

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОГО ИНСТРУМЕНТА КАЛИБРОВКИ КОДЫ (ССТ) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

Рябенко П.В.

*ruabenko@kndc.kz*

Институт геофизических исследований Национального ядерного центра, г. Алматы, Казахстан

*В работе представлены результаты освоения и использования инструмента калибровки коды, разработанного в AFTAC и LLNL (США), для получения стабильных оценок очаговых параметров ( $M_w$ , излученная энергия, кажущееся напряжение, угловая частота очагового спектра) землетрясений Тянь-Шаня. Работа проведена на материалах 21 станций ИСНАН КР и ИГИ НЯЦ РК. Метод ССТ обеспечивает оценку стабильных очаговых спектров, определение значений моментной магнитуды, кажущегося напряжения (apparent stress), которые примерно в 3-4 раза менее изменчивы, чем оценки, полученные на основе традиционных методик по прямым волнам. В результате опыта по освоению ССТ определены очаговые параметры 25 средних по силе землетрясений Тянь-Шаня с магнитудой 4,1-5,1. Проведено сопоставление кажущихся напряжений при разных значениях  $M_0$  для разных районов мира с данными по Тянь-Шаню.*

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмическая станция, волновая форма, огибающая, сейсмический момент, моментная магнитуда.

**Введение.** Привлечение коды волн для оценки магнитуды землетрясений началось еще более 40 лет назад. Для этого использовались записи частотно-избирательной сейсмической станции (ЧИСС) [1]. Аналоговые записи в общем диапазоне частот от 0,022 до 40 Гц представлялись аналитику по нескольким полосам частот, характеристики которых имели сравнительно узкую полосу (октавную или полуоктавную). Переход на цифровую регистрацию способствовал повышению эффективности в оценке очаговых параметров, в том числе сейсмического момента, угловой частоты, кажущегося напряжения, выделившейся энергии.

В данной работе использовалось программное обеспечение ССТ последней версии 1.0.21. Инструмент калибровки коды (ССТ) — это приложение на основе Java, созданное в результате совместного проекта ученых USNDC (AFTAC/SDS) и Министерства энергетики (LLNL), а также значительного вклада сейсмологов из Университета Юты, INGV (Милан) и Геологической службы США (Голден, Колорадо), Министерство природных ресурсов Канады. Это программное обеспечение было передано KNDC для использования, за что мы выражаем свою благодарность авторам разработки Кевину Майеда и Джастину Барно. Программы позволяют проводить локальную и региональную калибровку для получения стабильного очагового спектра при помощи узкополосной фильтрации [2]. Сначала проводится калибровка с помощью узкополосных огибающих коды. Затем, когда район откалиброван, можно проводить рутинную обработку для получения стабильных оценок очаговых параметров ( $M_w$ , излученная энергия, кажущееся напряжение, угловая частота) при помощи интерфейса REST API. В результате исследований можно получить ответ на вопрос, который уже 40 лет задают сейсмологи — увеличивается ли кажущееся напряжение с увеличением размера очага (излученная сейсмическая энергия/момент) или остается постоянной? Ответы важны для прогноза сейсмической опасности, моделирования в физике очага и мониторинга взрывов. Использование ССТ позволяет рассчитывать стабильную моментную магнитуду  $M_w$  для событий, которые слишком слабы для моделирования волновых форм и устраняет необходимость привязывать к  $M_w$  узкополосные магнитуды ('Рихтера'  $ML$  или длительности  $MD$ ), что может привести к значительным отклонениям.

**Используемые материалы и методика обработки.** В районе исследований были выбраны события за период 2018-2023 гг. Чтобы удовлетворить условиям выбора событий с четкими записями, хорошего соотношения сигнал-шум, решено выбирать землетрясения с магнитудой ( $mb$ ,  $M_{Pv}$ )  $\geq 4$ . В качестве района исследований был выбран Северный и Южный Тянь-Шань, где находится большинство сейсмических станций Института сейсмологии Кыргызстана (сеть KR), ранее уже калиброванных, и некоторые станции Казахстана (сеть KZ). Отметим, что этот район является одним из наиболее сейсмоактивных в Центральной Азии, где ранее происходили землетрясения с магнитудой  $M_s \geq 8$ . Всего в исследовании использовались данные 21 станции. Их расположение приведено на рис. 1.

Все события имели очаги примерно в том же районе, где и находились станции. Отбор событий проводился из соображений, чтобы данные по ним (волновые формы) имелись в data center IRIS, поскольку необходимые нам волновые формы находились именно там. В качестве данных для работы в программе были взяты данные по 25 событиям.

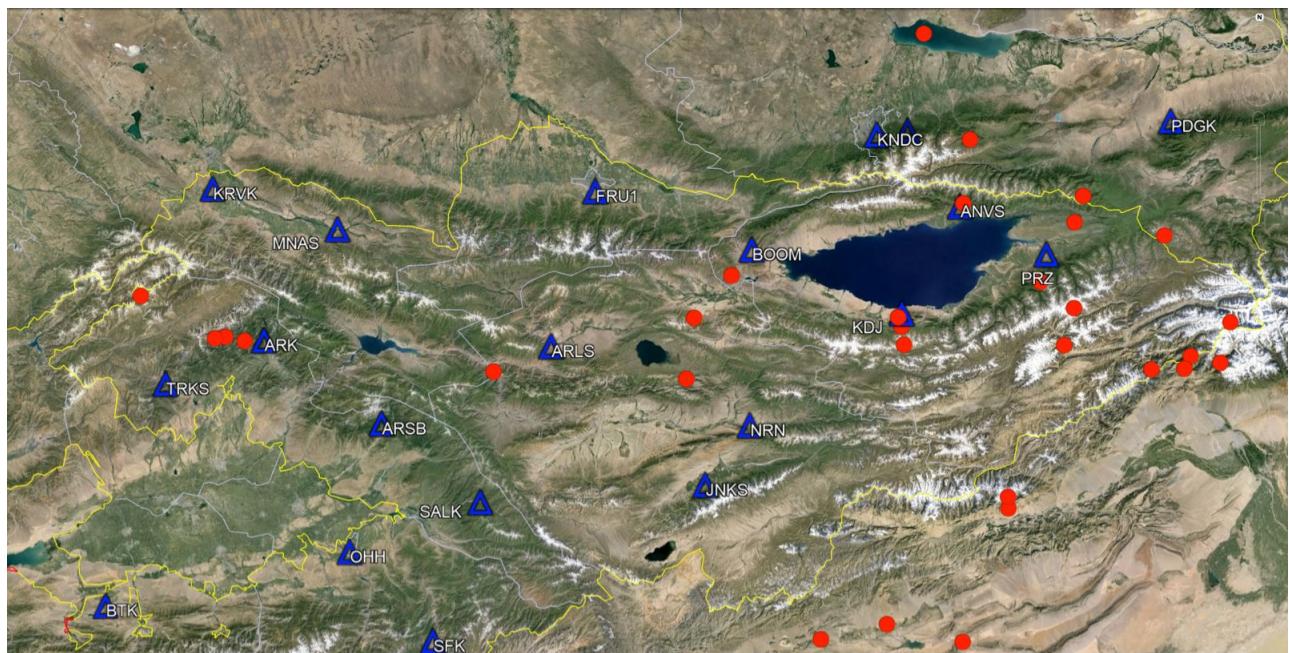


Рисунок 1 – Карта расположения эпицентров землетрясений (кружки) и сейсмических станций (треугольники)

Карта эпицентров отобранных землетрясений приведена на рисунке 1. Мы попытались найти независимые решения СМТ для наших событий. Выбор проводился в пределах района, ограниченного координатами:  $\phi = 39^\circ$  с.ш. –  $44^\circ$  с.ш.  $\lambda = 68^\circ$  в.д. –  $81^\circ$  в.д.

На сайте [Global Centroid Moment Tensor Catalog \(globalcmt.org\)](http://globalcmt.org) была сделана выборка для этого района. В результате найдено 5 событий, соответствующих критериям выборки. помошью скрипта (CCT\_01\_Event\_Catalog\_and\_Data\_Retrieval) сформировали все волновые формы для всех событий по всем станциям (станции Киргизской сети KR, станции Казахстанской сети KZ). Скрипт посредством запроса загружает волновые формы с серверов IRIS. Результатом выполнения скрипта были данные в формате miniseed (3 компоненты), файлы инструментов в формате XML и параметры события в формате CSV. Согласно регламенту технического руководства программы CCT, для калибровки необходимы однородные данные. После загрузки всех данных из IRIS выяснилось, что часть данных имеет частоту дискретизации 100 Hz, а другая часть - 40 Hz. Было принято решение понижения частоты отсчетов волновых форм с помощью средств ObsPy. Методом *decimate* 100 Hz данные были «прорежены» до 50 Hz. Полученные волновые формы прошли этап конвертации с использованием скрипта (CCT\_02\_Data\_Processing). После конвертации в формат SAC оставлены только горизонтальные компоненты. На основе этих данных были сформированы Envelopes (огибающие) посредством встроенного инструмента в программе CCT.

**Работа в программе CCT.** На начальном этапе работы в программе CCT все полученные envelopes по всем станциям по всем землетрясениям были загружены в программу. Общее количество stack-файлов перед началом калибровки составляло **5587** файлов. Далее эти stack-файлы были подвергены 3 этапам процесса калибровки.

**На первом этапе** проведена автоматическая калибровка, используя функцию *Run Calibration (AutoPick)*, которая использует простой подход типа STA/LTA для поиска «лучшего» измерения времени окончания коды для анализа. Это обеспечивает хорошую первоначальную оценку для определения положения  $f$  – маркера в конце огибающей, согласующейся с моделью. Необходимо просмотреть каждый envelope и вручную отрегулировать положение маркера.

**На втором этапе** каждое событие просматривалось отдельно с помощью встроенной функции фильтрации. Функция фильтрации позволяет отфильтровать данные по заголовкам, например, по ID события или коду станции. Можно комбинировать фильтры, используя одновременно фильтр для кода станции и полос частот и т.д. Отфильтрованные данные по событию содержали данные полос частот только для одного события. При нажатии на любую строку события отображается всплывающее окно с наблюдаемым envelope (синий), наиболее согласующийся с синтетическим (зеленый) и моделью (серый) (рис.2). Далее, когда все события были просмотрены и маркеры поставлены в нужные места, необходимо экспортить все волновые формы в папку для сохранения положения  $f$  – маркера. Когда 2 этап калибровки по событиям был закончен, проводился следующий прогон *Run Calibration*. Следуя технической инструкции программы, мы сохранили результат калибровки в новый файл *Calibration\_Parameters*.

**На третьем этапе** мы использовали новый файл *Calibration\_Parameters*, который был получен в результате 2 этапа калибровки и загружен в программу. Сохранённые волновые формы с положениями  $f$  – маркера также были загружены в программу для следующей итерации калибровки. Аналогично второму этапу было просмотрено каждое окно записи волновой формы. Также проведена отбраковка некоторых записей. В конце всех этапов калибровки осталось **3432 stack файла**. 2155 stack-файлов были отбракованы за 3 этапа калибровки.

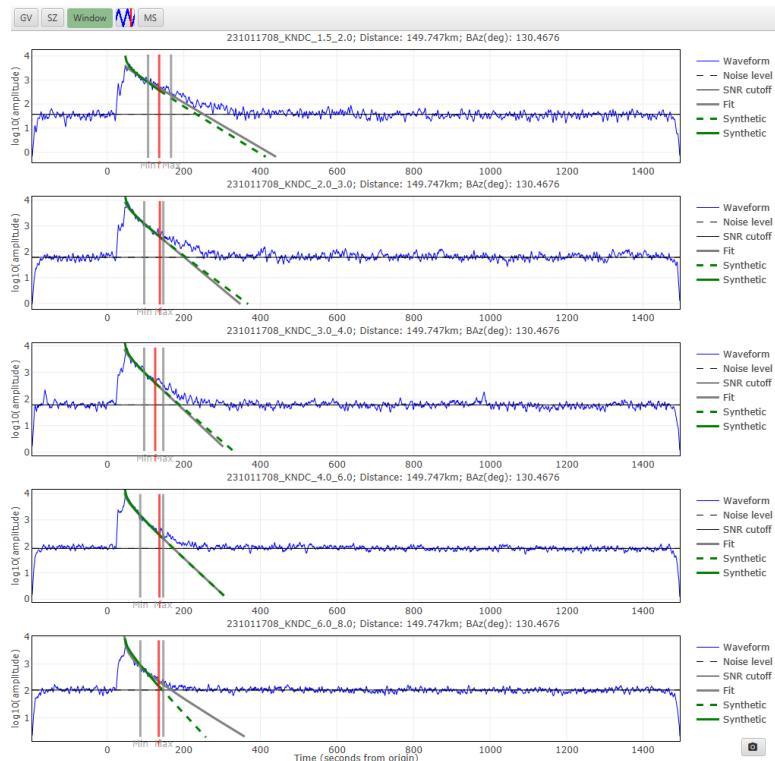


Рисунок 2 – Пример огибающих коды сигнала для станции KNDC, для одного события на разных частотах

Для проведения контроля качества калибровки, в программе существуют 3 раздела.

*Раздел «Shape»*. Позволяет просматривать эмпирические параметры и соответствие скорости по наблюдаемым данным в зависимости от расстояния. Для примера выбран диапазон частот 2,0–3,0 Гц (Рисунок 4), на котором можно видеть, есть ли большие отскоки данных или нет.

*Раздел «Site»*. Позволяет просматривать очаговые спектры в единицах Нм после определения поправки с использованием выбранных эталонных событий.

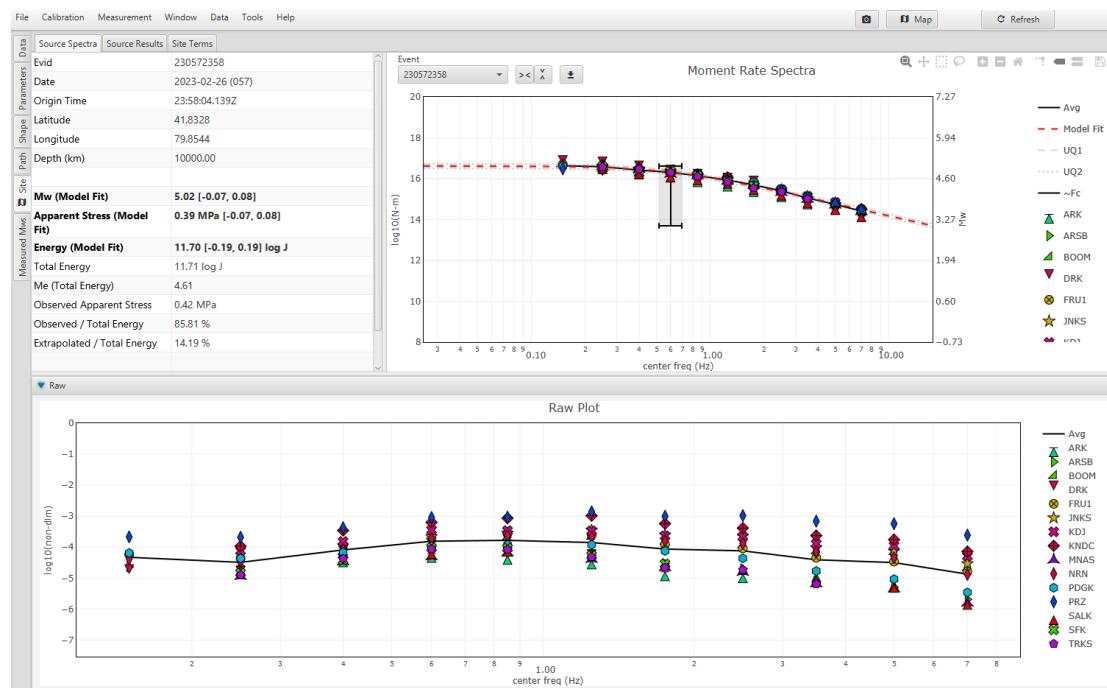


Рисунок 3 – Пример откалиброванного события 2023-02-26 23:58:04 mb 5.1 на вкладке SITE (Source Spectra)

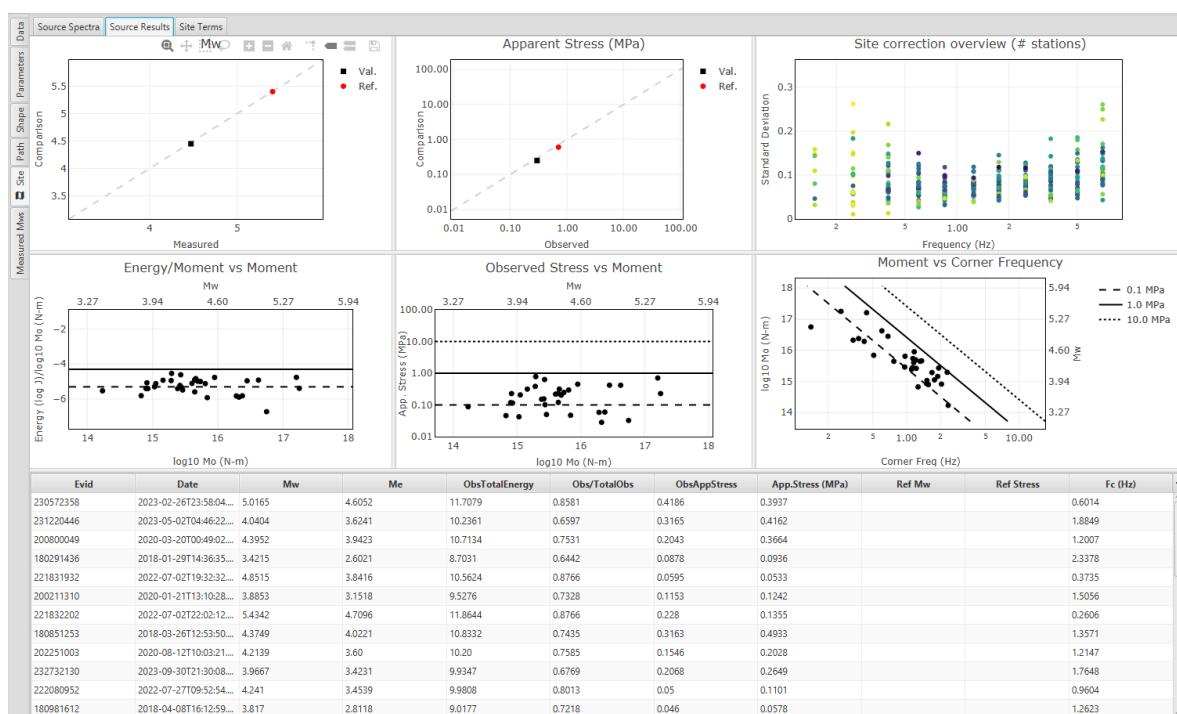


Рисунок 4 – Пример откалиброванного события 2023-02-26 23:58:04 mb 5.1 на вкладке SITE (Source Result)

Как видно на рис. 3 и 4, значения по всем станциям на всех частотах ведут себя достаточно согласованно. На рис. 5 и 6 представлены вкладки Spectra и Results в разделе «Measured Mws».

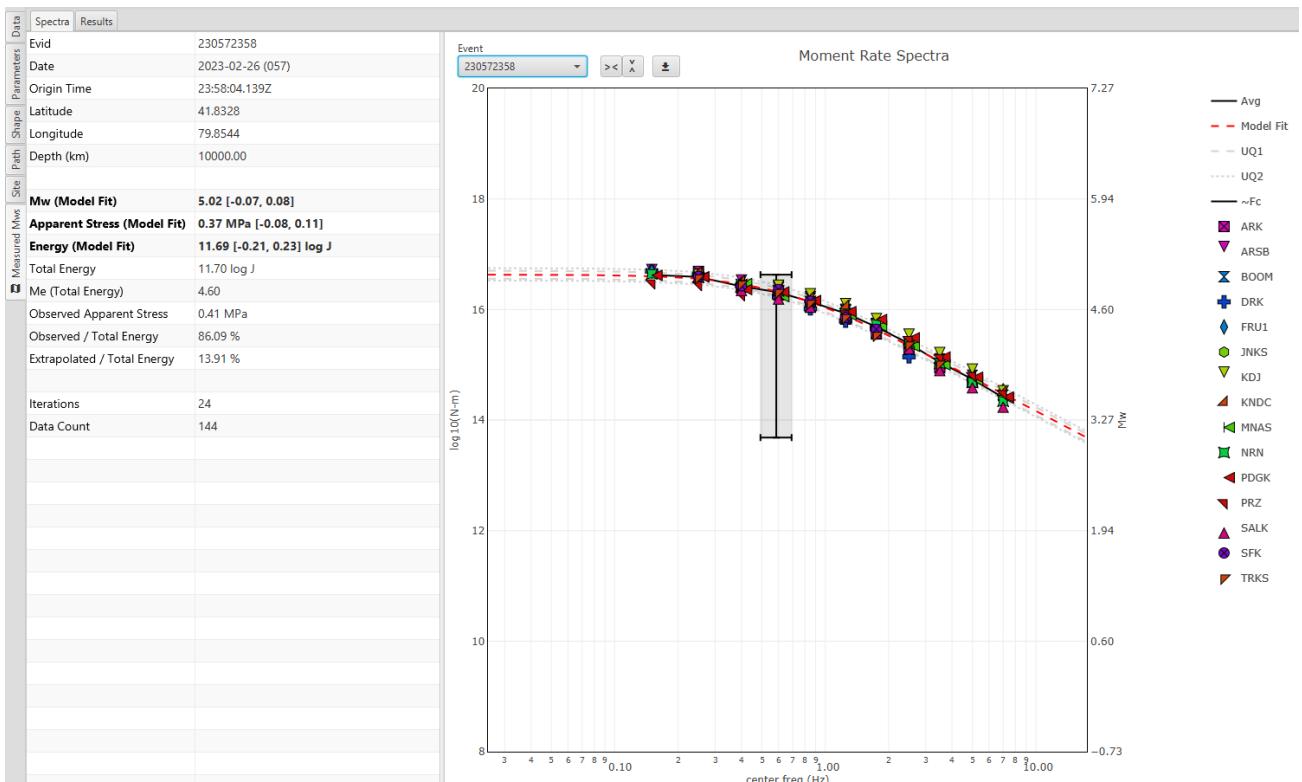


Рисунок 5 – Пример откалиброванного события 2023-02-26 23:58:04 mb 5.1 на вкладке Measured Mws (Spectra)

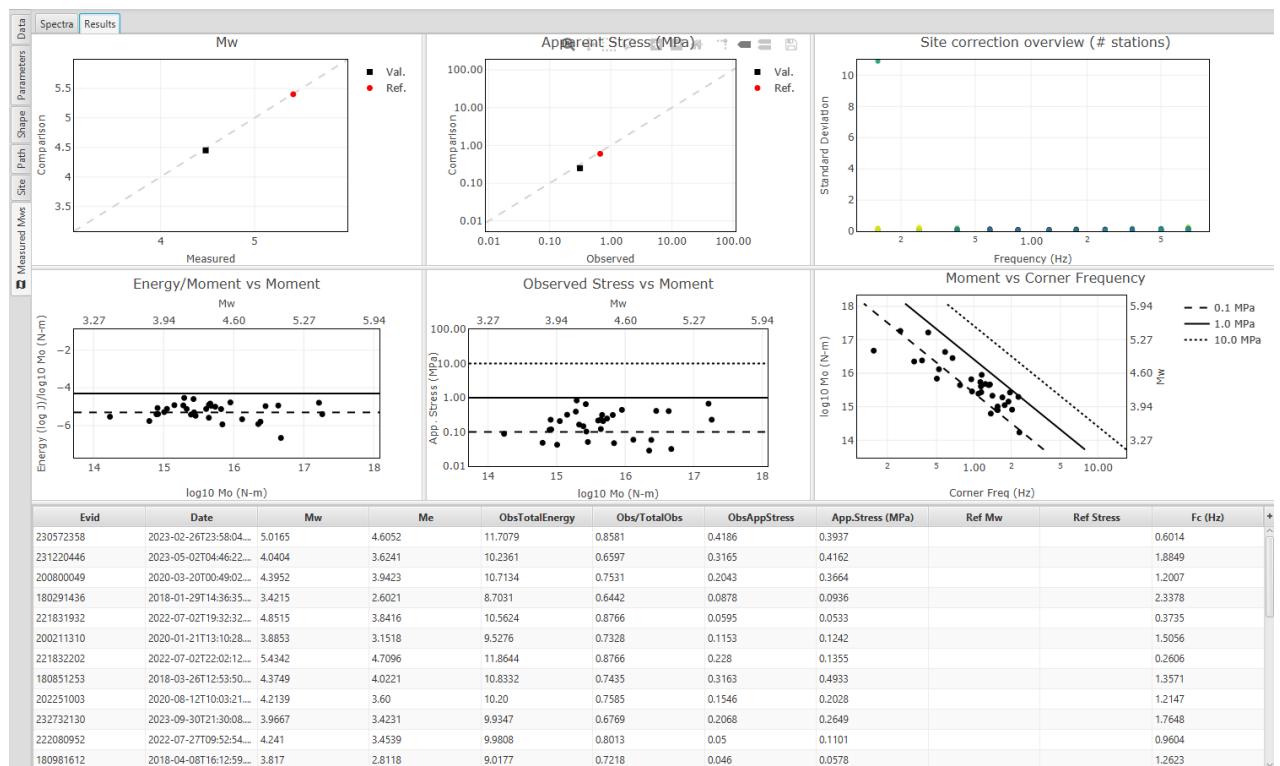


Рисунок 6 – Пример откалиброванного события 2023-02-26 23:58:04 mb 5.1 на вкладке Measured Mws (Result)

Таким образом, были получены значения магнитуды и другие очаговые параметры.

После всех этапов калибровки и проверки, рассчитанную магнитуду можно сохранить в файл и использовать в дальнейшем. Сравнение результатов CCT с СМТ показало удовлетворительное согласие в значениях Mo.

По полученным значениям угловой частоты очаговых спектров и сейсмического момента было проведено сравнение значений по землетрясениям Тянь-Шаня с другими регионами мира. (данные Kevin Mayeda and Jorge Roman-Nieves). Можно видеть, что основная масса этих значений соответствует средним кажущимся напряжениям между 0,1 и 1 МПа (LogMo = 15-16). Не отмечено увеличение кажущихся напряжений с ростом сейсмического момента, а, следовательно, и магнитуды землетрясений.

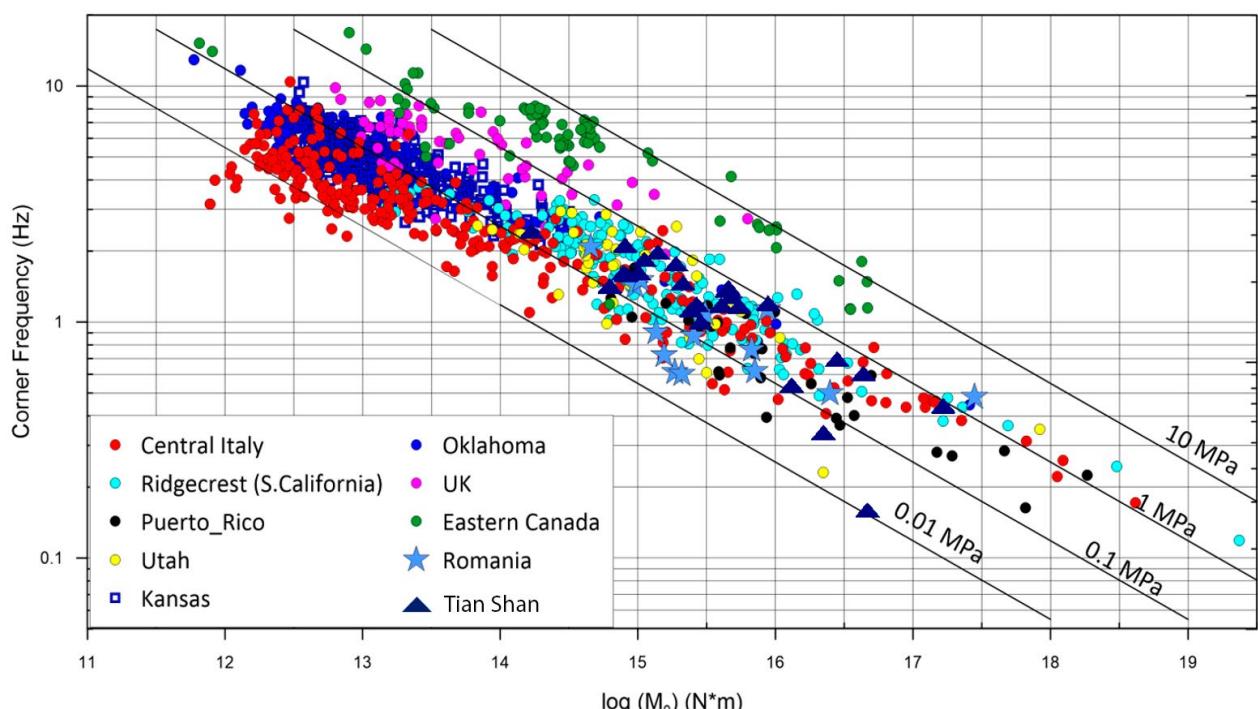


Рисунок 7 – Связь угловой частоты и сейсмического момента для землетрясений разных регионов мира. (рисунок взят из презентации [3]). На график рис. 7 нанесены треугольниками полученные значения по региону Тянь-Шань

### Заключение

Освоен метод калибровки коды для определения очаговых параметров. На материалах средних по силе землетрясений определены параметры очага. Впервые данные по Тянь-Шаню рассмотрены в совокупности с данными по другим сейсмически активным районам. Работа по использованию инструмента CCT продолжается на калибровке коды сильных событий.

### Литература

1. Экспериментальные исследования сейсмической коды / Т.Г. Раутиан, В.И. Халтурин, М.С. Закиров и др. М.: Наука. 1981. 141с.
2. Mayeda K., Hofstetter A., O'Boyle J.L., Walter W.R. Stable and transportable regional magnitudes based on coda-derived momentrate spectra // Bull. Seismol. Soc. Am., 2003, 93, 224–239.
3. Mayeda K., Roman-Nieves J. The Coda Calibration Tool (CCT) for Stable Source Spectra, Moment Magnitude, Radiated Energy, Apparent Stress and Routine Regional Network Processing. 2023. Presentation in Almaty, KNDC. 2023.