

УДК 550.34 (571.53/55)

Джумабаева А. Б., Байкулов С.
Институт сейсмологии НАН КР
г. Бишкек, Кыргызстан

ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КЫРГЫЗСТАНЕ

Аннотация. В статье рассматриваются палеосейсмологические исследования, проведённые на отдельных участках территории Кыргызской Республики за последние 20 лет. С применением метода «трэнчинга» получены абсолютные возраста сильных палеоземлетрясений, оценены магнитуды максимально возможного землетрясения (от 6.7 до 7.4) и определены их периоды повторяемости, которые варьируются в отдельных сегментах от 2000 до 5000 лет, а также скорости смещений активных разломов (Иссык-Атинский, Чонкурчакский, Памирский фронтальный надвиг) в позднечетвертичное время. Данные абсолютных возрастов палеоземлетрясений расширили и дополнили каталог сильных землетрясений на территории Кыргызстана

Ключевые слова: палеосейсмология, палеосейсмодислокация, палеоземлетрясение, метод «трэнчинга», активные разломы, повторяемость, скорость смещения крыльев разлома.

КЫРГЫЗСТАНДАГЫ ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЯЛЫК ИЗИЛДӨӨЛӨР

Кыскача мазмуну. Макалада акыркы 20 жылда Кыргыз Республикасынын айрым аймактарында жүргүзүлгөн палеосейсмологиялык изилдөөлөр талкууланат. «Траншея» ыкмасын колдонуу менен күчтүү палеожертитирөөнүн абсолюттук жашы алынган, мүмкүн болгон максималдуу жер титирөөнүн магнитудалары (6.7ден 7.4кө чейин) бааланган жана айрым сегменттерде 2000дөн 5000 жылга чейин өзгөргөн алардын кайталануу ылдамдыгы аныкталган, ошондой эле төртүнчү доордун аягында жаракалардын жылышынын ылдамдыгы (Ысык-Ата, Чонкурчак, Памир фронталдык туртуу) эсептелинген. Палео-жер титирөөнүн абсолюттук жашы боюнча маалыматтар Кыргызстандын аймагындагы күчтүү жер титирөөлөрдүн каталогун кеңейтти жана толуктады.

Негизги сөздөр: палеосейсмология, палеосейсмикалык дислокация, палеожертитирөө, траншеялык ыкма, активдүү жаракалар, кайталануучулук, жарака канаттарынын жылышуу ылдамдыгы.

PALEOSEISMOLOGICAL STUDIES IN KYRGYZSTAN

Abstract. In the article paleoseismological studies conducted in certain areas of the territory of the Kyrgyz Republic over the past 20 years are presented. Using the trenching method, the absolute ages of strong paleoearthquakes were obtained, the magnitudes of the maximum possible earthquake (from 6.7 to 7.4) were estimated, and their recurrences were determined, which vary in some segments from 2000 to 5000 years, as well as the rates of displacement of faults (Issyk-Ata, Chonkurchak, Pamir frontal thrust) in late Quaternary time. The data on the absolute ages of paleoearthquakes expanded and supplemented the catalog of strong earthquakes on the territory of Kyrgyzstan.

Keywords: paleoseismology, paleoseismodislocation, paleoearthquake, trenching method, active faults, recurrence of interval, dip slip rate.

Основная цель палеосейсмологии — это изучение доисторических землетрясений. Главным образом, их местоположения, времени возникновения и магнитуды [1]. Данные палеосейсмологических исследований успешно применяются для оценки сейсмической опасности и составления карты детального сейсмического районирования территории

Кыргызской Республики [2 - 4]. Сильнейшие землетрясения, произошедшие в конце XIX- в начале XX веков в Тянь-Шане, повлекшие человеческие жертвы и причинившие большой ущерб экономике страны, выявили необходимость изучения и развития палеосейсмологии в Кыргызстане. Материалы работ И.В. Игнатъева [5], изучавшего последствия Беловодского землетрясения 1885 г., К.И. Богдановича и др., изучавших последствия Кеминского землетрясения 1911 г. с $M_s = 8.2 \pm 0.3$ [6], труды П.М. Вильгельмзона о Кеминско-Чуйском землетрясении 1938 г. с $M_s = 6.9 \pm 0.5$ [7], Н.Н. Леонова о Чаткальском землетрясении 1946 г., $M=7.5$ [8], Никонова А.А и др. - об Алайских землетрясениях 1974 - 1978 гг., $M=7.3 \pm 0.2$ и $M=6.8 \pm 0.1$ [9], о Суусамырском землетрясении 1992 г., $M=7.3$ [10, 11], о Нурунском землетрясении 2008 г., $M_w = 6.6$ [12], позволили нам понять величины смещений по разрыву и их протяжённости, масштабы и распространения форм рельефа и отложений, образования которых связано с сейсмическими колебаниями, а также накопить большой материал по современным сейсмодислокациям. Следует отметить, что строение современных сейсмодислокаций схоже с дислокациями палеоземлетрясений примерно той же силы, что позволяет сделать более обоснованные оценки параметров палеоземлетрясений по палеосейсмодислокациям с использованием корреляционных зависимостей, где палеосейсмодислокация – это сейсмодислокации с возрастом в сотни – тысячи лет [1].

Первоначальные этапы развития палеосейсмогеологических исследований в Тянь-Шане, были сосредоточены, в основном, на выявлении и картировании палеосейсмодислокаций на основе геоморфологического метода и составлении серии карт палео- и сейсмодислокаций [13-25]. В работе [22] составлены каталог и карта палео- и сейсмодислокаций (порядка 300), имеющих на территории Кыргызстана до 2000 года.

Впервые в Средней Азии А.А. Никонову с соавторами удалось количественно сопоставить сейсмодислокации сильных землетрясений 1974 г. с $M=7.3$ и 1978 г. с $M=6.8$ (Алайская впадина) с палеосейсмодислокациями и выявить палеоземлетрясения, определив их абсолютные возраста с помощью лихенометрического и радиоуглеродного методов [9]. В ранее исследованном [9] разломе - Памирском фронтальном надвиге (ПФН) - проведены повторные комплексные палеосейсмологические исследования (рисунок 1). В пяти траншеях вдоль центрального сегмента выявлены пять и, возможно, шесть разрывообразующих палеоземлетрясений (800 ± 200 , 1500 ± 100 , 2400 ± 200 , 3400 ± 200 , 5300 ± 100 лет назад) произошедших примерно 7 тыс. лет назад и ~ 16 тыс. лет назад, (14300 ± 2200 лет назад) соответственно. Интервал повторяемости между палеоземлетрясениями составляет ~1.9 тыс. лет. Как минимум три землетрясения «разорвались» в длину ~35 км, а одно «разорвалось» на ~65 км при землетрясениях с возможной магнитудой $M_w = 7.4$. Для двух очевидных коротких сегментов разрыва, выраженных в западном конце центрального разлома ПФН, наблюдалось несоответствие между аномально большими величинами сдвига в 2-3 м по сравнению с относительно короткой длиной (< 20 км) поверхностного разрыва [26].

Палеосейсмология на протяжении последних 50 лет, благодаря новым технологиям, претерпела значительные улучшения в методах и подходах к исследованиям [27] (рисунок 2). Работа переходит от регионального масштаба к локальному, т. е. детальному изучению палеосейсмодислокации в конкретных местах методом «тренинга». Сам метод, изложенный в работе МакКалпина [1], представляет комплекс работ, связанных с проходкой канав (траншей), интерпретацией разрезов и отбором проб на определение абсолютного возраста, которые позволяют получить необходимую информацию о магнитудах и периодах повторяемости палеоземлетрясений в зонах активных разломов.

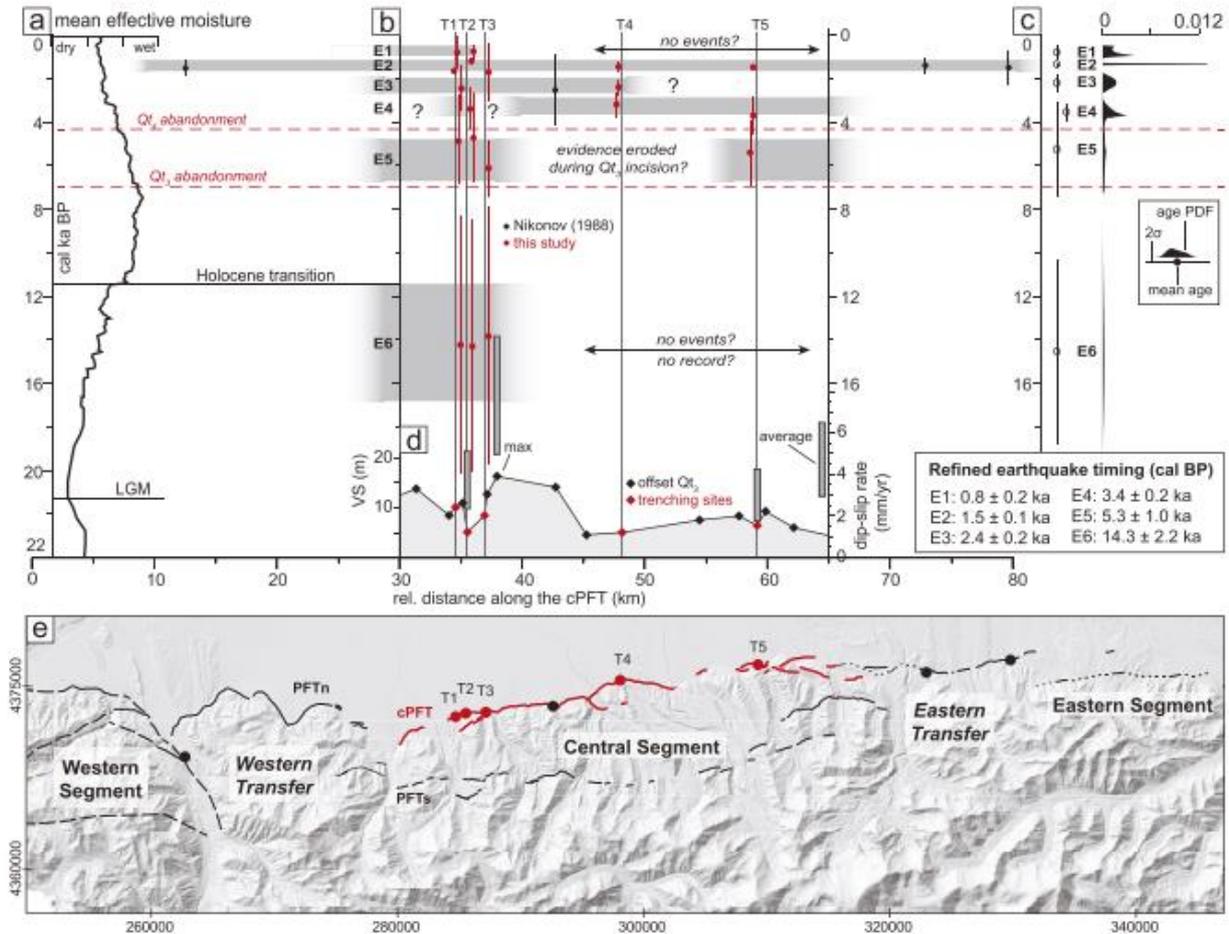


Рисунок 1. Сводка данных о палеоземлетрясениях по Памирскому фронтальному надвигу [26]. (а). Средняя эффективная влажность из Центральной Азии. (б). Корреляция смоделированных возрастов землетрясений (красные кружки - $\pm 2\sigma$) с пяти участков траншей и возраст землетрясений по Никонову [9] (чёрные кружки - $\pm 2\sigma$) вдоль разлома ПФН, местоположения которых указаны на рисунке. (с). Заштрихованные области на заднем плане указывают на возможную протяжённость разрываобразующего землетрясения вдоль разлома. Ширина по вертикали представляет уточнённую погрешность в 1σ функции распределения вероятностей (PDF) из (с) смоделированных возрастов землетрясений центрального сегмента разлома ПНФ (чёрные PDF, со средним значением $\pm 2\sigma$) на основе корреляции. (д). Кумулятивное вертикальное смещение. Серыми прямоугольниками показана расчётная скорость смещение по падению в голоцене (< 6 тыс. лет) по совокупным оценкам вертикального смещение: максимальной в Ачык-Суу (T2), средней в Ташкунгей (T5). В таблице указаны смоделированные возраста палеоземлетрясений. (е). Изображение отмывки на основе данных TanDEM-X. Красные и чёрные линии обозначают простираение разлома (сплошная) и предполагаемая (пунктирная) в зоне разломов ПФН и СПФН+S соответственно. Чёрные кружки обозначают места землетрясений по А. А. Никонову [9].

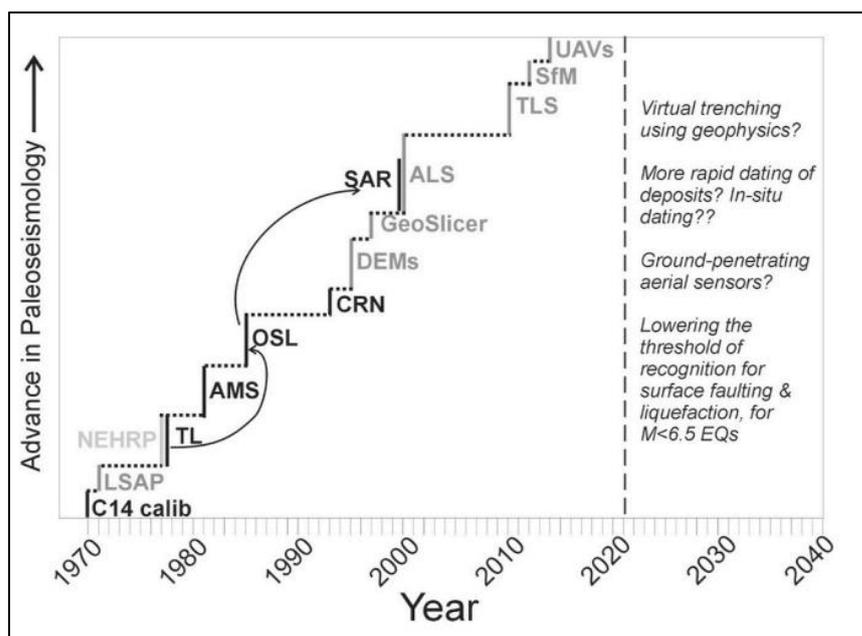


Рисунок 2. Схематическая диаграмма, показывающие влияние новых технологий на развитие палеосейсмологии с 1970 года по настоящее время [27]. Чёрные метки- методы датировки; серые - методы дистанционного зондирования; светло-серые- институциональные изменения. Высота вертикального шага субъективно отражает развитие палеосейсмологии относительно времени. Изогнутые стрелки показывают как развивался единый метод датирования (люминесценция), датирование и калибровка радиоуглеродных возрастов (^{14}C); LSAP - фотосъемка под низким углом наклона солнца; NEHRP- Национальная программа США по снижению опасности землетрясений; TL — термолюминесцентное датирование отложений; AMS- ускорительная масс-спектрометрия, радиоуглеродное датирование; OSL- оптически стимулированное люминесцентное датирование; CRN- космогенное радионуклидное датирование отложений; ЦМР – цифровые модели рельефа; GeoSlicer- метод извлечение неповрежденные монолиты осадочных пород из недр; SAR- однозерновое люминесцентное датирование; ALS- воздушное лазерное сканирование (лидар); TLS- наземное лазерное сканирование; SfM- структура-из-движения; БПЛА- беспилотные летательные аппараты (дроны).

При финансовой поддержке международных проектов, начиная с 2000 года, странами-партнерами (США, Бельгии, Германии, России) проводятся тренинговые работы в зонах активных разломов на территории Кыргызской Республики. Результаты этих исследований отражены в ряде работ [28-35]. В работах [26, 33, 34] полностью отражён весь комплекс современных палеосейсмологических методов, которые в настоящее время применяются при изучении палеоземлетрясений. На рисунке 3 показана детальная карта, составленная с помощью цифровых источников данных (30-метровая цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по материалам радарной съёмки SRTM1 - Shuttle Radar Topography Mission (США)), ручного 12-канального GPS-приёмника, подключённого к базовой станции GPS и лазерного сканирования земной поверхности (LiDAR). Для измерения вертикального смещения поверхности построены профили вкрест приразломного уступа, которые обрабатывались программой ArcGIS [33].

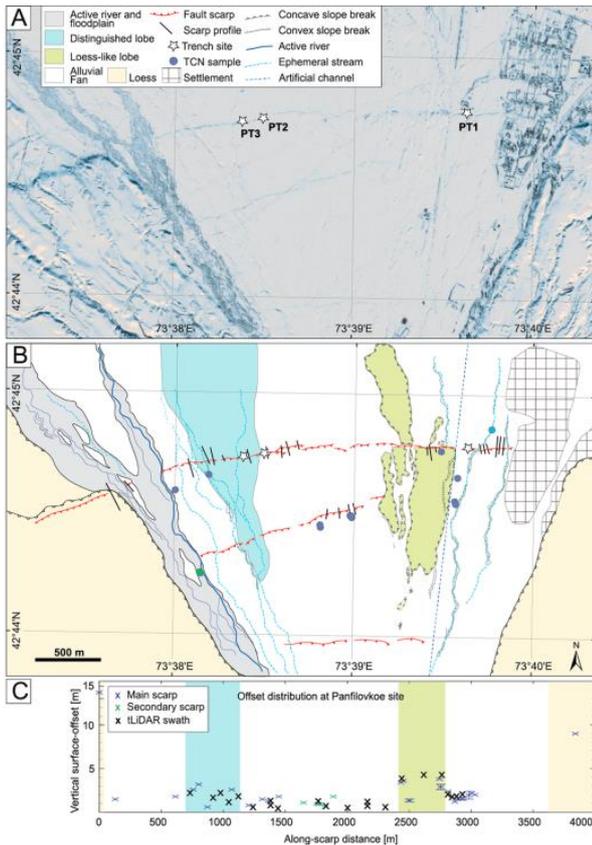


Рисунок 3. Пример картирования смещения приповерхностных уступов и отложений в зоне Чонкурчакского разлома на участке Панфиловка, расположенной примерно в 75 км к западу от Бишкека, предгорье Кыргызского хребта [33]. (а). Спутниковый снимок участка, на котором видны три субпараллельных линейных приразломных уступа на поверхности аллювиального конуса выноса. (б). Геоморфологическая интерпретация участка. Разрывы отображены сплошными красными линиями. Белые звёзды обозначают расположение траншей (с востока на запад: PT1, PT2 и PT3). Место отбора образцов на датирование: TCN - валун (синий), галька (голубой) и песок (зеленый). (с). Распределение вертикального смещения, полученное на основе профилей, построенные вкост приразломного уступа (чёрные линии на рисунке 3b) с помощью лазерного сканирования (лидар- tLiDAR).

На рисунке 4 показана фотодокументация разреза стенки траншеи Белек в зоне Иссык-Атинского разлома [34]. Разрез воспроизведён на 3D-модели с помощью программного обеспечения «VisualSfM». В программе «Agisoft PhotoScan Pro 1.2.1» были обработаны 300 фотографий, сделанные цифровой камерой на площади ~30 м² в каждой стенке траншеи, и были привязаны в 25 контрольных точках к системе координат с помощью dGPS. Дальнейшие расчёты 3D-модели фотомозаики были выполнены с помощью программы ESRI ArcGIS и ArcScene.

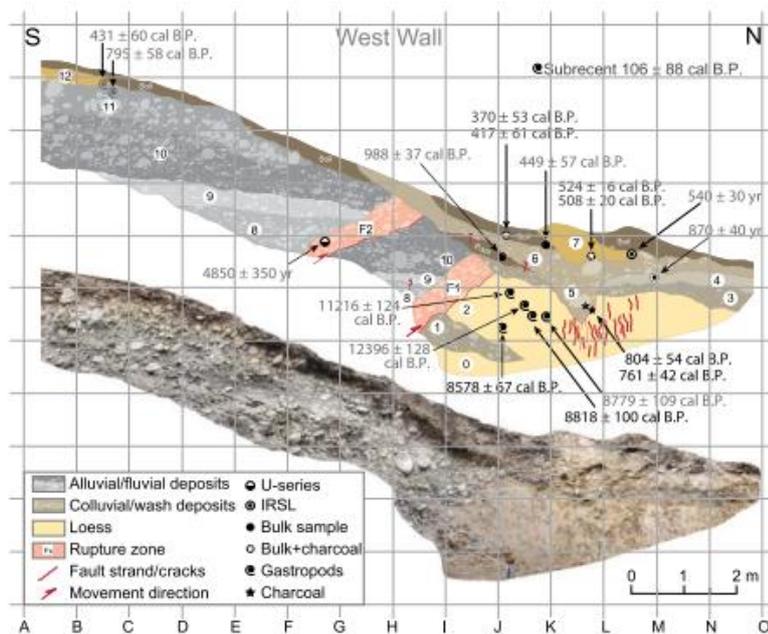


Рисунок 4. Схема документации разреза западной стенки траншеи «Белек» в зоне Иссык-Атинского разлома, расположенного в 25 км к юго-западу от Бишкека [34]. Речные/аллювиальные толщи (блоки 8–11) на висячей стенке надвинуты на массивное лессовое отложение (блок 2).

Для датирования предполагаемых горизонтов землетрясений требуется сбор различных типов образцов со стен траншей. Калибровка радиоуглеродных дат и байесовская статистика выполняется в программе «OxCal» (версия 4.2.4) с использованием калибровочной атмосферной кривой IntCal13. Программа позволяет комбинировать радиоуглеродную датировку и стратиграфическую последовательность слоев в разрезах стенки траншей. На рисунке 5 показана модель вероятностного времени 3-х палеоземлетрясений, построенной по данным 16 радиоуглеродных дат (14C), результатом измерений изотопов U и Th (4 образец) и люминесцентного датирования (2 образец) [34].

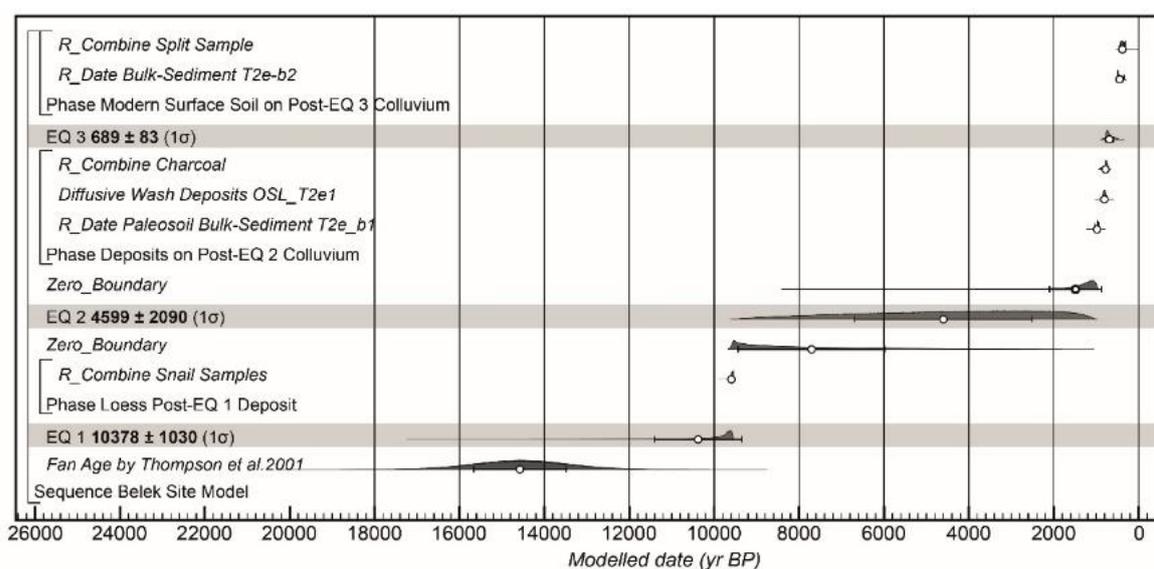


Рисунок 5. Модели вероятностных возрастов 3-х палеоземлетрясений в интервале -10.5 ± 1.1 , 5.6 ± 1.0 и 0.625 ± 95 тыс. лет с погрешностью 1σ в траншее «Белек» в зоне Иссык-Атинского разлома. Возрасты, выделенные жирным курсивом, представляют собой смоделированные возрасты землетрясений в тысячи лет до н. э. с неопределённостью 1σ с использованием «OxCal v4.2.4» и атмосферной кривой IntCal13. Модель основана на сочетании калиброванных значений ^{14}C и IRSL [34].

Выводы

Появившиеся за последние 20 лет новые данные по палеоземлетрясениям в зонах активных разломов на территории Кыргызской Республики свидетельствуют о важнейшей роли палеосейсмологических данных при оценке долговременной сейсмической опасности, обуславливаемой событиями редкой повторяемости (раз в 1000–10000 лет). Повторяемости палеоземлетрясений в зоне Иссык-Атинского разлома на сегменте А (участок «Белек») и сегменте Б составляют 2000 и 5000 лет соответственно. Возраст последнего палеоземлетрясения - 625 ± 95 лет назад, а вероятностная магнитуда находится в диапазоне от 6.7 до 7.2. Скорости позднеплейстоценовых смещений Иссык-Атинского разлома варьируются от 0.6 до 0.9 мм/год.

Повторяемость палеоземлетрясений в зоне Чонкурчакского разлома (участок Панфиловка) - около 5000 лет, последнее палеоземлетрясение датируется 3600 ± 1300 лет назад, вероятностная магнитуда - в пределах 6.7 и 7.2, средняя скорость смещения - 0.2 ± 0.1 мм/год; в зоне Памирского фронтального надвига - около 2000 лет, последнее событие 800 ± 200 лет назад с магнитудой $M_w 7.4$ и средняя скорость горизонтального движения в 4.1 ± 1.5 мм/год в течение последних ~5 тыс. лет. В местах исследования выявлены разломы взбросо-сдвигового и взбросового типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палеосейсмология: В 2-х т. – Т. 2 / под ред. Джеймса П. Мак Калпина; Пер. с англ. И. А. Басов, И.Ю. Лободенко, А.Л. Стром; предисл. к рус.изд. и науч. ред. А.Л. Стром. – М.: Научный мир, 2011. – 400 с.
2. Карта сейсмического районирования Киргизии масштаба 1:2 500 000. – Фрунзе: Илим, 1979.-23с.
3. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики в масштабе 1:1000000. Джанузаков К.Д., Чедия О.К., Абдрахматов К.Е., Турдукулов А.Т. – Бишкек: Илим, 1995. – 25 с.
4. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики в масштабе 1:1000000. Абдрахматов К.Е., Джанузаков К.Д., Фролова А. Г., Погребной В.Н. и др., НАН КР, Институт сейсмологии. - Бишкек, 2013, 51с.
5. Игнатъев И. В. Землетрясение в Токмакском уезде в 1885 г. // Изв. Импер. Русск. геогр. о-ва. - 1886. – Т. 22. - Вып. 2. - С. 150–164.
6. Богданович К. И., Карк И.М., Корольков Б.Я., Мушкетов Д.И. Землетрясения в северных цепях Тянь-Шаня, 22 декабря 1910 года (4 января 1911 года). СПб., 1914, 270 с. (Тр. Геолкома., вып. 89)
7. Вильгельмзон П.М. Кемино-Чуйское землетрясение 21 июня 1938 г. // Фонды ИФЗ АН СССР. – М., 1947
8. Леонов Н. Н. Чаткальское землетрясение 1946 г. Сейсмич. движение грунтов // Вопр. инженерной сейсмологии. – М.: Наука, 1970. - № 13. - С. 64–77.
9. Никонов А. А., Ваков А.В., Веселов И. А. Сейсмоструктура и землетрясения в зоне сближения Памира и Тянь-Шаня. - М.: Наука, 1983. - 240 с.
10. Ghose S., Mellors R.J., Korjenkov A.M., Hamburger M.W., Pavlis T.L., Pavlis G.L., Omuraliev M., Mamurov E., Muraliev A.R. The Ms = 7.3 1992 Suusamyр, Kyrgyzstan, earthquake in the Tien-Shan :2. Aftershock Focal Mechanisms and Surface Deformation // Bull. Seism. Soc. Amer. - 1997. - Vol. 87. - P. 23-38.
11. Mellors R.J., Vernon F.L., Pavlis G.L., Abers G.A., Hamburger M.W., Ghose S., Iliasov B. The Ms = 7,3 1992 Suusamyр, Kyrgyzstan earthquake: 1. Constraints on fault geometry and source parameters based on aftershocks and body wave modeling // Bull. Seism. Soc. Am. - 1997. - Vol. 87. - P. 11-22.
12. Patyniak, M., Landgraf, A., Dzhumabaeva, A., Baikulov, S., Williams, A. M., Preusser, F., et al. (2024). Surface rupture of the 2008 Mw 6.6 Nura earthquake: Triggered flexural-slip faulting in the Pamir-Tien Shan collision zone. *Tectonics*, 43, e2024TC008360. <https://doi.org/10.1029/2024TC008360>
13. Опыт комплексного сейсмического районирования на примере Чуйской впадины. – Фрунзе: Илим, 1975. -186.
14. Геологические основы сейсмического районирования Иссык-Кульской впадины. - Фрунзе: Илим, 1978. -150.
15. Детальное сейсмическое районирование Восточной Киргизии. Фрунзе: Илим, 1988, 250 с.
16. Чедия О.К., Лемзин И.Н. Сейсмогенерирующие разломы Чаткальской впадины // Сейсмоструктура и сейсмичность Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1980. – С. 19–28.
17. Абдрахматов К.Е. Четвертичная тектоника Чуйской впадины. – Фрунзе: Илим, 1988. – 118 с.
18. Chediya O.K., Abdrakhmatov K.E., Korzhenkov A.M., Lemzin I.N. Seismotectonic position of the Balasogun, north Tien Shan earthquake of the 15th century // *Journal of Earthquake Prediction Research*. - 1988. – V. 7. - P. 289-299.
19. Корженков А. М., Чедия О.К. Новейшая структура и сейсмодислокации Тюлекской и Каракуджурской впадин (Тянь-Шань) // Изв. АН Кирг. ССР. - 1986. - № 5. - С. 26–33.

20. Абдрахматов К.Е., Лемзин И.Н. Палеосейсмичность Центрального Тянь-Шаня // Изв. АН Кирг. ССР. - 1990. - № 3. - С. 93–99.
21. Омуралиев М., Чаримов Т. Сейсмодислокации и сейсмическая опасность в западной части северной Киргизии // Изв. АН Кирг. ССР. - 1990. – № 4. - С. 83–88.
22. Чаримов Т.А., Поволоцкая И.Э., Корженков А. М. Сейсмодислокации Северного Тянь-Шаня // Изв. вузов. - 2005. – № 1. - С. 211–229.
23. Чаримов Т.А. Палеосейсмодислокации в бассейнах рек Карабалта-Аксу и Шамси // Изв. НАН КР. Физ.-тех., мат. и горно-геол. науки. - 1991. – № 3. - С. 121–133.
24. Утиров Ч.У. Сейсмодислокации // Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня / Под ред. Н. П. Лаверова. - М.: Наука, 1991. - С. 158–163.
25. Корженков А. М., Чаримов Т.А. Чонкурчакский участок сейсмодислокаций – свидетельство многократных сейсмических катастроф близ г. Бишкек // Актуальные вопросы геологии, геофизики и сейсмологии: Сб. - Бишкек: Илим, 1993. - С. 7–14.
26. Patyniak, M., Landgraf, A., Dzhumabaeva, A., Baikulov, S., Williams, A. M., Weiss, J. R., et al. (2021). The Pamir Frontal Thrust fault: Holocene full-segment ruptures and implications for complex segment interactions in a continental collision zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(12), e2021JB022405. <https://doi.org/10.1029/2021JB022405>
27. James McCalpin, Francesca Ferrario, Paula Figueiredo, Franz Livio, Christoph Grützner, Malgorzata Pisarska-Jamrozy, Mark Quigley, Klaus Reicherter, Thomas Rockwell, Petra Stepánčíková, Petr Tabo. New developments in onshore paleoseismic methods, and their impact on Quaternary tectonic studies, *Quaternary International* Том 664, 2023, P. 59-76 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2023.03.008>
28. Chediya O.K., Abdrakhmatov K.E., Lemzin I. N., Mihel G., and Mikhaylev V. Issyk-Ata, Northern Tien Shan fault in the Holocene // *Journal of Earthquake Prediction Research*. - 2000. - Vol. 8.P. 379-386
29. Thompson S.C., Weldon R.J., Rubin C.M., Abdrakhmatov K., Molnar P, and Berger G.W. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia // *Journal of Geophysical Research*. - 2002. - Vol. 107. – No. B9, 2203, doi: 10.1029/2001JB000596. - P. ETG 7 - 1-32.
30. Omuraliev M. and Omuralieva A. Late Cenozoic Tectonics of the Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. - Bishkek, 2004. - 166 p.
31. Корженков, А. М. Сейсмогеология Тянь-Шаня // Бишкек: Илим, 2006. - 290 с.
32. Абдрахматов, К. Е. Активная тектоника Тянь-Шаня / К.Е. Абдрахматов, С. Томпсон, Р. Уилдон. – Бишкек: Илим, 2007. – 70 с.
33. Landgraf A., Dzhumabaeva A., Abdrakhmatov K.E., Streker M.R., Macaulay E.A., Arrowsmith JR, Sudhaus H., Preusser H., Rugel G., Mershel S. Repeated large-magnitude earthquakes in a tectonically active, low- strain continental interior. The Northern Tien Shan, Kyrgyzstan, *JGR: Solid Earth*, 10.1002/2015JB012714
34. Patyniak, M., Landgraf, A., Dzhumabaeva, A., Abdrakhmatov, K. E., Rosenwinkel, S., Korup, O. & Strecker, M. R. (2017). Paleoseismic Record of Three Holocene Earthquakes Rupturing the Issyk-Ata Fault near Bishkek, North Kyrgyzstan Paleoseismic Record of Three Holocene Earthquakes Rupturing the Issyk- Ata Fault near Bishkek. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6), стр. 2721–2737.
35. Smekalin, O. P., Imaev, V. S., Korzhenkov, A. M., & Chipizubov, A. V. (2016). Paleoseismological investigations in the pleistoseismal zone of the 1885 Belovodskoe earthquake, North Tien Shan. *Seismic Instruments*, 52(4), стр. 279–289.

Рецензент: к. г.-м. н. Омуралиева А.