

УДК 550.34

¹Муралиев А.М., ²Дженалиев А. А., ¹Малдыбаева М.Б.¹Институт сейсмологии НАН КР, г.Бишкек, Кыргызстан²Technische Universität Berlin, Berlin, Germany

МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ БИШКЕКСКОГО ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Аннотация. В статье представлены результаты изучения пространственного распределения механизмов очагов 1790 землетрясений с энергетическими классами 7 и более ($K_R \geq 7.0$), произошедших на территории Бишкекского прогностического полигона, охватывающего территории Чуйской и Иссык-Кульской впадин и их горных обрамлений, за последние 30 лет (1991 – 2020 гг.). Основное внимание уделено картированию ориентации осей главных напряжений в очагах исследованных землетрясений. Переход от количественного описания угловых параметров осей напряжения сжатия и растяжения к векторному изображению с помощью GIS технологии позволил выявить особенности развития напряжённого состояния земной коры. Выявлены две зоны оси напряжения сжатия, в одной из которых (западная часть полигона) преобладают горизонтальные сжатия, направленные с севера и северо-запада на юг и юго-восток, а в другой (восточная часть полигона) оси напряжения сжатия направлены с северо-востока на юго-запад.

Ключевые слова: механизм очага, землетрясения, поле напряжений, оси сжатия и растяжения, прогноз землетрясений.

ЖЕР ТИТИРӨӨ БУЛАГЫ МЕХАНИЗМДЕРИ ЖАНА ЗАМАНБАП СТРЕССТИН ТАЛААСЫ

Аннотация. Макалада Чуй жана Ысык-Көл ойдуңдарынын аймагын камтыган, Бишкек болжолдуу полигонунун аймагында болгон 7 же андан көп энергетикалык класстары бар ($K_R \geq 7.0$) 1790 жер титирөөлөрдүн фокус механизмдеринин мейкиндик боюнча бөлүштүрүлүшүн изилдөөнүн жыйынтыктары келтирилген жана алардын тоо алкактары, акыркы 30 жыл ичинде (1991-2020). Негизги көңүл изилденген жер титирөөлөрдүн булактарындагы негизги чыңалуулардын огунун багытынын картасына түшүрүлөт. Кысуу жана чыңалуу окторунун бурчтук параметрлеринин сандык сүрөттөлүшүнөн ГИС технологиясын колдонуу менен вектордук сүрөткө өтүү жер кыртышынын чыңалуу абалынын өнүгүү өзгөчөлүктөрүн аныктоого мүмкүндүк берди. Кысуу стресстин огунун эки зонасы аныкталган, алардын биринде (көп бурчтуктун батыш бөлүгү) горизонталдуу кысуу басымдуулук кылат, түндүк менен түндүк-батыштан түштүккө жана түштүк-чыгышка багытталган, экинчисинде (чыгыштын чыгыш бөлүгү) көп бурчтук) кысуу стресс октору түндүк-чыгыштан түштүк-батышка багытталган.

Негизги сөздөр: фокус механизми, жер титирөөлөр, стресстик талаа, кысуу жана чыңалуу октору, жер титирөөнүн божомолу.

EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS AND THE MODERN STRESS FIELD OF THE BISHKEK PROGNOSTIC SITE

Abstract. The paper presents the results of studying the spatial distribution of the focal mechanisms of 1790 earthquakes with energy classes 7 and more ($K_R \geq 7.0$) that occurred on the territory of the Bishkek prognostic site, covering the territory of the Chuya and Issy-Kul depressions and their mountain frames, over the past 30 years (1991- 2020). The main attention is paid to the mapping of the orientation of the axes of the principal stresses in the sources of the investigated earthquakes. The transition from a quantitative description of the angular

parameters of the compression and tension axes to a vector image using GIS technology made it possible to identify the features of the development of the stress state of the earth's crust. Two zones of the compression stress axis were identified, in one of which (the western part of the polygon) horizontal compression prevails, directed from the north and north-west to the south and southeast, and in the other (the eastern part of the polygon) the compression stress axes are directed from the north-east to the southwest.

Keywords: focal mechanism, earthquakes, stress field, compression and tension axes, earthquake production.

Введение

Исследование механизмов очагов землетрясений и напряжённо-деформированного состояния земной коры, связанного с возникновением сильного землетрясения, является одной из актуальных проблем в современной сейсмологии. Её решение определяется не только изучением направленности излучения и распространения сейсмических волн, но и с физическим представлением о землетрясении как плоскости разрыва, по которой происходит смещение (подвижка), совпадающая с касательным напряжением в его очаге [1, 2]. С точки зрения тектонофизики очаги землетрясений в некотором смысле являются «датчиками» напряжений, действующих внутри земной коры и в верхней мантии.

Изучая механизм очага, можно определить направления главного растягивающего и сжимающего напряжений, действующих в очаговой области. Согласно классическим представлениям, землетрясения, вообще говоря, несут информацию о напряжённом состоянии очаговых областей и могут использоваться, как датчики напряжения в земной коре сейсмоактивного региона. В настоящее время изучение механизмов очагов землетрясений проводится практически во всех сейсмоактивных регионах планеты Земля. По территории Кыргызстана и Центральной Азии, включая Бишкекский прогностический полигон, ежегодно пополняются новыми определениями и публикуется каталог фокальных механизмов землетрясений [3, 4]. Имеются также работы [5 и др.], где проведены расчёты деформации по данным механизмов землетрясений полигона. Однако вопросы картирования параметров механизмов очагов землетрясений на территории Тянь-Шаня пока не рассматривались.

Целью настоящего исследования является пространственное изучение распределения ориентации осей главных напряжений сжатия и растяжения в очагах землетрясений и выявление особенностей напряжённого состояния, связанного с возникновением сильных сейсмических событий на территории Бишкекского прогностического полигона. Для этого необходимо построить карты-схемы ориентации осей главных напряжений сжатия и растяжения в очагах землетрясений, интерпретировать данные карты с целью построения полей напряжений полигона и провести ретроспективный анализ вариации временных рядов сжатия и растяжения перед ощутимыми землетрясениями.

Методика изучения и исходные данные

На основании квадрантного распределения первых вступлений Р-волн вокруг эпицентра, японский сейсмолог Накано [6] сформулировал задачу о точечной теоретической модели очага землетрясения. Теоретической моделью очага землетрясения называют такой сосредоточенный источник возбуждения продольных и поперечных волн в упругой среде, поле первых вступлений которого совпадает с наблюдаемыми полем при землетрясениях.

В настоящее время общепризнанной теоретической моделью сейсмического очага является двойной диполь – двойная пара сил без момента (модель Хонда-

Введенской). Система двойной пары имеет эквивалент системы сил, в которой две пары сил - растяжения и сжатия, равны по величине, но перпендикулярны друг другу. Назовем направление пары растяжения осями растяжения (оси Т), а пары сжатия – осями сжатия (Р). Картина излучения продольных волн из очага имеет четыре квадранта, которые разделяют область волн сжатия от области волн разрежения. Амплитуды первых смещений продольных волн вокруг оси Т большие и положительные, а вокруг оси Р - большие и отрицательные.

Величина амплитуды вдоль двух плоскостей, разделяющих области различных полярностей, равна нулю. Эти плоскости называются нодальными плоскостями и имеют некоторые ориентации как системы двойной пары сил - две плоскости ортогональны друг другу, поскольку две пары сил взаимно перпендикулярны. Оси главных напряжений в очаге землетрясения находят следующим образом. Ось Р – максимум сжимающих главных напряжений - путём проведения биссектрисы в квадрантах разрежения, а ось Т – минимум сжимающих главных напряжений - также проведя биссектрисы в квадрантах сжатия. Ось промежуточного напряжения В перпендикулярна к осям как Т, так и Р. Ось В находится на пересечении двух нодальных плоскостей.

Один из способов такого изучения называют «механизмом очага» или «фокальным механизмом». Так, четыре квадранта делятся двумя плоскостями, из которых одна совпадает с ориентацией плоскости разрыва, а другая, так называемая, вспомогательная плоскость, представляет собой вектор скольжения и определяет нормаль к первой. Это, по существу, геометрическая ориентация тензора сейсмического момента. Главные оси тензора сейсмического момента - это биссектрисы квадрантов сжатия и растяжения, которые называются осями Р и Т. Попытка связать направления осей Р и Т с направлением главных наибольших и наименьших сжимающих напряжений требует определённой осторожности. Они не всегда совпадают, так как тензор сброшенных напряжений содержит только сдвиговые напряжения. Оси Р и Т находятся в 45° к плоскости разрыва.

Для построения карты Р и Т нами использованы данные ориентации осей напряжения сжатия и растяжения в очагах 1790 землетрясений с энергетическим классом 7 и более, произошедших на территории полигона за период с 1991 по 2020 год. Выборка произведена из каталога механизмов очагов землетрясений Кыргызстана [7]. Процент умеренных и сильных землетрясений на территории полигона, для которых проведены определения направления главных осей напряжений в очагах, довольно высок и составляет 85%. Возможные ошибки определений угловых координат осей напряжений при необходимом распределении знаков смещений в сейсмических волнах не превышает $\pm 5-10^{\circ}$, что свидетельствует о высокой точности. Поэтому можно считать, что полученные нами результаты являются представительными для суждения о данных закономерностях.

Результаты

На рисунке 1 представлена карта-схема распределения механизмов очагов 1790 землетрясений ($K_p \geq 7.0$), произошедших на территории Бишкекского прогностического полигона за период с 1990 г. по 2020 г. Анализ показал, что преобладают землетрясения взбросового и надвигового типов. Присутствуют также другие типы – это сдвиги, сбросы и другие. Одно положение из двух ортогональных нодальных плоскостей в очагах совпадает с положением разлома, который проходит через очаговую область землетрясения.

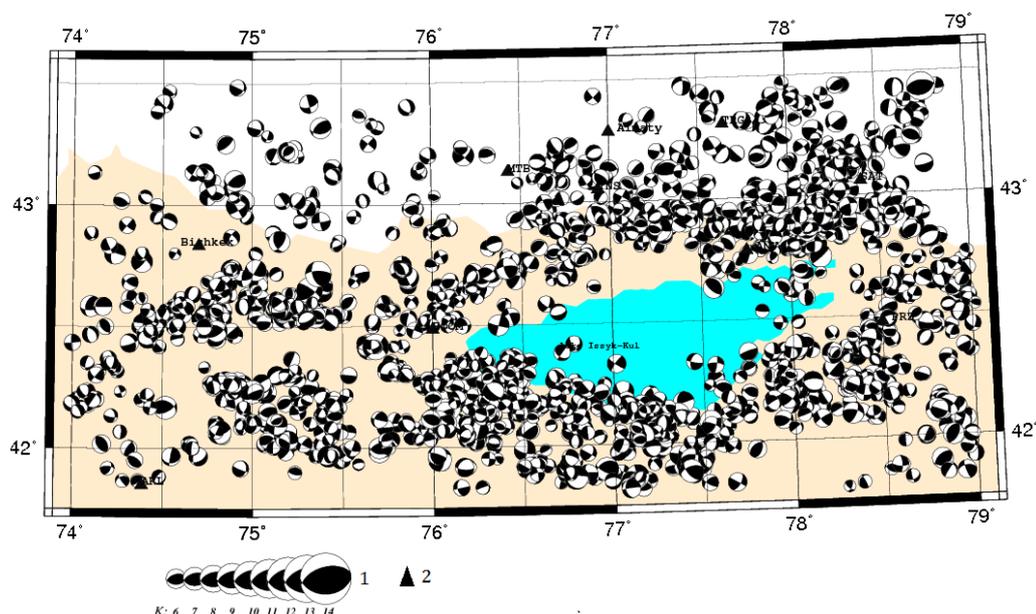


Рисунок 1. Карта-схема механизмов очагов землетрясений ($K_p \geq 7.0$) полигона за период с 1991 г. по 2020 г. 1 – стереорамы механизма очага землетрясения, 2 – сейсмическая станция.

На рисунке 2 представлена карта-схема распределения осей сжатия в очагах, исследуемых сейсмособытий, произошедших на территории полигона за последние 30 лет (1991-2020 гг.), на которой, даже невооруженным глазом, можно видеть сходящиеся стрелки (векторы), ориентированные, в основном, в близмеридиональном направлении. Имеются также векторы, показывающие значительные отклонения от указанного направления. Это означает, что на полигоне произошли не только землетрясения взбросового и надвигового типов подвижек, но и другие типы подвижек-сбросы, сброса-сдвиги и т.д., поэтому по направлениям стрелок очень сложно различать их подвижки. Кроме того, можно отметить ещё одну особенность, а именно: ориентация осей напряжения сжатия в очагах землетрясений, эпицентры которых находятся на западной части (от 74° до 76° меридианы) полигона, имеют, в основном северо-западное направление. Затем на востоке векторы сжатия поворачиваются на северо-восток. Это, может быть связано с особенностью пространственного распределения глубинных тектонических сил, действующих в Северо -Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоне. Границей разноориентированных осей напряжения сжатия в очагах землетрясений, является 76° меридиан (рисунок 2), т.е. от Боомского ущелья на восток в очагах землетрясений преобладают оси сжатия с северо-востока на юго-восток, а в противоположной стороне - оси сжатия с северо-запада на юго-восток. Отметим, что это первое «грубое» разделение территории полигона на две зоны сжатия.

Исследование показало, что на полигоне одна из главных осей напряжений, действующих в очагах (либо ось сжатия, либо ось растяжения) направлена почти горизонтально и, преимущественно, перпендикулярно к простиранию структур, независимо от глубины очага. При этом, под простиранием структур мы понимаем простирание полосы эпицентров землетрясений, простирание хребтов (Киргизский, Кунгей Ала-Тоо, Заилийский Ала-Тау и Терской Ала-Тоо) и разломов, каждой из которых соответствует определённый тип напряжённого состояния

На рисунке 3 показано распределение осей напряжений растяжения в очагах исследованных землетрясений. По сравнению с осями сжатия векторы растяжения

разбросаны. Но, известно, что согласно дислокационной модели очага землетрясения, ось растяжения перпендикулярна к оси сжатия.

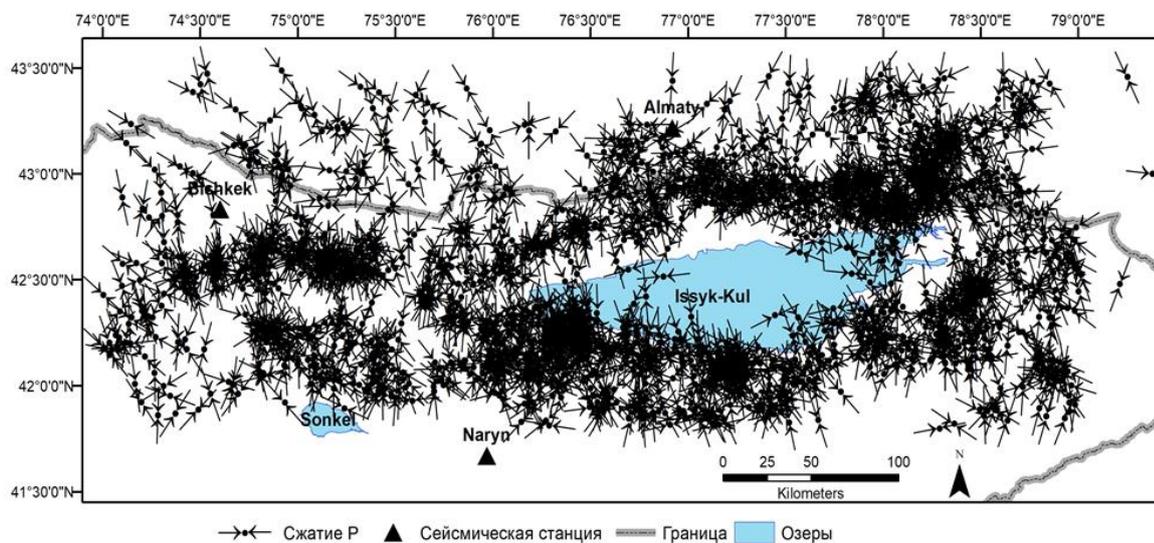


Рисунок 2. Ориентация осей напряжения сжатия в очагах землетрясений полигона.

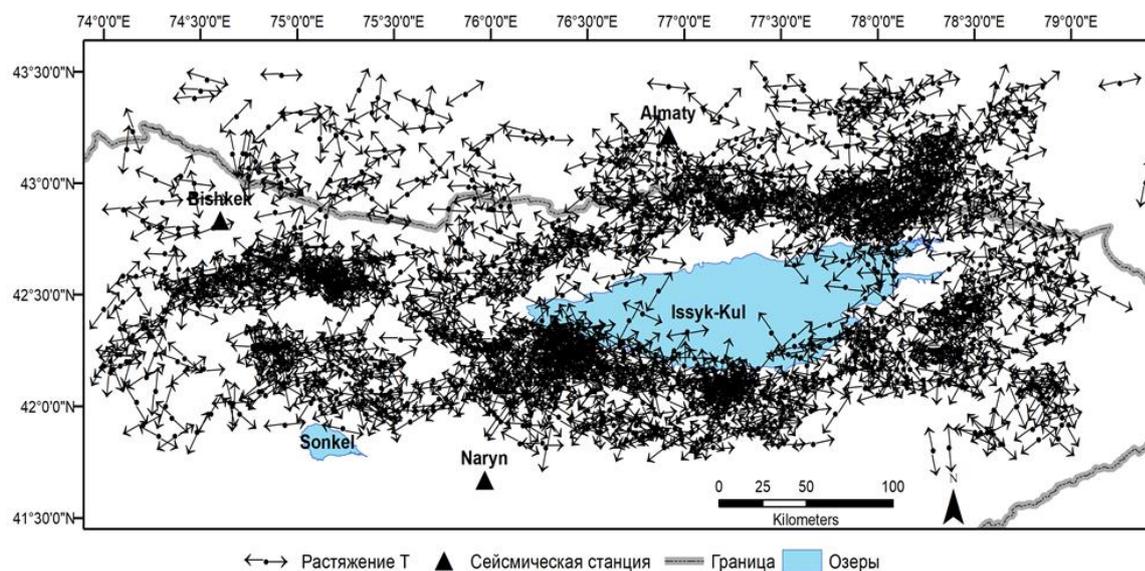


Рисунок 3. Ориентация осей напряжения растяжения в очагах землетрясений полигона.

Можно отметить, что оси напряжения растяжения в очагах землетрясений, в основном, ориентированы вдоль простирания структур.

Таким образом, напряжённое состояние Бишкекского прогностического полигона можно охарактеризовать близгоризонтальным сжатием близмеридионального направления с некоторым поворотом главных осей сжатия с запада на восток и близвертикального растяжения.

На рисунке 4 (а, б) представлены результаты ретроспективного анализа вариации временных графиков углов погружения напряжений сжатия за 2014 г. На графиках можно увидеть изменение величины угла наклона (plunge) перед умеренными землетрясениями. За 1.5 месяца до землетрясения 15 августа 2014 г. ($K_p=12.6$) произошло уменьшение величины plunge T (рисунок 4 б), а величина plunge P (рисунок

4 а) не изменилась. Аналогичная картина и для землетрясения 14 ноября 2014 г. ($K_p=13.7$), т.е. в качестве одного из предвестников сильного землетрясения можно использовать вариации углов наклона осей напряжения сжатия и растяжения. Дальнейшее исследование в этом направлении требует точные, устойчивые и представительные данные о фокальных механизмах землетрясений.

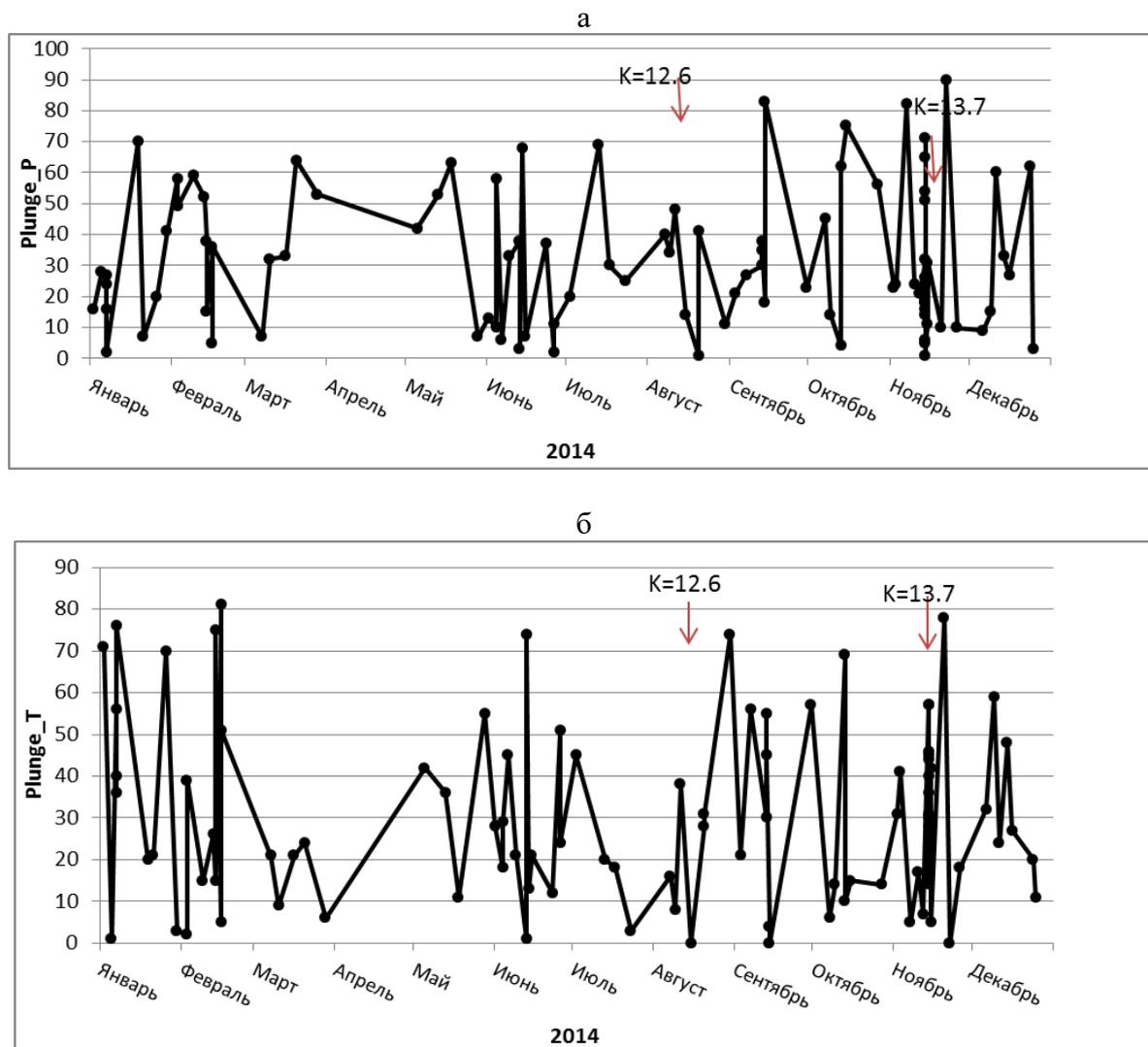


Рисунок 4. Вариация углов наклона (plunge) напряжения сжатия (а) и растяжения (б) в очагах землетрясений полигона во времени. Ось абсцисс - год и месяцы, ось ординат - угловое значение plunge P и T. Вверху маленькие стрелки показывают дату возникновения землетрясения с энергетическим классом К.

Заключение

1. Сейсмологические данные о фокальных механизмах землетрясений являются одним из наиболее информативных источников для изучения современного поля напряжений сейсмоактивных регионов.
2. Картирование параметров механизмов очагов землетрясений с помощью современных программ GIS-технологии дало нам возможность установить напряжённое состояние земной коры полигона. Представлены карты-схемы nodальных плоскостей, осей напряжений сжатия и растяжения в очагах исследованных землетрясений 1991-2020 гг. Пространственное изучение

распределения осей напряжения сжатия и растяжения в очагах землетрясений позволило получить представление о современном поле напряжений, действующего в земной коре Бишкекского прогностического полигона.

3. На территории полигона землетрясения происходят, в основном, в условиях горизонтального сжатия в близмеридиональном направлении и в близвертикальном растяжении. При таком напряжённом состоянии преобладают взбросовые и надвиговые типы землетрясения.
4. Выявлены две зоны сжатия на полигоне: западная - Бишкекская и Исык-Кульская-восточная. Первая из них характеризуется близгоризонтальным сжимающим напряжением, направленным с севера северо-запада на юг юго-восток, а вторая - с северо-востока на юго-запад.
5. Приведён выборочный пример (2014 г.) ретроспективного анализа изменения угла погружения осей сжатия и растяжения перед ощутимыми землетрясениями полигона. Вариация угла наклона главных напряжений в очагах землетрясений может использоваться как один из предвестников сильных землетрясений. Детальное изучение этого параметра, как один из предвестников сильных землетрясений, является предметом дальнейшего нашего исследования.

Литература

1. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокации. -М.: Наука, 1969. -136с.
2. Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений// Сейсмология №8. М., «Наука», 1972. -191с.
3. Землетрясения Северной Евразии (1990-2016гг.). ГС РАН, г.Обнинск.
4. Муралиев А.М., Абдыраева Б.С., Малдыбаева М.Б. Механизмы очагов землетрясений Кыргызстана за 2009 год//Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2014. №3. С.93-99.
5. Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадеева В.А. Сеймотектоническая деформация земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET)//Физика Земли.2005. №11. С.62-78.
6. Nakano H. Notes on the nature of the forces which give to the earthquake motions. Seismol. Bull., Central Meteorological Obs., Japan. 1923. 1, 92-120.
7. Муралиев А.М., Малдыбаева М.Б., Абдыраева Б.С. Краткое описание технологии создания информационной базы данных о фокальных механизмах землетрясений Кыргызстана//Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: XI Международная сейсмологическая школа. –Бишкек: ИС РАН, 2016. С.102-108.

Рецензент: д. ф.-м. н. А.М. Токтосопиев