

**ГЕОЛОГИЯ  
GEOLOGY**

УДК 551.24

**Юрий Леонидович Ребецкий<sup>1</sup>,***з.н.с. ИФЗ РАН, д.ф.м.н.***Yuriy Leonidovich Rebetsky<sup>1</sup>,***Chief Researcher of IFZ RAS, d.ph.m.s.***Антон Витальевич Маринин<sup>1</sup>,****Anton Vitalievich Marinin<sup>1</sup>,***Senior Researcher of IFZ RAS, c.g.m.s.**с.н.с. ИФЗ РАН, к.г.м.н***Сергей Иванович Кузиков<sup>2</sup>,***в.н.с. ИС РАН, к.г.м.н***Sergey Ivanovich Kuzikov<sup>2</sup>,***Leading Researcher of RS RAS, c.ph.m.s.***Найля Абдуллоевна Сычева<sup>2</sup>,***с.н.с. ИС РАН, к.ф.м.н, доцент***Naylya Abdullovna Sycheva<sup>2</sup>,***Senior Researcher of RS RAS, c.ph.m.s., docent.***Владимир Николаевич Сычев<sup>2</sup>,***в.н.с. ИС РАН, к.ф.м.н, доцент***Vladimir Nikolaevich Sychev<sup>2</sup>,***Leading Researcher of RS RAS, c.ph.m.s., docent.*<sup>1</sup> Институт физики Земли РАН, Москва, Россия<sup>2</sup> Научная станция РАН в г. Бишкеке, Кыргызстан<sup>1</sup> – Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia<sup>2</sup> – Research Station RAS in Bishkek, Kyrgyzstan**ОБ АКТИВНОСТИ РАЗЛОМА «ВЕРХОВОЙ» НА СЕВЕРНОМ СКЛОНЕ  
КЫРГЫЗСКОГО ХРЕБТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ  
ИНВЕРСИИ НАПРЯЖЕНИЙ**

**Аннотация.** На Кыргызском хребте выделен безымянный субширотный разлом, который в рамках тектонофизическим методов районирования напряжений определен как опасный. Вблизи пересечения разломом долин рек Аламедин и Аксу идет обильное образование каменных осыпей и вывалов, что может свидетельствовать о медленных движениях его бортов, продолжающихся уже не менее 10–15 лет. Разлом является потенциально опасным для возникновения землетрясения с магнитудой от 6.5 до 7.5.

**Ключевые слова:** напряжения, активный разлом, землетрясения, медленное скольжение.

**ABOUT ACTIVITY OF THE FAULT «VERKHOVOY» ON NORTHERN  
SLOPE OF KYRGYZ RANGE BY RESULTS OF TECTONOPHYSICAL  
STRESS INVERSION**

**Abstract.** A sub-latitudinal fault has been identified on the Kyrgyz range, which, within the framework of tectonophysical methods of stress zoning, is defined as dangerous. Near the crossing

of the valleys of the Alamedin and Aksu rivers by the fault, there is an abundant formation of scree and rock falls, which may indicate the slow movements of its sides, which have been going on for at least 10–15 years. The fault is potentially dangerous for an earthquake with a magnitude of 6.5 to 7.5.

**Key words:** stresses, active fault, earthquakes, slow sliding

### ТЕХТОНОФИЗИКАЛЫК ЧЫҢАЛУУЛАРДЫН ӨЗГӨРҮШҮНҮН НАТЫЙЖАСЫНДА БОЛГОН КЫРГЫЗ ТОО КЫРКАСЫНЫН ТҮНДҮК ЖАНТАЙЫНДАГЫ «ВЕРХОВАЯ» ЖАРАКАСЫНЫН АКТИВДҮҮЛҮГҮ ЖӨНҮНДӨ

**Аннотация.** Кыргыз тоо кыркасында аты аталбаган субкеңдиктик жаракасы аныкталды, ал стресстик зоналоонун тектонофизикалык ыкмаларынын алкагында коркунучтуу деп табылды. Аламүдүн жана Аксу дарыяларынын өрөөндөрүнүн жаракаларынын кесилишинде, таш куюлуусу жана ташкындардын пайда болушу байкалууда, бул анын капталдарынын жай кыймылын, жок эле дегенде, 10-15 жылдан бери уланып келе жаткандыгын көрсөтөт. Жарака 6,5 тен 7,5 баллга чейин жеткен жер титирөөлөрдүн пайда болушуна коркунучтуу.

**Негизги сөздөр:** чыңалуулар, активдүү жарака, жер титирөөлөр, жай жылышуусу

**Коровые напряжения и активные разломы Северного Тянь-Шаня.** В кооперации сотрудников Института физики Земли (ИФЗ) РАН и Научной станции РАН (НС РАН) в г. Бишкеке для коры Северного Тянь-Шаня по сейсмологическим данным выполнялась инверсия напряженного состояния для нескольких глубинных уровней [1–2]. Базисом этой работы являлись: А) каталог механизмов очагов землетрясений, в магнитудном диапазоне от 1.5 до 3.5, полученный сейсмической сетью КНЕТ; Б) тектонофизический метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) Ребецкого [3].

Анализ плотности распределения и диапазона магнитуд очагов землетрясений (1056 событий) из каталога фокальных механизмов показал, что линейный масштаб осреднения реконструируемых напряжений может соответствовать 10–15 км. Поэтому реконструкция напряжений осуществлялась в узлах сетки  $0.05 \times 0.05^\circ$  в латеральном направлении для горизонтальных полос вертикальной мощностью 10 км, середины которых находились на глубинах 5, 10, 15 и 20 км.

На картах рис. 1 для разных глубинных уровней представлено районирование зем-

ной коры Северного Тянь-Шаня, выполненное на основе данных о геодинамических типах напряженного состояния, которое было получено по результатам инверсии напряжений. Здесь выделяются установленные нами ранее закономерности [4,5,2]: 1) областям горных поднятий отвечают геодинамические режимы горизонтального сжатия или сжатия со сдвигом; 2) областям внутригорных впадин, вовлеченных в поднятия, отвечают режимы горизонтального сдвига; 3) передовому прогибу отвечает режим горизонтального сдвига или растяжения.

На картах напряжений (рис. 1, а, б) в диапазоне глубин 0–15 км выделяется две области в пределах Кыргызского хребта с режимом горизонтального растяжения, которые не подчиняются представленным выше закономерностям. Для того, чтобы объяснить причину возникновения таких областей необходимо было сопоставить полученные данные с расположением разломов, выделяемых как активные в кайнозойский период.

С 2012 года НС РАН совместно с лабораторией тектонофизики ИФЗ РАН выполняли исследования по изучению активных разломов севера Центрального Тянь-Шаня

[6]. С этой целью была составлена цифровая карта разломов с дискретностью определения координат разломов около 1 км (рис. 2). Созданная карта является наиболее детальной информативной картой разломов исследуемой территории, т.к. помимо представления данных о расположении разломов на ней имелись указания о направлениях погружения плоскостей отдельных их участков, а также данные об угле погружения.

Выполненное сопоставление данных о напряжениях с разломной тектоникой показывает, что отмеченные аномалии в распределении напряжений отвечают области между реками Сокулук и Аламедин вдоль северного склона в приосевой части Кыргызского хребта (рис. 2).

Обращает на себя внимание тот факт, что эти зоны связаны с разломом, простирающимся вдоль северного склона Кыргызского хребта в наиболее высокой его части. Разлом не имеет собственного имени и на картах активных разломов [7, 8] показан как надвиг без указания возможности сдвига вдоль простираения. Поскольку расположение безымянного разлома в верхней части Кыргызского склона предопределяет его труднодоступность, то указанный для него в кинематический тип следует воспринимать как достаточно условный, связанный с общей концепцией развития региона. С другой стороны, согласно накрест лежащим областям локального растяжения [9], выделенным вблизи концевых участков разлома, ему можно приписать наличие правосдвиговой компоненты.

Наши исследования кулоновых напряжений [10, 11], выполненные в работе [6], показали, что на глубине 10 км угол погружения безымянного разлома составляет около 70–75°. В этом случае практически весь разлом оказывается в области на диаграмме Мора внутри полосы хрупкого разрушения, а большая его часть в виде восточного сегмента имеет значения нормированных кулоновых напряжений, близкие к единице.

Таким образом, исследуемый разлом следует рассматривать как активный и, более того, восточный его сегмент как

*опасный участок, на котором возможны как асейсмические процессы криповых движений, так и сейсмические события.* Отметим, что протяженность восточного сегмента разлома составляет около 20 км, а весь разлом – около 50 км. В случае возникновения здесь землетрясения восточный сегмент способен генерировать магнитуду около 6.5, а весь разлом – около 7.5.

**Разлом Верховой – полевые исследования.** Поскольку исследуемый разлом проходит в непосредственной близости к водоразделу Кыргызского хребта, то предлагается далее его именовать как «Верховой».

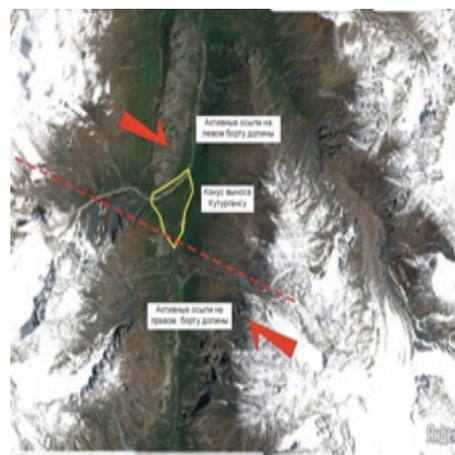
В этой области Северного Тянь-Шаня произошло два сильных события. Первое – Беловодское землетрясение ( $M = 6.9$ ), которое сейсмотектоники [12] уверенно относят к междуречью Сокулук и Аксу. Второе – палеоземлетрясение, произошедшее около 3250 л.н., – было более мощным (магнитуда не менее 7.1), и его относят к междуречью Аламедин и Сукулук [13]. Авторы последней работы относят очаг к предгорьям Кыргызского хребта, где Иссыккатынский разлом теряет свою непрерывность, формируют разрывную структуру типа кулис. Таким образом, в настоящее время нет данных о сильных землетрясениях прошлого в районе разлома Верховой.

Для понимания сейсмотектонической обстановки разлома Верховой в 2011–2018 гг. были проведены полевые тектонофизические исследования от восточного окончания данного разлома в долине р. Аламедин до западной его части в долине р. Сокулук. В междуречье Аламедин – Ала-Арча положение разлома трассируется эрозионными врезами их притоков Кутургансу (Джендысу) и Шаркыратма. Далее на запад разлом Верховой обозначается разветвленной сетью притоков верховья р. Джеламыш, через слияние р. Сокулук с западным притоком Ашутор и до верхних течений притока Туюк.

В районе пересечения разлома с долиной р. Аламедин пространственное положение левого притока Кутургансу (Джендысу) можно связывать с ослабленным участком

разлома Верховой. Аллювиально-пролювиальный конус выноса реки Кутургансу является самым мощным на всем протяжении Аламединской долины (фото 1). При этом, выше по течению «живые» активные

склоны с осыпями расположены на правом (восточном) борту долины, а ниже – на левом (западном) борту долины. Это, возможно, отвечает активному правосдвиговому смещению по разлому.



**Фото 1**

Конус выноса р. Кутургансу (левый приток Аламедина): фотоснимок с правого берега Аламедин (а), космоснимок (б)

В долине реки Аламедин вблизи пересечения с разломом Верховой отмечается большое число обвално-оползневых явлений, «стреляние» скальных стен и активная деятельность ледников, в верхней части примыкающих к долине с запада и востока отрогов. Непосредственно в самой зоне раз-

лома коллювиальные осыпи перекрывают современный аллювий реки Аламедин. Вынос каменного материала (фото 2, а) и скатывание со склона гор в русло реки глыбы размером до 5–7 метров (фото 2, б) произошли в последние несколько лет.



**Фото 2**

Природные проявления в зоне разлома Безымянный: а) свежие обломки 2011 года коллювиально-пролювиального выноса восточного борта и флювиогляциальный конус выноса верхне-современного четвертичного возраста, который образован обломочными породами западного борта ущелья и эродирован современным руслом р. Аламедин; б) глыба (5–7 м), скатившаяся в русло р. Аламедин с восточного (правого) борта в 2018 г. Виден след из снесенных глыбой деревьев и кустарников

В первых сотнях метров южнее исследуемого разлома, с западного (левого) борта р. Аламедин «спускается» флювиогляциальный верхне-современный четвертичный конус выноса, который ранее полностью перегораживал долину р. Аламедин (фото 2, а). При этом был сформирован подпрудный водоем глубиной до 7–8 метров. Современное русло реки прорезает эту естественную дамбу, имея на данном участке большой градиент рельефа с выраженными порогами.

В обнажениях коренных пород вблизи от разлома Верховой фиксируются много зеркал скольжения со сдвиговой кинематикой смещений. При этом простирание право- и левосдвиговых систем дизъюнктивных нарушений не выдержано и меняется от одной точки наблюдения к другой. Здесь наблюдаются правосдвиговые системы СВ простирания, а также ЗСЗ простирания с пологим (до 45°) падением плоскостей в южных румбах и присутствием взбросо-надвиговой компоненты смещения. Левосдвиговые системы имеют меридиональное, широтное и СВ простирание.

Общая активность каменных осыпей, присутствие вывалов крупных камней (несколько тонн) пород говорит о высокой скорости эрозии в восточной части разлома Верховой (пересечение долины Аламедин). В таких областях должно происходить увеличение уровня напряжений горизонтального сжатия за счет выхода к поверхности пород, испытавших высокое всестороннее обжатие на более больших глубинах. Проявление этих повышенных горизонтальных напряжений можно связывать с наблюдающимися в южной части долины Аламедин такими явлениями, как «стреляние» стен горных склонов. Подобные явления известны в горном деле и наблюдаются в шахтах тех регионов, где имеет место режим горизонтального сжатия.

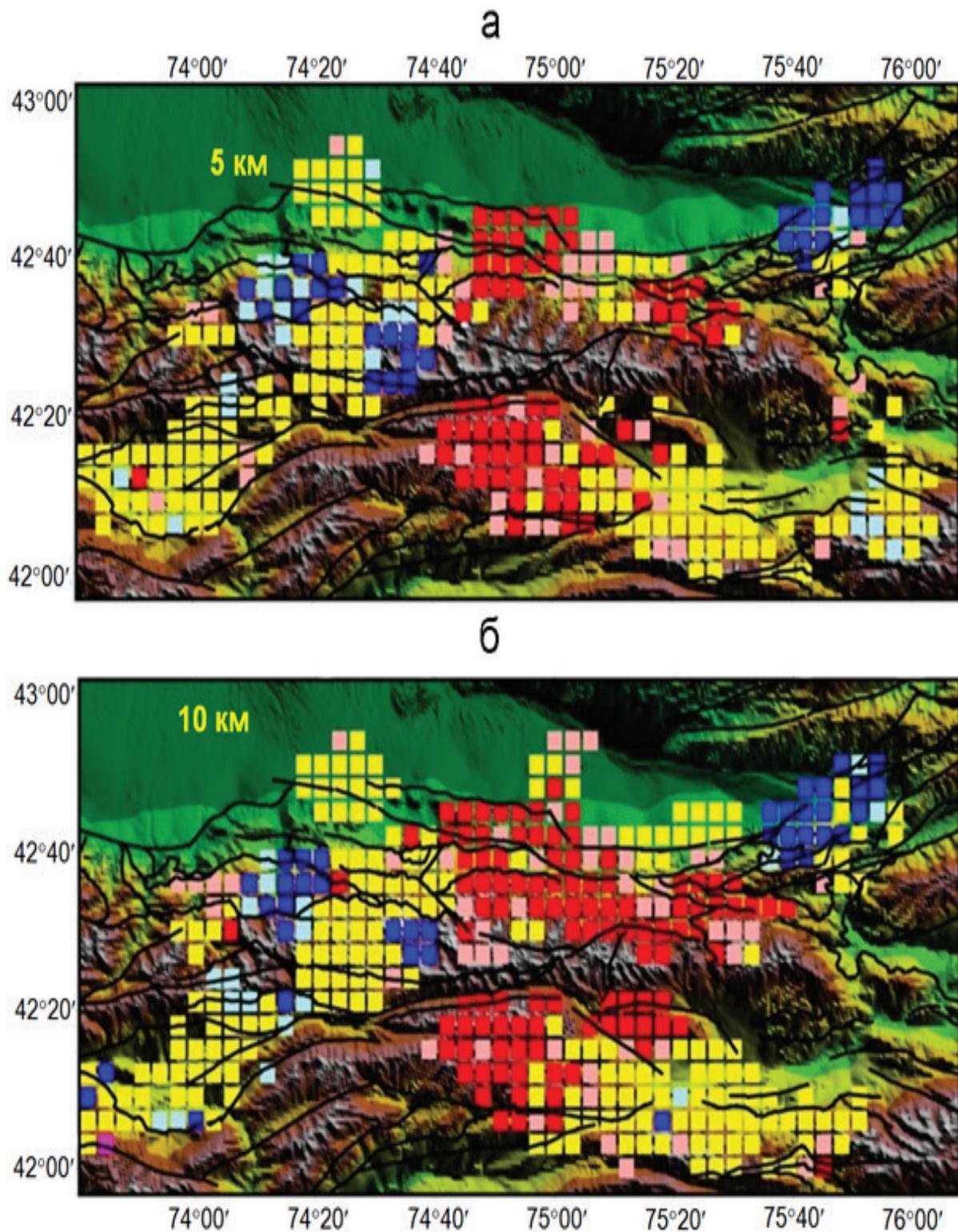
Обследование долины реки Ала-Арча в районе ее пересечения с разломом Безымянный также выявило аномальное состояние горных склонов. По свидетельству местных жителей здесь за последние 3–5 лет суще-

ственно увеличилась мощность обвальных пород. В районе пересечения с разломом река Аларча резко меняет направление своего течения, здесь в нее впадает река Аксай. Можно предположить, что Аксай вместе с ее восточным притоком Шаркыратма обозначают место положения разлома Верховой. На западном участке данного разлома в долинах рек Сокулук и Аксу к его зоне приурочены склоны с мощными обвально-осыпными отложениями, участки с большими уклонами русла реки (градиентами рельефа) и серия водопадов.

Тектонофизические исследования палеонапряжений по данным о зеркалах скольжения показали, что для X пересечений разломов в секторах горизонтального растяжения, прогноз которых делался из данных о современных напряжениях, имеется значительное количество локальных палеостресс-тензоров с обстановкой горизонтального растяжения. Подтверждение этих результатов находим в наличии в этих секторах большого числа родников.

*Результаты проведенных полевых наблюдений позволяют сделать предположение о медленных движениях вдоль разлома Верховой, которые и ответственны за наблюдаемые высокие скорости экзогенных процессов.*

**Прогноз состояния разлома Верховой.** Проведенные в последние десять лет геомеханические исследования неустойчивого скольжения на разломах на основе численного моделирования показали, что сильные землетрясения предваряются медленным, постепенно нарастающим по скорости движением на разломе. Это явление связывают с нелинейным падением трения на разломе по закону, близкому к Rate&State [14]. Таким образом, было показано, что в зонах субдукции невозможно осуществить хрупкое разрушение крупной зоны асперити (шероховатости с высоким уровнем напряжений), где из-за высокой силы трения скольжение по разлому затруднено. Переход такой зоны в состояние медленного, но все увеличивающегося по скорости скольжения приводит к снижению сил трения. Следствием это-



*Рис. 1.* Геодинамические типы напряженного состояния коры севера Центрального Тянь-Шаня для двух глубинных уровней: а – 0–10 км; б – 5–15 км. Красный цвет – горизонтальное сжатие, желтый – горизонтальный сдвиг, синий – горизонтальное растяжение. Положение разломов (черные линии) по карте рис. 2

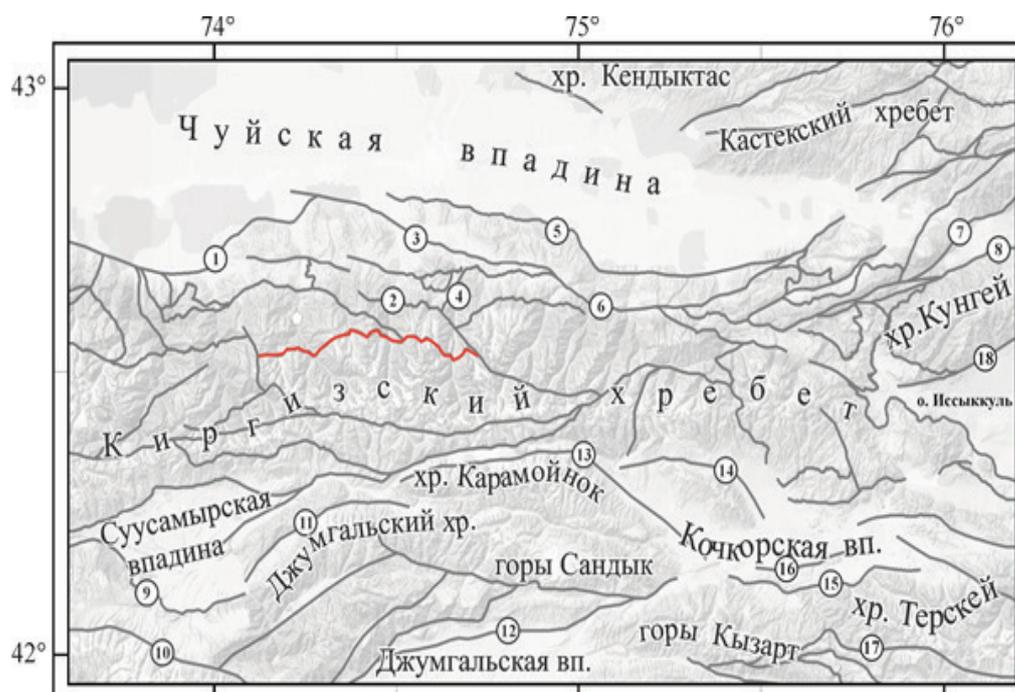


Рис. 2. Карта активных разломов севера Центрального Тянь-Шаня. Разломы: 1 – Аксуйский, 2 – Чонкурчакский, 3 – Байтикский разлом, 4 – Аламединский, 5 – Иссыккатынский, 6 – Шамсинский, 7 – Каракунuzский, 8 – Заилийский, 9 – Северо-Кеминский, 10 – Южно-Кеминский, 11 – Тогуз-Булакский (Северо-Иссыккульский), 12 – Араминский, 13 – Кызылойский, 14 – Каракульский, 15 – Улунбулакский (Узунбулак-Ойкаинская зона), 16 – Каракольский, 17 – Ортокский, 18 – Акчопский, 19 – Южно-Кочкорский, 20 – Каракурджурский. Пятиугольник – эпицентральная область Беловодских землетрясений 1885 г. Красной линией выделен разлом Верховой

го является возникновение предпосылок к формированию крупного стандартного землетрясения.

Длительность фазы перехода от состояния асперити к состоянию медленного, но ускоряющегося скольжения пока непонятна. В геомеханическом численном эксперименте [15, 16] геологические факторы влияния на трение не учитывались. Там этот переход занимал 1–2 года, но существуют и другие примеры с длительностью в первые десятилетия.

Полученные в численном геомеханическом эксперименте результаты можно распространить и на землетрясения, происходящие не только в зонах перехода от континентов к океану [17]. В этой связи состояние медленного движения по разлому Верховой может являться предтечей сильного землетрясения с магнитудой от 6.5 до 7.5.

**Выводы.** По результатам тектонофизической инверсии напряжений вблизи водораздела северного склона Кыргызского хребта выделен субширотный безымянный разлом. Этот разлом возмущает поле современных тектонических напряжений, показывая существование для него праводвиговой компоненты смещения.

На основе тектонофизических расчетов было установлено, что для безымянного разлома уровень кулоновых напряжений приближается к критическим значениям.

Установлены яркие проявления разлома в экзогенных процессах, выражающиеся в наличии вывалов и осыпей. Особо сильные проявления этих процессов установлены в пересечении исследуемого разлома долины реки Аламедин. Также отмечены подобные проявления в долине Ала-Арча.

Весь комплекс данных показывает активность изучаемого разлома и его опасность в соответствии с современными представлениями геомеханики на завершающую стадию подготовки землетрясения.

Предложено в дальнейшем именовать этот разлом как «Верховой». Существующие данные показывают возможность реализации на разломе Верховой землетрясения с магнитудой 6.5 и более.

Представленный в этой статье, а также в работе (6) новый подход по дистанционному, тектонофизическому районированию активности и опасности разломов следует рассматривать как важное дополнение широко известных геологических методов [8, 12, 18, 19].

Работа поддержана проектами РФФИ № 12-05-00234а, 12-05-00550-а, 19-55-53025 GFEN\_a и темами Госзадания ИФЗ РАН и ИС РАН в г. Бишкеке.

## Литература

1. *Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В.* Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 3. С. 496–520.
2. *Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E.* Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // Tectonophysics. 2012. V. 581. P. 114–131.
3. *Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин // Автореф. дис. док. физ.мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ. 2003. 56 с.
4. *Ребецкий Ю.Л.* Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, Вып. 4. С. 437–466.
5. *Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 2. С. 271–291.
6. *Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И.* Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 6. С. 1225–1250.
7. *Абдрахматов К.Е., Томпсон С., Вэлдон Р.* и др. Активные разломы Тянь-Шаня // Наука, новые технологии. Бишкек, 2001. №2. С. 22–28.
8. *Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д., Мелешко А.В., Жантаев М.М., Зубович А.В.* Атлас землетрясений Кыргызстана. 2009. Бишкек: Изд. Бишкек-ЦАИИЗ. 73 с.
9. *Осокина Д.Н.* Взаимосвязь смещений по разрывам с тектоническими полями напряжений и некоторые вопросы разрушения горного массива // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 120–135
10. *Ferrill D.A.* Critical re-evaluation of differential stress estimates from calcite twins in coarse-grained limestone. Tectonophysics 1998. V. 285, No 1-2. P. 77–86.
11. *Morris A.P., Ferrill D.A., Henderson D.B.* Slip tendency analysis and fault reactivation // Geology, 1996. V. 24. P. 275–278.
12. *Абдрахматов К.Е., Джанузаков К.Д., Фролова А.Ф., Погребной В.Н.* Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики. Объяснительная записка. Бишкек: Илим, 2012. 51 с.
13. *Смекалин О.П., Имаев В.С., Корженков А.М., Чипизубов А.В.* Палеосейсмологические исследования в плейстосейстовой области Беловодского землетрясения 1885 г. в Северном Тянь-Шане // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т.42, № 3. С. 20–32.
14. *Dieterich J.H.* Earthquake nucleation on faults with rate-and state-dependent strength // Tectonophysics 1992. V. 211, No 1-4. P. 115–134.

15. *Abercrombie R.E., Rice J.R.* Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 162, P. 406–424.
16. *Rice J.R., Uenishi K.* Slip development and instability on a heterogeneously loaded fault with power-law slip-weakening // *EOS, Trans. Am. geophys. Un., Fall Meeting Suppl.* 2002. V. 83, No 47, abstract S61E-06.
17. *Rebetsky Y.L., Guo YS.* From Natural Stresses in Seismic Zones to Predictions of Megaequake Nucleation Zones // *PAAG.* 2020. V. 177. P. 421.
18. *Миколайчук А.В., Собел Э., Лобанченко А.Н.* Структурная эволюция северной окраины Тяньшаньского орогена // *Известия НАН КР.* 2003. № 4. С. 50-58
19. *Нурманбетов К.* Геологические признаки «сейсмоопасности» отрезков региональных глубинных разломов Северного Тянь-Шаня // *Вестник Института сейсмологии НАН КР.* 2014. №1 (3). С. 99–104.