УДК 550.31

МОДЕЛЬ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ АЙКОЛ, КИТАЙ, 22 ЯНВАРЯ 2024, ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2024 г. Е. П. Тимошкина^а, А. М. Конвисар^{а, b, *}, В. О. Михайлов^{а, b}, А. В. Пономарев^а, В. Б. Смирнов^{b, а}

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия ^bФизический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия * e-mail: alexkonvisar@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.2024 г. После доработки 21.08.2024 г. Принята к публикации 21.08.2024 г.

В работе по данным спутниковой радарной интерферометрии выполнено моделирование очага землетрясения Айкол, произошедшего на границе КНР и Кыргызстана 22 января 2024 г. с магнитудой $M_W = 7.0$, а также очага его наиболее сильного афтершока 29 января 2024 г. с магнитудой $M_W = 5.7$. По снимкам спутника Сентинель-1А рассчитаны поля смещений земной поверхности в направлении на спутник для этих событий и решена обратная задача нахождения полей смещений на поверхностях разрывов в их очагах. Полученные модели очагов показывают наличие систем разрывов, падающих навстречу друг другу. Поверхность главного события, по которой произошел надвиг с левосторонним сдвигом, имеет падение на северо-запад. В ее фронтальной части, в процессе развития афтершокового процесса, сформировался тыловой надвиг, падающий на юго-восток, который сдвинул на запад часть фронтального надвига, сформированного во время главного события. Такая динамика является следствием сложного строения разломных зон исследуемого региона. Тыловые надвиги тут были закартированы в ходе выполненных ранее полевых исследований.

Ключевые слова: землетрясение, Айкол, Китай, 22.01.2024, спутниковая радарная интерферометрия, поля смещений, обратная задача, модель поверхности разрыва

DOI: 10.31857/S0203030624060027, EDN: HZEVOE

введение

Землетрясение Айкол магнитудой $M_W = 7.0$ произошло 22 января 2024 г. на небольшой глубине южнее границы Кыргызстана и КНР в юго-западной части Тянь-Шаньской горной системы. По данным Геологической службы США¹ (USGS) механизм очага — это надвиг со значительной сдвиговой составляющей. Координаты гипоцентра 41.263° с. ш., 78.659° в. д., глубина 13.0 км. По данным GCMT каталога² координаты центроида определены как 41.19° с. ш., 78.56° в. д., глубина 16.1 км. Землетрясение получило свое название по названию населенного пункта (Aykol), расположенного в 128 км к юго-востоку от эпицентра.

Тянь-Шань — это один из самых молодых внутриконтинентальных орогенных поясов мира, протянувшийся более чем на 2 тыс. км с востока на запад. Эта область является уникальной, поскольку деформации, связанные с коллизией Индийской и Евроазиатской плит, распространяются севернее первоначального контакта плит в южном Тибете на расстояния до 2 тыс. км в северном направлении, формируя горные системы Гималаев, Куньлуня,

¹ https://earthquake.usgs.gov/

² https://www.globalcmt.org/

Каракорума, Гиндукуша, Памира, Тянь-Шаня, Алтая, а также Тибетское нагорье и поднятые на различные высоты Афгано-Таджикскую, Таримскую и Джунгарскую межгорные впадины [Макаров и др., 2010]. В кайнозое Тянь-Шань испытал значительное сжатие на 100–200 км в направлении север-юг и утолщение земной коры на 10–20 км [Avouac et al., 1993].

В свою очередь юго-западный Тянь-Шань, который образован в результате сближения Таримского бассейна и так называемой Казахской платформы [Jourdon et al., 2017; Yu et al., 2017], является одной из наиболее тектонически активных областей в пределах Евразийского континента. Современные данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) показывают, что скорость сжатия земной коры с севера на юг тут достигает 18-20 мм/год (например, [Yang et al., 2008; Zubovich et al., 2010]). Это составляет почти половину скорости современного сближения Индии и Евразии, равной примерно 45 мм/год [DeMets et al., 1994]. На разломных зонах этого региона наблюдаются как надвиговые, так и значительные сдвиговые

смещения. Это, например, разломы Кемин-Чилик, Талассо-Ферганский, линия Николаева, Майдантаг и др. [Буртман и др. 1997; Wu et al., 2019; Yao et al., 2022; Delvaux et al., 2001] (рис. 1).

Тянь-Шань характеризуется высокой сейсмической активностью. По данным USGS, с начала двадцатого века на Тянь-Шане произошло 13 землетрясений с магнитудой больше M = 7.0, сильнейшими из которых были землетрясения: Ацуши (или Кашгарское) $M_{\rm S} = 8.25$ $(M_{\rm W} = 7.7)$ 22.08.1902 [Kulikova, Krüger, 2017; Chen et al., 2022], Манас $M_{\rm W} = 7.7$ 22.12.1906 [Wang et al., 2004] и Кеминское $M_{\rm W} = 7.9 - 8.0$ 04.01.1911 [Kulikova, Krüger, 2015; Arrowsmith et al., 2017]. Кеминское землетрясение было примерно в 250 км к северо-западу от события Айкол. Оно унесло жизни более 450 человек и нанесло огромный ущерб региону. Землетрясение 2024 г. стало в регионе первым событием с магнитудой больше M = 7.0 после Суусамырского землетрясения 1992 г. с магнитудой 7.5 [Ghose et al., 1997; Гребенникова, Фролова, 2019]. В связи с этим, землетрясение Айкол представляет особый интерес.



Рис. 1. Основные тектонические структуры в области землетрясения Айкол.

Красной линией показана разломная зона Майдантаг (МДР); черные линии — основные разломы Тянь-Шаня [Wu et al., 2019], из которых индексами обозначены: Ж-НР – Жалаир-Найманский разлом, КПР – предгорный разлом Калпинтаг (Кепинг), ДГР – Главный Джунгарский разлом, ЛН – Линия Николаева (Nalati), ТФР – Таласо-Ферганский разлом, К-ЧР – Кемин-Чилик; фиолетовая ломанная линия – трасса сейсмического профиля MANAS [Макаров и др., 2010]; красные круги – эпицентры исторических землетрясений из каталога USGS, для наиболее сильных из них указан год и магнитуда.

В работе по данным спутниковой радарной интерферометрии оценены поля смещений земной поверхности в результате землетрясения Айкол и его главного афтершока, построены модели очагов этих событий. Данные о смещениях сопоставлены с картами разломной тектоники, оценками скоростей современных движений, полученных другими методами.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тектоническая позиция землетрясения

Сейсмический профиль MANAS (см. рис. 1, фиолетовая линия), проходящий несколько западнее землетрясения Айкол, выявил поддвиг Таримского бассейна под Тянь-Шань на расстояние более 50 км [Макаров и др., 2010]. На этом профиле зона поддвига по разломам Калпинтаг и Майдантаг отчетливо прослеживается до подошвы земной коры под всей системой поднятий Кокшаалтау. Эта зона поддвига часто трактуется как главный элемент Южно-Тянь-Шаньской системы дислокаций [Макаров и др., 2010]. В то же время детальные исследования показали, что значительное сокрашение и слвиговые деформации происходят и внутри Тянь-Шаньской горной системы [Li et al., 2021]. Землетрясение Айкол произошло в районе северо-восточной ветви разломной зоны Майдантаг (см. рис. 1, красные линии).

Авторы работы [Wu et al., 2019] считают, что разлом Майдантаг, который простирается более чем на 400 км с северо-востока на юго-запад, является границей между юго-западным Тянь-Шанем и Таримским бассейном. По их данным позднечетвертичные смещения происходили одновременно на пологом предгорном надвиге Калпинтаг и на круто падающем разломе Майдантаг, на котором происходили и надвиги, и левосторонние сдвиги. В цитируемой работе выполнены оценки смещений вдоль разлома в позднечетвертичный период на основе интерпретации оптических снимков высокого разрешения и детальных полевых исследований. Северо-восточнее г. Аксу (см. рис. 1), в долине Ахеки (Aheqi), севернее которой произошло землетрясение Айкол, активный участок разлома Майдантаг длиной около 150 км можно разделить на северо-восточный и юго-западный сегменты, имеющие различное

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 6 2024

простирание и геометрию. На основе анализа геоморфологических особенностей смещений и датировок четвертичных отложений скорость позднечетвертичного сокращения поперек этой части разлома оценена в 1.2±0.25 мм/год, скорость левостороннего сдвига в 1.6±0.6 мм/год, скорость суммарного смещения в 2.0±0.7 мм/год [Wu et al., 2019].

11

Данные сейсмологии

Землетрясение Айкол сопровождалось серией афтершоков, сконцентрированных в компактной области вокруг эпицентра. На рис. 2 показаны афтершоки за период радарной съемки с 14 по 26 января 2024 г.

Решение механизма очага, приведенное на сайте USGS, имеет следующие параметры нодальных плоскостей: для первой из них (NP1) простирание, падение, угол подвижки равны 235°, 45°, и 42°, для второй (NP2) — 113°, 62°, 126° соответственно. Скалярный сейсмический момент оценен в 3.7×10^{19} Н·м ($M_W = 7.0$). Данные Гарвардского каталога GCMT очень близки: (235°, 46°, 44°) и (112°, 60°, 127°), скалярный сейсмический момент немного больше — 4.77×10^{19} Н·м ($M_W = 7.1$).



Рис. 2. Афтершоки за период радарной съемки (с 14 по 26 января 2024 г.) в области землетрясения Айкол из каталога USGS.

Черные прямоугольники – проекция построенной в данной работе модели поверхности разрыва на дневную поверхность; красная линия проведена вдоль верхней границы модели. Звездой обозначен эпицентр основного события по USGS. Фиолетовые линии – система разломов Майдантаг, по [Wu et al., 2019], синие линии – остальные разломы, по [Zelenin et al., 2022]. Стереограмма основного события дана по USGS. На сайте USGS приведена экспресс-модель поверхности разрыва³, основанная на данных телесейсмических станций и интерферометрии (снимки спутника Sentinel-1A, обработанные с большим осреднением Европейским космическим агентством (EKA) с помощью пакета JPL/ Caltech/Stanford InSAR Scientific Computing Environment). Модель состоит из одной плоскости, разделенной на 26 элементов по простиранию и 13 по падению. Угол простирания выбран равным 233°, падения 59°. Суммарный сейсмический момент оценен в 3.8×10^{19} H·м ($M_W = 7.0$).

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ И МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА

Для определения косейсмических смещений нами были использованы два снимка спутника Сентинель-1А с восходящей орбиты, выполненные 14 и 26 января 2024 г. Обработка снимков за этот и последующий период выполнена в программном пакете SNAP, разработанном ЕКА. Для коррекции за влияние топографии использована цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 1 угловая секунда. Применено осреднение перпендикулярно орбите, чтобы получить на поверхности земли примерно одинаковые размеры элемента разрешения вдоль и поперек орбиты (9.3×13.9 м). В остальном процесс обработки был стандартным.

На рис. 3 показано поле смещений в направлении на спутник в см, полученное после развертки фазы статистическим методом "минимального потока стоимости" (MCF, [Costantini, Rosen, 1999]). Карта построена на трехмерной топографии ETOPO1, полученной с сайта National Centers for Environmental Information⁴.

Смещения в направлении на спутник находятся в пределах от —13 до 72 см (положительные в сторону спутника). По морфологии поля смещений можно заключить, что смещения произошли по разлому, падающему на северо-запад, близкому по простиранию к первой нодальной плоскости NP1 в решении USGS (простирание 235°, падение 45°, угол подвижки 42°). Действительно, в случае надвига по вертикальному разлому области поднятий и опусканий имеют



Рис. 3. Поле смещений в направлении на спутник (LOS) в см на топографической карте ETOPO1.

Красными линиями показана центральная часть разломной зоны Майдантаг (по [Wu et al., 2019]), остальные разломы — желтые линии (по [Zelenin et al., 2022]). Красная звезда — эпицентр землетрясения по USGS.

одинаковый размер и величину смещений. По мере уменьшения угла падения надвига, область поднятия над его висячим крылом расширяется, величина поднятия увеличивается, а область опускания становится меньше и по размеру, и по величине смещений. Простирание разлома всегда близко к простиранию линии, разделяющей области поднятия и опускания. В результате углы падения и простирания поверхности разрыва четко контролируются полем смещений.

Модель поверхности разрыва, состоящая из одной плоскости, построена на основе почти 2 тыс. значений поля смещений. В результате большой серии численных экспериментов, в которых поиск решения выполнялся для различных размеров поверхности разрыва, углов ее падения и простирания, были определены следующие параметры, дающие наилучшее приближение к полю смещений по данным спутниковой радарной интерферометрии: размеры плоскости по падению и простиранию 48.54 км и 45.0 км, соответственно. Глубина нижней кромки 25 км, верхняя кромка около земной поверхности. Полученная поверхность разрыва почти полностью перекрывает облако афтершоков, произошедших к 26 января 2024 г. (см. рис. 2).

Для расчета смещений на дневной поверхности в результате смещений на элементах поверхности разрыва было использовано решение [Pollitz, 1996], полученное для сферической

³ https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000lsze/ finite-fault

⁴https://ngdc.noaa.gov/

планеты, параметры которой зависят от радиуса. Программный код Static1D, реализующий это решение, доступен на сайте USGS.

Модель разделена на 24 одинаковых элемента: 4 ряда по падению, 6 — по простиранию (рис. 4). Наилучшее приближение к спутниковым смещениям получено для угла простирания 228°, падения 59°. Сравнение поля смещений модели с реальными смещениями на спутник показано на рис. 5.

Максимальное смещение в модели составило 1.7 м на элементе с координатами и глубиной центра 41.231 с. ш., 78.64 в. д., 9.4 км. Этот элемент расположен в окрестности эпицентра землетрясения. Среднее смещение по плоскости равно 0.97 м. Смещения концентрируются в средней части поверхности разрыва, ближе к верхней ее кромке. Сейсмический момент получен равным 6.809×10¹⁹ Н·м при модуле сдвига 32 ГПа, что соответствует магнитуде $M_W = 7.16$.

Верхняя кромка модели, как и граница между положительными и отрицательными смещениями располагается у подножья гор, в пределах разломной зоны Майдантаг. Левосторонняя сдвиговая компонента имеет максимальные



Рис. 4. Модель поверхности разрыва землетрясения Айкол 22.01.2024, основанная на данных спутниковой радарной интерферометрии.

Элементы поверхности разрыва показаны черными прямоугольниками на карте рельефа ETOPO1, красная линия маркирует ее верхнюю кромку. Белые стрелки показывают направление смещений висячего крыла каждого элемента модели. Красная звезда — эпицентр землетрясения по данным USGS.



13

Рис. 5. Сопоставление смещений по данным РСА интерферометрии (цветная шкала в см) и вычисленных по модели поверхности разрыва (изолинии).

значения в верхней части поверхности разрыва, а с глубиной убывает.

Минимум в поле измеренных смещений несколько сдвинут относительно смещений, вычисленных по модели. По нашему мнению, улучшить подбор не удается из-за того, что в использованной нами модели [Pollitz, 1996] решение получено для сферической поверхности Земли, без учета топографии. Максимум поля смещений располагается в горах, а минимум в предгорной долине, примерно на 1 км ниже. Вопрос об учете рельефа в аналитических моделях пока остается не решенным.

МОДЕЛЬ ГЛАВНОГО АФТЕРШОКА 29.01.2024

За период с 26 января по 3 марта 2024 г. произошло 59 афтершоков. Четыре афтершока имели магнитуду более 5. Из них один – более 5.4 и еще один сильный афтершок магнитудой $M_{\rm W} = 5.7$ произошел 29 января 2024 г. По данным USGS гипоцентр наиболее сильного афтершока имел координаты 41.199° с.ш., 78.639° в.д. и располагался на небольшой глубине в 11.5 км (близкие данные приведены в каталоге GCMT: 41.12° с. ш., 78.63° в. д., глубина 12 км). Решение механизма очага дало следующие параметры нодальных плоскостей: NP1 – простирание 221°, падение 35°, угол подвижки 66° и NP2 - 69°; 59°; 106° соответственно. Сейсмический момент 4.665×10¹⁷ Н·м ($M_w = 5.71$). Решение GCMT несколько отличается, особенно

для второй нодальной плоскости: NP1 – 221°, 49°, 65° и NP2 – 76°, 47°, 116°. Сейсмический момент почти такой же 4.89×10^{17} Н·м ($M_W = 5.7$).

По радарным снимкам спутника Сентинель-1А от 26 января – 7 февраля была построена парная интерферограмма, которая в районе эпицентра афтершока магнитудой 5.7 (рис. 6, 7, желтая звезда) показала смещения, соответствующие надвигу на поверхности разлома, имеющего простирание, близкое к нодальной плоскости NP2 в решениях USGS и GCMT. Эта поверхность наклонена на юго-юго-восток, и на ней, судя по спутниковым данным, произошли смещения в противоположном направлении. относительно главного сейсмического события – т.е. надвиг в северо-северо-западном направлении, который сопровождался правым сдвигом. Смещения в направлении на спутник находятся в пределах от -12 до 40 см.

На рис. 6 показана карта смещений в направлении на спутник в см, изолиниями показаны смещения по модели главного афтершока. Эпицентр землетрясения по сейсмологическим данным сдвинут относительно определенной нами очаговой области на несколько км на северо-восток. Это, возможно, связано с ошибками определения параметров очага для относительно небольших землетрясений, расположенных в удаленных горных районах.



Рис. 6. Карта смещений земной поверхности (цветовая шкала в см) в направлении на спутник в результате афтершока 29 января 2024 г. с магнитудой $M_{\rm W} = 5.7$.

Изолинии – смещения по подобранной модели. Желтая звезда – эпицентр главного афтершока. Стереограмма афтершока дана по USGS.



Рис. 7. Соотношение поверхностей разрыва главного события (черные прямоугольники) и сильнейшего афтершока $M_{\rm W}$ = 5.7 29 января 2024 г. (синий прямоугольник). Стрелка показывает направление смещения 1.32 м висячего крыла в модели афтершока. Красные линии маркируют верхние грани моделей. Красная и желтая звезды – эпицентры главного события и сильнейшего афтершока соответственно.

Область смещений относительно небольшая, и сами смещения невелики, поэтому поверхность разрыва была аппроксимирована одной плоскостью. Параметры модели: простирание 64°, падение 49°, глубина от 3.5 до 0.5 км, модуль вектора смещений 1.32 м, угол подвижки 113.2°. Сейсмический момент равен 6.65×10^{17} Н·м ($M_W = 5.8$). Проекции на земную поверхность моделей сейсмического разрыва землетрясения Айкол и его главного афтершока на карте рельефа показаны на рис. 7.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сетка разломов в области исследований построена в основном по полевым наблюдениям на обнажениях и путем дешифрирования спутниковых и аэроснимков. Основные разломы, показанные на рис. 1–5, по данным детальных исследований являются эшелонированными системами, в которых фиксируются и тыловые надвиги с падением, противоположным падению основной системы (см., например, [Wu et al., 2019]). Модель поверхности разрыва главного события имеет простирание близкое к простиранию северо-восточной ветви разломной зоны Майдантаг. Реальное строение разломной зоны, естественно, существенно более сложное. тия, построенная по данным радарной спутниковой интерферометрии, показывает, что механизм главного события – это надвиг с левосторонним сдвигом на поверхности, падающей на северо-запад (угол простирания 228°, падения 59°), что соответствует кинематике северо-восточной ветви разлома Майдантаг [Wu et al., 2019]. При моделировании главного афтершока получен надвиг на поверхности разрыва, падающей почти в противоположном направлении, на юго-юго-восток, который сопровождался небольшой компонентой правого сдвига (угол подвижки 113.2°). Заметим, что аналогичные разломы встречного падения были обнаружены полевыми исследованиями недалеко от очаговой зоны землетрясений Айкол, в долине рек Yushanguxi и Boguzidukesu [Wu et al., 2019, fig. 3, 5]. В целом, ситуация, когда подвижка в очаге афтершока противоположна подвижке в очаге главного событии встречается в сейсмологии и интерпретируется как реализация компенсационного движения [Вакарчук и др., 2013]. Похожее явление было обнаружено по данным спутниковой интерферометрии и в роевой сейсмичности [Татевосян и др., 2024].

Поверхность разрыва главного афтершока отделила небольшую по длине часть фронтального надвига, произошедшего во время главного события, и сдвинула ее в западном направлении, т.е. примерно в том же направлении, в котором фронтальная часть надвига была смещена и во время главного события.

Как уже отмечалось, в юго-западной части Тянь-Шаня скорость сокращения по данным ГНСС в направлении с севера на юг оценивается в 18–20 мм/год (например, [Yang et al., 2008; Zubovich et al., 2010]). Однако, скорость суммарного позднечетвертичного сокращения поперек северной части разлома Майдантаг оценена в работе [Wu et al., 2019] на порядок меньше в 2.0±0.7 мм/год. Здесь нет противоречий, поскольку сокращение в юго-западной части Тянь-Шаня происходит по эшелонированной системе разломов.

выводы

На основании выполненного моделирования полей смещений, полученных для

Модель поверхности разрыва главного собыия, построенная по данным радарной спутнии его наиболее сильного афтершока 29 января 2024 г. с магнитудой $M_W = 5.7$, можно сделать изм главного события — это надвиг с следующие выводы.

15

1. В очаговой зоне землетрясения Айкол проявляются две разломные системы различного падения.

2. Поверхность главного события, по которой произошел надвиг с левосторонним сдвигом, имеет падение на северо-запад.

3. Во фронтальной части разрыва очага главного события в процессе развития афтершокового процесса сформировался тыловой разрыв, падающий на юго-запад, который отделил и сдвинул на запад часть фронтальных пород, надвинутых во время главного события.

4. Выявленная сложная динамика вспарывания главного события и сильнейшего афтершока вероятно является следствием сложного строения разломных зон исследуемого региона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные радарные снимки спутников Сентинель-1А. Мы благодарим Ф. Поллитца (USGS), который разработал программный код Static1D и сделал его доступным для научного сообщества.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буртман В.С., Молнар П., Скобелев С.Ф. Новые данные о современных смещениях по Таласо-Ферганскому разлому // Докл. РАН. 1997. Т. 352. С. 214–217.

Вакарчук Р.Н., Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В. Рачинское землетрясение 1991 г. на Кавказе: многоактная модель очага с компенсационным типом движения // Физика Земли. 2013. № 5. С. 58–64. Гребенникова В.В., Фролова А.Г. Новые данные по Суусамырскому землетрясению, 19 августа 1992 г. (по анализу записей сильных афтершоков) // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2019. № 1(13). С. 26–43.

Макаров В.И., Алексеев Д.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Беляев И.В., Брагин В.Д., Дергунов Н.Т., Ефимова Н.Н., Леонов М.Г., Мунирова Л.М., Павленкин А.Д., Рёкер С.В., Рослов Ю.В., Рыбин А.К., Щелочков Г.Г. Поддвиг Тарима под Тянь-Шань и глубинная структура зоны их сочленения: Основные результаты сейсмических исследований по профилю MANAS (Кашгар Сонкёль) // Геотектоника. 2010. № 2. С. 23–42.

Татевосян Р.Э., Пономарев А.В., Тимошкина Е.П., Аптекман Ж.Я. Компенсационные движения в очаговой зоне высокомагнитудного роя землетрясений 2023 г. в провинции Герат, Афганистан // Физика Земли. 2024. № 4. С. 64–75.

Arrowsmith R., Crosby C.J., Korzhenkov A.M., Mamyrov E., Povolotskaya I., Guralnik B., Landgraf A. Surface rupture of the 1911 Kebin (Chon-Kemin) earthquake, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan // Geological Society Special Publication. 2017. V. 432(1). P. 233–253.

Avouac J.P., Tapponnier P., Bai M.X., You H.C., Wang G. Active faulting and folding in the northern Tian Shan and rotation of Tarim relative to Dzungarian and Kazakhstan // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 6755–6804.

Chen Q., Fu B., Shi P., Li Z. Surface Deformation Associated with the 22 August 1902 M_w 7.7 Atushi Earthquake in the Southwestern Tian Shan, Revealed from Multiple Remote Sensing Data // Remote Sens. 2022. V. 14. P. 1663.

Costantini M., Rosen P.A. A generalized phase unwrapping approach for sparse data (IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293)). Hamburg, Germany: IEEE, 1999. P. 267–269.

Delvaux D., Abdrakhmatov K.E., Lemzin I.N., Strom A.L. Landslides and surface breaks of the 1911 $M_{\rm S}$ 8.2 Kemin earthquake // Russian Geology and Geophysics. 2001. V. 42(10). P. 1583–1592.

DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. P. 2191–2194.

Ghose S., Mellors R.J., Korjenkov A.M., Hamburger M.W., Pavlis T.L., Pavlis G.L. et al. The Ms = 7.3 1992 Suusamyr, Kyrgyzstan, earthquake in the Tien Shan: 2. Aftershock focal mechanisms and surface deformation // Bull. Seismol. Soc. Am. 1997. V. 87(1). P. 23–38. Jourdon A., Pourhiet L.L., Petit C., Rolland Y. The deep structure and reactivation of the Kyrgyz Tien Shan: Modelling the past to better constrain the present // Tectonophysics. 2017. V. 746. P. 530–548.

Kulikova G., Krüger F. Source process of the 1911 *M* 8.0 Chon–Kemin earthquake: investigation results by analogue seismic records // Geophysics Journal International. 2015. V. 201. P. 1891–1911.

Kulikova G., Krüger F. Historical Seismogram Reproductions for the Source Parameters Determination of the 1902, Atushi (Kashgar) Earthquake // J. Seismol. 2017. V. 21. P. 1577–1597.

Li Y., Liu M., Hao M. et al. Active crustal deformation in the tian Shan region // Tectonophysics. 2021. V. 811.

Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophys. J. Int. 1996. V. 125. № 1. P. 1–14.

Wang C.Y., Yang Z.E., Luo H., Mooney W. Crustal structure of the northern margin of the eastern Tien Shan, China, and its tectonic implications for the 1906 $M \sim 7.7$ Manas earthquake // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V. 223. P. 187–202.

Wu C., Zheng W., Zhang Z., Jia Q., Yu J., Zhang H., Yao Y., Liu J., Han G., Chen J. Oblique thrust of the Maidan fault and late Quaternary tectonic deformation in the southwestern Tian Shan, northwestern China // Tectonics. 2019. V. 38. P. 2625–2645.

Yang S.M., Li J., Wang Q. The deformation pattern and fault rate in the Tianshan Mountains inferred form GPS observations // Science in China Series D-Earth Sciences. 2008. V. 51(8). P. 1064–1080.

Yao Y., Wen S., Yang L., Wu C., Sun X., Wang L., Zhang Z. A Shallow and left-lateral rupture event of the 2021 $M_{\rm W}$ 5.3 Baicheng earthquake: Implications for the diffuse deformation of Southern Tianshan // Earth and Space Science. 2022. V. 9.

Yu Y.Q., Zhao D.P., Lei J.S. Mantle transition zone discontinuities beneath the Tien Shan // Geophysical Journal International. 2017. V. 211(1). P. 80–92.

Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continentalscale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503.

Zubovich A.V., Wang X.Q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigher C. et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. 2010. V. 29.

Model of the Seismic Rupture Surface of the Aykol Earthquake, China, January 22, 2024, Based on SAR Interferometry Data

E. P. Timoshkina¹, A. M. Konvisar^{1, 2, *}, V. O. Mikhailov^{1, 2}, A. V. Ponomarev¹, V. B. Smirnov^{1, 2}

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia ²Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, bld. 2, Moscow, 119991 Russia * e-mail: alexkonvisar@gmail.com

In this study the modeling of the rupture surface of the $M_W = 7.0$ Aykol earthquake, which occurred on the border of PRC and Kyrgyzstan on January 22, 2024, as well as the rupture surface of its strongest aftershock on January 29, 2024, with magnitude $M_W = 5.7$ has been carried out using satellite radar interferometry data. We derived displacement fields of the Earth's surface in the satellite line-of-sight for these events using Sentinel-1A imagery, and resolved the inverse problem of estimating displacement fields on the rupture surfaces. The resulting rupture surface models reveal the presence of fault systems dipping towards one another. The fault plane of the main event is a thrust with left-lateral shear component dipping to the northwest. During the development of the aftershock process, a backthrust dipping to the southeast developed in the frontal region, displacing the western portion of the frontal thrust formed during the main shock. Such fault dynamics is a result of the complex structure of the fault zones in the studied region. Backthrusts in this area had been mapped during previous field works.

Keywords: earthquake, Aykol, China, January 22, 2024, SAR interferometry, displacement fields, inverse problem, seismic rupture model