

УДК 550.34

Муралиев А.М., Абдыраева Б.С.,
Малдыбаева М.Б., Сабирова Г.А.
Институт сейсмологии НАН КР,
Бишкек, Кыргызстан

СДВИГО-НАДВИГОВЫЕ ПОДВИЖКИ В ОЧАГАХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СОВРЕМЕННОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАТКЕНСКОЙ ОБЛАСТИ КЫРГЫЗСТАНА

Аннотация. В статье приведены основные результаты анализа решения фокальных механизмов землетрясений $K_R \geq 9.6$ Баткенской области Кыргызстана за период 2000-2021 гг. При анализе учитывалось распределение фокальных механизмов 72 землетрясений и их эпицентров, а также положение активных разломов. Количество сдвиго-надвиговых типов подвижек по плоскостям разрывов в очагах исследованных землетрясений преобладает по сравнению с другими типами. Сведения о сейсмичности, фокальных механизмах очагов землетрясений и активных разломах позволяют охарактеризовать напряжённо-деформированное состояние земной коры, ответственное за подготовку сильного землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, эпицентр, механизм очага, разлом, нодалная плоскость, оси сжатия и растяжения.

КЫРГЫЗСТАНДЫН БАТКЕН АЙМАГЫНДАГЫ КАТУУ ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРДҮН БУЛАКТАРЫНДА ЖАНА ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН АЗЫРКЫ СТРЕСС ТАЛААСЫНДА ЖЫЛЫШУУ КЫЙМЫЛДАРЫ

Аннотация. Макалада 2000-2021-жылдар аралыгында Кыргызстандын Баткен облусундагы жер титирөөлөрдүн очоктук механизмдерин ($K_R \geq 9.6$) чечүүнүн анализинин негизги жыйынтыктары берилген. Талдоо 72 жер титирөөнүн очоктук механизмдерин бөлүштүрүүнү, алардын эпицентрлерин жана активдүү жаракалардын ордун камтыды. Изилденген жер титирөөлөрдүн булактарында жаракалардын тегиздиктери боюнча жылма түрлөрдүн саны башка түрлөргө салыштырмалуу басымдуу. Сейсмикалуулугу, жер титирөө булактарынын фокалдык механизмдери жана активдүү жаракалар жөнүндөгү маалыматтар катуу жер титирөөнү даярдоого жооптуу болгон жер кыртышынын чыңалуу-деформациялык абалын мүнөздөөгө мүмкүндүк берет.

Негизги сөздөр: жер титирөө, эпицентр, фокалдык механизм, жарака, нодалдык тегиздиги, кысуу жана узартуу октору.

STRIKE SLIP AND THRUST TYPES OF MOTIONS AT THE SOURCES OF STRONG EARTHQUAKES AND THE MODERN STRESS FIELD OF THE EARTH'S CRUST IN THE BATKEN REGION OF KYRGYZSTAN

Abstract. The article presents the main results of the analysis of the focal plane solutions of earthquakes ($K_R \geq 9.6$), occurred in the Batken region of Kyrgyzstan for 2000-2021. The distribution of focal mechanisms of 72 earthquakes and their epicenters, as well as the active faults locations were analysed. The number of strike slip and thrust types of motions along the planes of faults in the sources of the studied earthquakes prevails in comparison with other types. Information about seismicity, focal mechanisms of earthquake sources, and active faults makes it possible to characterize the stress-strain state of the earth's crust, which is responsible for the preparation of a strong earthquake.

Key words: earthquake, epicenter, focal mechanism, fault, nodal plane, compression and extension axes.

Введение. Изучение механизма очага землетрясений – источника сейсмических волн – имеет важное значение для исследования тектонических движений земной коры и верхней мантии. Суммарный анализ локальных деформаций в очагах землетрясений данной сейсмоактивной области позволяет судить о её напряжённно-деформированном состоянии. Сведения о последнем могут быть использованы для выяснения условий формирования тектонических структур, оценки сейсмической опасности и прогноза сильных землетрясений. Основной целью статьи является проведение анализа различных типов подвижек в очагах сильных землетрясений, произошедших за последние двадцать лет (2000-2021 гг.) и построение современного поля напряжений земной коры, приводящего к возникновению сильных землетрясений. Для решения данной задачи мы выбрали сейсмологические данные для исследуемой территории, собранные за последние 20 лет (2000-2021 гг.) - как один из сейсмически активных периодов наблюдений. За этот период в Баткенской области произошли 7 землетрясений с энергетическим классом 13 и более (см. Рисунок 1(с)). Произведена выборка из каталога механизмов очагов землетрясений с $K \geq 9.6$ Кыргызстана [1] и на основе собственных данных построена карта-схема распределения ориентации осей главных напряжений в очагах исследованных землетрясений.

Для определения механизма очага нами используется дислокационная модель очага землетрясения Хонда-Введенской [2, 3]. Практическое выполнение процедуры базируется на знаках первых вступлений продольных волн, зарегистрированных региональной сетью сейсмических станций региона. Исследуемая территория ограничена координатами: $39^{\circ}00'$ - $40^{\circ}40'$ с. ш. и $69^{\circ}00'$ - $72^{\circ}30'$ в. д. Все выборки произведены по указанным координатам из необходимых сейсмологических источников и других данных.

Исходные данные. В качестве исходных данных для работ использован каталог механизмов очагов землетрясений Кыргызстана и прилегающих районов [1], составленный по знакам первых вступлений продольных волн, зарегистрированных широкополосными цифровыми станциями Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики. Составлен рабочий каталог для Баткенской области. В случае сильных землетрясений ($K_R \geq 12.0$) в рабочий каталог внесены также данные из международных центров GCMT [4], NEIC [5], ISC[6], MOS[7].

Количество определений механизмов очагов землетрясений за 2000-2021 гг., произошедших на территории Баткенской области.

Таблица 1.

K_R	9	10	11	12	13	14	Сумма
N	36	43	13	3	1	3	99
n	25	32	8	3	1	3	72
n/N	69%	74%	61%	100%	100%	100%	

Примечание: K_R - энергетический класс, N- общее количество землетрясений, n- число землетрясений, для которых определены механизмы очагов.

Описание результатов. На Рисунке 1 представлено распределение эпицентров и диаграммы фокальных механизмов 99 землетрясений с энергетическими классами 9.6 и более за период с 2000 г. по 2021 г., а также линии разломов на территории Баткенской области. Гипоцентров этих землетрясений находятся на глубине 5-30 км, т.е. они расположены в верхней части земной коры (см. Рисунок 1(b)). Уровень сейсмической активности за период 2000-2021 гг. значительно повышается. Этому свидетельствует произошедшие здесь 7 сильных ($K=13.0 - 14.0$) землетрясений, с интервалом времени возникновения 4-7 лет.

Из Рисунка 1 видно, что восточная часть территории выглядит сейсмически активней по сравнению с западной половиной области. Здесь максимальный энергетический класс землетрясений достиг до 14.5. Мы видим, что группирование землетрясений наблюдается в районе сейсмической станции «Чимион» (CHN), очаги землетрясений приурочены к зоне Сулюктинского разлома и его восточного продолжения. Другая группа эпицентров концентрируется на юге от сейсмических станций «Чаувай» (CHV) и «Шахимардан» (SHA). Очаги землетрясений, по-видимому, связаны с тектоническими движениями Туркестан-Алайского разлома. Следующая группа землетрясений находится в западном продолжении Северо-Хайдарканского разлома.

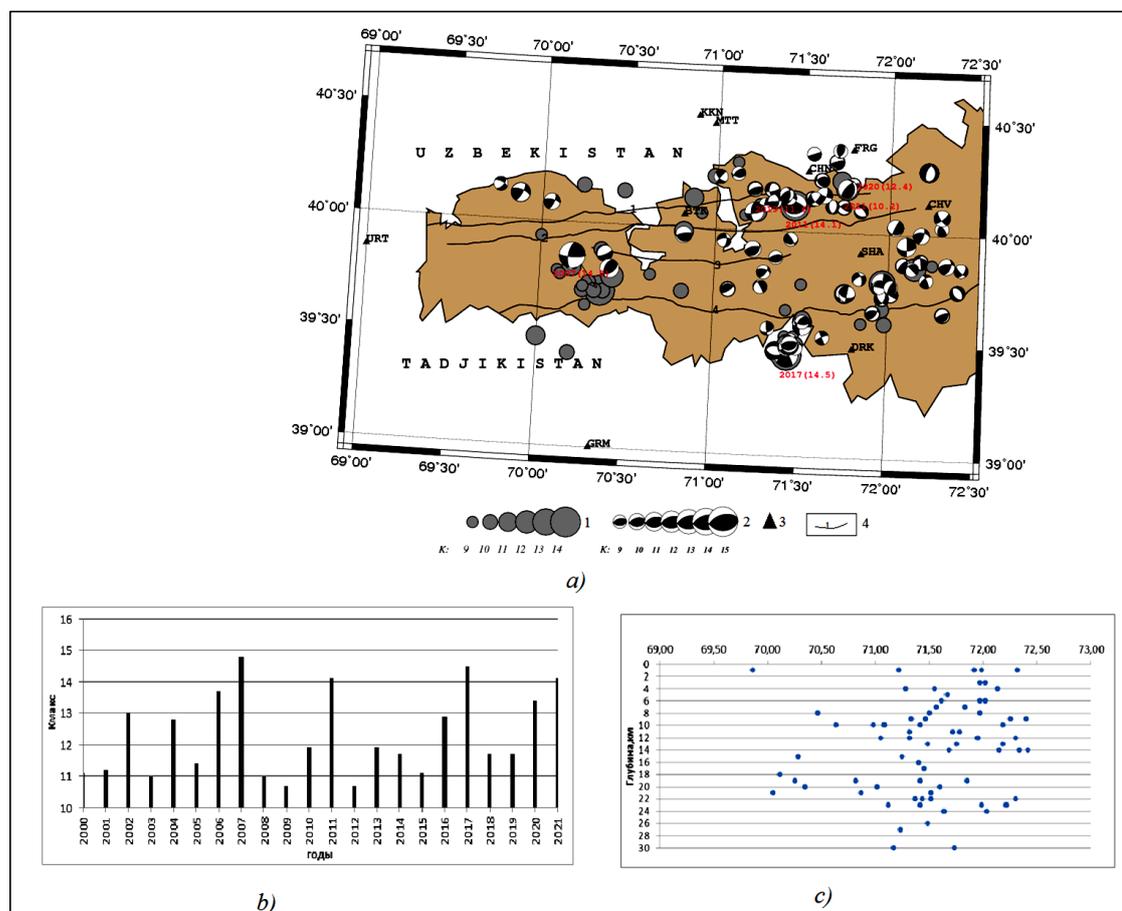


Рисунок 1. Представлены: (а) - распределение эпицентров и механизмов очагов землетрясений ($K \geq 9.6$) за период 2000-2021 гг. и разломов; (б) – возникновения землетрясений на территории Баткенской области Кыргызстана во времени; (с) - гипоцентры землетрясений по глубинам, Условные обозначения: 1- эпицентры, 2- диаграммы механизмов очагов землетрясений, 3 - сейсмическая станция, 4 - разломы: Сулюктинский (1), Катран-Тоо (2), Северо-Хайдарканский (3), Туркестан-Алайский (4) [9].

В нашем случае изучение сейсмичности выражается в виде распределения эпицентров землетрясений и механизмов их очагов, а также линии разломов по территории области (Рисунок 1). Наиболее активным участком в сейсмическом отношении является восточная часть исследуемой территории, то есть Кадамжайский район Баткенской области. Большое количество очагов землетрясений возникло к восточной части (оконечности) Сулюктинского, Северо-Хайдарканского и Туркестан-Алайкого разломов, которые простираются в субширотном направлении. В очагах исследованных землетрясений доминировали «сдвига-надвиговые» типы подвижек. Это, по-видимому, отражает такое же тектоническое движение по указанным разломам. В то же время западная часть территории (от 71-й параллели к западу) относилась в рассматриваемом диапазоне времени наблюдений к слабосейсмичным участкам. Здесь фиксировалось намного меньшее количество землетрясений по сравнению с восточной частью территории.

Классификация землетрясений по типам подвижек в их очагах за период 2000-2021 гг. в Баткенской области производилась следующим образом: в очагах трёх землетрясений произошла подвижка типа «сдвиг», 6 землетрясений – «сброс», 10 землетрясений - «сдвига-сброс», 7 землетрясений - «надвиг», 20 землетрясений-«сдвига-надвиг», 12 землетрясений - «взброс по крутой плоскости или сдвиг по пологой», 14 землетрясений - «взброс». Таким образом, на территории Баткенской области преобладают подвижки типа «сдвига-надвиг» в очагах исследованных землетрясений. Механизмы очагов определены 100%, т.е. для всех землетрясений с $K \geq 13.0$, а для землетрясений с $K=10.0-12.0$ – более 70%. Это означает, что мы имеем дело с представительным фактическим материалом.

Согласно дислокационной модели очага землетрясения [3], сдвиговая подвижка в очаге землетрясения – это смещение по вертикальной или наклонной плоскости разрыва, возникающего в результате действия тектонических сил сжатия и растяжения в горизонтальном направлении. Сдвиг – одна из форм разрывных тектонических деформаций, при которой происходит смещение блоков в горизонтальном направлении. Надвиговой тип механизма очага землетрясения означает, что смещение произошло по пологой (45^0-60^0) плоскости разрыва, по которому всякий блок поднят относительно лежащего и надвинут на него. Сдвига-надвиговые механизмы землетрясений обычно связаны с положением в пространстве нодальных плоскостей и осей главных напряжений сжатия и растяжения. Ось напряжения сжатия действуют по горизонтальной плоскости, ось растяжения – близвертикальной (угол с вертикалью $\alpha_T=30^0-60^0$).

На Рисунке 2 представлено распределение осей напряжений сжатия в очагах исследованных землетрясений по территории Баткенской области. Из Рисунка 2 видно, что ориентация осей напряжения сжатия в очагах землетрясений, в основном, имеет меридиональный характер, точнее векторы сжатия направлены в крест геологических структур (линии разлома, хребта и др.). Рисунок 2 показывает, что ориентации главных осей сжатия в очагах исследованных землетрясений, в основном, направлены перпендикулярно или в крест линии разломов и других геологических структур. Такая особенность механизмов очагов землетрясений позволяет определить современное поле упругих напряжений земной коры исследуемой территории.

В качестве примера покажем обработку механизма очага землетрясений по данным региональной сети сейсмических станций. Для сравнения полученных нами решений приведены также данные других международных центров (NEIC, GTMC и др.). Землетрясение с энергетическим классом $K=14.8$ произошло 8 января 2007 года в Баткенской области, его очаг расположен в верхней части земной коры на глубине 20 км и приурочен к Северо-Хайдарканскому разлому (Рисунок 1). Для определения механизма очага использованы знаки смещений продольных волн по данным 20 станций.

Результаты решения и диаграмма фокального механизма землетрясения 2007 года с энергетическим классом $K=14.8$ приведены на Рисунке 3.

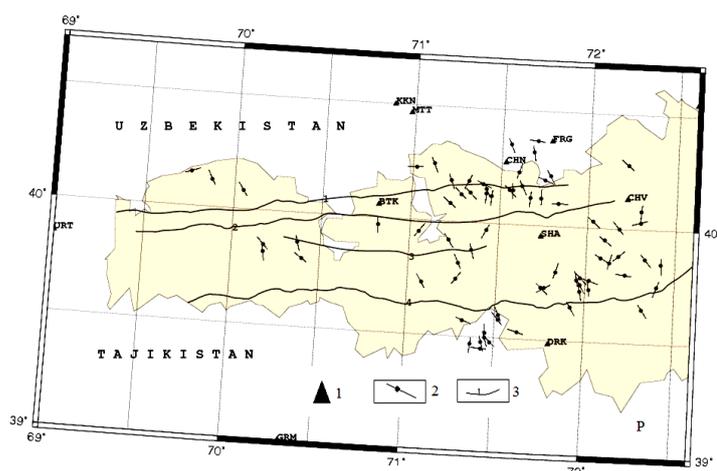


Рисунок 2. Распределение оси главных напряжений сжатия в очагах землетрясений по территории Баткенской области. 1- сейсмическая станция, 2- вектор напряжения сжатия в очаге землетрясения, 3- линии разлома [9].

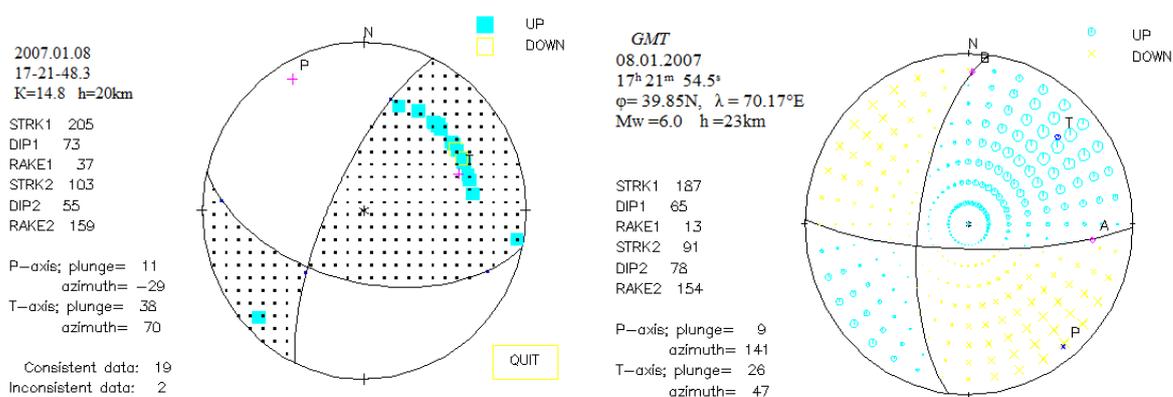


Рисунок 3. Пример определения механизма очага землетрясения 8 января 2007 г. ($K=14.8$) Баткенской области (слева- решение ИС НАН КР, справа- решение международного центра GMT). Первый (левый рисунок) - механизм очага определён по знакам первых вступлений Р-волн, второй – по данным телеметрических наблюдений методом инверсии; синим цветом обозначена – волна сжатия, жёлтым – волна растяжения.

Результаты обработки компьютерного решения приведены в таблице 2. Записи первых вступлений Р-волн в большинстве случаев чёткие. Ось напряжения сжатия в очаге направлена на северо-запад. Азимут 331° и угол 11° . Ось напряжения растяжения в очаге направлена на северо-восток. Азимут 70° и угол 38° . Ось промежуточного напряжения ориентирована на юго-запад. Азимут 226° и угол 50° . В результате в очаге землетрясения произошла деформация «надвигового» типа. Азимут простирания первой нодальной плоскости $STK=205^\circ$, угол падения $DP=73^\circ$, угол скольжения $SLIP=37^\circ$. Азимут простирания второй нодальной плоскости $STK=103^\circ$, угол падения $DP=55^\circ$, угол скольжения $SLIP=159^\circ$. Подвижка в очаге землетрясения - «сдвига-надвиг». Аналогичное решение найдено также другими международными центрами (GCMТ,

NEIC) (таблица 2). Отметим, что наше решение механизма очага данного землетрясения хорошо согласуется с решением международных центров [8]. Положение нодальных линий в обоих случаях практически совпадает. В то же время знаки первых вступлений Р-волн от южных сейсмических станций из-за нечёткого вступления отсутствуют. Это затрудняет проведение нодальных линий и нахождение однозначного решения механизма очага. Именно в такой ситуации в поиске однозначного решения помогают данные из других источников, что и сделано для землетрясения 08.01.2007 г. (Рисунок 3).

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясения 8 января 2007 г.

Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Вид подвижки	Источник
Т		N		P		NP1			NP2				
PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP		
38	70	50	226	11	331	205	73	37	103	55	159	Сдвиго-надвиг	ИС НАН КР
26	47	62	248	9	141	187	65	13	91	78	154	Сдвиго-надвиг	GCMT
12	57	76	264	6	148	193	77	4	102	86	167	сдвиг	NEIC

На Рисунке 4 показано решение механизма очага для 4 сильных ($K=11.0 - 14.0$) землетрясений Баткенской области.

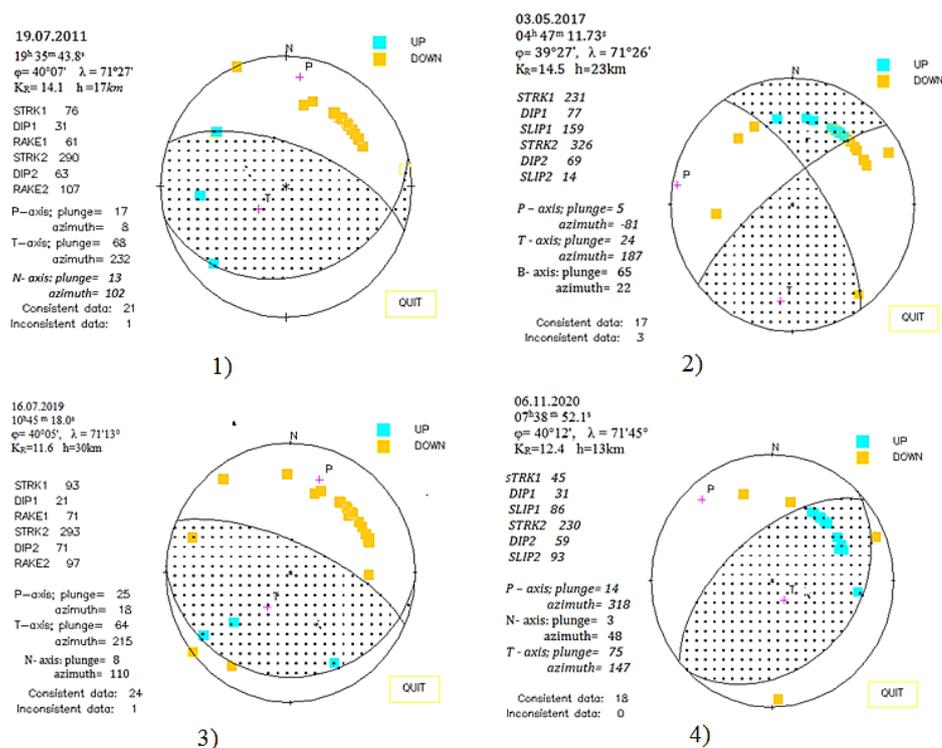


Рисунок 4. Примеры компьютерных определений для землетрясений: 1)- 19.07.2011 г., 19 час, 35 мин, $\phi = 40^{\circ}07'N$, $\lambda = 71^{\circ}27'E$, $h = 17$ км, $K = 14.1$; 2)- 03.05.2017 г., 04 час 47 мин, $\phi = 39^{\circ}27'N$, $\lambda = 71^{\circ}26'E$, $h = 23$ км, $K = 14.5$; 3) 16.07.2019 г., 10 час 45 мин, $\phi = 40^{\circ}05'N$, $\lambda = 71^{\circ}13'E$, $h = 30$ км, $K = 11.6$; 4) 06.11.2020 г., 07 час 38 мин, $\phi = 40^{\circ}12'N$, $\lambda = 71^{\circ}45'E$, $h = 13$ км, $K = 12.4$.

Таблица 3. Параметры механизма очага сильных землетрясений.

Дата	Время	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Вид подвижки	Источник
		T		N		P		NP1			NP2				
		PL	AZ M	PL	AZ M	PL	AZ M	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP		
19.07.2011	19-35	68	232	13	102	17	8	76	31	61	290	63	107	надвиг	ИС НАН КР
		67	191	6	86	22	354	72	24	75	269	67	97	взброс по крутой плоскости или сдвиг по пологой	GCMТ
		74	190	3	89	15	358	271	61	94	84	30	84	надвиг	NEIC
		70	229	15	90	12	357	279	59	108	67	35	63	надвиг	MOS
		75	180	00	000	15	360	90	30	90	270	60	90	надвиг	NEIC
03.05.2017	04-47	24	187	65	22	5	279	231	77	159	326	69	14	сдвиго-надвиг	ИС НАН КР
		36	199	53	30	5	292	342	61	24	240	69	149	сдвиго-надвиг	GCMТ
		36	205	54	21	2	114	243	63	154	345	66	28	сдвиго-надвиг	NEIC
		35	204	55	26	1	295	243	66	152	345	65	25	сдвиго-надвиг	NEIC
16.07.2019	10-45	64	215	8	110	25	18	93	21	71	293	71	97	взброс по крутой плоскости или сдвиг по пологой	ИС НАН КР
		26	47	62	248	9	141	187	65	13	91	78	154	взброс по крутой плоскости или сдвиг по пологой	GCMТ
06.11.2020	07-38	75	147	03	48	14	318	45	31	86	23	59	93	надвиг	ИС НАН КР
		68	194	18	51	12	317	25	36	59	241	59	111	надвиг	GCMТ
		68	101	10	217	19	311	57	27	112	212	64	78	надвиг	NEIC
		60	117	00	26	30	296	25	14	89	206	75	90	взброс по крутой плоскости или сдвиг по пологой	NEIC

Из Рисунка 4 и таблицы 3 видно, что в очагах сильных землетрясений произошли «сдвиго-надвиговые» и «надвиговые» виды подвижек. Это означает, что подвижка по висячему крылу разрыва в очагах землетрясений смещена вверх относительно лежащего крыла разрыва. Ориентация плоскости разрывов в основном направлена в субширотном направлении и совпадает с простиранием разлома. Оси напряжения сжатия в очагах землетрясений ориентированы в близгоризонтальном и близмеридиональном направлении.

Выводы:

1. В результате проведенных сейсмологических исследований выявлено, что количество «сдвиго-надвиговых» подвижек в очагах сильных ($K=12.0-14.0$) землетрясений Баткенской области преобладает по сравнению с другими типами подвижек.
2. Напряжённое состояние земной коры Баткенской области по сейсмологическим данным характеризуется близмеридиональным и близгоризонтальным сжатием и близвертикальным растяжением, что согласуется с характером современного регионального поля напряжений.

3. Результаты массовой обработки фокальных механизмов землетрясений в ИС НАН КР достаточно хорошо согласуются с результатами определения совершенно независимыми методами, полученными в международных центрах (например, GCMT, NEIC, MOS и др.). Такое совпадение обнадеживает дальнейшие исследования в этом направлении.
4. Полученные нами результаты рекомендуются использовать при проведении сейсмического районирования и прогноза сильных землетрясений.

Литература

1. А.М. Муралиев, М.Б. Малдыбаева, Б.С. Абдыраева. Каталог механизмов очагов землетрясений Кыргызстана за период 1946-2010 гг.// Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2016. Единая геофизическая служба РАН. Сборник трудов конференции. 2016. С. 219-223.
2. Honda H. On the mechanism and the types of the seismograms of shallow earthquakes. – Geophys. Mag., 1932, 5, №1.
3. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью Теории дислокаций. // Изв. Ан СССР. Сер.геофиз. –1956-№3. - С.277-284.
4. The Global CMT Project (GCMT). – New-York, USA. –URL: www.global.cmt.org/CMTsearch.html
5. National Earthquake Information Centre. - URL: <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>
6. Bulletin of the International Seismological Centre for 2016-2017. – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2015. www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin.
7. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2016-2017 гг. / Отв. ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: ГСРАН, 2016-2017. –URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2016-2017/.
8. Муралиев А.М., Малдыбаева М.Б., Абдыраева Б.С. Положение плоскости разрыва в очаге Сазкого землетрясения 2019 года ($M_{pv} \geq 5.2$) в районе Ошского сейсмогенного узла на юге Кыргызстана. Вестник Института сейсмологии НАН КР. - 2020. -№2(16). –С. 38- 41.
9. Чедия О.К., Трофимов А.К., Абдрахматов К.Е. и др. - Карта новейших краевых разломов и линеаментов Киргизской ССР. 1988г.

Рецензент: д. г.-м. н., профессор Дж.Ж. Кендирбаева