

УДК 550.346 (575.2)

Муралиев А.М., Абдыраева Б.С., Малдыбаева М.Б.
Институт сейсмологии НАН КР при ПКР,
г. Бишкек, Кыргызстан

СЕЙСМИЧНОСТЬ И ОБЛАСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БРЕШИ ПЕРЕД СИЛЬНЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 2024 ГОДА С МАГНИТУДОЙ $M_w=6.5$ В РАЙОНЕ УЧТУРФАНА ЮЖНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Аннотация. В статье представлены изучение сейсмической активности Южно-Тянь-Шаньской зоны, направленное на выявление областей сейсмических брешей, как потенциальных мест ожидаемых землетрясений. Составлены карты распределение эпицентров исторических сильных землетрясений с $M_w \geq 5.0$, временной ход исторических сильных землетрясений для Тянь-Шаня (1770-2025 гг.), карта сейсмичности Кыргызстана за период 1955-2023 гг. с $K \geq 9.0$, область сейсмической бреши перед Учтурфанским землетрясением 2024 года. Сейсмологический метод выделения области сейсмической бреши можно использовать для прогнозирования места ожидаемых сильных землетрясений.

Ключевые слова: эпицентр, землетрясение, основной толчок, фокальный механизм, сейсмическая бреши, магнитуда, сейсмичность, энергетический класс.

ТҮШТҮК ТЯНЬ-ШАНДЫН ҮЧТУРПАН РАЙОНУНДАГЫ 2024-ЖЫЛДАГЫ МАГНИТУДАСЫ $M_w=6.5$ БОЛГОН КАТУУ ЖЕР ТИТИРӨӨГӨ ЧЕЙИНКИ СЕЙСМИКАЛУУЛУК ЖАНА СЕЙСМИКАЛЫК ЖАРАКА ОБЛАСТЫ

Кыскача мазмуну. Макалада Түштүк Тянь-Шань аймагынын сейсмикалык активдүүлүгүн изилдөө, күтүлүүчү жер титирөөнүн потенциалдуу орду катары сейсмикалык боштуктарды аныктоого багытталган. $M_w \geq 5.0$ болгон тарыхый күчтүү жер титирөөлөрдүн эпицентрлеринин жайгашуу карталары, Тянь-Шань үчүн тарыхый күчтүү жер титирөөлөрдүн убакыттык өнүгүүсү (1770-2025-жж.), 1955-2023-жылдар аралыгындагы Кыргызстандын сейсмикалуулук картасы ($K \geq 9.0$), 2024-жылдагы Учтурфан жер титирөөсүнө чейинки сейсмикалык боштук аймагы түзүлгөн. Сейсмикалык боштук аймагын бөлүүчү сейсмологиялык ыкманы күтүлүүчү күчтүү жер титирөөлөрүнүн ордун алдын ала айтуу үчүн колдонсо болот.

Негизги сөздөр: так очогу, жер титирөө, негизги силкинүү, фокалдык механизм, сейсмикалык жарака, магнитуда, сейсмикалык активдүүлүк, энергетикалык класс.

SEISMICITY AND THE SEISMIC GAP AREA BEFORE THE 2024 EARTHQUAKE WITH $M_w=6.5$ IN THE UQTURPAN AREA OF THE SOUTHERN TIAN SHAN

Abstract. This article presents a study of seismic activity in the South Tien Shan zone aimed at identifying seismic gap areas as potential locations for expected earthquakes. Compiled maps show the distribution of epicenters of historical strong earthquakes with $M_w \geq 5.0$, the time course of historical strong earthquakes for the Tien Shan (1770-2025) with $K \geq 9.0$, a seismicity map of Kyrgyzstan for the period 1955-2023, and the seismic gap area preceding the 2024 Uqturpan earthquake. The seismological method of identifying seismic gap areas can use to predict the locations of expected strong earthquakes.

Keywords: epicenter, earthquake, main shock, focal mechanism, seismic gap, magnitude, seismicity, energy class

В статье проведено исследование сейсмичности территории Кыргызстана и прилегающих сейсмоактивных зон, направленное на понимание механизма возникновения и прогнозирования сильных землетрясений в регионе. Основное внимание уделено пространственно-временным особенностям возникновения исторически сильных землетрясений. Изучение сейсмической активности Южно-Тянь-Шаньской зоны направлено на выявление областей сейсмических брешей, как потенциальных мест ожидаемых сильных землетрясений. В качестве примера представлен ретроспективный анализ возникновения сильного землетрясения 22 января 2024 г. с магнитудой $M_w=6.5$, эпицентр которого находился в районе населённого пункта Учтурфан на территории Китая.

Тянь-Шаньскую горную систему на территории Кыргызстана и прилегающих областей условно можно подразделить на четыре сейсмоактивные зоны: Северо-Тянь-Шаньская (№ I), Юго-Западная (№ II), Центральная (№ III) и Южно-Тянь-Шаньская (№ IV) (рисунок 1), каждая из которых имеет свои сейсмологические и геолого-геофизические особенности [2]. Макросейсмические данные о случившихся сильных землетрясениях в Кыргызстане собраны за последние 255 лет (1770-2025 гг.). Наиболее достоверные сведения об ощутимых и сильных землетрясениях Кыргызстана получены, начиная с 1770 года в результате макросейсмического обследования последствий сильного Беловодского землетрясения в Кыргызстане [3].

Сейсмичность. Исследование сейсмичности конкретного региона, как правило, основывается на анализе достоверных данных сейсмического мониторинга и каталога сильных землетрясений. Особенно вопрос о классификации сильных землетрясений по определённым очаговым параметрам имеет существенное значение, например, по магнитуде M , энергетическому классу K , сейсмическому моменту M_0 , моментной магнитуде M_w , интенсивности сейсмических сотрясений I_0 и др.

Следует отметить, что исторические сильные землетрясения Тянь-Шаня, произошедшие в XIX и XX веках, зарегистрированные сейсмическими станциями, первоначально оценивались обычно в магнитудах M [14]. В то время сила землетрясений, в основном, оценивались по магнитуде M и интенсивности I_0 , которые определялись на основе макросейсмических обследований их последствий. С развитием и расширением сети инструментальных сейсмических наблюдений в регионах сейсмологии начали определять энергетический класс землетрясений, $K=\lg E$ ($E = 10^K$ Дж).

Корреляционное соотношение между K и M установлено формулой Рихтера-Гутенберга-Раутиан [6]:

$$K = 4 + 1.8 * M, \quad (1)$$

где K - энергетический класс, M - магнитуда землетрясения. Величина сильных землетрясений, примерно с $K > 15.0$, $M > 6.0$, регистрируемых сейсмическими станциями, оценивается обычно в магнитудах M . Для них можно рассчитать K по M по корреляционной формуле (1). Проблема величины землетрясений в сейсмоактивных регионах в различных её аспектах обсуждалась в работах Richter, 1935; Gutenberg, Richter, 1956; Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1986; Chen P., Chen H., 1989; Джанузаков, 2006; Мамыров, 2012; Муралиев, Джанузаков, 2008 и др.

Понятие сейсмического момента M_0 , как одной из физических величин очага землетрясения, было введено в сейсмологию К.Аки [1], а моментная магнитуда M_w была предложена Х.Канамори [13]. В настоящее время моментная магнитуда M_w , как физическая величина, широко используется в сейсмологической практике. С сейсмическим моментом M_0 тесно связаны основные геометрические размеры (длина, ширина и др.) очага землетрясения. Величину M_0 можно определить по спектрам сейсмических колебаний. Корреляционная связь между сейсмическим моментом M_0 и величиной землетрясений K и M установлена в работе [6]:

$$\lg M_0 \pm 0.6 = 11.842 + 0.889 * K = 15.4 + 1.6 * M, \quad (2)$$

где M_0 измеряется в динах, умноженных на сантиметр. Данная корреляция обеспечена наблюдениями в диапазоне $K=6-20$, $M=1-8,9$.

Величину моментной магнитуды M_w можно вычислить по формуле Х. Канамори [13]:

$$M_w = 2/3 \cdot \lg M_0 - 10.7 \quad (M_0 - [\text{Дин} \cdot \text{см}]). \quad (3)$$

Таким образом, переход от величины K и M к величине моментной магнитуды M_w осуществляется формулами (1) - (3). Численные значения моментной магнитуды M_w и магнитуды M по поверхностным волнам близки друг к другу. Указанные корреляционные переходы учитывались при классификации сильных землетрясений по магнитудам.

Распределение эпицентров исторических сильных 487 землетрясений с магнитудой 5 и более ($M_w \geq 5.0$) по территории Кыргызстана и его сейсмоактивных зон за период с исторического времени с 1770 г. по 2023 г. представлено на рисунке 1. Карта эпицентров исторических сильных землетрясений построена по данным выборки из книги «Новый каталог сильных землетрясений ...», 1977, с дополнением из каталога землетрясений Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики за период с 1975 г. по 2025 г.

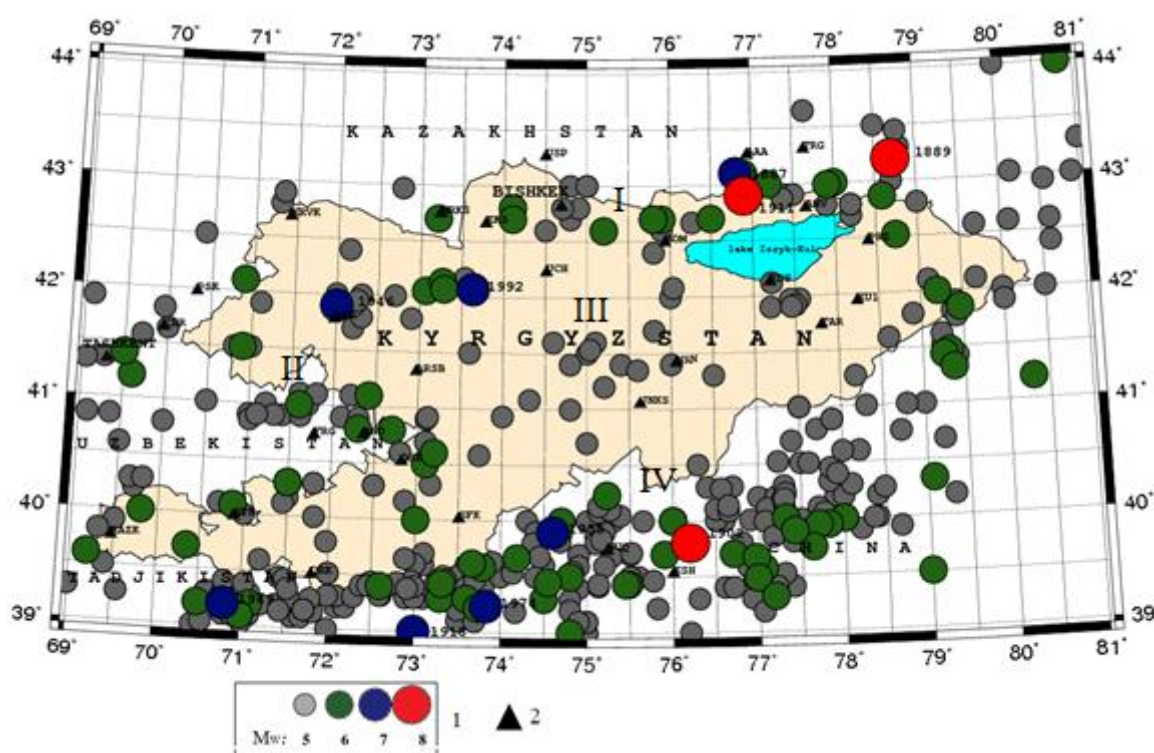


Рисунок 1. Распределение эпицентров исторических сильных землетрясений с $M_w \geq 5.0$ по территории Кыргызстана и его сейсмоактивным зонам. Условные обозначения: 1- цветными кружочками разного размера обозначены магнитуды землетрясений ($M_w = 5 - 8$); 2 – сейсмические станции. Сейсмоактивные зоны обозначены римскими цифрами: I - Северо-Тянь-Шаньская, II-Юго-Западная, III-Центральная, IV-Южно-Тянь-Шаньская.

Из рисунка 1 видно, что эпицентры катастрофического 10-11-балльного Кеминского землетрясения 1911 г. с магнитудой $M_w=8.3$ и 10-балльного Чиликского землетрясения 1889 г. с $M_w=8.4$ расположены в Северо-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоне (I); эпицентр 9-10- балльного Кашгарского землетрясения 1902 г. с магнитудой $M_w=8.2$ - в Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоне (IV). Эпицентры землетрясений с $M_w \geq 8$ обозначены кружочками красного цвета, с магнитудой $M_w \geq 7$ - синего, с $M_w \geq 6$ - зелёного и с $M_w \geq 5$ - серым цветами (рисунок 1).

В данной работе мы рассматриваем сейсмичность Южного Тянь-Шаня, который характеризуется высокой сейсмической активностью и сравнительно узкой зоной, простирающейся по направлению с юго-запада на северо-восток с протяжённостью порядка 1000 км (рисунок 1). Она расположена на территории Китая и Таджикистана и ближе к государственной границе Кыргызстана. Южно-Тянь-Шаньская сейсмоактивная зона состоит из двух подзон: Гиссарская и Какшаальская, которые разделяет эпицентр сильнейшего Какшаальского землетрясения 1902 г. с магнитудой $M_w=8.2$ (рисунок 1). Из рисунка 1 видно, что в пределах Гиссарской части Южно-Тянь-Шаньской высокосейсмичной зоны расположены 4 эпицентра сильных землетрясений с $M_w=7$ и множество менее сильных событий. В пределах Какшаальской части подобные события не наблюдались. Эпицентры ощутимых землетрясений с $M_w \geq 5$ заполняют всю зону, в одном месте эпицентры сгущаются, в другом - практически отсутствуют, вероятно наблюдаются сейсмические бреши 1-го рода. Обращает внимание область сейсмической бреши 1-го рода, выявленная в районе $41^0-41.5^0$ с.ш. и 78.5^0-79^0 в.д., внутри которой не наблюдались землетрясения с $M_w \geq 5.0$ (рисунок 1) в течение рассматриваемого периода времени.

На рисунке 2 показан временной ход исторических сильных землетрясений для рассматриваемой территории с магнитудой $M_w \geq 5.0$ за последние 255 лет (1770-2025 гг.). Из рисунка 2 видно, что в начале графика сейсмические события сравнительно редки, это возможно связано с пропуском некоторых землетрясений. Начиная с 1868 г. на графике наблюдается привычный фон сейсмического процесса. На графике также видно, что перед сильными происходящими землетрясениями можно увидеть уменьшение величины (магнитуды) и количество предшествующих событий. Анализ временного хода исторических сильных землетрясений показал ещё одну особенность сейсмичности Тянь-Шаня: на графике имеется тенденция к уменьшению магнитуды сильных землетрясений (рисунок 2 (а)). Примерно аналогичная же картина наблюдается на рисунке 2 (б) для Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны.

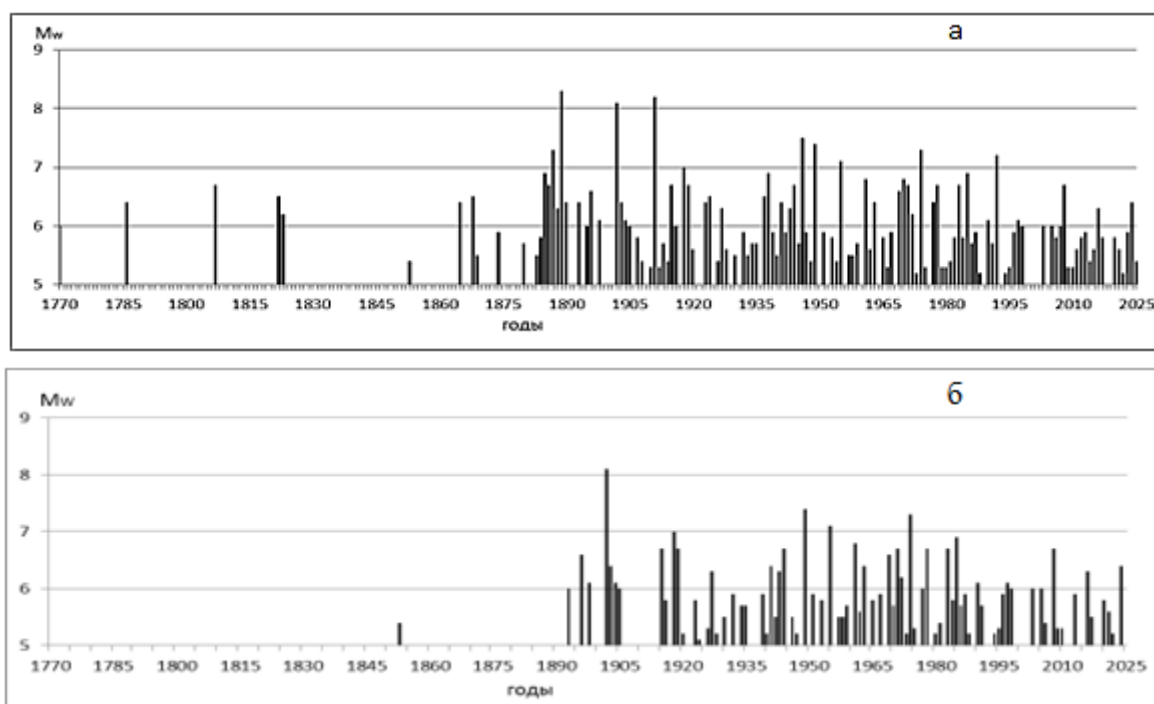


Рисунок 2. Распределение исторических сильных землетрясений во времени с максимальной магнитудой M_w по годам для всей территории (а) и для Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны (б).

На рисунке 3 показана сейсмичность территории Кыргызстана и его сейсмоактивных зон по данным инструментальных сейсмических наблюдений за период с 1955 г. по 2023 г. с $K \geq 9.0$, где наглядно выделяются Южно-Тянь-Шаньская и другие сейсмоактивные зоны. Южно-Тянь-Шаньская сейсмоактивная зона выделяется с высокой степенью скопления эпицентров землетрясений, в ней также выделяются сейсмические бреши в двух местах: 1) область границы Какшаальской и Гиссарской сейсмоактивных зон, 2) область с географическими координатами: пересечение 41- параллели и 78.5⁰ восточной долготы. Эти области можно рассматривать как потенциальные места будущих сильных землетрясений. Если при подготовке сильнейших землетрясений напряжение в коре постепенно возрастает на большой площади, деформация накапливается до определённого предела, после чего происходит разрыв, а напряжение и деформация высвобождаются сразу и полностью, то те районы, где длительное время сильные землетрясения не отмечались, можно рассматривать как возможные места будущих крупных толчков [7].

Результаты ретроспективного анализа последней области сейсмической бреши свидетельствуют о возникновении сильного землетрясения 2024 г. с магнитудой $M_w=6.5$, эпицентр которого находился в районе Учтурфан.

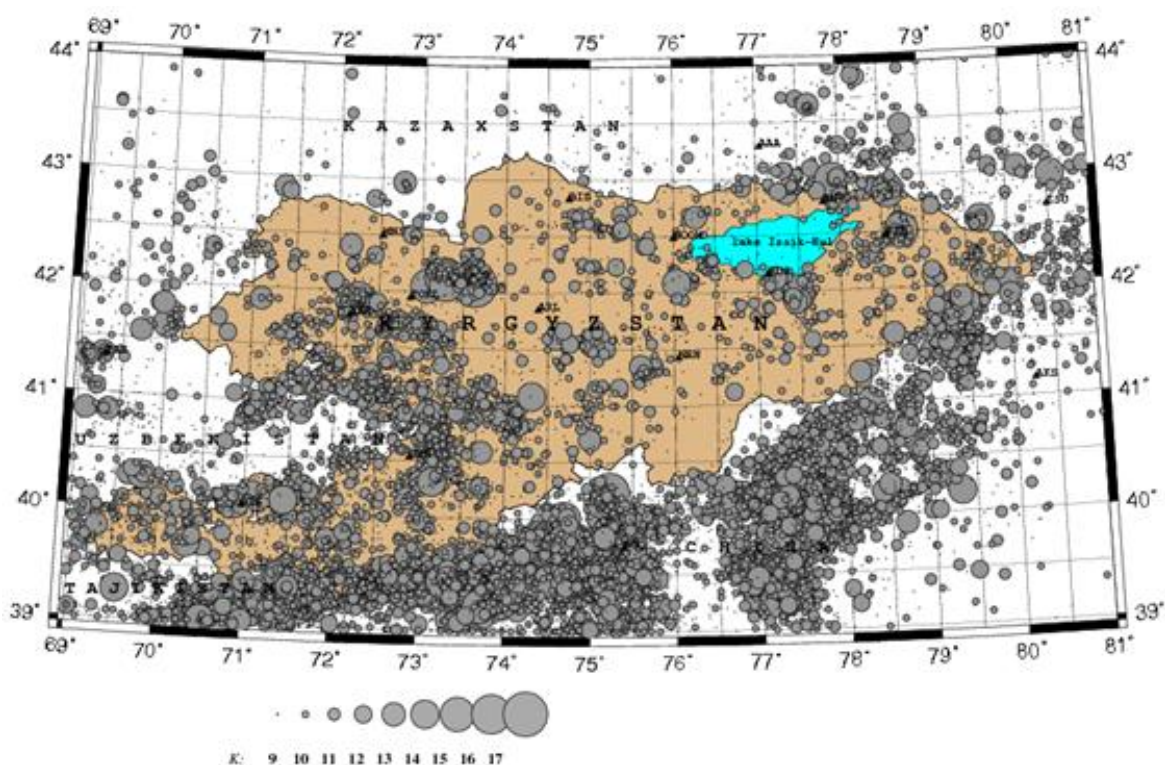


Рисунок 3. Сейсмичность Кыргызстана, за период 1955-2023 гг. с $K \geq 9.0$.

Область сейсмической бреши 1-го и 2-го рода, предшествующая возникновению сильного землетрясения с $M_w=6.5$ в Южно-Тянь-Шаньской высокосейсмичной зоне, показана на рисунке 4. Данная область представляет собой эллипсообразную геометрическую форму, большая ось которой простирается с юго-запада на северо-восток. Общая площадь составляет примерно 2.5 тыс. км². Следует отметить, что область сейсмической бреши выделена по данным исторических сильных ($M_w \geq 5.0$) (рисунок 1) и представительных землетрясений с магнитудой $M_w \geq 2.6$ за инструментальный период времени (рисунок 3).

22 января 2024 года в 18 час. 09 мин. произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w=6.5$ на территории КНР, в 75 км к юго-востоку от с. Кумтор, в 218 км к юго-востоку от г. Нарын, в 370 км к юго-востоку от г. Бишкек. Сейсмическое сотрясение в

эпицентральной области достигало до 6 баллов по шкале MSK-64. Его эпицентр попал в центр выделенной области сейсмической брешии (рисунок 4 (б)) и полностью заполнен эпицентрами афтершоков этого события с разными энергетическими классами. Глубина очага этого землетрясения определена как 15 км.

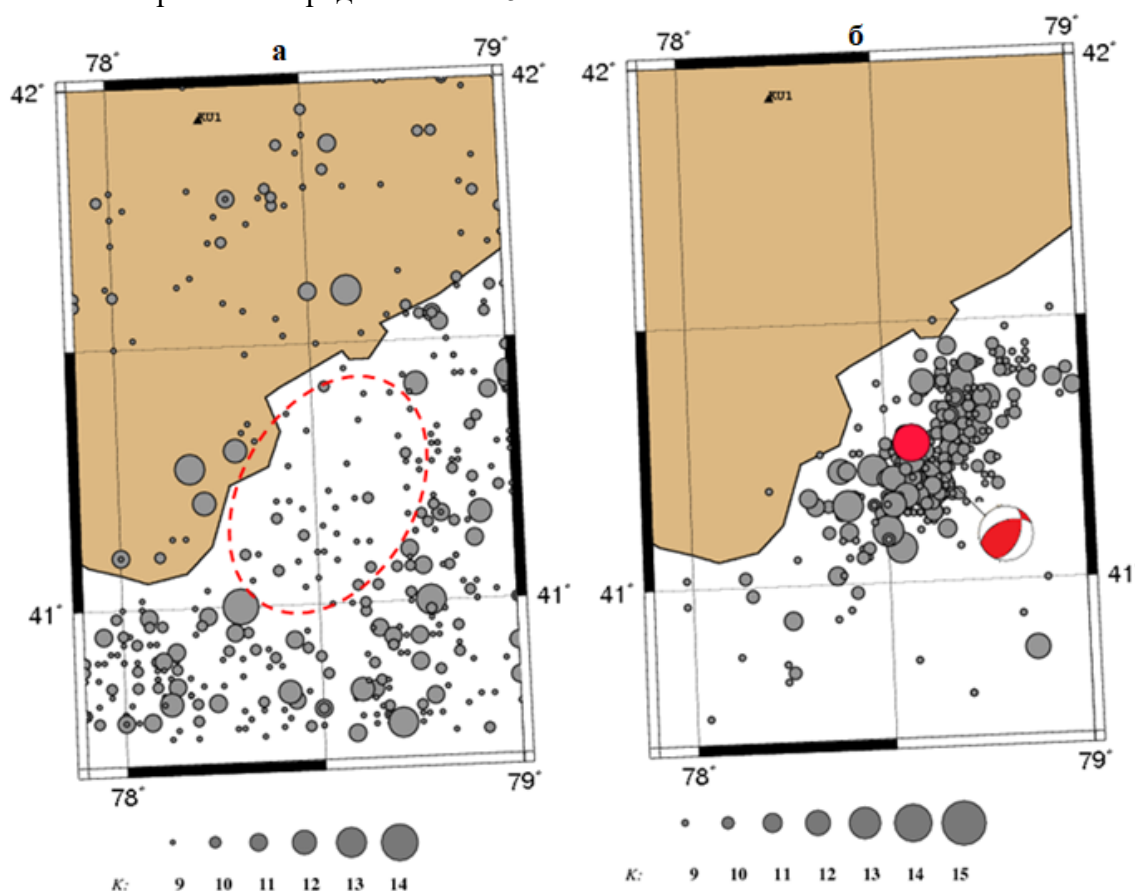


Рисунок 4. Область сейсмической брешии перед Учтурфанским землетрясением 2024 года с магнитудой $M_w=6.5$ (эллипс красного цвета) (а); стереограмма механизма очага основного толчка и эпицентры афтершоков (б).

Механизм очага Учтурфанского землетрясения 2024 г. с магнитудой $M_w=6.5$ определён по знакам первых вступлений продольных (Р) волн, стереограмма которого показана на рисунок 4 (б). Азимут простираения первой нодальной плоскости $STK=251^\circ$, угол падения составляет $DP=51^\circ$, угол скольжения $SLIP=124^\circ$. Азимут простираения второй нодальной плоскости $STK=25^\circ$, угол падения $DP=50^\circ$, угол скольжения $SLIP=56^\circ$.

Обе нодальные плоскости простираются с юго-запада на северо-восток. По данным инструментальных сейсмических наблюдений, в очаге данного землетрясения произошёл «сдвига-надвиговый» тип подвижки. Оси ориентации осей главных напряжений сжатия направлены в близмеридионально близгоризонтально ($Az=318^\circ$, угол падения $PL=0^\circ$) направлении, а оси главных напряжений растяжения имеют вертикальный характер ($Az=228^\circ$, угол падения $PL=64^\circ$). Судя по размеру области сейсмической брешии и области распределения афтершоков, можно предположить, что длина разрыва составляет примерно ~ 50 км и по ним происходит сдвиг-надвиговая деформация. Другими словами, Учтурфанское землетрясение 2024 г. с магнитудой $M_w=6.5$ произошло в результате близгоризонтального близмеридионального сжатия и близвертикальном растяжении. При таком напряжённо-деформированном состоянии земной коры в очаговой области происходят афтершоковые процессы. Накопленная энергия в области сейсмической брешии снималась путём возникновения ощутимых афтершоков с энергетическими классами

$K=8.0-13.0$ в течение января месяца 2024 г. Максимальное количество афтершоков достигло 457 событий в январе месяц 2024 г., затем уменьшалось по экспоненциальному закону. Эпицентры афтершоков трассируется от эпицентра главного толчка по направлению на северо-восток и на юго-запад. Положение в пространстве и направления миграции афтершоков хорошо согласуются с пространственным положением геологических структур (простиранием хребтов, разломов и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых сейсмологических исследований на территории Кыргызстана и прилегающих сейсмоактивных зон, можно сделать следующие выводы:

1. Южный Тянь-Шань характеризуется как одна из высокосейсмичных зон в регионе. Из произошедших всех землетрясений на рассматриваемой территории, 70% эпицентров попадает в эту зону (рисунок 1 (IV) и рисунок 3). Очаги землетрясений в этой зоне расположены внутри земной коры до 30-40 км, т.е. мы имеем дело с континентальными коровыми землетрясениями. Эпицентральные поля слабых, ощутимых и сильных землетрясений совпадают. То есть, где происходят слабые землетрясения, там и можно ожидать сильные.

Миграция очагов коровых землетрясений имеет близширотное направление, с юго-запада на северо-восток и обратно. Перед сильными землетрясениями с магнитудой $M_w \geq 5.0$ наблюдаются, в основном, сейсмические бреши 1-рода.

2. Перед сильным землетрясением 2024 г. ($M_w=6.5$), происходящим в районе Учтурфан Южно-Тянь-Шаньской высокосейсмичной зоны, выявлена эллипсообразная область сейсмической бреши 1-го рода. Эпицентр сильного землетрясения 2024 г. располагался в центре области сейсмической бреши. Эпицентры афтершоков заполняли эту область в течение 3 месяцев (рисунок 4) и соответствующая активность продолжается по сегодняшний день.

Таким образом, сейсмологический метод выделения области сейсмической бреши можно использовать для прогнозирования мест ожидаемых сильных землетрясений. Дальнейшее развитие сейсмологических исследований Тянь-Шаня требует развитие международного обмена первичных данных сейсмического мониторинга и создание единого каталога землетрясений Центрально-Азиатского региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аки К., Ричардс П.Г. Количественная сейсмология. Москва: Мир, 1983, т.1-2, 880 с.
2. Джанузаков К.Д., Ильясов Б.И., Кнауф В.И., Королев В.Г., Христов Е.В., Чедия О.К. Сейсмическое районирование Киргизской ССР (Объяснительная записка к новой карте сейсмического районирования Киргизии масштаба 1:2 500 000). Фрунзе. Издательство «Илим», 1977. 53 с.
3. Джанузаков К.Д. Землетрясения Киргизии и сейсмическое районирование её территории. Фрунзе. «Илим», 1964, 216 с.
4. Джанузаков К.Д. Сопоставление различных магнитуд и энергетических определений величины землетрясений Центральной Азии // Геолого-геофизические исследования в Институте сейсмологии НАН Кыргызской Республики. Бишкек: Илим, 2006, с. 38-46.
5. Мамыров Э. Землетрясения Тянь-Шаня: магнитуда, сейсмический момент и энергетический класс. -Бишкек, «Инсанат», 2012, -234 с.
6. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. Москва, «Наука», 1985, 405 с.
7. Могги К. Предсказание землетрясений: Пер. с англ. - Москва: Мир, 1988. - 382с.

8. Муралиев А.М., Джанузаков К.Д. Сейсмичность и механизмы очагов сильных землетрясений Кыргызстана// Сейсмичность Северной Евразии. Материалы международной конференции. Обнинск: ГС РАН, 2008, с. 194-199.
9. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В.Кондорской и Н.В.Шебалина. Москва: Наука, 1977, с.198-296.
10. Aki K. Generation and propagation of G-waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part.2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G-wave spectrum, 44, Bull. Earthq. Res. Inst, Tokio University, 44, 1966, 73-88.
11. Chen P., Chen H. Scaling law and its applications to earthquake statistical relations// Tectonophysics, 1989, 166, p.53-72.
12. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration // Bull. Seismol. Soc. Am. 46, 1956, p.45-145.
13. Kanamori H. The energy released in great earthquakes. J. Geophys. Res., 82, 1977, 2981-2987.
14. Richter C.F. An instrumental earthquake magnitude scale. Bull. Seismol. Soc. Am., 25, 1935, pp. 1-32.

Рецензент: к.т.н., доц. Камчыбеков М.П.