

УДК 550.348.436; 551.24:550.34

СЕЙСМОТЕКТОНИКА ВОСТОЧНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И ДЖУНГАРИИ

¹⁾ Абдрахматов К.Е., ²⁾ Мукамбаев А., ³⁾ С. Grützner, ⁴⁾ G. Campbell, ⁵⁾ R.T. Walker, ⁵⁾ D. Mackenzie, ⁶⁾ J. Jackson,
⁷⁾ Аширов Б.М., ⁷⁾ Айтмырзаев Ж.С., ⁷⁾ Джанабилова С.О., ⁷⁾ Елдеева М.С.

¹⁾ Институт сейсмологии НАН, Бишкек, Кыргызстан

²⁾ Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

³⁾ Friedrich Schiller University Jena, Institute of Geological Sciences, Jena, Germany

⁴⁾ ARUP, London, UK

⁵⁾ Department of Earth Sciences, University of Oxford, UK

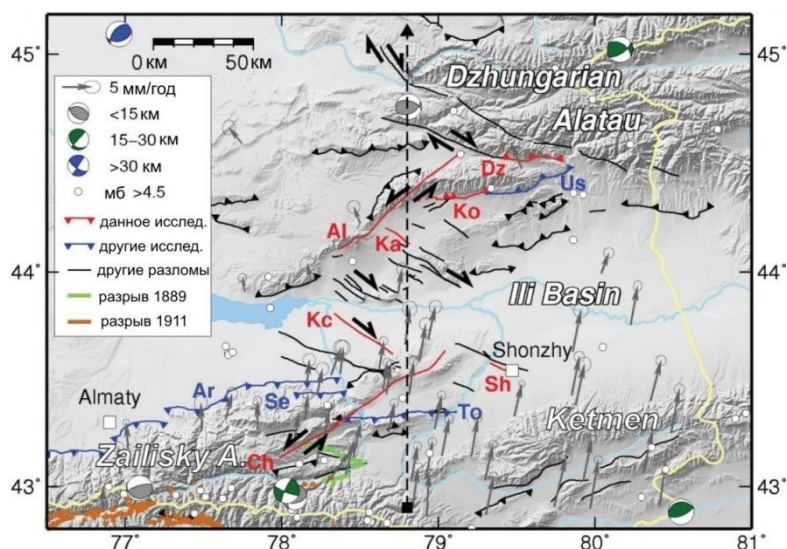
⁶⁾ COMET, Bullard Labs, Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Cambridge, UK

⁷⁾ ТОО «Институт сейсмологии», Алматы, Казахстан

В статье показано, что в пределах восточной части Северного Тянь-Шаня и Джунгарии активные разломы, с крыльями, смещенными в позднем плейстоцене – голоцене, имеют простирание, отличное от направления новейших структур, в основном субширотных. Эти разломы представляют собой правосдвиговые дизъюнктивы северо-западного простирания. Именно они ответственны за современную сейсмическую обстановку на исследованной территории.

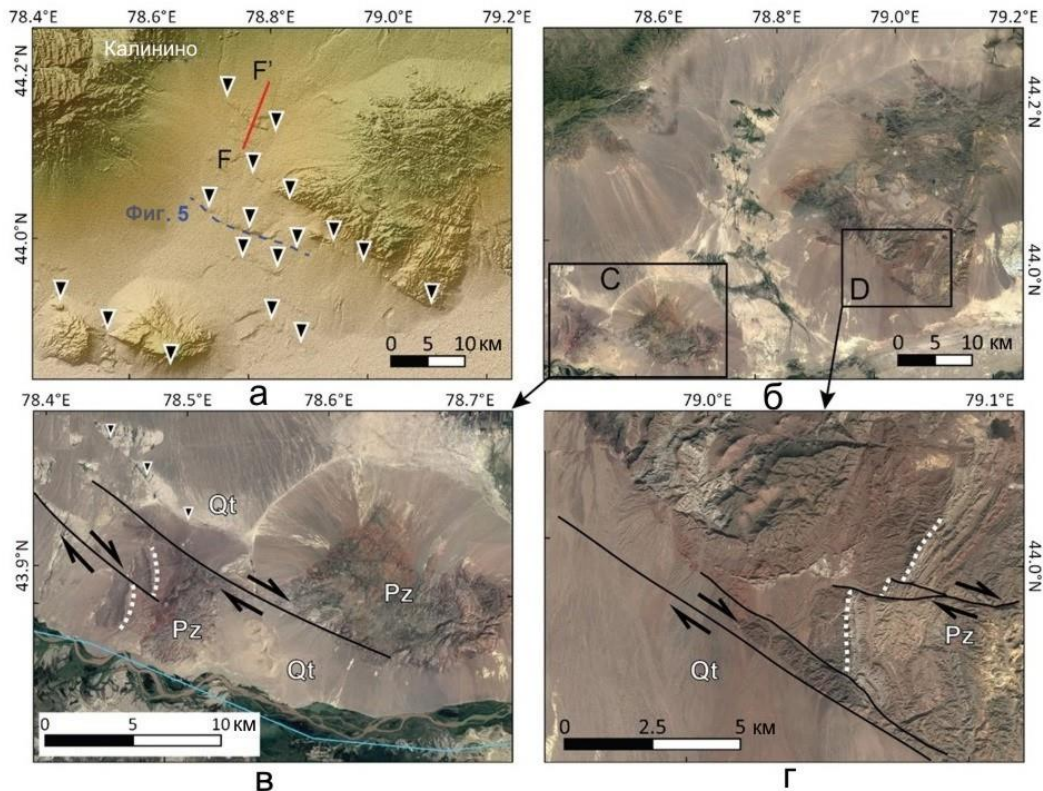
Как известно, простирание основных новейших структур Северного Тянь-Шаня и Джунгарии отвечает субмеридиональному сжатию, направленному с юга на север, в соответствии с давлением Индийской плиты. Новейшие разломы, которые на Тянь-Шане в большинстве случаев представлены взбросами, надвигами и сдвигами, также являются следствием этого давления. Их положение на границе хребтов и впадин совпадает с простиранием основных структур. Однако исследования, проведенные в

последние годы, показали, что активные разломы, т. е. разломы, крылья которых смещались в позднем плейстоцене – голоцене, в пределах восточной части Северного Тянь-Шаня имеют простирание, отличное от направления новейших структур. Эти разломы представляют собой правосдвиговые дизъюнктивы северо-западного простирания. Именно они ответственны за современную сейсмическую обстановку на Северном Тянь-Шане и Джунгарии (рисунок 1).



стрелка – скорость GPS с 95%-ным доверительным эллипсом по [1]; механизмы очагов землетрясений по [2]; белая точка – землетрясение с $m_b > 4.5$ за 1960–2008 гг. по [3] и каталогам ISC за 2009–2018 гг. [4]; черная линия – активный разлом, закартированный по космоснимкам и полевым данным; красная линия – разлом, обсуждаемый в статье: Al – Алтынэмельский, Ch – Чилико-Кеминский, Dz – Западно-Джунгарский, Ka – Калинино, Kc – разрыв вблизи Капчагайского водохранилища, Ko – Конуруленский, Sh – Шонжы; синяя линия – разлом, обсуждавшийся в предыдущих исследованиях: Ar – Алматинский [5], Se – Алматинский [6], To – Торайгырский [7], Us – Усекский [8]; зеленая линия – поверхностный разрыв Чиликского землетрясения 1889 г. [9]; коричневая линия – поверхностный разрыв Кеминского землетрясения 1911 г. [10]

Рисунок 1. Сейсмотектонические особенности Восточного Тянь-Шаня и Джунгарии



красная линия – профиль SRTM1; треугольник – уступ в осадочном заполнении впадины; синяя линия – разлом, показанный на рисунке 5-б; прямоугольник – участок, представленный крупным планом на рисунках 2-в, г

Рисунок 2. Активная деформация разломами северо-западного простирания с правосторонней компонентой на участке Калинино: а – поверхностное проявление активного разлома по данным HMA (Heterogeneous Missions Accessibility) и SRTM1; б – спутниковое изображение той же области (родники маркируют основания уступов благодаря изменению растительности); в – космоснимок смещенных палеозойских горных хребтов вблизи Калинино (разломы, нарушающие коренные породы, смещают также и четвертичные аллювиальные конусы и дренажную систему); г – правосторонние сдвиги, нарушающие палеозойское скальное основание и отмечающие границу между палеозойскими породами и четвертичными отложениями (б, в, г – изображения GoogleEarthDigitalGlobe/CNES (Centre National D'études Spatiales))

Ниже рассмотрены несколько примеров таких разломов.

1. Многочисленные разломы северо-западного простирания с правосдвиговой компонентой обнаружены авторами в районе с. Калинино (рисунки 1, 2). Здесь закартированы многочисленные разломы СЗ–ЮВ простирания, длиной 5–20 км (рисунок 2-а). Разломы субпараллельны, расстоянием между ними 3–15 км. В районе с. Калинино (рисунок 2-а, б) разломы правосторонне смещают выходы коренных пород [11] (рисунок 2-в, г), но возраст этих смещений неизвестен. Там, где эти разломы продолжают в аллювиальных конусах, наблюдается взбросовая компонента смещений. Другие разломы вертикально смещают аллювиальные и речные поверхности. Они хорошо видны на DEM (Digital elevation model) и на полевых фотографиях. Вблизи Калинино задокументирован разлом, протяженностью более 5 км и 12-метровый уступ, смещающий лессовый покров террас (рисунок 4-д). Топографический профиль по данным SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) показывает, что вертикальное смещение не связано с локальной (антропогенной) модификацией, а пред-

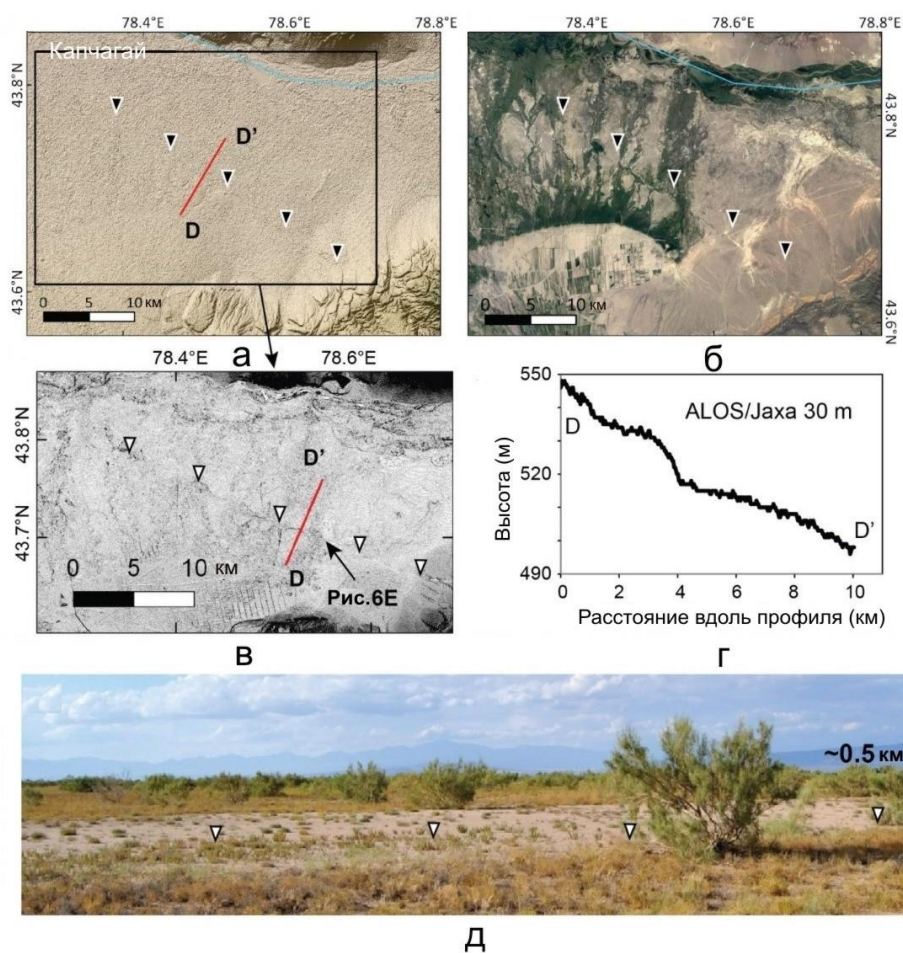
ставляет собой систематическое смещение поверхности впадины.

2. Еще один разлом северо-западного простирания с вертикальным смещением и, вероятно, также правосторонним смещением, был закартирован юго-восточнее Капчагайского водохранилища (Кс на рисунке 1). Разлом имеет простирание СЗ–ЮВ и прослеживается около 40 км согласно DEM (рисунок 3-а) и в оптических спутниковых снимках (рисунок 3-б). В данном случае на карте склона, полученной спутником исследования Земли ALOS/Jaxa (Advanced Land Observation Satellite/ Japan Aerospace Exploration Agency) 30-миллиметрового разрешения (рисунок 3-в) видно, что поверхностное проявление активного разрыва намного четче, чем по набору данных SRTM1, несмотря на более высокий уровень шума. Дно впадины смещено по вертикали на 20 м в центральной части разлома и имеет широкую зону деформации, которая может быть вызвана современными изменениями (рисунок 3-г). Наблюдается относительно резкое смещение, когда уступ виден в оптических изображениях. Участок с резким смещением осмотрен в поле и выявлен небольшой уступ

разлома высотой $\sim 0,5$ м. Уступ смещает молодой аллювиальный и золовый материал. Это смещение должно быть молодым и интерпретируется как поверхностное выражение одного большого землетрясения, которое, скорее всего, имело место в голоцене (рисунок 3-д). Интригует то, что наблюдаемое смещение одного события составляет всего 0,5 м, в то время как по данным дистанционного зондирования могут быть идентифицированы гораздо большие смещения. Этот опыт подчеркивает важность сочетания различных подходов при выявлении отображении активных изменений.

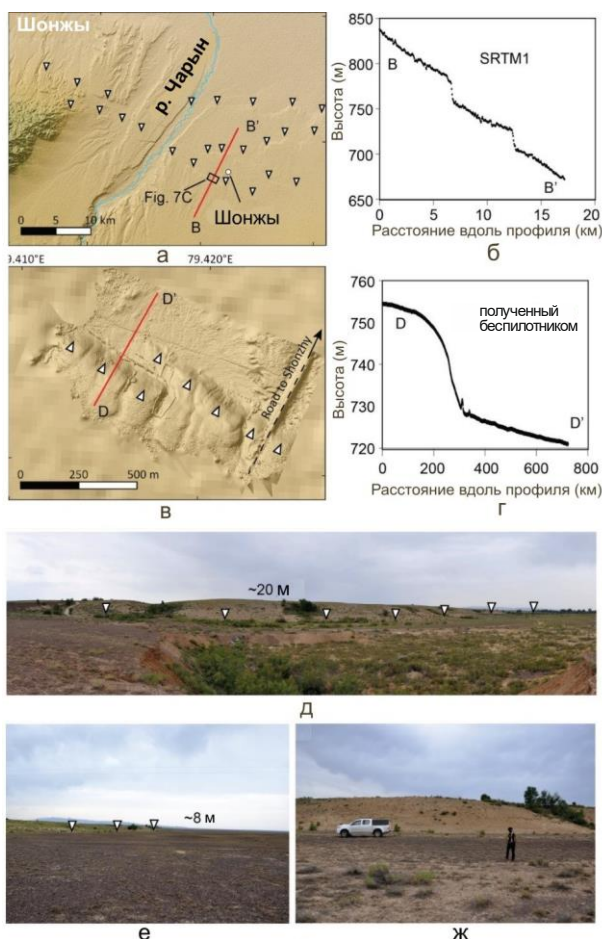
3. В южной части Илийского бассейна, разломы северо-западного простирания наблюдаются у окраины с. Чунджа (рисунок 4-а). Общая длина разломов составляет ~ 40 км. На северо-западе самый протя-

женный из них ограничивает скальное основание от осадочных пород впадины. Наблюдаются также разломы, которые смещают палеозойские породы на несколько сотен метров, но они были исключены из полевого картографирования, так как оказалось невозможным сузить возраст их последней активности. Данные по высоте согласно SRTM1 вдоль профиля вблизи города Чунджа выявили два основных разлома со смещением на несколько десятков метров (рисунок 4-б). Наиболее заметный северо-западный уступ встречен к западу от Шонжы (Sh на рисунках 1 и 4-в). Измеренное вертикальное смещение с помощью DGPS (Differential Global Positioning System) составило более 15 м, что было подтверждено съемками дронов и SRTM1 (рисунок 4-г).



условные обозначения – на рисунке 2

Рисунок 3. Активная деформация вблизи северо-западных разломов во внутренней части бассейна участка Капчагай: а – слабый, северо-западный линеймент, прослеживаемый только по SRTM1 и данным о теневом рельефе (для лучшей видимости рельеф преувеличен по сравнению с другими фигурами); б – изображение спутника той же области, что и на рисунке 3-а (заметно изменение растительности вдоль разлома в бассейне изображения GoogleEarth DigitalGlobe / CNES); в – снимок ALOS/Jaxa холмистой области (несмотря на более высокий уровень шума по сравнению с SRTM1 линеймент отчетливо различим); г – высотный профиль по ALOS/Jaxa по линии, обозначенной на рисунке 3-а (вертикальное смещение согласно DEM – до 12 м); д – полевая фотография уклона (вертикальное смещение $\sim 0,5$ м; вид на ЮЗ, место, обозначенное на рисунке 3-в ($43,673321^{\circ}$ N $78,611516^{\circ}$ E))



красные линии на рисунке 4-а, в – профиль, показанный на рис. 4-б, г; треугольник – уступ

Рисунок 4. Активный разлом северо-западного простирания во внутренней части Илийской впадины на участке Шонджи:

а – проявление на поверхности активного разлома вблизи города Шонджи (по данным НМА и SRTM1); б – профиль SRTM1 (согласно DEM – до ~30 м кумулятивного вертикального смещения по двум основным уступам, вероятно, поздне-четвертичного времени); в – съемка уступа в районе с. Шонджи с дрона DEM; г – профиль уступа вблизи с. Шонджи по результатам обработки съемки дрона по методу SfM (Structure from Motion) показывает ~20 м вертикального смещения; д – панорама уступа, в его самом высоком месте (~20 м вертикального смещения) – взгляд на ЮЗ, такой же, как с дрона DEM на рисунке 4-в; е – вид на запад вдоль уступа с палеозойскими горными хребтами на заднем плане (на левом крае уступ составляет ~8 м); ж – наивысшая часть уступа (~20 м)

Мощный лессовый покров к юго-западу от уступа, вероятно, имеет голоценовый возраст (рисунок 4-д). Уступ можно проследить на несколько километров (рисунок 4-е). В большинстве мест вдоль уступа обнаружено лессовое покрытие по обе стороны от него. Горизонтальную составляющую движения по разломам определить не удалось, но вертикальное движение проявляется в дренажной схеме, по-

скольку потоки часто отклоняются или заканчиваются около разлома Шонджи.

Таким образом, во внутренней части Илийской впадины встречены разломы северо-западного простирания, длиной 5–40 км, которые смещают позднечетвертичные и даже голоценовые отложения, и контролируют особенности дренажной сети.

Полученные авторами данные приводят к нескольким основным выводам, главный из которых заключается в том, что, активная деформация в Северном Тянь-Шане не ограничивается субширотными разломами, перпендикулярными направлению укорочения. Значительную роль играют активизированные разломы северо-западного простирания, принимающие на себя значительную часть сокращения земной коры. При этом сокращение земной коры в Илийской впадине в значительной степени происходит за счет активизации разрывов, находящихся именно в пределах впадины, а не за счет разломов, ограничивающих впадину с юга. При этом в пределах впадины имеются также молодые складчатые структуры [11].

Указанные особенности имеют самое непосредственное влияние на особенности современной сейсмичности. Например, доказано [12, 13], что в пределах Лепсинского разлома, расположенного в Джунгарии (рисунки 5, 6) произошло несколько крупных землетрясений, наиболее близкое к нам имело место около 400 лет назад, а предыдущее землетрясение произошло не менее 5 тыс. лет назад.

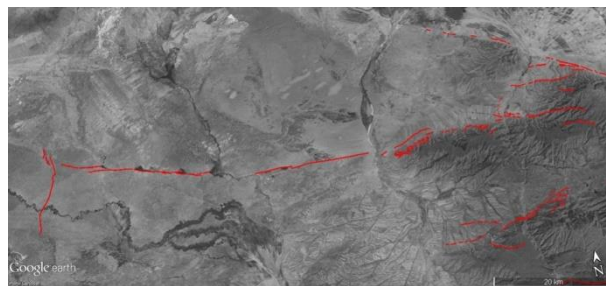
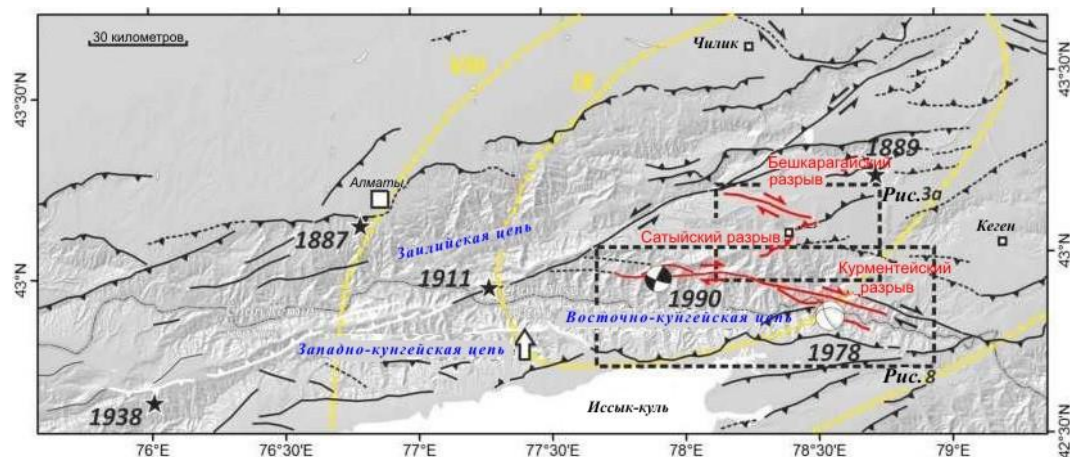


Рисунок 5. Положение Лепсинского разлома [Google Earth]



Рисунок 6. Лепсинский разлом по полевым наблюдениям и спутниковым снимкам, показывающим косое взбросовое правостороннее смещение с преобладанием вертикальных движений на востоке и без явных свидетельств горизонтальных смещений на западе [14]



белые линии – разрывные нарушения землетрясения 1911 г., изученные Ароусмитом [10]; желтые линии – изосейсты 9-ти и 8-ми бальной зоны землетрясения 1989 г. оцифрованы из карт, составленных Джанузаковым [17]; красные линии – разрывные нарушения землетрясения 1889 г по результатам работы авторов [9] с учетом первоначальных наблюдений [15, 16]; черные звездочки – эпицентры исторических землетрясений [18, 19]

Рисунок 7. Топография SRTM с затененным рельефом Заилийского и Кунгейского Тянь-Шаня, показывающая основные активные разломы

Авторы предполагают также, что Чиликское Землетрясение 11 июля 1889 г. (M_w 8,0–8,3) является частью последовательности крупных землетрясений, имевших место в конце девятнадцатого и начале двадцатого веков на Северном Тянь-Шане. Несмотря на достаточно высокую изученность этих событий, сейсмотектонические условия возникновения этого землетрясения остаются неизвестными, хотя макросейсмический эпицентр расположен в долине р. Чилик, всего в 100 км к юго-востоку от г. Алматы. Несколько сегментов разломов, которые считаются очаговыми разрывами этого землетрясения, слишком коротки для события такой магнитуды.

Можно предположить, что поверхностный разрыв в районе с. Саты (рисунок 7) образовался в результате одного землетрясения, имевшего место в течение последних 700 лет, приведшего в возникновение поверхностного смещения до 10 м. Событие, образовавшее поверхностный разрыв, вероятно, было Чиликским землетрясением 1889 г. и было единственным событием, разрушившим земную поверхность в течение, по меньшей мере, 5000 лет или, возможно, намного дольше. Использование спутниковых снимков позволило выявить несколько свежих уступов в эпицентральной зоне 1889 г. общей протяженностью около 175 км, которые предположительно также являются разрывами от указанного землетрясения. 175-километровый разрыв включает в себя сопряженное левосдвиговое и правосдвиговое смещение по трем отдельным разломам с шагом в несколько километров между ними. По всей видимости, все три разрыва не были выражены в современном рельефе, вплоть до возникновения последнего смещения. Интервал повторения между большими землетрясениями по любому из этих разломов и, по-видимому, по другим разломам Тянь-Шаня может быть больше, чем временные рамки, в течение которых обновляется рельеф,

что создает проблему для определения источников будущей опасности.

И наконец, особенности распределения современной сейсмичности в пределах Северного Тянь-Шаня (рисунок 8) показывают, что даже современное распределение слабых землетрясений обладает выраженной тенденцией группироваться в северо-западных румбах.

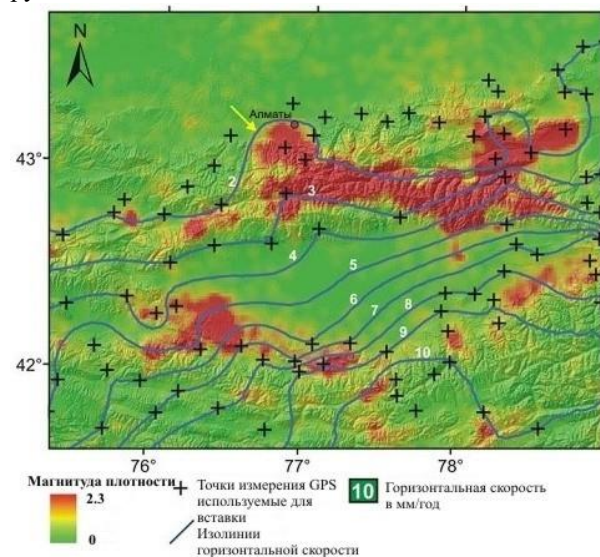


Рисунок 8. Карта плотности землетрясений и контуры скоростей современных смещений земной коры по данным GPS на территории Северного Тянь-Шаня [20]

Таким образом, проведенные нами исследования показывают, что на современном этапе тектонического развития Северного Тянь-Шаня преобладающими направлениями разрядки напряжений являются северо-западные, что должно учитываться при оценке сейсмической опасности Северного Тянь-Шаня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zubovich, A. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. / A. V. Zubovich, X. Wang, Y. G. Scherba, G. G., Schelochkov [et al] // *Tectonics*, 2010. – №29. – doi: 10.1029/2010TC002772.
2. Sloan, R. A. Earthquake depth distributions in central Asia, and their relations with lithosphere thickness, shortening and extension. / R. A. Sloan, J. A. Jackson, D. McKenzie, K. Priestley // *Geophysical Journal International*, 2011. – 185(1). – P. 1 – 29. – doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04882.x.
3. Engdahl, E. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. Bull. / E. Engdahl, R. Van Der Hilst, R. Buland // *Seismol. Soc. Am.*, 1998. – 8(3). – P. 722–743.
4. International Seismological Centre, on-line catalogue [Электронный ресурс], – Thatcham, UK, last access: 2018-01-25. – Режим доступа: <http://www.isc.ac.uk>.
5. Grützner, C. Active tectonics around Almaty and along the Zailisky Alatau range front / C. Grützner, R. T. Walker, K. E. Abdrakhmatov, A. Mukambayev [et al] // *Tectonics*, 2017. – 36(10). – P. 2192–2226.
6. Selander, J. Inherited strike-slip faults as an origin for basement-cored uplifts: Example of the Kungey and Zailisky ranges, northern Tien Shan / J. Selander, M. Oskin, C. Ormukov, K. Abdrakhmatov // *Tectonics*, 2012. – 31(4). – doi: 10.1029/2011TC003002.
7. Grützner, C. Assessing the activity of faults in continental interiors: palaeoseismic insights from SE Kazakhstan / C. Grützner, E. Carson, R. T. Walker, E. Rhodes [et al] // *Earth and Planetary Science Letters*, 2017. – 459. – P. 93–104. – doi:10.1016/j.epsl.2016.11.025.
8. Cording, A. Be exposure dating of river terraces at the southern mountain front of the Dzungarian Alatau (SE Kazakhstan) reveals rate of thrust faulting over the past ~ 400 ka. / A. Cording, R. Hetzel, M. Kober, J. Kley // *Quat. Res.*, 2014. – 81 (1). – P. 168–178. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2013.10.016>.
9. Abdrakhmatov, K. Multi-segment rupture in the July 11th 1889 Chilik earthquake (Mw 8.0–8.3), Kazakh Tien Shan, identified from remote-sensing, field survey, and palaeoseismic trenching / K. Abdrakhmatov, R. T. Walker, G. E. Campbell, A. S. Carr [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016. – 121(6). P. 4615–4640. – doi: 10.1002/2015JB012763.
10. Arrowsmith, J. R. Surface rupture of the 1911 Kebin (Chon–Kemin) earthquake, northern Tien Shan, Kyrgyzstan / J. R. Arrowsmith, C. J. Crosby, A. M. Korzhnikov, E. Mamurov [et al] // *Geological Society*, 2017. – London: Special Publications, 432(1). – P.233–253. – doi: 10.1144/SP432.10.
11. Kober, M. Thick-skinned thrusting in the northern Tien Shan foreland, Kazakhstan: structural inheritance and polyphase deformation / M. Kober, N. Seib, J. Kley, T. Voigt // *Geological Society*, 2013. – London: Special Publications, 2013377(1), 19–42. – doi:10.1144/SP377.7.
12. Campbell, G. E. Great earthquakes in low strain rate continental interiors: An example from SE Kazakhstan / G. E. Campbell, R. T. Walker, K. Abdrakhmatov, J. Jackson [et al] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015. – 120(8). – P. 5507–5534. doi: 10.1002/2015JB011925.
13. Campbell, G. E. The Dzhungarian fault: Late Quaternary tectonics and slip rate of a major right-lateral strike-slip fault in the northern Tien Shan region / G. E. Campbell, R. T. Walker, K. Abdrakhmatov, J. L. Schwenninger [et al] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013. – 118(10). – P. 5681–5698. – doi: 10.1002/jgrb.50367.
14. Абдрахматов, К.Е. Оценка сейсмической опасности Лепсинского разлома / К.Е. Абдрахматов, М.С. Ельдеева, С.О. Джанабилова // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН – в 2-х томах.* – М.: ИФЗ, 2016. – Т. 1.– С. 332–336.
15. Tibaldi, A. Morphotectonic indicators of Holocene faulting in Central Tien Shan, Kazakhstan, and geodynamic implications / A. Tibaldi, E. Graziotto, F. Forcella, V. H. Gapich // *Journal of Geodynamics*, January 1997. – 23(1). – P. 23–45. – doi: 10.1016/S0264-3707(96)00021-X.
16. Crosby, C. The hunt for surface rupture from the 1889 Ms 8.3 Chilik earthquake, Northern Tien-Shan, Kyrgyzstan and Kazakhstan. / C. Crosby, J. Arrowsmith, A. Korzhnikov, B. Guralnik [et al] // In: AGU Fall Meeting Abstracts, F5, poster presentation, 2007. – San Francisco, California, USA.
17. Сильные землетрясения / Джанузаков К.Д., М. Омуралиев, А. Омуралиева, Б.И. Ильясов, В.В. Гребенникова – Бишкек: Илим, 2003.
18. Krüger, F. Instrumental magnitude constraints for the 11 July 1889, Chilik earthquake / F. Krüger, G. Kulikova, A. Landgraf // *Geological Society*. – London, Special Publications, 2015. – 432, SP432-8. – doi:10.1144/SP432.8.
19. Kulikova, G. Source process of the 1911 M 8.0 Chon-Kemin earthquake: investigation results by analogue seismic records / G. Kulikova, F. Krüger // *Geophysical Journal International*, 2015. – 201(3). P. 1891–1911. – doi: 10.1093/gji/ggv091.
20. Torizin, J. Rating of seismicity and reconstruction of the fault geometries in northern Tien Shan within the project “Seismic Hazard Assessment for Almaty” / J. Torizin, G. Jentsch, P. Malischewsky, J. Kley [et al] // *Journal of Geodynamics*, December 2009. – 48(3). – P. 269–278. – doi: 10.1016/j.jog.2009.09.030.

ШЫҒЫС ТЯНЬ-ШАНЬ МЕН ЖОҒАРТАУДЫҢ СЕЙСМОТЕКТОНИКАСЫ

¹⁾ Абдрахматов К.Е., ²⁾ Мукамбаев А., ³⁾ C. Grützner, ⁴⁾ G. Campbell, ⁵⁾ R.T. Walker, ⁵⁾ D. Mackenzie,
⁶⁾ J. Jackson, ⁷⁾ Аширов Б.М., ⁷⁾ Айтмырзаев Ж.С., ⁷⁾ Джанабилова С.О., ⁷⁾ Елдеева М.С.

¹⁾ *ҰҒА Сейсмология институты, Бишкек, Қырғызстан,*

²⁾ *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

³⁾ *Friedrich Schiller University Jena, Institute of Geological Sciences, Jena, Germany*

⁴⁾ *ARUP, London, UK*

⁵⁾ *Department of Earth Sciences, University of Oxford, UK,*

⁶⁾ *COMET, Bullard Labs, Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Cambridge, UK*

⁷⁾ *Сейсмология институты, Алматы, Қазақстан*

Солтүстік Тянь-Шаньнің шығыс жағы мен Жоғартауда, кеш плейстоценде – голоценде жылжытылған қанаттарымен белсенді жарылымдардың созылымы, негізінде субендік ең жаңа құрылымдардың бағыттарынан өзгеше. Бұл жарылымдар солтүстік-батыс созылымдағы онжақты ығыспалы дизъюнктивтер болып келеді. Дәл осы жарылымдар зерттелген аумақта қазіргі кездегі сейсмикалық жағдайына жауапты болып келеді.

SEISMO-TECTONICS OF EASTERN TIEN-SHAN AND DZHUNGARIYA

¹⁾ K.E. Abdrakhmatov, ²⁾ A. Mukambayev, ³⁾ C. Grützner, ⁴⁾ G. Campbell, ⁵⁾ R.T. Walker, ⁵⁾ D. Mackenzie,
⁶⁾ J. Jackson, ⁷⁾ B.M. Ashirov, ⁷⁾ Zh.S. Aytmyrzayev, ⁷⁾ S.O. Szhanabilova, ⁷⁾ M.S. Yeldeyeva

¹⁾ *Institute of Seismology NAS, Bishkek, Kyrgyzstan,*

²⁾ *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

³⁾ *Friedrich Schiller University Jena, Institute of Geological Sciences, Jena, Germany*

⁴⁾ *ARUP, London, UK*

⁵⁾ *Department of Earth Sciences, University of Oxford, UK,*

⁶⁾ *COMET, Bullard Labs, Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Cambridge, UK*

⁷⁾ *Institute of Seismology, Almaty, Kazakhstan*

It was demonstrated that within the eastern part of Northern Tien-Shan and Dzhungarya active faults with wings shifted in the late Pleistocene – Holocene have the striking different from the direction of the newest structures, mainly sub-lateral ones. These faults represent right-shift disjunctive structures of north-western strike. They are the responsible ones for modern seismic situation at the investigated territory.