

УДК 550.34 (571.53/55)

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

ПРИМЕНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (ЧУЙСКАЯ ВПАДИНА, СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

Аннотация. В статье рассматривается применение Байесовской статистики для анализа абсолютных возрастов палеоземлетрясений, установленных в разрезах траншеи «Белек» и «Панфиловка» в зонах Иссык-Атинского и Чонкурчакского разломов Чуйской впадины Северного Тянь-Шаня. Результаты датирования использованы для построения возрастной модели палеоземлетрясений по программе OxCal (v.4.2), которая определила функции плотности вероятности появления палеоземлетрясений в интервале времени 10.5 ± 1.1 , 5.6 ± 1.0 и 0.625 ± 95 тыс. лет по траншее «Белек» и 8.9 ± 1.9 , 3.6 ± 1.3 тыс. лет по траншее «Панфиловка», со стандартной погрешностью ($\pm 1 \sigma$).

Ключевые слова: палеоземлетрясение, абсолютный возраст, радиоуглеродный метод, байесовский анализ, программа OxCal v.4.2.

ПАЛЕО ЖЕРТИТИРӨӨЛӨРДҮН УБАКТЫСЫН АНЫКТООДО БАЙЕС СТАТИСТИКАСЫН КОЛДОНУУ (ЧҮЙ ӨРӨӨНҮ, ТҮНДҮК ТЯНЬ -ШАНЬ)

Кыскача мазмуну. Макалада палео-жер титирөөлөрдүн убактысын жана кайталанышын аныктоо боюнча Байес статистикасын колдонуу жөнүндө сөз болот. Модель OxCal программасынын (v.4.2) жардамы менен Чуй өрөөнүндөгү Ысык-Ата жана Чонкурчак жарака зоналарында жүргүзүлгөн траншея изилдөөлөрүндө (с. Белек жана Панфиловка) алынган палеосейсмикалык маалыматтарды талдоонун негизинде курулган. Программа Белек траншеясы боюнча 10.5 ± 1.1 , 5.6 ± 1.0 жана 0.625 ± 95 миң жыл аралыгында жана Панфиловка траншеясы боюнча 8.9 ± 1.9 , 3.6 ± 1.3 миң жыл аралыгында палеожер титирөөлөр мезгилинин пайда болуу ыктымалдыгы боюнча тыгыздык функцияларын аныктайт ($\pm 1 \sigma$).

Негизги сөздөр: палеожер титирөөлөр, радиокөмүртектүү даталануу, Байес анализи, OxCal v.4.2 программасы.

APPLICATION OF BAYESIAN STATISTICS FOR MODELING OF ABSOLUTE AGE OF PALEOEARTHQUAKES (CHU BASIN, NORTHERN TIEN-SHAN)

Abstract. The use of Bayesian statistics to analyze radiocarbon dating, selected in the trench "Belek" and "Panfilovka" in the areas of Issyk-Ata and Chonkurchak faults in the Chubasin of the Northern Tien Shan is considered in the paper. Based on stratigraphy and absolute dating, an age model of paleoearthquakes was created in the OxCal calibration program (v.4.2). The program determines the density of the probability of the appearance of paleo earthquake time in the interval of 10.5 ± 1.1 , 5.6 ± 1.0 and 0.625 ± 95 kyr on the "Belek" trench and 8.9 ± 1.9 , 3.6 ± 1.3 kyr on the Panfilovka trench, estimated [$\pm 1\sigma$] range.

Keywords: paleoearthquake, radiocarbon dating, Bayes method, OxCal (v.4.2) program.

Определение времени доисторических сильных землетрясений и их повторяемость является одной из ключевых задач палеосейсмологии и служит важным параметром при оценке сейсмической опасности территории Кыргызской Республики. Палеосейсмические данные последних лет, полученные по методу «тренинга» в зонах активных разломов, позволяет получить качественные и количественные материалы и расширяет базу данных [1-7].

Современные компьютерные технологии и разработанные на их платформе различные программы позволяют провести статистический анализ палеосейсмологических данных и построить возрастные модели времени и повторяемости палеоземлетрясений [1, 2, 8, 9, 10].

Одна из таких программ - OxCal (v.4), разработанная в Оксфордском университете (Англия), с последовательной версией калибровочной кривой IntCal. OxCal - это широко используемый программный пакет для калибровки и статистического анализа радиоуглеродных датировок и других хронологических информации. Он стал доступен для более широкого использования в 1994 г. [11-12]. Последующие выпуски сосредоточены на внедрении новых статистических методов и изменениях в пользовательском интерфейсе [13-15].

Байесовское статистическое моделирование радиоуглеродных дат внедрено в качестве инструмента в программу калибровки OxCal v.4 и заключается в том, что хронологическая модель событий строится с учётом информации о стратиграфическом контексте каждого из включённых радиоуглеродных измерений. Разработанные методы моделирования радиоуглеродных возрастов по программе OxCal v.4 обеспечивают основу для эффективного заполнения пробелов и сужения вероятностных интервалов событий в хронологической летописи [16-17]. В работе Бронк Рэмси [16] даётся более подробное описание использования Байесовского анализа для уменьшения неопределённости радиоуглеродных возрастов.

Следует отметить, что метод Байеса позволяет определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие и можно более точно пересчитать вероятность, взяв в расчёт как ранее известную информацию, так и данные новых наблюдений. Особенность теоремы Байеса заключается в том, что для её практического применения требуется большое количество расчётов и вычислений, поэтому Байесовские оценки стали активно использовать только после «революции» в компьютерных и сетевых технологиях [16].

Разработанные Байесовские методы впервые в палеосейсмологии применялись при оценке возраста и интервала повторяемости палеоземлетрясений на основе анализа радиоуглеродных датировок и стратиграфических признаков, отобранных на участках траншейных исследований в зоне разлома Сан-Андреас в Калифорнии [8, 9].

К примеру, Дюрсс с соавторами [10] расширили этот метод и использовали для объединения данных 4-х траншей, пройденных на сегменте Вербер в зоне Уосатцкого разлома (США). С помощью метода Байеса были проанализированы интервалы времени между событиями в программе OxCal, которая определяла функции плотности вероятности времени каждого события. Сопоставляя интервалы времени события каждого участка друг с другом и учитывая перекрытие распределения функции плотности вероятности, разницу в величинах смещения и заметные границы внутри сегмента разлома, построена расчётная возрастная модель на всю длину сегмента за длительное время. Моделирование определило последовательность 5 палеоземлетрясений, произошедших на сегменте около 5.9, 4.5, 3.1, 1.1 и 0.6 тыс. лет назад. С помощью модели Монте-Карло был определён средний интервал повторяемости 1.3 тыс. лет со стандартным отклонением в 2 сигмы (рисунок 1).

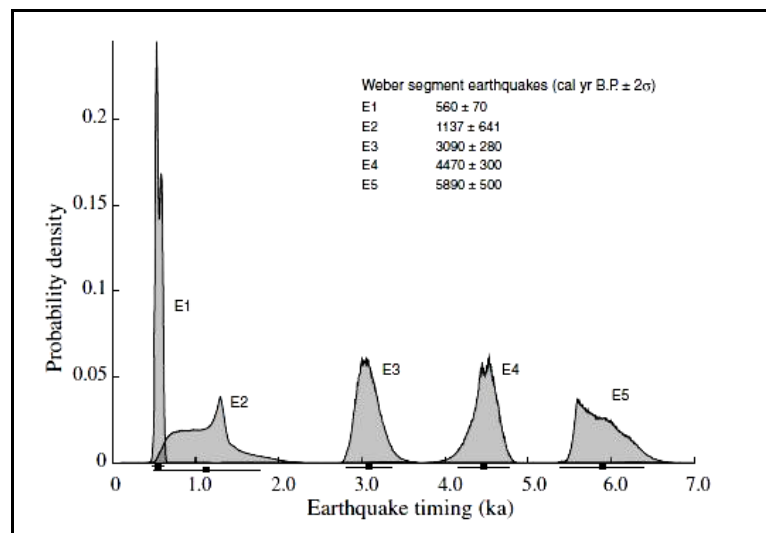


Рисунок 1. Возрастная модель хронологии палеоземлетрясений в сегменте «Вербер» (зона разлома Уосатч, США). Распределение дат по шкале времени отражает периоды появления сейсмособытий: 560 $\pm$ 70 (E1), 1137 $\pm$ 641 (E2), 3090 $\pm$ 280 (E3), 4470 $\pm$ 300 (E4) и 5890 $\pm$ 500 (E5) [10].

Используя Байесовские методы, нами были определены интервалы времени палеоземлетрясений по данным траншеи «Белек», пройденной в зоне Иссык-Атинского разлома (Чуйской впадина) [1] (рисунки 2 и 3). Абсолютная хронология палеоземлетрясений надёжно базируется на значительной серии образцов, отобранных в стенках траншеи, для абсолютного датирования различными методами: радиоуглеродным (^{14}C), инфракрасной стимуляцией люминесценции (IRSL), уран-ториевым (U-Th). Калибровка радиоуглеродных возрастов и Байесовские анализы были осуществлены в программе OxCal (версия 4.2) с использованием калибровочной атмосферной кривой IntCal13 [11].

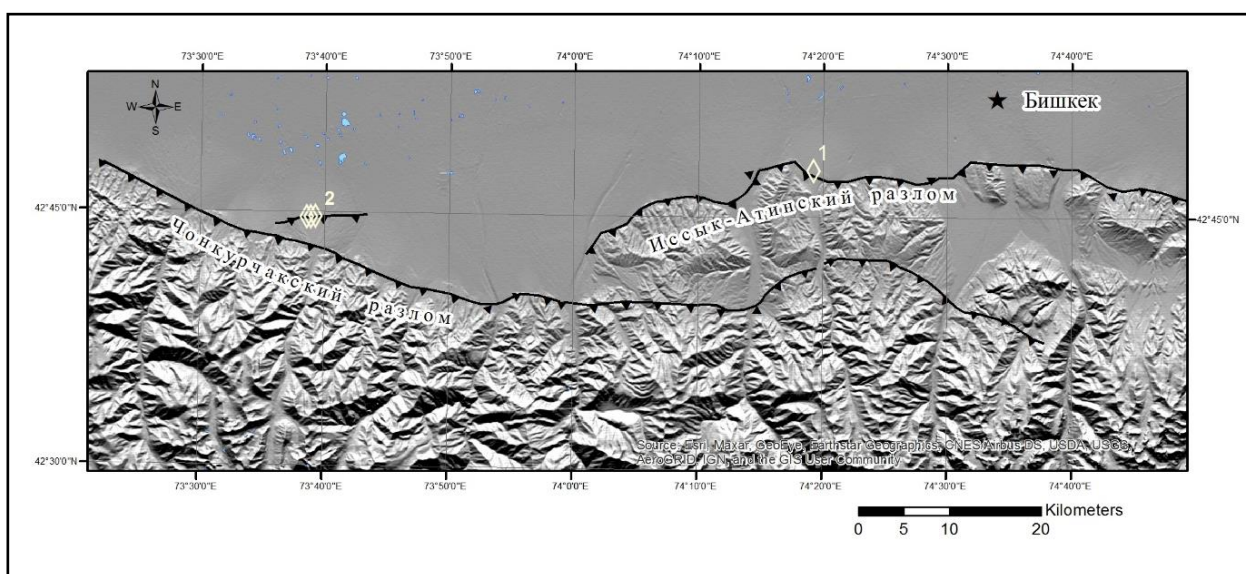


Рисунок 2. Положение траншеи, пройденной в зоне Иссык-Атинского и Чонкурчакского разломов в Чуйской впадине. Ромбиками отмечено место траншей: 1-«Белек», 2-«Панфиловка_1_2_3».

Радиоуглеродные даты образцов, полученные из стратиграфического разреза траншеи, представляет собой случайную величину, подчинённую нормальному закону распределения: $T \pm \sigma$, где T - математическое ожидание, σ - стандартная погрешность измерений. На шкале времени - это не точка, а интервал, который с определённой вероятностью содержит «истинную дату». Для большей уверенности предлагается делать множественное и дублирующее датирование – серии дат по разрезу, несколько дат из наиболее важных стратиграфических единиц, выполнять датирование несколькими методами, а также использовать разного рода независимый контроль по стратиграфическим, геоморфологическим, археологическим и другим данным [20]. Принципы датирования, применяемых в палеосейсмологии, подробно освещены в работах [18, 19].

Возраст палеособытия на стенках траншеи выражается в виде временного интервала, ограниченного, с одной стороны, возрастом самого молодого из нарушенных слоев, дислоцированных подвижкой (нижняя граница интервала) и, с другой стороны, возрастом наиболее древнего из датированных горизонтов, перекрывающих сейсмогенные отложения (верхняя граница интервала). В качестве событийного горизонта в разрезах траншеи являются отложения коллювиального клина, относительно которого возможна корреляция отложений периодов сейсмического покоя [18, 19].

Полученные абсолютные возрасты введены в программу OxCalv 4.2, которая состоит из последовательного набора запросов. Программа начинается командой «Sequence» (последовательность, определяющая, что измерение датировать последовательные события, что является допущением), указывающей, что все датированные события организованы по порядку. Внутри размещены запросы «Boundary» (граница), открывающие и закрывающие каждую из определённых фаз стратификации, что является заданным допущением о последовательностях. Эта команда позволяет ограничить калиброванные интервалы, попадающие в поле значений соседствующей фазы, и рассчитать продолжительность фаз путём датирования событий в начале и в конце каждой фазы на основании всей совокупности дат в пределах границ. Внутри запросов «Boundary» в хронологическом порядке размещены команды калибровки радиоуглеродных измерений «R_Date» и «C_Date» инфракрасной стимуляции люминесценции (IRSL) и уранового ряда(U), при этом они сгруппированы командой «Phase» (фаза), указывающей, что порядок событий неизвестен, следовательно, калиброванные интервалы не зависят один от другого. В некоторых случаях, когда было несколько индивидуальных радиоуглеродных дат без относительных возрастных ограничений в последовательности, использовалась функция R_Combine, которая позволяет определить комбинированный возраст до калибровки. В другом случае, объединена граница «Boundary» вероятного палеоземлетрясения с отдельной функцией Zero_Boundary, что даёт возможность смоделировать предполагаемый разброс во времени между ограниченными предельными (максимальными и минимальными) возрастными [11-13].

Используя вышеизложенные запросы программы, построена возрастная модель хронологии 3-х палеоземлетрясений в траншее «Белек». Внешние ограничения в последовательности событий начинаются с абсолютного возраста 13500 – 15700 BP лет назад (смещённой поверхности террасы QIII2 по данным [3]) и заканчиваются Беловодским землетрясением 1885 г. ($M=7.0$). В пределах этого времени появляются три фазы, которые ограничиваются тремя событиями в интервале -10.5 ± 1.1 , 5.6 ± 1.0 и 0.625 ± 95 тыс. лет, со стандартной погрешностью измерений в пределах 1σ [13] (рисунки 3 и 4).

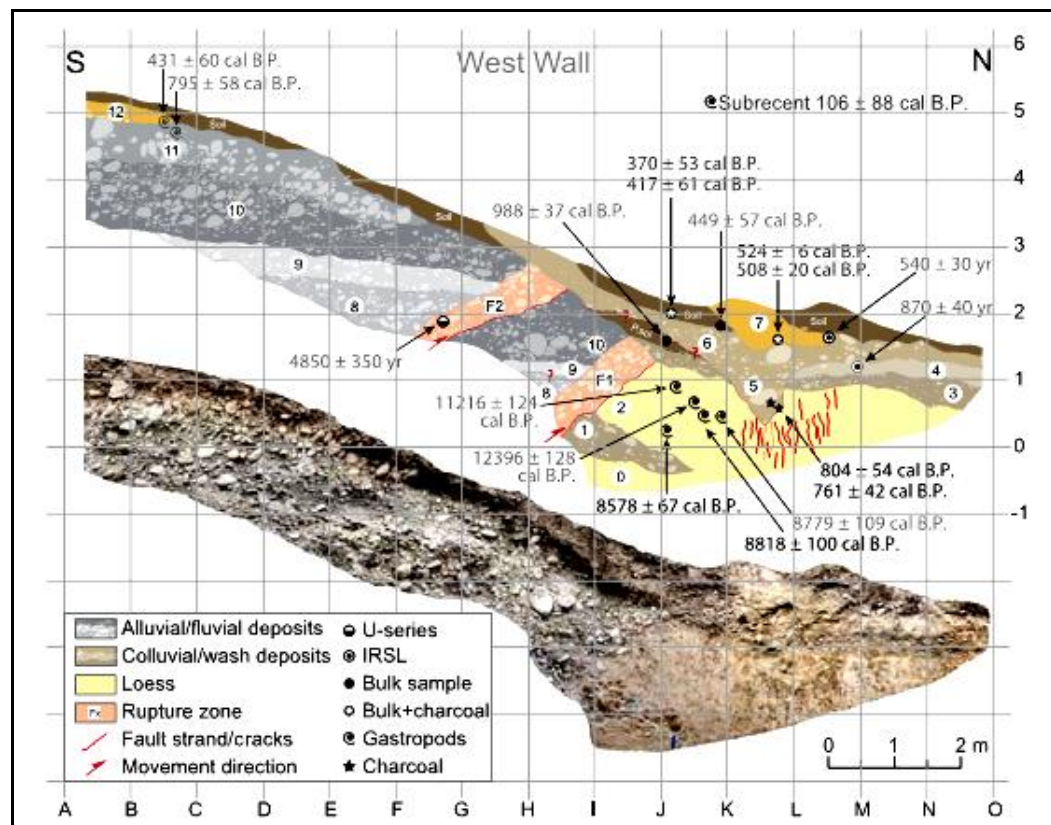


Рисунок 3. Документация траншеи «Белек», пройденной в долине реки Джыламыш, в зоне Иссык-Атинского разлома Чуйской впадины [1].

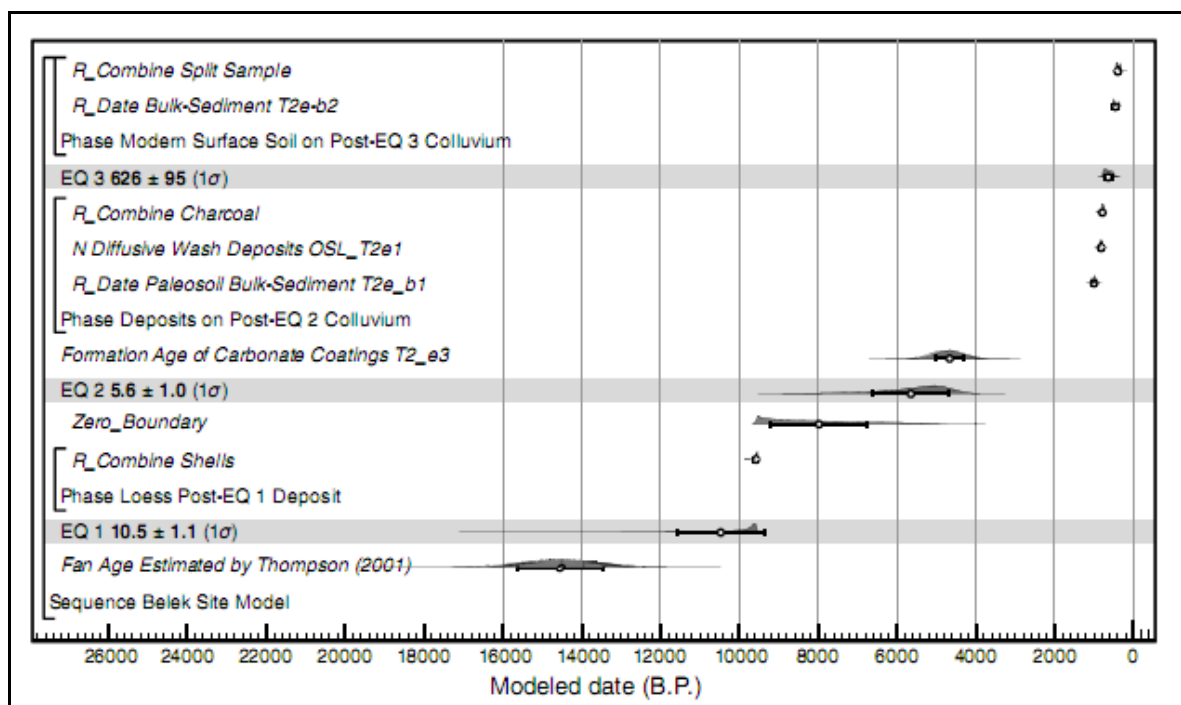


Рисунок 4. Возрастная модель хронологии 3-х палеоземлетрясений по данным траншеи «Белек», пройденной в зоне Иссык-Атинского разлома [1].

Такая же модель построена по данным из 3-х траншей «Панфиловка1_2_3» в зоне Чон-Курчакского разлома (рисунки 2 и 4). Абсолютные возраста (радиоуглеродный ^{14}C , IRSL, OSL) нарушенных слоёв в траншеях охватывает последовательное время от 17.3 ± 4.3 до 1.57 ± 0.17 тыс. лет. На основе полученных данных построена модель, которая определяет функцию плотности вероятности времени двух палеоземлетрясений, в интервале 8.9 ± 1.9 и 3.6 ± 1.3 тыс. лет назад с погрешностью $\pm 1\sigma$. [2] (рисунок 4).

Таким образом, Байесовские методы позволили уточнить наиболее вероятные интервалы времени пяти палеоземлетрясений со стандартной погрешностью в пределах $\pm 1\sigma$, произошедших в Чуйской впадине в течение 10 тыс. лет. Разработанные методы моделирования абсолютных возрастов палеоземлетрясений по программе OxCal v.4 обеспечивают основу для эффективного заполнения пробелов и сужения вероятностных интервалов событий в хронологической летописи. Результаты анализа является необходимыми для улучшения вероятностной оценки сейсмической опасности изученной территории.

Дальнейшая работа состоит в более углублённом количественном анализе данных по палеоземлетрясениям, полученных в результате тренчинга, что позволит интегрировать и коррелировать имеющиеся данные и более точно оценить время и интервалы доисторических сейсмособытий.

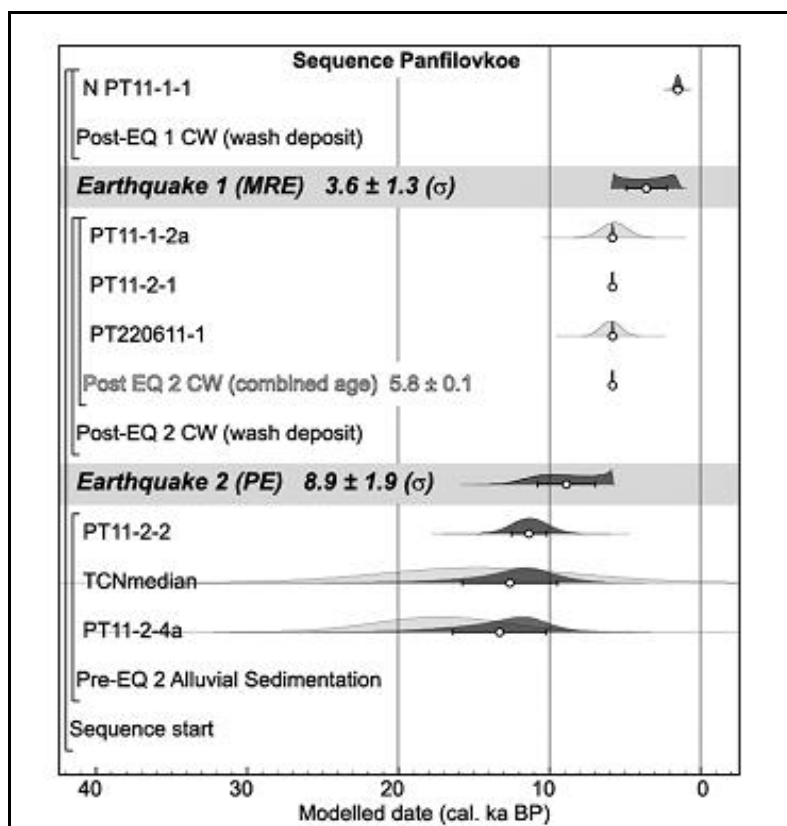


Рисунок 4. Возрастная модель хронологии 2-х палеоземлетрясений с помощью программы OxCal 1 (v4.2.4) [14, 15] по данным траншеи «Панфиловка» в зоне Чон-Курчакского разлома (Чуйская впадина) [2].

Литература

1. 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
2. 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
3. Thompson, S. C., R. J. Weldon, C. M. Rubin, K. Abdrakhmatov, P. Molnar, and G. W. Berger, Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, central Asia, J. Geophys. Res., 107(B9), 2203, doi: 10.1029/2001JB000596, 2002.
4. Abdrakhmatov, K. E., et al. (2016), Multisegment rupture in the 11 July 1889 Chilik earthquake (Mw 8.0–8.3), Kazakh Tien Shan, interpreted from remote sensing, field survey, and paleoseismic trenching, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, doi:10.1002/2015JB012763.
5. Сильные исторические и палеоземлетрясения Прииссыккуля и их положение в структуре Северного Тянь-Шаня / А.М. Корженков, С.В. Абдиева, А.Р. Агатова и др.; Под ред А.В. Николаева. - М. ИФЗ РАН, 2018. - 174 с.: ил.
6. Smekalin, O. P., V. S. Imaev, A. M. Korzhenkov, and A. V. Chipizubov (2016). Paleoseismological investigations in the pleistoseismal zone of the 1885 Belovodskoe earthquake, North Tien Shan, Seism.Instrum. 52, pp. 279–289.
7. Джумабаева А.Б. Хронология палеоземлетрясений в зоне Иссык-Атинского разлома (Чуйская впадина, Северный Тянь-Шань) Вестник Института сейсмологии НАН КР №1(13), 2019.
8. Biasi G. P., and R. J. Weldon II San Andreas Fault Rupture Scenarios from Multiple Paleoseismic Records: Stringing Pearls Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 2A, pp. 471–498, April 2009, doi: 10.1785/0120080287
9. Hilley, G.E., and Yong, J.J. Deducing paleoearthquake timing and recurrence from paleoseismic data, part I: Evaluation of new Bayesian Markov-Chain Monte Carlo simulation methods applied to excavations with continuous peat growth \Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.98, No.1, pp. 382-406, 2008, doi:10.1785/0120020077
10. DuRoss, C. B., S. F. Personius, A. J. Crone, S. S. Olig, and W. R. Lund (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, Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 101, No.6, pp. 2765–2781, 2011, doi:10.1785/0120110102
11. http://c14.arch.ox.ac.uk
12. Bronk Ramsey, C. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal Program, Radiocarbon, 37(2), 425–430, 1995.
13. Bronk Ramsey, C. Probability and dating, Radiocarbon, 40(1), 461–474, 1998.
14. Bronk Ramsey, C. (2013), OxCal 4.2, Web Interface Build No. 78, Oxford Univ., Oxford, U.K.
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. Bronk Ramsey, C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, Radiocarbon, 51(1), 337–360, 2009
17. Чечушков И.В., Молчанова В.В., Епимахов А.В. Абсолютная хронология поселений позднего бронзового века Каменный амбар и Устье I в южном Зауралье: Возможности Байесовской статистики /Вестник археологии, антропологии и этнографии, 2020, № 2 (49), с.5-19, doi.org/10/20874/2071-0437-2020-49-2-1
18. Палеосейсмология. Коллектив авторов; под ред. Джеймса П. Мак Калпина: в 2-х томах. Том 2. 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.
19. Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.И. Палеосейсмология Восточной Сибири (некоторый опыт практического применения)/ Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. -99с.
20. Панин А.В. Методы палеогеографических исследований: Четвертичная геохронология. Учебное пособие. Географический факультет МГУ, 2014.

Рецензент: к. г.-м.н. А.Б. Фортуна