

УДК 550.34 (571.53/55)

<sup>1</sup>Джумабаева А. Б., <sup>1</sup>Байкулов С.,<sup>1</sup>Абдрахматов К.Е., <sup>2</sup>М. Патыняк,<sup>3</sup>А. Ландграф, <sup>4</sup>Р. Эроусмит, <sup>2</sup>М. Стрекер<sup>1</sup>Институт сейсмологии НАН КР, Бишкек, Кыргызстан.<sup>2</sup>Институт геолого-геофизических исследований  
Потсдамского университета, Потсдам, Германия.<sup>3</sup>NAGRA, Веттинген, Швейцария,<sup>4</sup>Школа исследования Земли и космоса,  
Университет штата Аризона, США.

## НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИИ НА ТЕРРИТОРИИ АЛАЙСКОЙ ВПАДИНЫ (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

**Аннотация.** Новые результаты траншейных исследований, пройденные через Центральный сегмент Памирского фронтального надвига (PFT) в южной части Алайской долины, выявили пять разрывообразующих палеоземлетрясений, произошедших в течение последних ~ 7 тыс. лет, и вероятностью шестого события последних 16 тыс. лет. Три из этих событий представляют собой крупные землетрясения с  $M_w \geq 7.4$ , которые, вероятно, разорвали всю длину сегмента - длиной до 35 км или и больше. Средняя скорость смещения крыльев разлома составляет  $4.7 \pm 1.7$  мм / год за последние 7 тыс. лет.

**Ключевые слова:** метод тренчинга, палеоземлетрясения, интервалы повторения, скорости смещения, активные разломы.

## АЛАЙ ОЙДУҢУНДАГЫ ПАЛЕОЗЕЙСМОЛОГИЯ БОҮОНЧА ЖАҢЫ МААЛЫМАТТАР (ТҮШТҮК-БАТЫШ ТЯН-ШАНЬ)

**Кыскача мазмуну:** Палеосейсмологиялык «тренчинг» ыкмасы боюнча изилдөөлөрдүн негизинде, Алай өрөөнүнүн түштүк тарабындагы Заалай тоо этектерин чектеген Памир фронталдык кыймылдуу жараңкада, акыркы 7 миң жыл ичинде 5 же болбосо акыркы 16 миң жылдан бери 6 жолу катуу силкинуу болгон. Анын ичинен 3 палеожер титирөөнүн магнитудасы  $M_w \geq 7.4$  жетип, узундугу ~ 35 км же андан да узун жараңканы пайда кылаары божомолдонот жана жараңканын жылыш ылдамдыгы акыркы 7 миң жыл ичинде жылына  $4.7 \pm 1.7$  мм чейин жетээри аныкталат.

**Негизги сөздөр:** тренчинг ыкмасы, палеожер титирөөлөр, кайталануу аралыгы, жылыш ылдамдыгы, кыймылдуу жаракалар.

## NEW DATA ON PALEOSEISMOLOGY IN THE TERRITORY ALAY DEPRESSION (SOUTHWESTERN TIEN-SHAN)

**Abstract.** New results of a trenching study carried out through the Pamir Frontal Thrust (PFT) of the Trans-Alay Range the northern part of the Alay Valley showed five rupture-forming paleo-earthquakes during the last ~ 7 thousand years, and the probability of six events of the last 16 thousand years. At least three of these events are large earthquakes with  $M_w \geq 7.4$ , which probably ripped the entire segment up to 35 km long or more. The average rate of horizontal motion for the cPFT of  $4.7 \pm 1.7$  mm/yr during the past ~7 kyr.

**Keywords:** trenching, paleoearthquakes, recurrence intervals, displacement rates, active faults.

Алайская межгорная впадина ограничивает северную границу Памирского орогена, расположенного на стыке Индостанской и Евразийской плит и отличается высокой сейсмичностью (рис.1).

Современный высокий уровень сейсмичности района исследования сосредоточен в узкой полосе шириной 15 км - 25 км к северу от Главного Памирского надвига (МРТ), с глубиной очагов землетрясений в пределах до 25 км, механизмы очагов которых указывают на правосторонний взбросо-сдвиг с преобладанием надвига. В Алайской впадине и прилегающих территориях за последнее время произошел ряд сильных сейсмических событий  $M \geq 6.5$ : Маркансуйское -  $M=7.3$ , 1974 г.; Дарауг-Курганское -  $M=6.8$ , 1978 г.; Алайское -  $M=6.1$ , 1983 г.; Нуринское -  $M=6.7$ , 2008 г.; Кызыл-Артское -  $M=6.5$ , 2016 г.; Карамыкское -  $M=6.5$ , 2017 г. (рисунок 2). Они отражают не только сейсмическую опасность данного региона, но и сложность проявления сильных землетрясений, как в пределах одного разлома, так и между соседними разломами. Такая геодинамическая обстановка региона привлекает внимание многих исследователей всего мира, что подтверждается публикациями последних лет с новыми количественными данными [1-11].

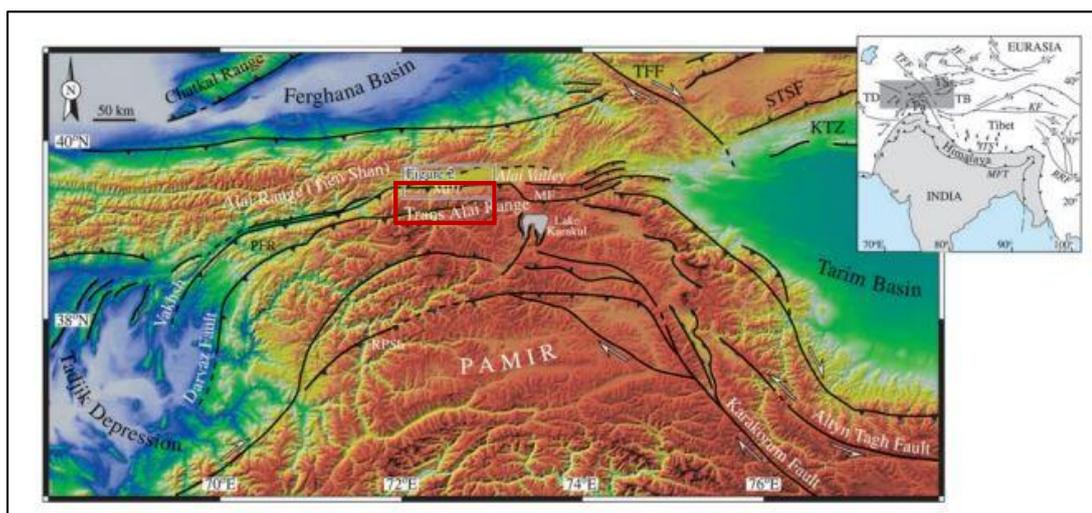


Рисунок 1. Схема расположения Алайской впадины между областями горообразования Памира (на юге) и Тянь-Шань (на севере). Основные системы разломов Памирского орогена (чёрные линии). Красный прямоугольник - область исследования [1].

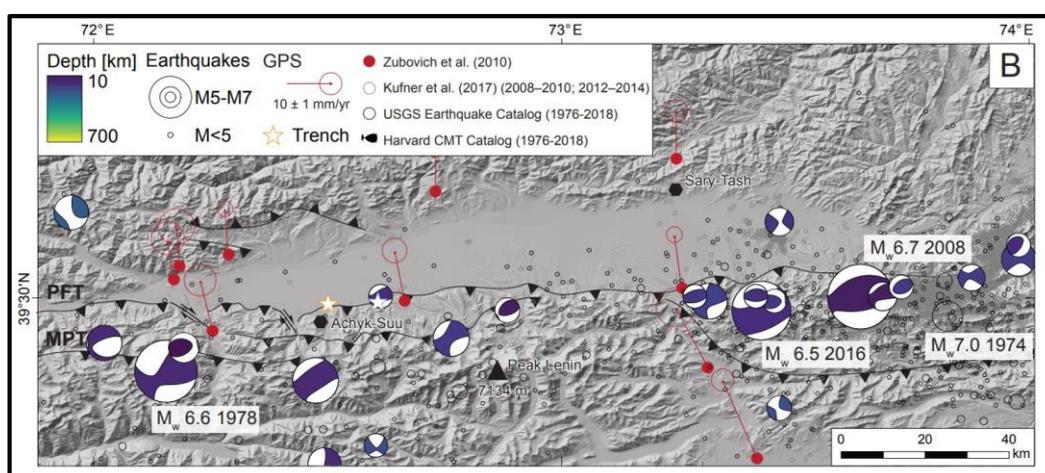


Рисунок 2. Карта эпицентров землетрясений на территории Алайской впадины и её горного обрамления в зоне разломов: Памирского фронтального надвига (PFT) и Главного Памирского надвига (МРТ) [13]. Отмечены сильные землетрясения  $M \geq 6.5$  за последние 100 лет с указанием года и магнитуды. Красные кружочки - скорость сокращения земной коры  $\sim 10$ -15 мм / по данным геодезических измерений GPS [7].

В 2017 - 2018 гг. нами совместно с немецкими учёными под руководством Манфреда Штрекера (проект CaTeNA, Германия) были проведены палеосейсмологические исследования с использованием метода «тренинга» в зоне разлома Памирского фронтального надвига (PFT). Главной задачей являлось выделение активных сегментов разлома и определение их параметров, а также оценка магнитуды и повторяемости сильных землетрясений в прошлом. Разлом (PFT), взбросо-надвигового типа, ограничивает южную границу Алайской впадины, протягиваясь вдоль северных предгорий Заалайского хребта до 65 км. По геолого-геоморфологическим признакам разлома делиться на 3 сегмента: западный, центральный и восточный [1, 4, 12-14].

Для детального исследования был выбран Центральный сегмент разлома протяжённостью около 35 км. Разлом отчётливо выражен в виде уступа высотой до 15 м и нарушает поверхность позднеплейстоценовых аллювиально-пролювиальных конусов выноса рек Ачик-Суу, Ылай-Суу, Коман-Суу и Ташкунгей. Морфология уступа в некоторых местах имеет ступенчатый рельеф (на участках Ачик Суу и Ташкунгей). Поверхность подножий падает на север под углом до 4-х градусов и частично покрыта моренными и оползневыми отложениями (между рек Комансу и Ташкунгей). Вдоль приразломного уступа были проложены пять траншей (на участках Ачик-Суу-Т1-2, Ылай-Суу-Т3, Комансу-Т4 и Ташкунгей-Т5), расстояния между которыми составляет около 1 км, 1 км, 12 км и 10 км, соответственно (рисунок 3) [12-14].

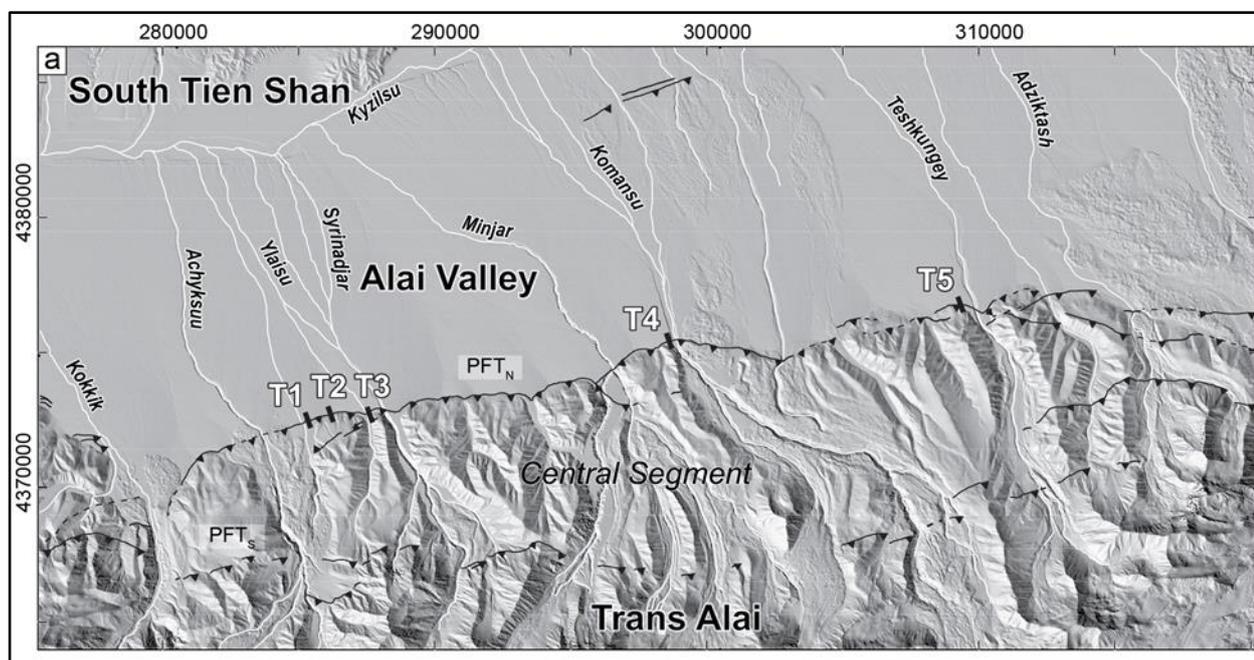


Рисунок 3. Карта разрывов исследуемого участка (12-метровая ЦМР, полученное по спутниковому изображению TanDEM-X) [14]. Чёрная линия со штрихами – Центральный сегмент Памирского фронтального надвига (PFT). Чёрные короткие полосы указывают место расположения траншей на участках; - Ачик-Суу-Т1-2, Ылай –Суу-Т3, Комансу-Т4 и Ташкунгей-Т5.

Анализ продольных профилей проведённых вкост приразломного уступа Памирского фронтального надвига (PFT) показывает изменение высоты уступа от 5 м до 16 м и падение уклона поверхности до 2 градуса. Средняя величина вертикального смещения составляет  $9.2 \pm 0.3$  м. На рисунке 4 приведены примеры профилей P5 - участок

Ачик-Суу, и P16 - участок Ташкунгей, где вертикальное смещение составляет соответственно  $5.2 \pm 0.7$  и  $6.4 \pm 0.5$  м.

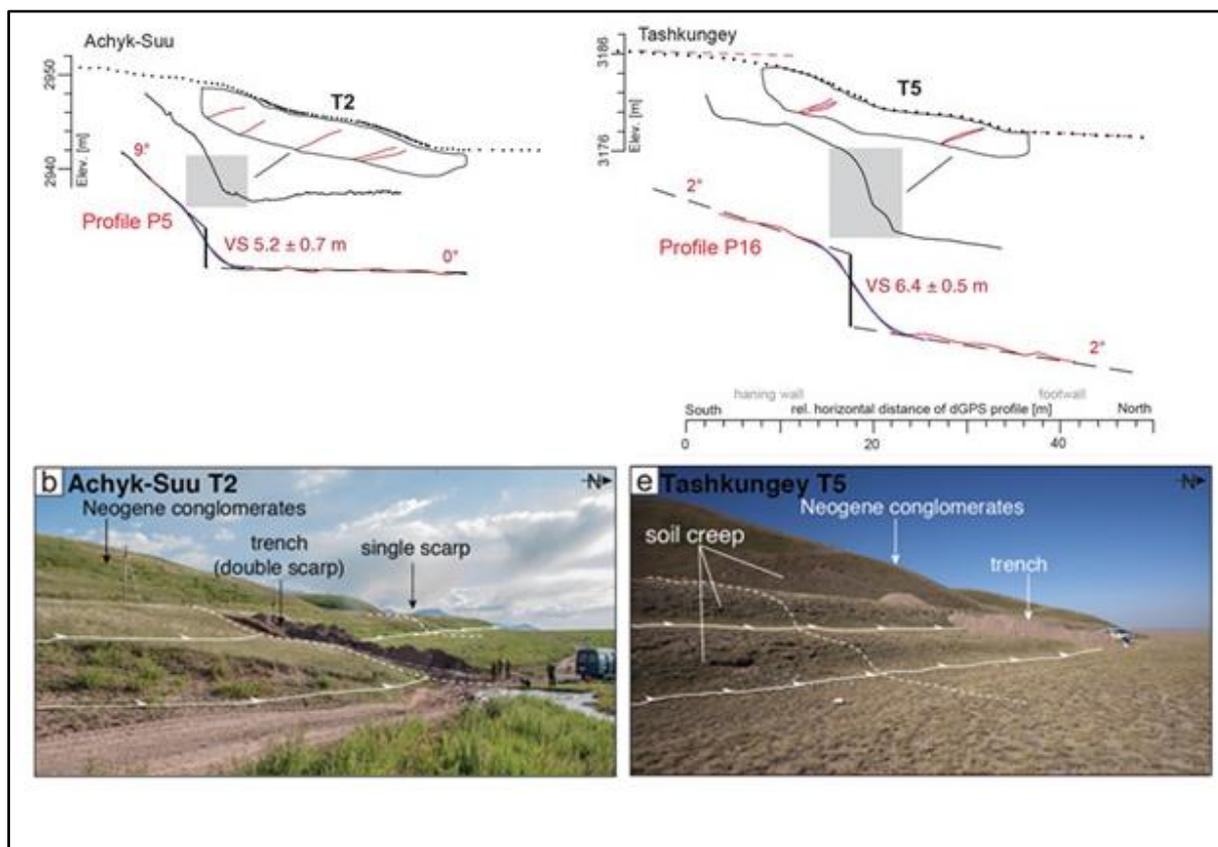


Рисунок 4. Схемы профилей, построенные поперек ступенчатого уступа и фотографии траншеи на участках: b - Ачик-Суу T2, e- Ташкунгей T5 [14] (фото Патыняк М.).

Стратиграфические единицы, обнажённые на всех стенках траншей, свидетельствуют о подвижках разлома. В разрезах чётко выделяются три слоя по стратиграфической последовательности (снизу-вверх): 1 – более древняя нижняя толща (1a, 1b) представлена гравийно-галечными накоплениями с грубопесчаным заполнителем (1-3м); образцы, отобранные из этого слоя в 3-х траншеях (T2, T3 и T5) показали средний абсолютный возраст  $20.3 \pm 0.6$  тыс. лет по инфракрасно-люминесцентному методу (IRSL). Второй слой - плотный тонкозернистый песчаный материал, толщиной 10-50 см, абсолютный возраст  $7.3 \pm 0.1$  тыс. лет - определён по  $^{14}\text{C}$  и IRSL образцам, полученный в траншее (T2) и из 2-х шурфов, пройденных в поднятом крыле приразломного уступа в долинах рек Сынаржар и Ташкунгей. Третий слой - верхний почвенный с богатой органикой- горизонт A (0-30 см). Следует отметить, что радиоуглеродные возрасты, полученные по образцам из этих слоёв, были калиброваны и моделированы в программе OxCal v.4.44 с использованием кривых Intcal13 [15.16].

Проявленные в стенках траншей разрывные структуры представлены двумя главными плоскостями смещения - между висячим и лежащим крыльями, которые падают под углом  $15 - 20^\circ$  к югу. Их ширина составляют примерно 5 - 20 см и они хорошо фиксируются по ориентированным обломкам пород по падению разрыва. Лежачее крыло разлома представлены снесенными с уступа коллювиальными отложениями и залегающими между ними материалами размыва верхних слоёв в поднятом крыле.

Единовременное вертикальное смещение при каждом событии во всех стенках траншей варьируется в пределах от 0.5 м до 5 м. Общее смещение по падению разрыва

оценивается в  $4.8 \pm 0.7$  м. Скорость смещения крыльев разлома в позднеплейстоценовое время ( $14.3 \pm 2.2$  тыс. лет) составляет  $0.7 \pm 0.2$  мм/год, палеомагнитуды палеоземлетрясений этого времени варьируются между  $M \geq 6.7-7.4$  [14].

На примере траншеи Т5, пройденной в долине реки Ташкунгей, приводится детальная документация западной стенки (рисунок 5) [14].

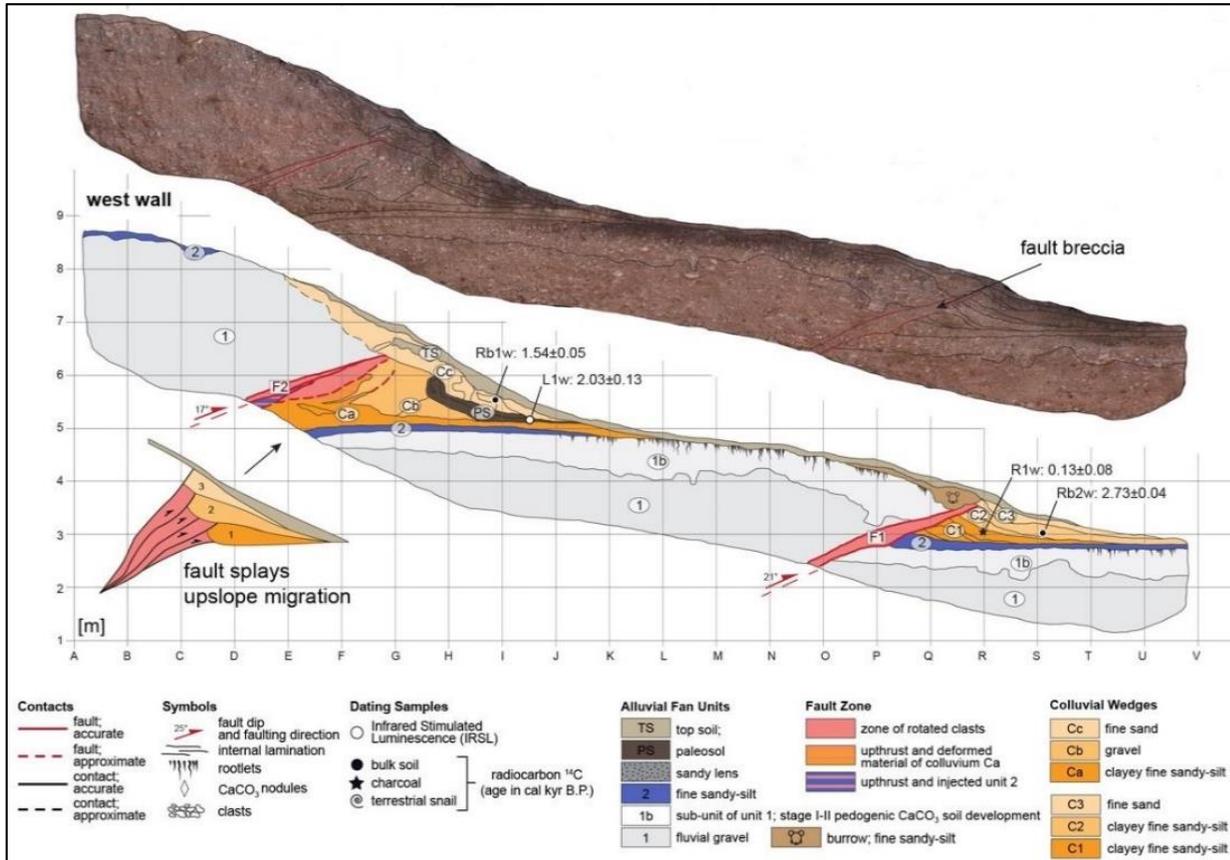


Рисунок 5. Документация западной стенки траншеи Т5 участка Ташкунгей (место расположения траншеи Т5 указано на рисунке 3) [14]. В стенке траншеи картируются две плоскости разрыва (F1, F2) падающие под углами 21 и 17 градусов к югу, по которым деформированные аллювиальные галечники мощностью около 3 м (1, 1b) надвинуты на серию тонкозернистых коллювиальных отложений (2). В результате трёх подвижек ( $4.6 \pm 0.7$ ,  $3.5 \pm 0.5$  и  $1.8 \pm 0.3$  м) по разлому образовались три коллювиальных клина (C1, C2, C3) и (Ca, Cb, Cc) на лежащем крыле разрыва. Образцы на датировании (радиоуглеродное <sup>14</sup>C, инфракрасной стимуляции люминесценции IRSL), отобранные из коллювиальных клиньев и погребенной почвы (PS), представляют комбинированные возрасты не менее трёх событий:  $5.4 \pm 0.8$ ,  $3.7 \pm 0.4$  и  $1.5 \pm 0.1$  тыс. лет с повторяемостью между событиями  $1.7 \pm 0.9$  и  $2.2 \pm 0.4$  тыс. лет. Геометрия разрыва и анализ абсолютных возрастов позволяет предполагать, что смещение по двум плоскостям разлома происходило одновременно. Общее вертикальное смещение составляет  $5.8 \pm 0.6$  м.

На основе анализе абсолютных возрастов и стратиграфических признаков, полученных при траншейных исследованиях, построены возрастные модели времени и повторяемости палеоземлетрясений, используя разработанные байесовские методы в программе OxCal v.4.4, которые успешно применены в работах [17-20]. С помощью метода проанализированы интервалы времени между палеоземлетрясениями, которые определяют функции плотности вероятности времени каждого события. Сопоставляя интервалы времени события каждого участка друг с другом и учитывая перекрытия

распределения функции плотности вероятности, а также разницу величин смещения, построена расчётная возрастная модель на всю длину сегмента за длительное время. Моделирование определило последовательность 5 и\или, возможно, 6 палеоземлетрясений, произошедших на Центральном сегменте около  $0.8 \pm 0.2$ ,  $1.5 \pm 0.1$ ,  $2.4 \pm 0.2$ ,  $3.4 \pm 0.2$ ,  $5.3 \pm 1.1$  и  $14.3 \pm 2.2$  тыс. лет назад. С помощью модели Монте-Карло был определён средний интервал повторяемости 1.9 тыс. лет со стандартным отклонением в 2 сигмы. Метод определения повторяемости включает, главным образом, измеренные промежутки времени между событиями (таблица 1).

Таблица 1. Моделированный возраст палеоземлетрясений, выявленных по Центральному сегменту Памирского фронтального надвига (по радиоуглеродным  $^{14}\text{C}$  и инфракрасной стимуляции люминесценции – IRSL).

Расположения траншеи (T1-T5) с запада на восток вдоль разлома (PFT) и возраст последовательных палеоземлетрясений (тыс. лет, с разбросом 2g)						Расчётный возраст *	Интервал повторяемости <sup>Λ</sup> (лет)	
T1	T2	T3	T4	T5	№ палеозем	Возраст (тыс.лет, с разбросом 2g)	Частичное разрывообразование	Полное разрывообразование
$0.8 \pm 0.4$	$0.8 \pm 0.2$	-	-	-	E1	$0.8 \pm 0.2$	$0.7 \pm 0.2$	-
$1.6 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.1$	$1.7 \pm 0.7$	$1.5 \pm 0.1$	$1.5 \pm 0.1$	E2	$1.5 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.2$	$2.0 \pm 0.2$
$2.4 \pm 0.5$	-	-	$2.4 \pm 0.2$	-	E3	$2.4 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.3$	-
-	$3.4 \pm 0.4$	-	$3.2 \pm 0.3$	$3.7 \pm 0.4$	E4	$3.4 \pm 0.2$	$1.8 \pm 1.1$	$1.8 \pm 1.1$
$4.8 \pm 1.0$	$4.7 \pm 1.0$	$6.1 \pm 0.6$	-	$5.6 \pm 0.8$	E5	$5.3 \pm 1.1$	$9.0 \pm 2.4$	-
$14.2 \pm 2.6$	$14.3 \pm 2.9$	$13.9 \pm 2.9$	-	-	E6	$14.3 \pm 2.2$		-----

\* - наиболее вероятной возраст палеоземлетрясений по методу Байеса, вычисленный в программе OxCal v.4.4

Λ - интервал повторяемости сильных палеоземлетрясений показывает измеренные промежутки времени между событиями

Для оценки сейсмического потенциала центрального сегмента Памирского фронтального надвига (PFT) были вычислены моментные магнитуды, которые рассчитываются по сейсмическому моменту ( $M_0$ ) с использованием соотношения, предложенного Хэнксом и Канамори [21]. Сейсмический момент определяется, как

$$M_0 = \mu D_{ave} A, \quad (1)$$

где  $\mu = 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  – средняя сдвиговая жёсткость пород в зоне разлома;  $D_{ave}$  – средняя величина смещения (м);  $A$  – площадь очагового разрыва ( $\text{m}^2$ ), определяется по протяжённости разрыва, умноженной на оценку ширину области вспарывания по падению плоскости разрыва. Для определения ширины разлома использованы средний угол падения разлома PFT  $30^\circ$  и глубина 15 км (гипоцентр сильных зарегистрированных землетрясений); для расчёта сейсмического момента - средняя величина смещения по плоскости разрыва  $D_{ave} = 2.5 \pm 0.5$  м предпоследнего события (E2), которое зафиксировано во всех траншеях.

С помощью уравнения (1) рассчитаны моментные магнитуды:  $M_w = 7.3$  - для разрыва длиной  $\sim 35$  км;  $M_w = 7.3$  - для разрыва длиной  $\sim 65$  км;  $M_w = 7.4$  - для разрыва длиной  $> 65$  км.

Таким образом, учитывая полное разрывообразование сегмента длиной  $\geq 35$  км во время трёх палеособытий ( $1.5 \pm 0.1$  тыс. лет (E2),  $3.4 \pm 0.2$  тыс. лет (E4) и  $5.3 \pm 1.1$  тыс. лет (E5)), нами вычислен средний интервал повторяемости землетрясений по Памирскому фронтальному надвигу (PFT) - 1.9 тыс. лет с магнитудой  $M_w \geq 7.0-7.4$ .

Новые результаты палеосейсмологического исследования по пяти траншеям через Центральный сегмент Памирского фронтального надвига (PFT) показали наличие пяти разрывообразующих палеоземлетрясениях в течении последних  $\sim 7$  тыс. лет и, возможно, шестого события последних 16 тыс. лет. По крайней мере три из этих событий представляют собой сильные землетрясения с  $M_w \geq 7.0-7.4$ , которые, вероятно, привели к разрыву всего сегмента ( $\sim 35$  км) и, возможно, даже пересекли границы сегмента ( $> 65$  км). Мы оцениваем среднюю скорость смещения крыльев разлома  $4.7 \pm 1.7$  мм / год (что эквивалентно скорости горизонтального укорочения на  $4.1 \pm 1.5$  мм / год) за последние  $\sim 7$  тыс. лет, а в позднеплейстоценовое время ( $14.3 \pm 2.2$  тыс. лет) она составляет  $0.7 \pm 0.2$  мм/год.

### Литература

1. Coutand I., Strecker M.R., Arrowsmith J.R., Hilley G., Thiede R.C., Korjenkov A., Omuraliev M. Late Cenozoic tectonic development of the intramontane Alai Valley (Pamir- Tian Shan region, Central Asia). *Tectonics*, 2002. vol.21, No.6, 1053.
2. Strecker, M. R., Frisch, W., Hamburger, M. W., Ratschbacher, L., Semiletkin, S., Zamoruyev, A., & Sturchio, N. (1995). Quaternary deformation in the eastern Pamirs, Tadzhikistan and Kyrgyzstan. *Tectonics*, 14(5), 1061–1079. <https://doi.org/10.1029/95tc00927>.
3. Strecker, M. R., Hilley, G. E., Arrowsmith, J. R., & Coutand, I. (2003). Differential structural and geomorphic mountain-front evolution in an active continental collision zone: The northwest Pamir, southern Kyrgyzstan. *Geological Society of America Bulletin*, 115(2), 166–181. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)115<0166:dsagmf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)115<0166:dsagmf>2.0.co;2).
4. Arrowsmith, J. R., & Strecker, M. R. (1999). Seismotectonic range-front segmentation and mountain-belt growth in the Pamir-Alai region, Kyrgyzstan (India-Eurasia collision zone). *Geological Society of America Bulletin*, 111(11), 1665–1683. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<1665:srfsam>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<1665:srfsam>2.3.co;2)
5. Teshebaeva, K., Sudhaus, H., Echtler, H., Schurr, B., & Roessner, S. (2014). Strain partitioning at the eastern Pamir-Alai revealed through SAR data analysis of the 2008 Nura earthquake. *Geophysical Journal International*, 198(2), 760–774. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu158>
6. A. Zubovich, X. Wang, Y. Scherba, G. Schelochkov, R. Reilinger, C. Reigber, et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. // *Tectonics*, 29 (2010), p. TC6014, 10.1029/2010TC002772.
7. Zubovich, A. V., Schöne, T., Metzger, S., Mosienko, O., Mukhamediev, S., Sharshebaev, A., & Zech, C. (2016). Tectonic interaction between the Pamir and Tien Shan observed by GPS. *Tectonics*, 35(2), 283–292. <https://doi.org/10.1002/2015tc004055>.
8. Metzger, S., Schurr, B., Ratschbacher, L., Sudhaus, H., Kufner, S.-K., Schöne, T., Zhang, Y., Perry, M., & Bendick, R. (2017). The 2015  $M_w 7.2$  Sarez strike-slip earthquake in the Pamir interior: Response to the underthrusting of India's western promontory. *Tectonics*, 36(11), 2407–2421.
9. Омуралиева А., Омуралиев М. «Динамика сейсмических процессов на сопряжении областей горообразования Памира и Тянь-Шаня: Заалайского поднятия и Алайской впадины» / Вестник Института сейсмологии НАН КР №1(11), 2018.
10. Гребенникова В.В., Фортуна А.Б. «Сейсмичность Заалайского хребта (Памиро-Алайская зона) Вестник Института сейсмологии НАН КР №1(11), 2018.
11. Никонов А.А., Ваков А.В., Веселов И.А. Сейсмоструктура и землетрясения зоны сближения Памира и Тянь-Шаня. М.: Наука, 1983, 240 с.
12. Patyniak M, Landgraf A, J. R. Arrowsmith, A. Dzhumabaeva, K. Abdrakhmatov, and M. Strecker. Unraveling the Quaternary deformation history of the North Pamir collision zone: New paleoseismological data from the Pamir Frontal Thrust (39.5°N, 72.5°E), Kyrgyzstan, Central Asia.) *Geophysical Research Abstracts* Vol. 20, EGU2018-18736, 2018 EGU General Assembly 2018 © Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 license.

13. Patyniak M., Landgraf A., Dzhumabaeva A., Williams A. M., S. Baikulov, J. R. Arrowsmith, K. Abdrakhmatov, and M. R. Strecker. Seismic Behavior Along a Fault Segment in an Active Continental Collision Zone: New Paleoseismic and Structural Data of the Pamir Frontal Thrust in the Alai Valley, Kyrgyzstan, Central Asia. 1EGU2020-4599 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4599> EGU General Assembly 2020 © Author(s) 2020.
14. 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, e2021JB022405. <https://doi.org/10.1029/2021JB022405>.
15. Reimer, P. J., E. Bard, A. Bayliss, J. W. Beck, P. G. Blackwell, C. Bronk Ramsey, C. E. Buck, H. Cheng, R. L. Edwards, M. Friedrich, et al. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 yearscal BP, *Radiocarbon*, No. 4, 1869–1887.
16. Reimer, P. J., Austin, W. E., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., & Friedrich, M. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/rdc.2020.41>
17. DuRoss, C. B., Personius, S. F., Crone, A. J., Olig, S. S., & Lund, W. R. (2011). Integration of paleoseismic data from multiple sites to develop an objective earthquake chronology: Application to the Weber segment of the Wasatch fault zone, Utah. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), 2765–2781. <https://doi.org/10.1785/0120110102>
18. Biasi, G. P., & Weldon, R. J. (2009). San Andreas Fault Rupture Scenarios from Multiple Paleoseismic Records: Stringing Pearls. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A), 471–498. <https://doi.org/10.1785/0120080287>
19. Landgraf, A., A. Dzhumabaeva, K. E. Abdrakhmatov, M. R. Strecker, E. A. Macaulay, J.R. Arrowsmith, H. Sudhaus, F. Preusser, G. Rugel, and S. Merchel (2016). Repeated large-magnitude earthquakes in a tectonically active, low-strain continental interior: The northern Tien Shan, Kyrgyzstan, *J. Geophys. Res.* Vol. 121, No. 5, pp. 3888–3910. Doi:10.1002/2015JB012714.
20. Patyniak, A. Landgraf, A. Dzhumabaeva, K. E. Abdrakhmatov, S. Rosenwinkel, O. Korup, F. Preusser, J. Fohlmeister, JR. Arrowsmith, M. R. Strecker. Paleoseismic Record of Three Holocene Earthquakes Rupturing the Issyk-Ata Fault near Bishkek, North Kyrgyzstan / *Bulletin of the Seismological Society of America* (2017) 107 (6): 2721-2737. doi:<https://doi.org/10.1785/0120170083>.
21. Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/jb084ib05p02348>
22. Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.

Рецензент: к. г.-мин. наук, М. О. Омуралиев