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. – Душанбе: Дониш, 1988. – 234 с.
7. *Никитин Л.В., Юнга С.Л.* Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1977. – № 11. – С. 54–67.
8. *Ризниченко Ю.В., Соболева О.В., Кучай О.А., Михайлова Р.С., Васильева О.Н.* Сейсмостектоническая деформация земной коры юга Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 10. – С. 90–104.
9. *Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А.* Скорости вертикальных движений при сейсмическом течении горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1976. – № 1. – С. 23–31.
10. *Ризниченко Ю.В.* Протяженный очаг и сейсмостектоническое течение горных масс // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 236.
11. *Ризниченко Ю.В.* Расчет скорости деформаций при сейсмическом течении горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1977. – № 10. – С. 34–47.
12. *Ризниченко Ю.В., Друмя А.В., Степаненко Н.Я., Симонова Н.А., Шумила В.И.* Сейсмостектоническая деформация в области Вранча // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1980. – № 11. – С. 10–21.

13. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. – М.: Наука, 1990. – 191 с.
14. Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // Докл. РАН. – 1997. – Т. 352. – № 2. – С. 253–255.
15. Сычева Н.А. Исследование особенностей механизмов очагов землетрясений и сейсмотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня по данным цифровой сейсмической сети КНЕТ: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: ИФЗ, 2005. – 176 с.