



STRESS FIELDS REVEALED BY AFTERSHOCKS OF THE STRONGEST EARTHQUAKES OF TIEN SHAN

O. A. Kuchay¹, Z. A. Kalmet'eva², M. E. Kozina³, K. E. Abdrakhmatov⁴

¹A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

²Central-Asian Institute for Applied Geosciences, Bishkek, Kyrgyzstan

³Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

⁴Institute of Seismology, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract: This study focused on the state of stress in the aftershock areas of the strongest earthquakes registered in Tien Shan on 11 August 1974 ($M_S=7.3$), 24 March 1978 ($M_S=7.1$), 01 November 1978 ($M_S=6.8$), 19 August 1992 ($M_S=7.3$), and 05 October 2008 ($M_S=6.9$). These earthquakes occurred in similar geodynamic conditions in the zone of the nearly N–S oriented compression caused by the India-Eurasia collision. The parameters of the state of stress were determined by Yu.L. Rebetsky method of cataclastic analysis (MCA) of displacements on faults, based on the focal mechanisms of aftershocks. In the first stage of MCA, we determined the orientations of the principal stress axes, the Lode-Nadai coefficients, and the geodynamic types of the state of stress in the study area. The stress fields reconstructed from the aftershocks of different energy levels show that the principal deviatoric stress axes pattern becomes less orderly as the magnitude of seismic events decreases. A peculiar feature of the aftershock process is the misalignment of the axes of maximum compression in the mechanisms of the weakest aftershocks and the compression axis in the focal mechanism of the main seismic event. Most of the aftershocks were recorded west of the location of the main earthquake.

Key words: stress; strong earthquake; earthquake focal mechanism; aftershock; Tien Shan

RESEARCH ARTICLE

Recommended by S.I. Sherman

Received: February 24, 2016

Revised: September 6, 2017

Accepted: September 14, 2017

For citation: Kuchay O.A., Kalmet'eva Z.A., Kozina M.E., Abdrakhmatov K.E., 2017. Stress fields revealed by aftershocks of the strongest earthquakes of Tien Shan. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 827–848. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0319.

Для цитирования: Кучай О.А., Кальметьева З.А., Козина М.Е., Абдрахматов К.Е. Поля напряжений по афтершокам сильнейших землетрясений Тянь-Шаня // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 827–848. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0319.

Поля напряжений по АФТЕРШОКАМ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

О. А. Кучай¹, З. А. Кальметьева², М. Е. Козина³, К. Е. Абдрахматов⁴

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

² Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызстан

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт сейсмологии НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: Изучены особенности напряженного состояния афтершоковых областей сильнейших землетрясений, зарегистрированных на территории Тянь-Шаня: 11 августа 1974 г. ($M_s=7.3$), 24 марта 1978 г. ($M_s=7.0$), 1 ноября 1978 г. ($M_s=6.8$), 19 августа 1992 г. ($M_s=7.3$) и 5 октября 2008 г. ($M_s=6.9$). Рассматриваемые землетрясения произошли в сходных геодинамических условиях – в зоне близмеридионального сжатия за счет Индо-Евразийской коллизии. Восстановление параметров напряженного состояния проводилось по методу катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого с использованием механизмов очагов афтершоков. В работе рассматриваются результаты первого этапа МКА, позволившего реконструировать ориентацию главных осей напряжений и такие параметры, как коэффициент Лоде – Надаи и геодинамический тип напряженного состояния. Полученные поля напряжений по афтершокам разных энергетических уровней показывают уменьшение упорядоченности осей главных девиаторных напряжений по мере уменьшения магнитуд событий. Одной из особенностей афтершокового процесса является несоосность осей максимального сжатия механизмов наиболее слабых афтершоков и оси сжатия механизма очага главного события. Основная масса афтершоков регистрируется западнее главного землетрясения.

Ключевые слова: напряжение; сильное землетрясение; механизм очага землетрясения; афтершок; Тянь-Шань

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучением пространственно-временных особенностей сейсмотектонического деформационного процесса исследователи занимаются на протяжении десятков лет. Использование не так давно появившегося метода восстановления поля напряжений по механизмам очагов землетрясений позволило по-иному взглянуть на характер проявления полей напряжений [Rebetsky, 2007]. В работах ряда авторов, применяющих новую методику, показано изменение полей напряжений не только на разных масштабных уровнях [Rebetskii et al., 2000; Rebetsky, 2007; Rebetsky, Marinin, 2005; Leskova, Epanov, 2011, 2014; Omar et al., 2011], но и вдоль плоскостей разрыва [Kuchay, 2012].

Цель нашей работы – выявить закономерности напряженного состояния афтершоковых областей сильных землетрясений Тянь-Шаня для разных энергетических диапазонов. Имеющийся в нашем распоряжении материал по механизмам очагов афтершоков позволил исследовать эти явления на натурном материале в зонах разрушительных землетрясений, произошедших на территории Тянь-Шаня.

В работе анализируются особенности напряженно-деформированного состояния земной коры афтершоковых областей сильных землетрясений, произошедших на территории Тянь-Шаня: Маркансуйского 11 августа 1974 г. ($M_s=7.3$, 39.4° с.ш., 73.9° в.д.), Жаланаш-Тюпского 24 марта 1978 г. ($M_s=7.0$, 42.88° с.ш., 78.58° в.д.), Дараут-Курганского (Алайское) 1 ноября 1978 г. ($M_s=6.8$, 39.4° с.ш., 72.6° в.д.), Суусамырского 19 августа 1992 г. ($M_s=7.3$, 42.07° с.ш., 73.63° в.д.) и Нуринского 5 октября 2008 г. ($M_s=6.9$; 39.60° с.ш., 73.67° в.д.) (рис. 1).

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Для реконструкции поля напряжений за счет афтершоковых последовательностей вышеупомянутых землетрясений применялся метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) Ю.Л. Ребецкого. Алгоритм МКА многоэтапный, позволяет определять параметры эллипсоида напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций (первый этап) и величины напряжений (второй – четвертый этапы). Для восстановления поля напряжений используются данные о меха-

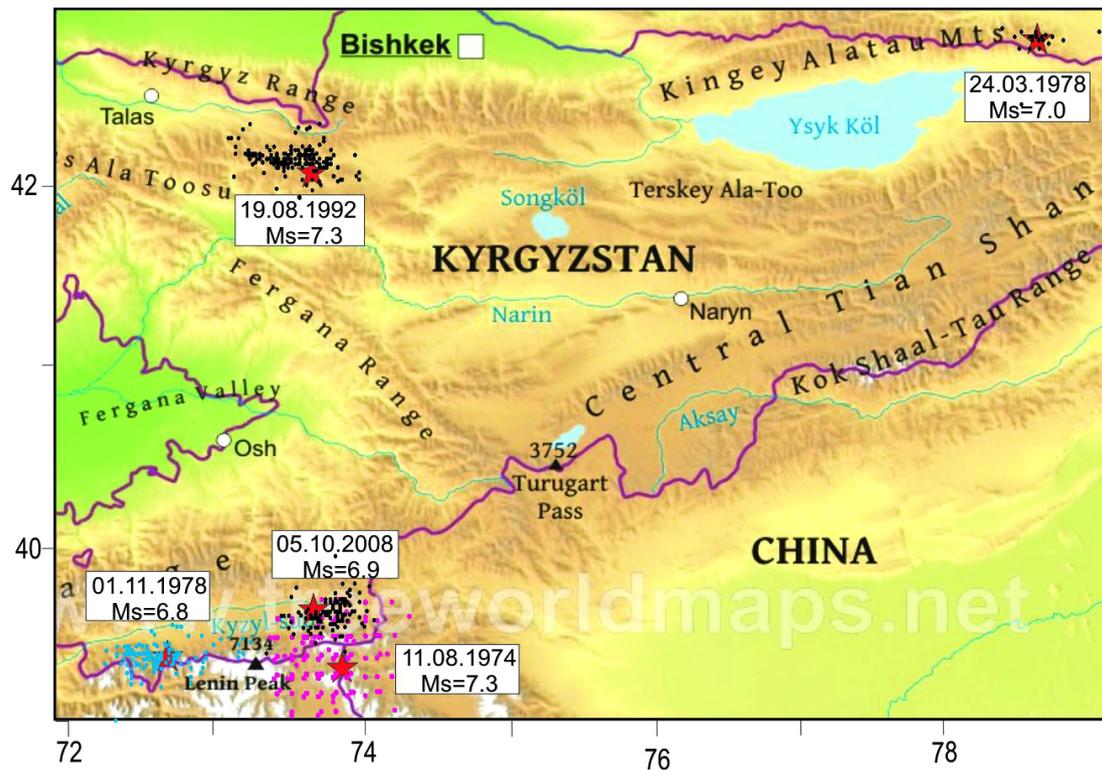


Рис. 1. Карта эпицентров пяти сильнейших землетрясений Тянь-Шаня и их афтершоков (отмечены разным цветом). Звездочками показаны эпицентры землетрясений, рассматриваемых в настоящей работе, указаны их даты и магнитуды. Афтершоки сильных землетрясений показаны с $M \geq 3.3$. Землетрясения с $M \geq 3.3$ являются представительными для данного района. Цифровая топооснова: <http://www.freeworldmaps.net>.

Fig. 1. Map showing the locations, dates and magnitudes of the epicenters of the five strongest earthquakes in the Tien Shan and aftershocks (marked in different colours). Stars – the epicenters discussed in this article. The map shows the aftershocks of $M \geq 3.3$ seismic events that are representative for this area. Digital relief: <http://www.freeworldmaps.net>.

низмах очагов землетрясений, дополнительные материалы в виде обобщений экспериментов по разрушению горных пород, сведения о динамических параметрах очагов землетрясений и др. [Rebetsky, 2007]. В настоящей работе рассматриваются и анализируются особенности ориентации осей главных напряжений, полученных по данным об афтершоках разных энергетических уровней, а также параметры, определяющие тип напряженного состояния (геодинамический режим) и вид тензора напряжений – коэффициент Лоде – Надаи (μ_σ). Коэффициент Лоде – Надаи принимает значения от -1 до $+1$ (-1 при одноосном растяжении, 0 при простом или чистом сдвиге, $+1$ при одноосном сжатии). Тип напряженного состояния в приложении к проблемам геодинамики (см., например, [Rebetsky, 2007]) определяется в соответствии с тем, какая из главных осей напряжений близка к вертикали. В расчетах использовались решения механизмов 86 афтершоков Маркансуйского (август 1974 г. – декабрь 1975 г.), 127 Алайского (ноябрь 1978 г. – октябрь 1979 г.), 62 Жаланаш-Тюпского (март 1978 г. – сентябрь 1978 г.), 132 Суусамырского (август

1992 г. – декабрь 1997 г.) и 117 афтершоков Нурина (октябрь 2008 г. – июнь 2009 г.) землетрясения. Надо отметить, что, несмотря на большое количество сейсмических станций, участвовавших в определении параметров механизмов очагов сильнейших афтершоков каждого из вышеперечисленных сильных землетрясений, решения строились со средней степенью надежности (иногда из-за одностороннего расположения сейсмических станций), поэтому при составлении каталога для механизмов очагов сильных афтершоков преимущество отдавалось параметрам механизмов очагов, полученных в ходе проекта Global CMT Project в обсерватории Ламонт-Доэрти Колумбийского университета [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017]. Данные о координатах эпицентров взяты из каталогов, помещенных в сборниках «Землетрясения в СССР» [Ulomov et al., 1977; Barinova et al., 1982], «Землетрясения Северной Евразии» [Dzhanuzakov et al., 1997, 2014; Dzhanuzakov, Shukurova, 2014], а также из каталогов Таджикского института сейсмологии и сейсмостойкого строительства (ТИССС) АН Таджикистана и Института геологии АН Киргизии

зии, сборника [Aitaliev, 1981]. Из-за отсутствия надежного определения глубин гипоцентров афтершоков в южной части Тянь-Шаня глубина очагов принималась равной 15 км. Механизмы очагов афтершоков рассчитывались по методике [Vvedenskaya, 1969] с использованием региональных годографов. Решения механизмов очагов афтершоков Алайского и Маркансуйского землетрясений были определены ранее одним из авторов, Суусамырского события – А. Муралиевым [Kuchay et al., 2002]. Решения для повторных сейсмических толчков (афтершоков) Жаланаш-Тюпского и Нуринского землетрясений взяты из работ [Aitaliev, 1981; Abdyaeva et al., 2014; Muraliev et al., 2014].

В алгоритме МКА учитывается энергетическая характеристика землетрясения, поэтому очень важно определить механизмы очагов землетрясений более сильных событий, которые формируют поле напряжений. В каталогах, в которых ранее определялись энергетические классы землетрясений, использовалась зависимость между энергетическим классом и магнитудой: $K=1.8M+4$ [Rautian, 1960]. Количество афтершоков Маркансуйского события с магнитудой 4.4–6.7 с определенными механизмами составляет 79 % от общего количества повторных толчков с такими же магнитудами. Количество механизмов афтершоков Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения с $M=3.3-4.3$ с определенными механизмами составляет 95 % от общего количества повторных толчков такой же энергии, с $M=4.4-5.3$ – 92 %, Жаланаш-Тюпского с $M=4.4$ – 100 % и с $M=1.7-4.0$ – 46 %, Суусамырского с $M=4.4-6.7$ – 89 %, с $M=3.3-4.3$ – 45 %, с $M=1.7-2.8$ – 12 %. Высокий процент определенных механизмов афтершоков позволяет говорить о достоверности результатов при восстановлении поля напряжений по очагам сильных событий. Уменьшение процентного отношения определенных механизмов более слабых повторных сейсмических толчков понижает надежность восстановленных полей напряжений.

В работе было важно определить масштаб осреднения, который зависит от уровня магнитуд сейсмических событий и от плотности их распределения в пространстве. В нашем случае обработка параметров механизмов очагов с использованием программы МКА производилась в узлах сетки размером $0.05 \times 0.05^\circ$ для афтершоков Маркансуйского землетрясения, $0.02 \times 0.02^\circ$ – для повторных толчков Жаланаш-Тюпского землетрясения, $0.02 \times 0.02^\circ$ – для афтершоков Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения, $0.05 \times 0.05^\circ$ – для афтершоков Суусамырского землетрясения и $0.02 \times 0.02^\circ$ – для повторных толчков Нуринского землетрясения. Алгоритм МКА имеет критерии формирования однородной выборки механизмов очагов землетрясений, по данным о которых и производится расчет

параметров тензора напряжений и приращений сейсмоструктурных деформаций. Однородная выборка характеризует квазиоднородную стадию деформирования локального участка земной коры – домена [Rebetsky, 2007]. При восстановлении стресс-состояния по данным однородной выборки механизмов афтершоков количество событий в ней варьировалось от 3 до 5, при лучшем варианте от 3 до 8. Результатом реконструкции первого этапа явились наборы карт проекций на горизонтальную плоскость осей алгебраически максимальных и минимальных девиаторных напряжений (далее максимальное растяжение и максимальное сжатие) по данным о механизмах очагов афтершоков.

3. ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПО АФТЕРШОКОВЫМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ

Прежде чем анализировать напряженное состояние очаговых областей по повторным сейсмическим толчкам сильнейших землетрясений, приведем некоторые результаты анализа поля компонент тензора сейсмоструктурных деформаций (широтные, меридиональные и вертикальные) для территорий рассматриваемых сильных событий. Для расчета использовался метод [Riznichenko, 1985; Kostrov, 1975]. Исследования показали, что на начальном этапе разрывообразования в очагах Маркансуйского и Жаланаш-Тюпского землетрясений осуществлялось в однородном поле деформаций, вычисленном по данным параметров механизмов очагов за 10 лет [Kuchay, 2013] до первого и 14 лет – до второго события [Kuchay et al., 2015]. Деформации, накопленные за 14 лет до Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения [Kuchay, 2013] и за 40 лет до Нуринского [Kuchay et al., 2015], свидетельствуют о том, что эпицентры землетрясений располагались в пределах условной границы, разделяющей положительные и отрицательные значения в поле широтной, меридиональной и вертикальной компонент сейсмоструктурных деформаций. В данном случае считалось, что начало вспарывания соответствовало координатам очагов главных событий, которые определялись с учетом локальных годографов и по записям местной сети сейсмических станций. Точность определения координат Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения ± 5 км [Barinova et al., 1982], Нуринского землетрясения $\pm 5-10$ км [Dzhanuzakov et al., 2014]. Суусамырское землетрясение произошло в районе крайне низкой сейсмичности, вследствие чего по нему нет необходимого объема данных для расчетов.

Рассмотрим решения механизмов очагов главных толчков сильных землетрясений в сопостав-

лении с особенностями полей напряжений, восстановленных по афтершоковым последовательностям.

3.1. МАРКАНСУЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 11 АВГУСТА 1974 Г. ($M_s=7.3$)

Маркансуйское землетрясение интенсивностью в эпицентре 7–8 баллов по шкале MSK-64 произошло 11 августа 1974 г. на границе Северного Памира и Западного Кунь-Луня [Dzhanuzakov et al., 2003]. По материалам каталога землетрясений Средней Азии с $K \geq 9$ за 1974 г. из сборника «Землетрясения в СССР в 1974 г.» [Ulomov et al., 1977] глубина главного толчка составила всего 5 км, однако очаг землетрясения на поверхность не вышел. Землетрясение сопровождалось огромным количеством афтершоков. По данным каталогов Института сейсмологии НАН КР и ТИССС, общее количество афтершоков с $K \geq 8$ ($M=2.2$) до конца 1976 г. составляло более 1500. Основные черты пространственного распределения эпицентров афтершоков проявились в течение первого дня после главного толчка: сначала афтершоки распространялись точно на запад (рис. 2, а), далее облако афтершоков стало расширяться и перемещаться в северо-западном направлении, одновременно намечая полосу афтершоков северо-восточного простирания (рис. 2, б, в). К концу первого дня (рис. 2, г) афтершоки происходили только в пределах полосы северо-восточного простирания. Затем на протяжении августа афтершоковая область несколько расширилась (2, д).

Механизм очага Маркансуйского события – типично сдвиговый. Близгоризонтальные оси сжатия и растяжения имеют субмеридиональное и субширотное положение (рис. 3, а, рис. 4). Мы в данной работе остановились на механизме очага, построенном одним из авторов статьи по данным первых вступлений продольных волн на основе материалов сейсмических станций мировой [International Seismological Centre, 2017] и региональной сети. Предполагаемый разрыв северо-западной ориентации сечет широтную линию Дарваз-Каракульского разлома на поверхности и согласуется с миграцией эпицентров первых афтершоков в западном и северо-западном направлении (см. рис. 2, а, б). Северо-восточное простирание возможной плоскости разрыва поддерживается положением эпицентров афтершоков, которые произошли во второй половине первого дня после главного толчка, и соответствует вытянутости изосейст балльности [Ulomov et al., 1977]. Поля напряжений по афтершоковым последовательностям Маркансуйского и Дараут-Курганского (Алайского) землетрясений были рассмотрены ранее [Kuchay, 2013] и в данной работе уточнены с учетом

изменения количества событий в однородной выборке.

Анализ карт ориентации осей главных девиаторных напряжений, построенных по разным магнитудным диапазонам афтершоков ($3.9 \leq M \leq 6.6$; $4.4 \leq M \leq 6.6$; $3.9 \leq M \leq 4.5$) (рис. 4), показывает устойчивость в азимутальном положении субмеридиональных осей максимального сжатия, субширотных осей максимального растяжения и субширотных осей промежуточных главных напряжений (рис. 4). Можно отметить согласованность азимутальной ориентации осей главных девиаторных напряжений (по повторным сейсмическим событиям $3.9 \leq M \leq 6.6$; $4.4 \leq M \leq 6.6$; $3.9 \leq M \leq 4.5$), с региональным полем напряжений для этой территории [Rebetsky, Alekseev, 2014], а также осей Р и Т главного события (см. рис. 3, а). Отличие наблюдается только в направлении погружения осей: оси сжатия за счет повторных толчков погружаются к северу, оси растяжения – к западу (рис. 4), в очаге главного землетрясения близгоризонтальная ось сжатия падает к югу, близгоризонтальная ось растяжения – к востоку (см. рис. 3, а).

Коэффициент Лоде – Надаи в основном принимает значения от -0.6 до $+0.2$, что характеризует вид тензора напряжений вблизи чистого сдвига с небольшим смещением в сторону одноосного сжатия. Преимущественный геодинамический тип напряженного состояния: горизонтальный сдвиг и растяжение со сдвигом. Виртуальная плоскость северо-восточного простирания отделяет области с горизонтальным сдвигом от областей, где фиксируется горизонтальное растяжение со сдвигом. Предполагаемая плоскость северо-восточного простирания, расположенная к северо-западу от эпицентра, находится в области горизонтального сдвига, к юго-востоку – в области горизонтального растяжения со сдвигом (рис. 4). В юго-восточной части поля по сильным афтершокам ($M=4.6-6.6$) и общему полю ($3.9 \leq M \leq 6.6$) геодинамический тип напряженного состояния – растяжение; по повторным, более слабым, событиям ($3.9 \leq M \leq 4.5$) в центральной части – сжатие со сдвигом и в западной – сжатие (рис. 4).

3.2. ДАРАУТ-КУРГАНСКОЕ (АЛАЙСКОЕ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 НОЯБРЯ 1978 Г. ($M_s=6.8$)

8–9-балльное Дараут-Курганское (Алайское) землетрясение произошло 1 ноября 1978 г. Глубина очага определена в пределах 20–30 км. Плейсто-сейстовая область охватывала северный склон Заалайского хребта протяженностью в 22 км при максимальной ширине 15 км [Mikhailova, 1980; Dzhanuzakov et al., 2003]. В течение первых шести часов афтершоки происходили вблизи главного толчка и постепенно перемещались в северо-запад-

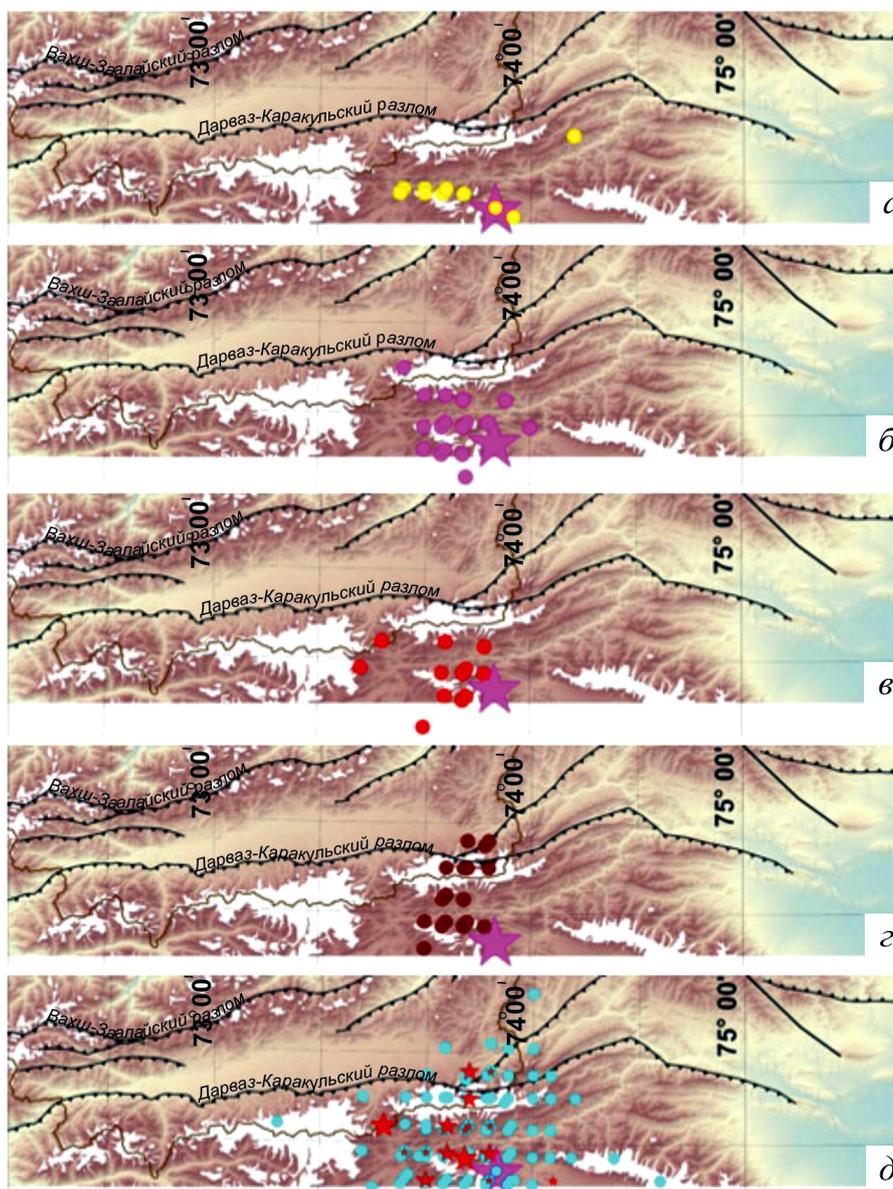


Рис. 2. Карты эпицентров афтершоков Маркансуйского землетрясения 11 августа 1974 г.: *a–c* – афтершоки, произошедшие в первый день после основного толчка за неравномерные временные интервалы (3.5 часа, 8 часов, 5 часов, 8 часов), но с изменением группирования их относительно эпицентра в период временных интервалов; *d* – афтершоки, произошедшие в августе 1974 г. Красными звездочками показаны эпицентры сильных афтершоков с $M=5.0–6.1$, другими цветами отмечены эпицентры более слабых событий с $M=3.3–4.9$. Активные разломы обозначены по данным А.В. Миколайчука из работы [Kalmet'eva et al., 2009].

Fig. 2. Maps showing the epicenters of aftershocks of the Markansuy earthquake ($M_S=7.3$; 11 August 1974): *a–c* – aftershocks that occurred in the first day after the main shock in irregular time intervals (3.5 hours, 8 hours, 5 hours, and 8 hours), but with changes in their clustering relative to the epicenter during the time intervals; *d* – aftershocks that occurred in August 1974. Red stars show the epicenters of strong aftershocks, $M=5.0–6.1$. Stars of other colours show the epicenters of weaker seismic events, $M=3.3–4.9$. Active faults are shown according to the data by A.V. Mikolaichuk in [Kalmet'eva et al., 2009].

ном направлении (голубые кружки вверху рис. 5). Следующие три часа афтершоки фиксировались по всей длине наметившейся полосы и севернее эпицентра главного толчка (синие кружки вверху рис. 5). Эти первые афтершоки, по существу, оконтурили всю афтершоковую область. В течение ноября

эпицентры афтершоков практически не выходили за пределы этой, наметившейся в первые девять часов после главного толчка, области (маленькие черные кружки вверху рис. 5). Более подробно сейсмический процесс рассмотрен в работе Р.С. Михайловой [Mikhailova, 1980].

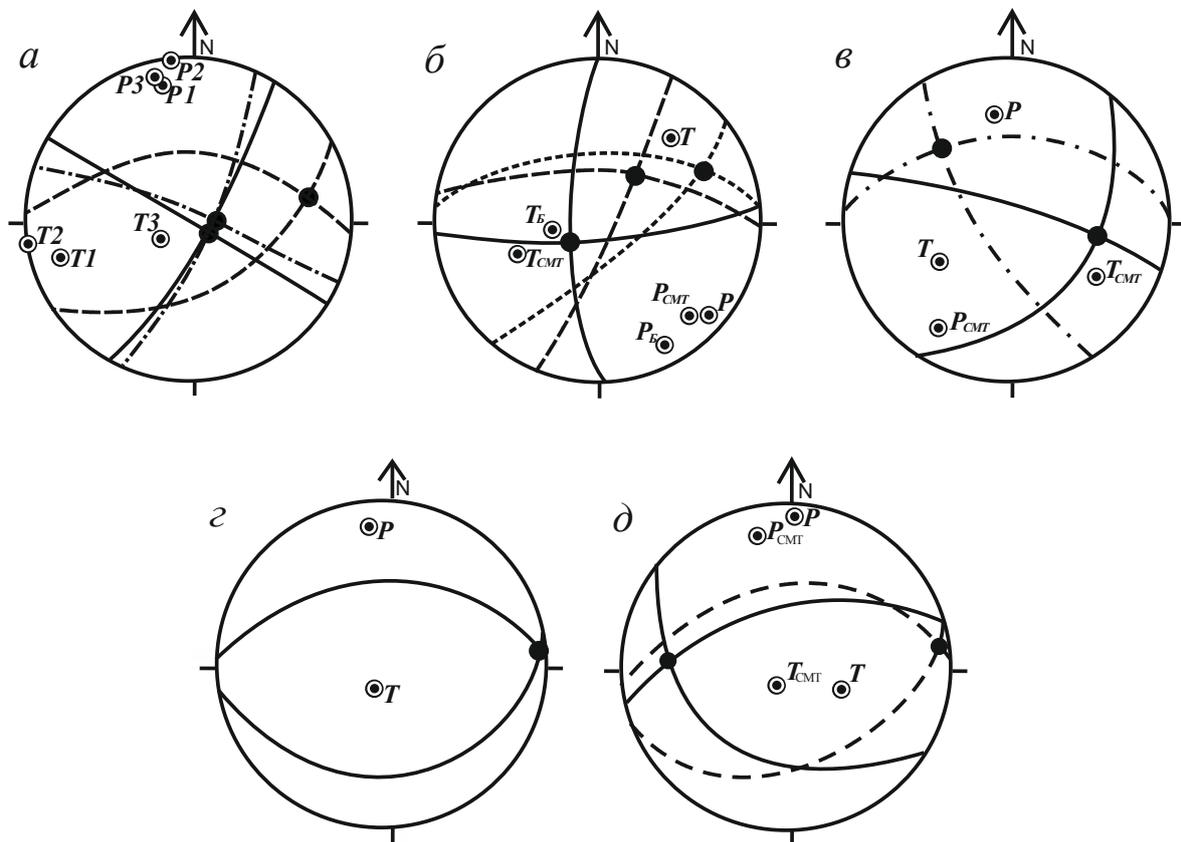


Рис. 3. Решения механизмов очагов землетрясений, построенных на верхней полусфере: Маркансуйского (а), Дарат-Курганского (Алайское) (б), Жаланаш-Тюпского (в), Суусамырского (г) и Нурина (д). Решения механизма очага Маркансуйского землетрясения получены разными авторами: сплошной линией и индексом 1 в названиях осей напряжений показано решение О.А. Кучай, штрихпунктирной линией и названиями осей с индексом 2 – решение Е.И. Широковой, штриховой линией и названиями осей с индексом 3 – решение Л.М. Балакиной [Balakina et al., 1993]. Решение механизма очага Дарат-Курганского (Алайского) землетрясения (б) обозначено сплошной линией и названиями осей без индекса (решение О.А. Кучай); решение, отмеченное точечной линией и названиями осей с индексом «Б», получено Л.М. Балакиной [Balakina et al., 1993]; решение, показанное штриховой линией и названиями осей с индексом «СМТ», выбрано из [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017]. Решения механизма очага Жаланаш-Тюпского землетрясения (в): сплошной линией обозначено решение из работы [Aitaliev, 1981], штрихпунктирной – из [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017]. Решение механизма очага Суусамырского землетрясения (г), выполненное А.М. Муралиевым [Muraliev, 1993] и заимствованное из каталога [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017], согласуются. Решение механизма очага Нурина (д), построенное А.М. Муралиевым [Muraliev et al., 2014], – сплошная линия; определенное в [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017] – штриховая линия.

Fig. 3. Earthquake focal mechanism solutions on the upper hemisphere: Markansuy (a), Daraut-Kurgan (Alai) (б), Zhalanash-Tyup (в), Suusamyr (г), and Nura (д). Focal mechanism solutions by different authors: (a) Markansuy earthquake: solid line, index 1 in the name of stress axes – O.A. Kuchai; dash-dotted line, index 2 – E.I. Shirokova; dashed line, index 3 – L.M. Balakina (after [Balakina et al., 1993]). (б) Daraut-Kurgan (Alai) earthquake: solid line, no index in the name of stress axes – O.A. Kuchai; dashed line, index Б – L.M. Balakina [Balakina et al., 1993]; dashed line, index CMT – [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017]. (в) Zhalanash-Tyup earthquake: solid line – [Aitaliev, 1981]; dash-dotted line – [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017]. (г) Suusamyr earthquake: the solution from [Muraliev, 1993] is consistent with the solution from [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017]. (д) Nura earthquake: solid line – [Muraliev et al., 2014]; dashed line – [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017].

Механизм очага Дарат-Курганского (Алайского) землетрясения – сдвиг вдоль простирания (см. рис. 3, б, и рис. 6а). Близгоризонтальные оси сжатия и растяжения Р и Т имеют соответственно ЮВ-СЗ и СВ-ЮЗ положение [Kuchay, 2013].

Поле напряжений земной коры, восстановленное по механизмам очагов афтершоковой последовательности ($3.3 \leq M \leq 5.6$) этого землетрясения за весь рассматриваемый период (т.е. год), недостаточно однородное (рис. 6, первый столбец): ориен-

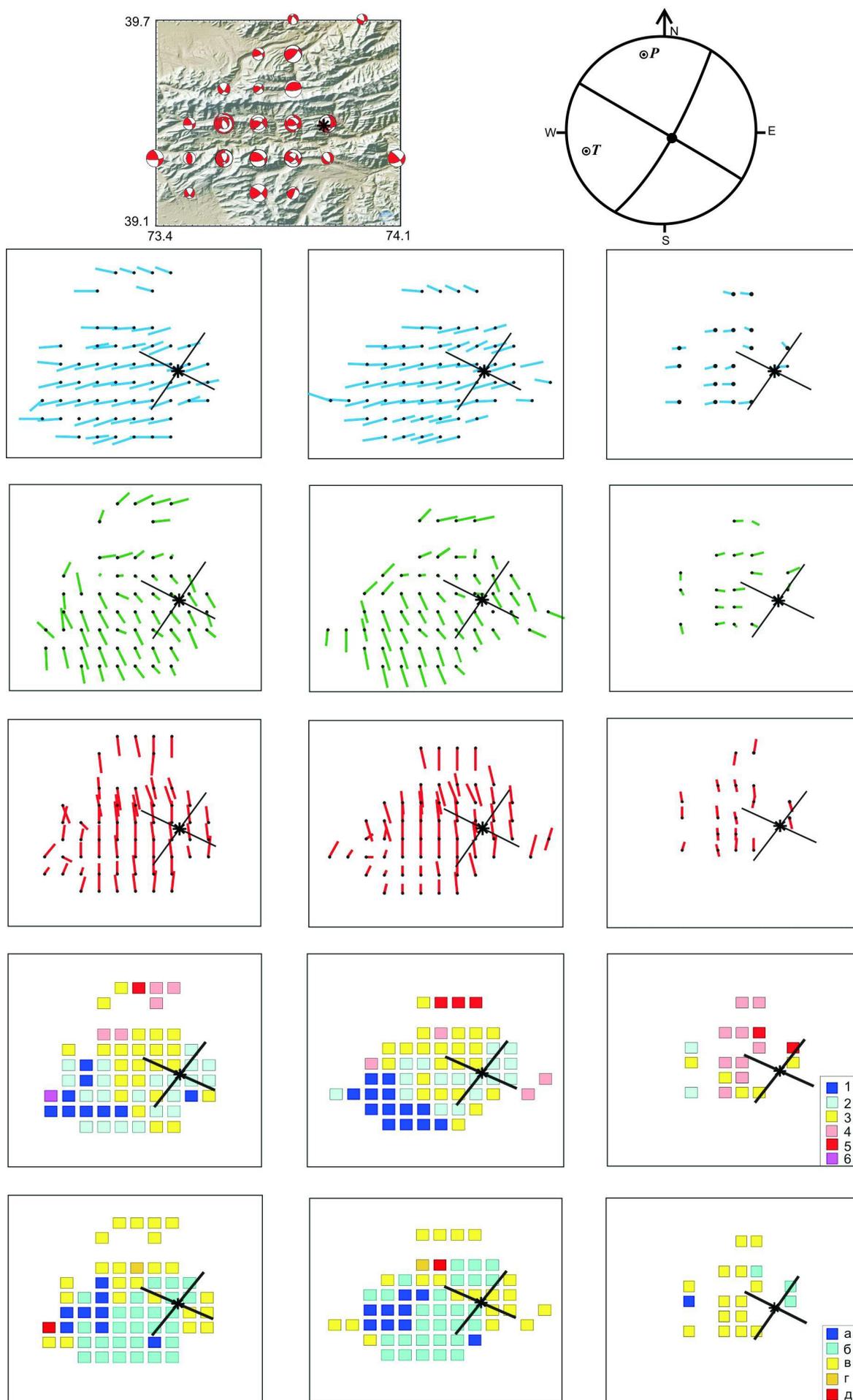


Рис. 4. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных девиаторных напряжений (осей алгебраически максимальных и минимальных девиаторных напряжений), восстановленных по афтершокам Маркансуйского землетрясения 1974 г. ($M_s=7.3$) с разными энергетическими интервалами: левый столбец – $3.9 \leq M \leq 6.6$, центральный столбец – $4.6 \leq M \leq 6.6$, правый столбец – $3.9 \leq M \leq 4.5$. Первый ряд – ориентация осей главных напряжений растяжения, второй ряд – ориентация осей главных промежуточных напряжений, третий ряд – ориентация осей главных напряжений сжатия. Направление погружения осей осуществляется из точки. Точка в центре линии означает близгоризонтальное положение осей напряжения. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Прямыми линиями схематично показаны предполагаемые плоскости разрыва главного землетрясения. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. Четвертый ряд – геодинамический тип напряженного состояния: 1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – вертикальный сдвиг. Пятый ряд – вид напряженного состояния (коэффициент Лодэ – Надаи): а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. В левом верхнем углу рисунка механизмы очагов афтершоков, в правом верхнем углу – механизм очага Маркансуйского землетрясения, параметры которого использовались при анализе материала.

Fig. 4. Projection on the horizontal plane of the principal deviatoric stress axes (i.e. axes of algebraically maximum and minimum deviatoric stresses) reconstructed from the aftershocks of the Markansuy earthquake ($M_s=7.3$; 11 August 1974) in different energy intervals: left column – $3.9 \leq M \leq 6.6$, central column – $4.6 \leq M \leq 6.6$, right column – $3.9 \leq M \leq 4.5$. The orientations of the principal stress axes: row 1 – extension; row 2 – intermediate; row 3 – compression. A dip direction of each axes is from the relevant point. The point in the center of the line means the subhorizontal position of the stress axes. The same points are the centers of homogeneously deformed domains. Straight lines schematically show the assumed fault planes of the main earthquake. Star – the epicenter of the main seismic event. Row 4 – geodynamic types of the state of stress: 1 – extension, 2 – extension–strike-slip, 3 – strike-slip, 4 – compression– strike-slip, 5 – compression, 6 – vertical strike-slip. Row 5 – Lode – Nadai coefficient: a – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. Upper left corner – the focal mechanisms of the aftershocks; upper right corner – the focal mechanism of the Markansuy earthquake, which parameters were used in the analysis.

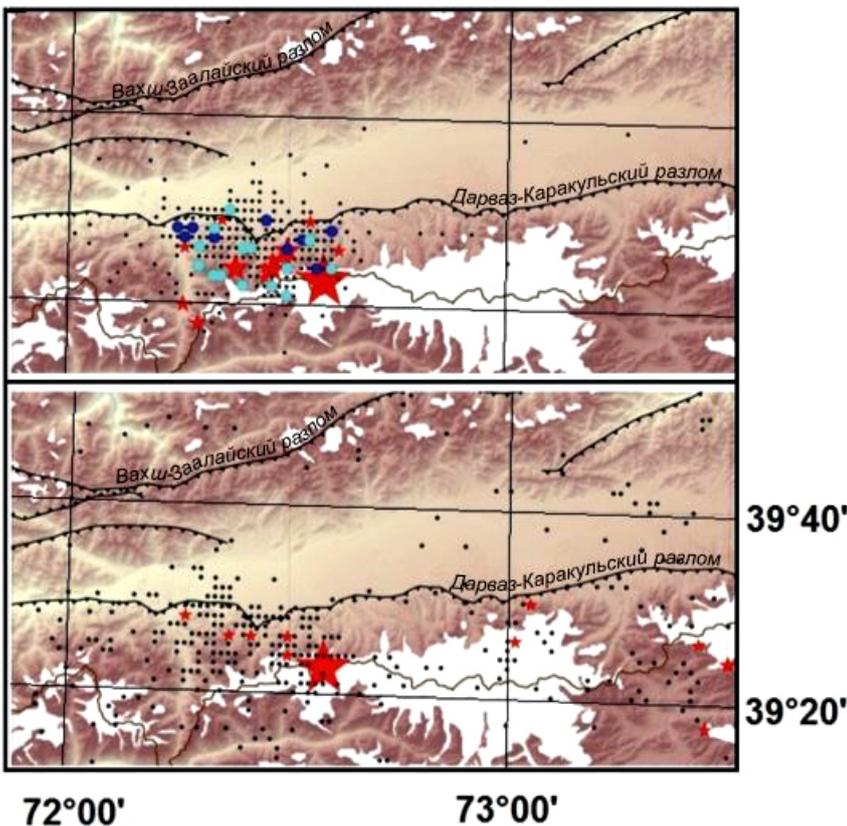


Рис. 5. Карта эпицентров главного толчка и афтершоков Дарваз-Курганского (Алайского) землетрясения ($M=6.8$). Верхний рисунок – с 1 по 29 ноября 1978 г.; нижний рисунок – с 30 ноября 1978 г. по 1 ноября 1979 г. К – энергетический класс по Т.Г. Раутиан (связан с M соотношением $K=1.8M+4$) [Rautian, 1960]. Активные разломы отмечены по данным А.В. Миколайчука из работы [Kalmet'eva et al., 2009].

Fig. 5. Map showing the epicenters of the main shock and aftershocks of the Daraut-Kurgan (Alai) earthquake ($M=6.8$). Top figure – from 01 to 29 November 1978; bottom figure – from 30 November 1978 to 01 November 1979. K – energy class (related to M by the ratio: $K=1.8M+4$) (after [Rautian, 1960]). Active faults are shown according to the data by A.V. Mikolaichuk (after [Kalmet'eva et al., 2009]).

Эпицентры землетрясений:
 ★ гл. толчок ● 1-6-й часы ● 7-9-й часы ★ K=14 ★ K=13 ★ K=12 ★ K=11 ● K=10

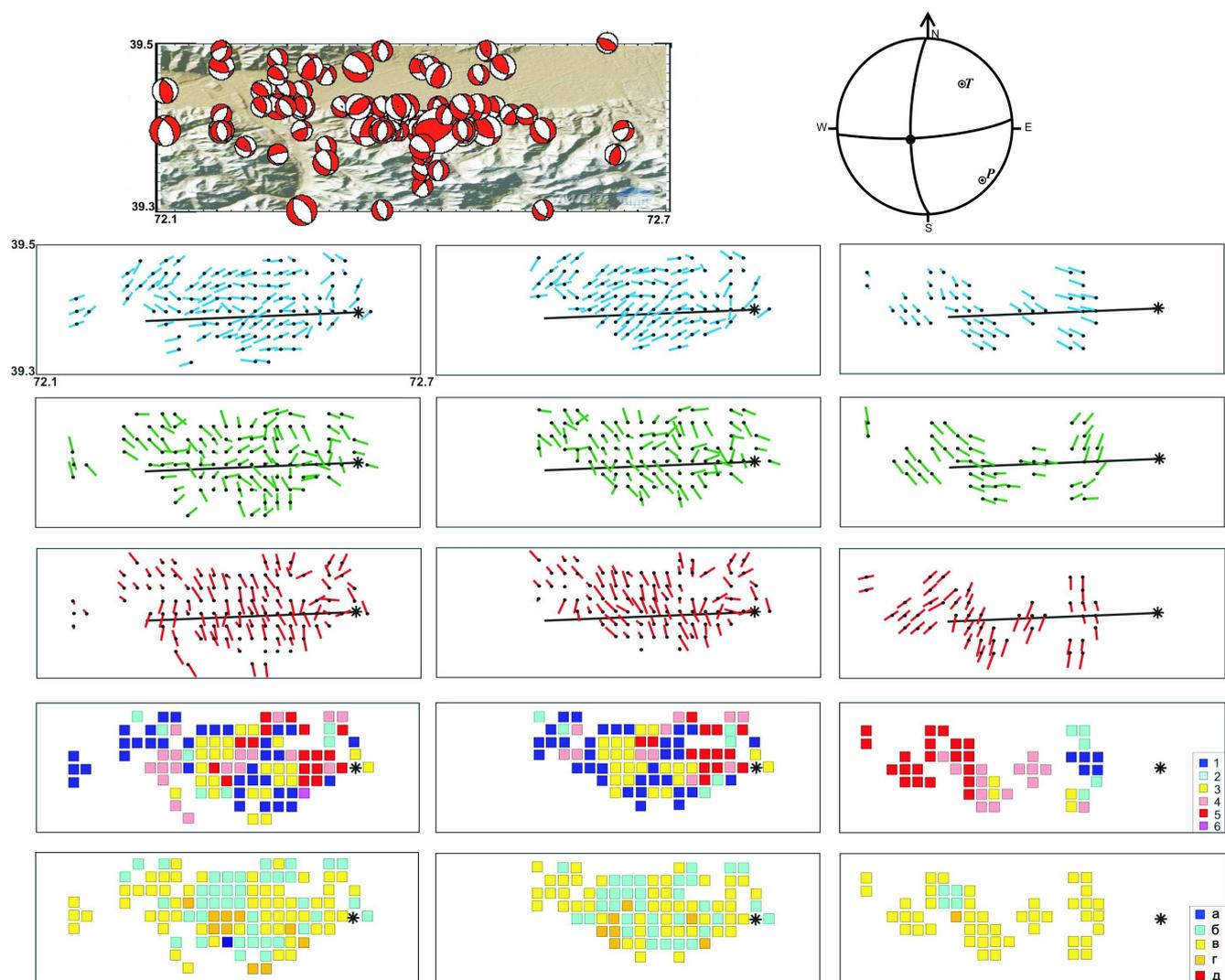


Рис. 6а. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных девиаторных напряжений, восстановленных по данным механизмов очагов афтершоков Даравт-Курганского (Алайского) землетрясения по разным временным интервалам: первый столбец – за год (с 1 ноября 1978 г. по 1 ноября 1979 г., $3.3 \leq M \leq 5.6$), второй – первая декада (с 1 ноября по 10 ноября 1978 г., $3.3 \leq M \leq 5.6$), третий – после первой декады весь остальной рассматриваемый период (с 11 ноября 1978 г. по 1 ноября 1979 г., $3.3 \leq M \leq 4.4$). Верхний ряд – ориентация осей главных напряжений растяжения, второй ряд – ориентация осей главных промежуточных напряжений, третий ряд – ориентация осей главных напряжений сжатия. Направление погружения осей осуществляется из точки. Точка в центре линии означает близгоризонтальное положение осей напряжения. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Прямой длиной линией схематично показано положение предполагаемой плоскости разрыва. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. Четвертый ряд – геодинамический тип напряженного состояния: 1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – вертикальный сдвиг. Пятый ряд – коэффициент Лодэ – Надаи: а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. В левом верхнем углу – механизмы очагов афтершоков; в правом верхнем углу – механизм очага Даравт-Курганского (Алайского) землетрясения, параметры которого использовались при анализе материала.

Fig. 6a. Projection on the horizontal plane of the principal deviatoric stress axes reconstructed from the focal mechanisms of the aftershocks of the Daraut-Kurgan (Alai) earthquake in different time intervals: column 1 – one year, from 01 November 1978 to 01 November 1979 ($3.3 \leq M \leq 5.6$); column 2 – the first 10 days, from 01 to 10 November 1978 ($3.3 \leq M \leq 5.6$); column 3 – after the first 10 days through the rest of the reporting period, from 11 November 1978 to 01 November 1979 ($3.3 \leq M \leq 4.4$). The orientations of the principal stress axes: row 1 – extension, row 2 – intermediate, row 3 – compression. A dip direction of each axis is from the relevant point. The point in the center of the line means the subhorizontal position of the stress axes. The same points are the centers of homogeneously deformed domains. The straight line schematically shows the assumed fault plane. Star – the epicenter of the main seismic event. Row 4 – geodynamic types of the state of stress: 1 – extension, 2 – extension–strike-slip, 3 – strike-slip, 4 – compression– strike-slip, 5 – compression, 6 – vertical strike-slip. Row 5 – Lode – Nadai coefficient: a – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. Upper left corner – the focal mechanisms of the aftershocks; upper right corner – the focal mechanism of the Daraut-Kurgan (Alai) earthquake, which parameters were used in the analysis.

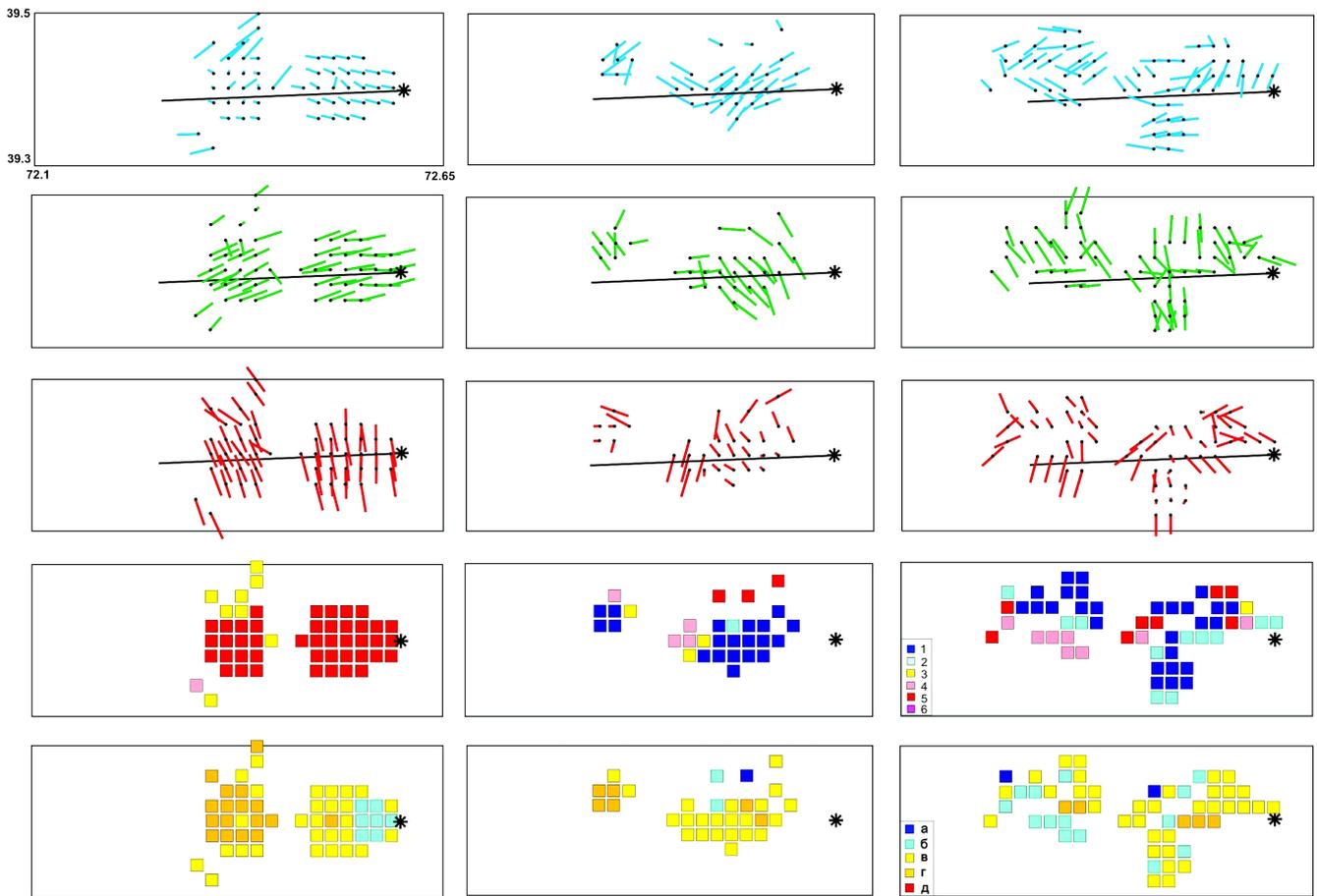


Рис. 66. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных девиаторных напряжений, восстановленных по данным механизмов очагов афтершоков Даравт-Курганского (Алайского) землетрясения по разным энергетическим интервалам: левый столбец – $4.5 \leq M \leq 5.6$, центральный столбец – $4.0 \leq M \leq 4.4$, правый столбец – $3.3 \leq M \leq 3.9$. С первого по пятый ряд обозначения те же, что и на рис. 6а.

Fig. 66. Projection on the horizontal plane of the principal deviatoric stress axes reconstructed from the focal mechanisms of the aftershocks of the Daraut-Kurgan (Alai) earthquake in different energy intervals: left column – $4.5 \leq M \leq 5.6$, central column – $4.0 \leq M \leq 4.4$, right column – $3.3 \leq M \leq 3.9$. Row 1 to 5 – see the legend of Fig. 6a.

тация осей главных девиаторных напряжений меняется в крайних зонах по отношению к центральной части афтершоковой области.

Остановимся далее на особенностях, проявившихся при анализе поля напряжений во временном аспекте. За первую декаду ориентация осей алгебраически максимальных и минимальных главных напряжений, полученная по афтершокам этого периода ($3.3 \leq M \leq 5.6$), согласуется с ориентацией осей Р и Т механизма очага основного сейсмического события и азимутальной ориентацией осей регионального поля напряжений [Rebetsky, Alekseev, 2014]. За весь остальной рассматриваемый период (с 11 ноября 1978 г. по 1 ноября 1979 г.) происходит переориентация осей напряжений: преимущественное направление осей максимального девиаторного сжатия (далее оси сжатия) меняется с СЗ (в первой декаде) на СВ, осей максимального девиаторного растяжения (далее оси растяжения) – с

субширотного и СВ на СЗ (рис. 6а, средний и правый столбцы). Возможное изменение поля напряжений во второй временной период связано с тем, что восстановление осуществлялось по очагам достаточно слабых событий ($3.3 \leq M \leq 4.0$).

За первый временной период погружение осей сжатия либо северо-западное, либо юго-восточное, осей растяжения – преимущественно юго-западное и северо-западное (рис. 6а, второй столбец), во второй период преобладающее погружение осей сжатия – на юго-запад, осей растяжения – к северо-западу (рис. 6а, третий столбец). Геодинамический тип напряженного состояния (первый период) – горизонтальное растяжение в западной и центральной части очаговой области, горизонтальный сдвиг в центральной части и горизонтальное сжатие – в восточной. Величина коэффициента Луде – Надаи меняется от -0.6 до $+0.2$ (первый период). Во второй период: на западе – горизонталь-

ное сжатие, в центральной части – горизонтальное сжатие со сдвигом, на востоке – горизонтальное растяжение и растяжение со сдвигом. Значение коэффициента Лоде – Надаи близко к нулю (рис. 6а). Из вышесказанного следует, что преимущественное СЗ направление главных осей максимального сжатия первого периода изменяется во второй период таким образом, что в направлении осей сжатия действуют уже оси растяжения, а в направлении осей растяжения (первого периода) действуют оси сжатия.

Очень кратко проведем анализ осей главных девиаторных напряжений, восстановленных по афтершокам Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения с разными магнитудными диапазонами ($4.5 \leq M \leq 5.6$; $4.0 \leq M \leq 4.4$; $3.3 \leq M \leq 3.9$) (рис. 6б). Реконструкция ориентации осей максимальных девиаторных напряжений сжатия по механизмам наиболее сильных афтершоков ($4.5 \leq M \leq 5.6$) (рис. 6б) свидетельствует о северо-северо-западном простирании (практически субмеридиональном), характерном для ориентации напряжений максимального сжатия на территории этого района [Rebetsky, Alekseev, 2014], и соответствует азимуту оси Р главного землетрясения. Направление осей растяжения меняется от ЗСЗ на востоке до близвертикального и северо-восточного на западе и лишь в некоторых частях афтершоковой области согласуется с близвертикальной осью главного землетрясения (рис. 6б). В основном тип напряженного состояния – сжатие. Значение коэффициента Лоде – Надаи (μ_σ) меняется от -0.6 до $+0.6$. Азимутальное положение осей напряжений максимального сжатия и растяжения умеренных ($4.0 \leq M \leq 4.4$) и более слабых событий ($3.3 \leq M \leq 3.9$) свидетельствует о их достаточной хаотичности (рис. 6б).

3.3. ЖАЛАНАШ-ТЮПСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 24 МАРТА 1978 г. ($M_s=7.0$)

Жаланаш-Тюпское землетрясение зарегистрировано в восточной оконечности хребта Кунгей Алатау в районе населенных пунктов Жаланаш и Тюп на глубине 15 км. Половина афтершоков этого события произошла в течение первых пяти суток. Среди них было пять событий с $M=4.4$ и одно – с $M=4.0$. Их локализация в пространстве определила область наибольшей плотности афтершоков. Следует отметить, что для этого землетрясения и его афтершоков были достаточно надежно определены глубины гипоцентров [Aitaliev, 1981], что позволило проследить расположение очагов афтершоков и по глубине (рис. 7). Процесс афтершоковой деятельности практически сразу распространился на всю толщу сейсмоактивного слоя к западу от основного толчка. Затем постепенно он начал стяги-

ваться к уровню глубины основного толчка и после незначительного затишья продолжился уже в нижней части сейсмоактивного слоя, ниже уровня основного толчка, расширяя площадь распространения к северу.

Механизм очага Жаланаш-Тюпского землетрясения – сдвиго-надвиговый, плоскость разрыва не вышла на поверхность (см. рис. 3, в, рис. 8). Субмеридиональная ось сжатия близгоризонтальна, ось растяжения близвертикальна. Нодальная плоскость западно-северо-западного простирания с падением к югу соответствует вытянутости изосейст балльности и распределению афтершоков вдоль этой плоскости [Aitaliev, 1981]. По этой плоскости произошла правосдвиговая подвижка с небольшой надвиговой составляющей.

Реконструкция ориентации осей главных девиаторных напряжений повторных сейсмических толчков рассматриваемого диапазона магнитуд ($1.7 \leq M \leq 4.4$) Жаланаш-Тюпского события позволяет говорить о том, что земная кора афтершоковой области, расположенная вокруг эпицентра главного землетрясения, находилась под действием близгоризонтального субмеридионального сжатия при преимущественном близвертикальном растяжении и близширотном промежуточном напряжении (рис. 8). В западной части афтершоковой области оси сжатия приобрели север-северо-восточное направление с погружением к югу, в восточной части оси сжатия северо-западной ориентации погружаются к северу, в центральной части – как к северу, так и к югу (рис. 8). Значение коэффициента Лоде – Надаи (μ_σ) меняется в достаточно широких пределах – от -0.6 до $+0.8$. Геодинамический тип напряженного состояния соответствует горизонтальному сжатию со сдвигом.

Более сильные афтершоки ($3.3 \leq M \leq 4.4$) концентрируются вокруг эпицентра главного события. Поле напряжений за счет этих сейсмических событий характеризуется близгоризонтальным субмеридиональным сжатием при растяжении, близком к субширотному. Значение углов погружения для осей растяжения меняется от 6 до 77° . Коэффициент Лоде – Надаи (μ_σ) на этой небольшой территории меняется от -0.2 до $+1.0$. Геодинамический тип напряженного состояния – горизонтальный сдвиг на западе от эпицентра главного события и горизонтальное сжатие со сдвигом – на востоке (рис. 8, второй столбец).

При сопоставлении полей напряжений слабых ($1.7 \leq M \leq 3.2$) и сильных ($3.3 \leq M \leq 4.4$) повторных событий отличие наблюдается только в ориентации осей растяжения: по сильным афтершокам оси растяжения ближе к близгоризонтальным, по слабым – к близвертикальным. Геодинамический тип напряженного состояния (по афтершокам

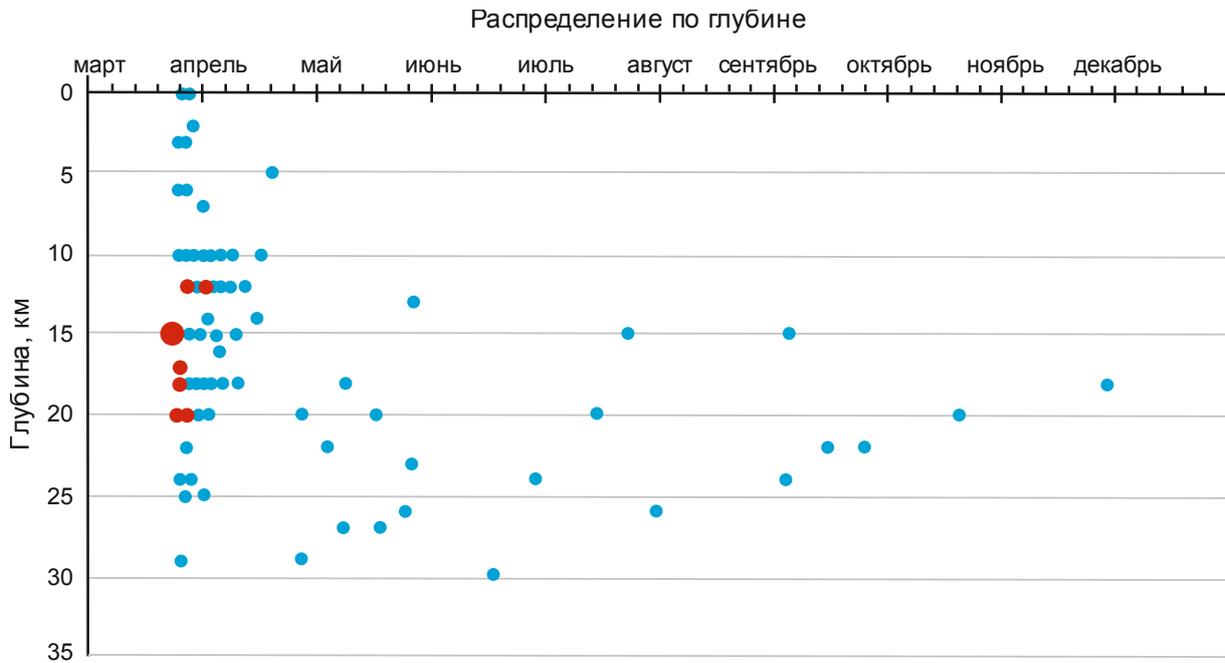


Рис. 7. Распределение афтершоков Жаланаш-Тюпского землетрясения по глубине. Красными кружками отмечены основной толчок и наиболее сильные афтершоки ($M=3.8-4.5$).

Fig. 7. Depth pattern of the aftershocks of the Zhalanash-Tyup earthquake. Red circles – the main shock and the strongest aftershocks ($M=3.8-4.5$).

$1.7 \leq M \leq 3.2$) соответствует горизонтальному сжатию для всей афтершоковой зоны. Значение коэффициента Лоде – Надаи (по афтершокам $1.7 \leq M \leq 3.2$) к востоку от эпицентра составляет $-0.2 \dots +0.6$, к западу в основном меняется от -1.0 до $+0.2$ (рис. 8).

Наблюдается согласованность в азимутальной ориентации осей P и T главного события с наиболее сильными повторными толчками, а также с региональным полем напряжений для этой территории [Rebetsky, Alekseev, 2014].

3.4. СУУСАМЫРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 19 АВГУСТА 1992 Г. ($M_s=7.3$)

Суусамырское землетрясение произошло во внутренней части Тянь-Шаня и при $M=7.3$ ощущалось в эпицентральной области интенсивностью 9–10 баллов. Глубина гипоцентра составила 25 км. Оно сопровождалось большим количеством афтершоков, которые продолжались несколько лет. Принимая во внимание то, что афтершок с $M=6.7$ незначительно отстает от основного толчка как по времени (через 1 час и 8 минут после основного толчка), так и по магнитуде (на 0.6 единицы магнитуды ниже магнитуды главного толчка), в случае Суусамырского землетрясения можно говорить о сопряженном двойном толчке [Kalmet'eva et al., 2009]. Землетрясение началось с сильного гула. Объекты на земной поверхности испытывали

вращательные движения, при этом в северо-западном и юго-восточном секторах повороты произошли по часовой стрелке, а в северо-восточном и юго-западном секторах – против часовой стрелки [Dzhanuzakov et al., 2003]. До этого события приводились многочисленные аргументы в пользу того, что внутренние районы Тянь-Шаньского орогена являются слабосейсмичными [Dzhanuzakov et al., 1977].

Механизм очага Суусамырского землетрясения взбросовый, обе возможные нодальные плоскости имеют субширотное положение (см. рис. 3, 2, рис. 9) [Muraliev, 1993; Dzhanuzakov et al., 1997; Muraliev, Iskenderov, 2015], что подтверждается субширотным простираем двух участков разрыва, вышедших на поверхность [Bogachkin et al., 1993]. Положение оси сжатия – субмеридиональное и близгоризонтальное, оси растяжения – близвертикальное. Магнитудный диапазон афтершоковой серии Суусамырского землетрясения, для которого удалось построить решения механизмов очагов, значительный ($1.7 \leq M \leq 6.7$), поэтому реконструкция полей напряжений осуществлялась для повторных толчков слабых ($1.7 \leq M \leq 2.7$), умеренных ($2.8 \leq M \leq 4.4$) и сильных ($4.5 \leq M \leq 6.7$) событий.

Восстановленные положения осей главных девиаторных напряжений сжатия по механизмам наиболее сильных афтершоков ($4.5 \leq M \leq 6.7$) (рис. 9) свидетельствуют о северо-северо-западном про-

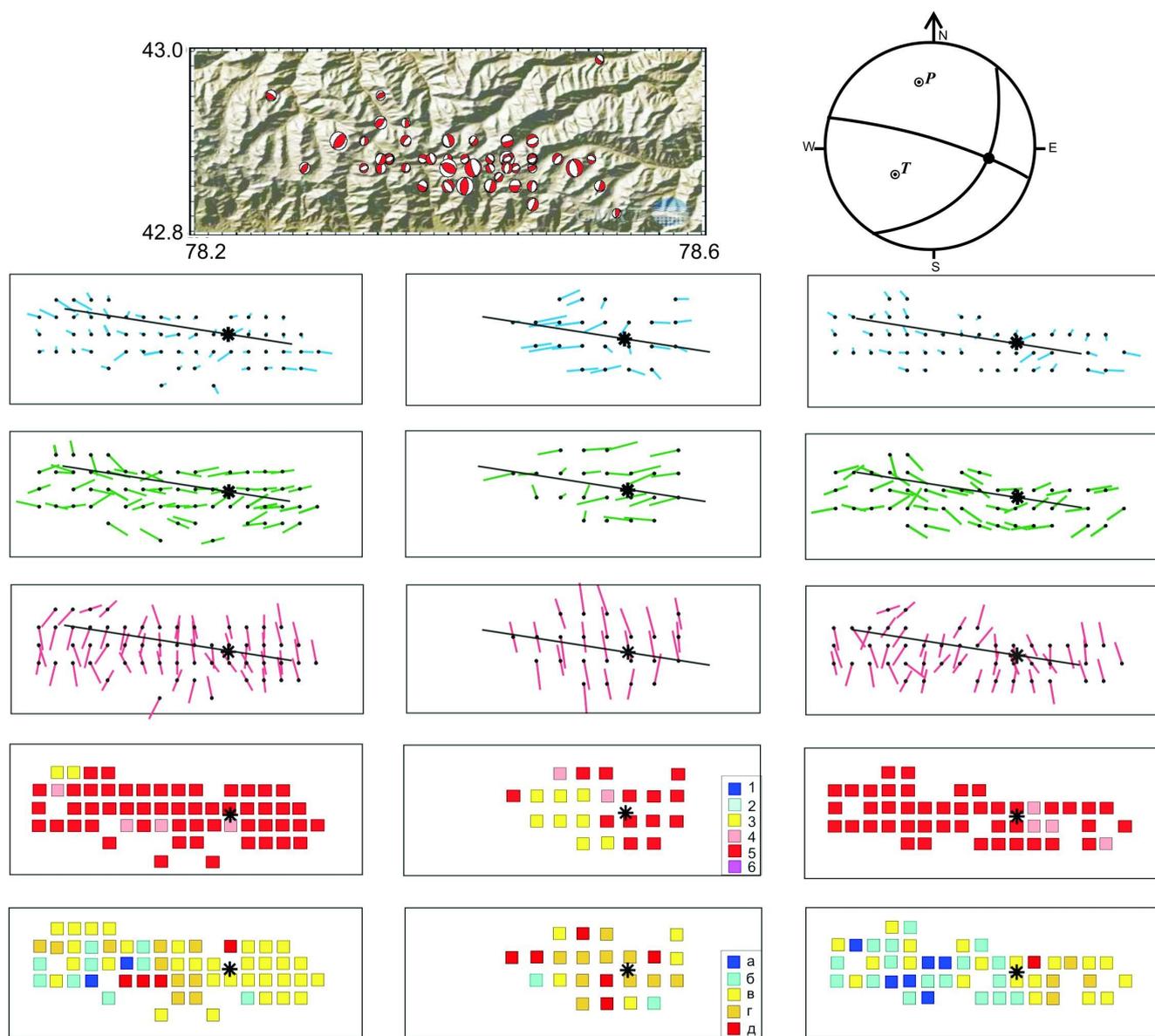


Рис. 8. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных девиаторных напряжений, восстановленных по афтершокам Жаланаш-Тюпского землетрясения 24 марта 1978 г. ($M_s=7.1$) с разными энергетическими интервалами: левый столбец – $1.7 \leq M \leq 4.4$, центральный столбец – $3.3 < M \leq 4.4$, правый столбец – $1.7 \leq M \leq 3.2$. Первый ряд – ориентация осей главных напряжений растяжения, второй ряд – ориентация осей главных промежуточных напряжений, третий ряд – ориентация осей главных напряжений сжатия. Направление погружения осей осуществляется из точки. Точка в центре линии означает близгоризонтальное положение осей напряжений. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Прямой линией схематично показан выход предполагаемой плоскости разрыва на поверхность. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. Четвертый ряд – геодинамический тип напряженного состояния: 1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – вертикальный сдвиг. Последний ряд – коэффициент Лодэ – Надаи: а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. В левом верхнем углу рисунка механизмы очагов афтершоков, в правом верхнем углу – механизм очага Жаланаш-Тюпского землетрясения, параметры которого использовались при анализе материала.

Fig. 8. Projection on the horizontal plane of the principal deviatoric stress axes reconstructed from the focal mechanisms of the aftershocks of the Zhalanash-Tyupa earthquake ($M_s=7.1$; 24 March 1978) in different energy intervals: left column – $1.7 \leq M \leq 4.4$, central column – $3.3 < M \leq 4.4$, right column – $1.7 \leq M \leq 3.2$. The orientations of the principal stress axes: row 1 – extension; row 2 – intermediate; row 3 – compression. A dip direction of each axis is from the relevant point. The point in the center of the line means the subhorizontal position of the stress axes. The same points are the centers of homogeneously deformed domains. The straight line schematically shows the assumed fault plane of the surface. Star – the epicenter of the main seismic event. Row 4 – geodynamic types of the state of stress: 1 – extension, 2 – extension – strike-slip, 3 – strike-slip, 4 – compression – strike-slip, 5 – compression, 6 – vertical strike-slip. Row 5 – Lode – Nadai coefficient: а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. Upper left corner – the focal mechanisms of the aftershocks; upper right corner – the focal mechanism of the Zhalanash-Tyupa earthquake, which parameters were used in the analysis.

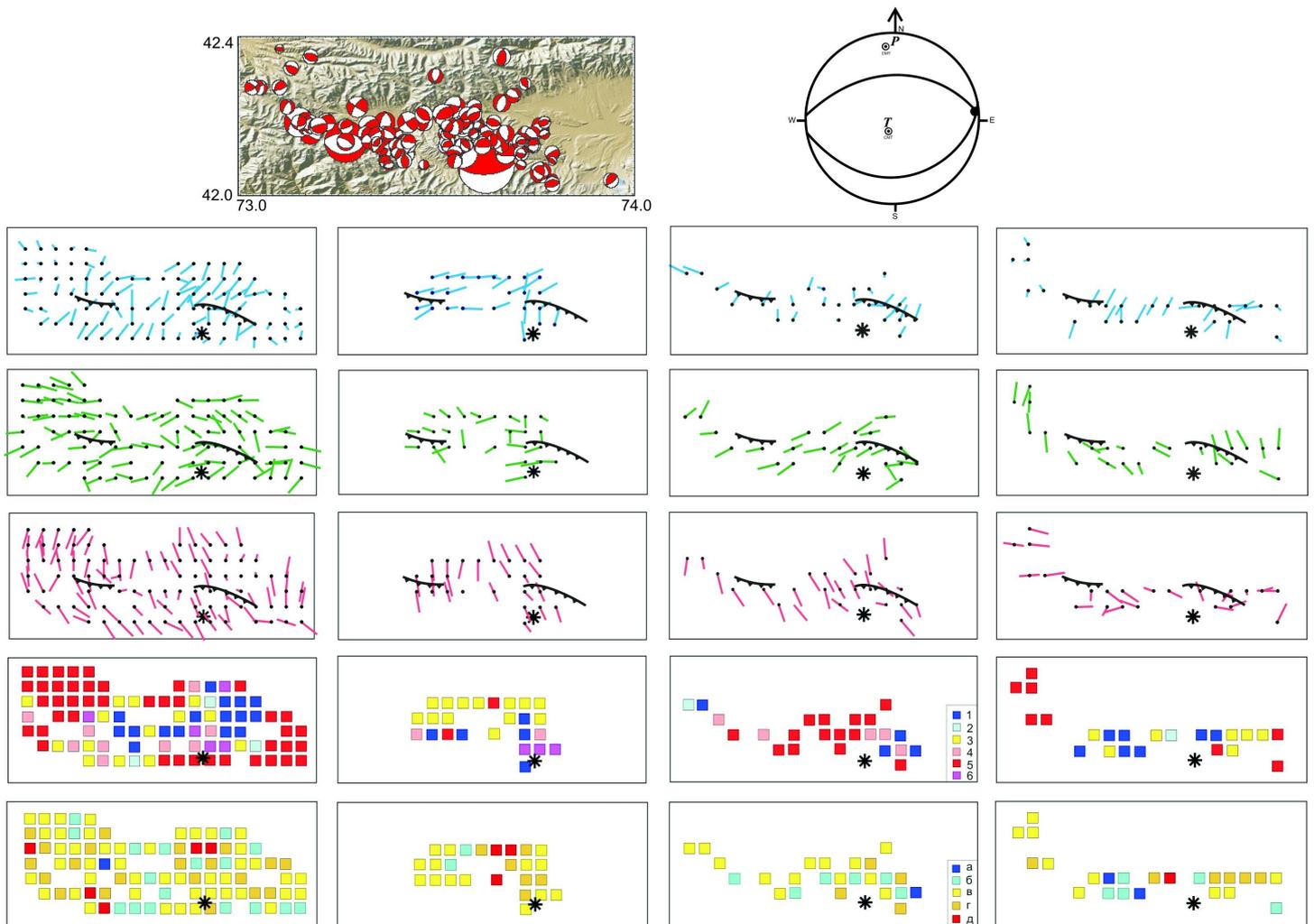


Рис. 9. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных девиаторных напряжений, восстановленных по афтершокам Суусамырского землетрясения 1992 г. с разными энергетическими интервалами: первый столбец – $1.7 \leq M \leq 6.7$, второй столбец – $4.1 \leq M \leq 6.7$, третий столбец – $2.9 \leq M \leq 4.0$, четвертый столбец – $1.7 \leq M \leq 2.8$. Первый ряд рисунков – ориентация осей главных напряжений растяжения, второй ряд – ориентация осей главных промежуточных напряжений, третий ряд – ориентация осей главных напряжений сжатия. Направление погружения осей осуществляется из точки. Точка в центре линии означает близгоризонтальное положение осей напряжения. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Двумя линиями с треугольниками показаны положения двух участков плоскости разрыва, вышедшей на поверхность [Bogachkin et al., 1993]. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. Четвертый ряд – геодинамический тип напряженного состояния: 1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – вертикальный сдвиг. Пятый ряд – коэффициент Лодэ-Надаи: а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. В левом верхнем углу рисунка – механизмы очагов афтершоков, в правом верхнем углу – механизм очага Суусамырского землетрясения, параметры которого использовались при анализе материала.

Fig. 9. Projection on the horizontal plane of the principal deviatoric stress axes reconstructed from the focal mechanisms of the aftershocks of the Suusamyrsky earthquake ($M_S=7.3$; 19 August 1992) in different energy intervals: column 1 – $1.7 \leq M \leq 6.7$, column 2 – $4.1 \leq M \leq 6.7$, column 3 – $2.9 \leq M \leq 4.0$, column 4 – $1.7 \leq M \leq 2.8$. The orientations of the principal stress axes: row 1 – extension, row 2 – intermediate, row 3 – compression. A dip direction of each axis is from the relevant point. The point in the center of the line means the subhorizontal position of the stress axes. The same points are the centers of homogeneously deformed domains. Two lines with triangles schematically show two segments of the fault plane of the surface (after [Bogachkin et al., 1993]). Star – the epicenter of the main seismic event. Row 4 – geodynamic type of the state of stress: 1 – extension, 2 – extension – strike-slip, 3 – strike-slip, 4 – compression – strike-slip, 5 – compression, 6 – vertical strike-slip. Row 5 – Lode – Nadai coefficient: а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. Upper left corner – the focal mechanisms of the aftershocks; upper right corner – the focal mechanism of the Suusamyrsky earthquake, which parameters were used in the analysis.

стирани, характерном для ориентации напряжений сжатия на территории этого района [Rebetsky, Alekseev, 2014], и соответствуют азимуту оси P главного землетрясения. Направление осей максимального растяжения меняется от субширотного на западе до субмеридионального и северо-восточного на востоке и лишь в некоторых частях афтершоковой области согласуется с близвертикальной осью главного землетрясения (рис. 9). Присутствуют все геодинамические типы напряженного состояния. Значение коэффициента Лоде – Надаи (μ_σ) меняется в достаточно широких пределах: от -0.6 до $+1.0$. Реконструкция осей напряжений умеренных землетрясений ($2.8 \leq M \leq 4.4$) свидетельствует о том, что оси максимального сжатия сохраняют ориентацию, свойственную напряжениям сжатия P по более сильным повторным толчкам. Оси максимального растяжения к востоку от эпицентра главного события повторяют ориентацию оси растяжения T, полученную по сильным афтершокам; к западу направление осей растяжения достаточно хаотичное. Геодинамические типы напряженного состояния соответствуют преимущественно горизонтальному сжатию и сжатию со сдвигом. Значение коэффициента Лоде – Надаи (μ_σ) меняется в диапазоне от -0.6 до $+0.6$ (рис. 9). Результаты, полученные по слабым повторным толчкам ($1.7 \leq M \leq 2.7$), характеризуют простирание оси σ_3 в запад-северо-западном направлении к западу от эпицентра, в северо-восточном направлении – к востоку от эпицентра главного сейсмического события. Преимущественная ориентация напряжений максимального растяжения (σ_1) – северо-восточная. В этом случае геодинамический тип напряженного состояния в центре эпицентральной области – горизонтальное растяжение и сдвиг, по окраинам – горизонтальное сжатие. Значение коэффициента Лоде – Надаи (μ_σ) меняется в диапазоне от -1.0 до $+0.6$ (рис. 9). Поле напряжений, построенное по всему имеющемуся диапазону магнитуд ($1.7 \leq M \leq 6.7$), – неоднородное: к северо-востоку от плоскости разрыва оси сжатия практически близвертикальны, на остальной территории – близгоризонтальны СЗ направления, на северо-западной окраине – субмеридиональны. Оси максимального растяжения, восстановленные по повторным сейсмическим толчкам и расположенные на краях разрыва главного землетрясения, – близвертикальные, в центральной части – близгоризонтальные СВ ориентации (рис. 9).

3.5. Нуринское землетрясение 5 октября 2008 г. ($M_s=6.9$)

Нуринское землетрясение произошло в восточном сегменте Алайской долины. В это время в районе Алайской долины находилось несколько временных станций Центра исследования Земли Гер-

мании (GFZ), оснащенных цифровой широкополосной аппаратурой с GPS-привязкой по времени. Это позволило достаточно надежно определить местоположение и глубины залегания гипоцентров основного толчка и афтершоков. Гипоцентр основного толчка располагается на глубине 10 км в районе наибольшего скопления афтершоков, образовавших дугообразную полосу широтного и восток-северо-восточного простирания шириной 15–20 км [Abdrakhmatov et al., 2014]. Самый глубокий афтершок произошел на глубине около 20 км. При перемещении афтершоков в северо-западном направлении глубина их гипоцентров постепенно уменьшалась [Zubovich et al., 2009]. Все последующие афтершоки происходили северо-западнее их. Всего к концу 2008 г. было зарегистрировано более тысячи афтершоков, из которых 420 были энергетического класса $K \geq 8.6$ ($M=2.5$). Афтершоковый процесс сначала распространился на всю толщу сейсмоактивного слоя (рис. 10), затем постепенно гипоцентры перемещались к поверхности, и примерно через месяц они происходили только выше уровня главного толчка [Abdrakhmatov et al., 2014].

Механизм очага Нуринского события – надвиговый. Обе возможные плоскости разрыва соответствуют структурному плану и близки к широтному простиранию Дарваз-Каракульского разлома. Близгоризонтальная ось сжатия имеет субмеридиональное положение, ось растяжения – близвертикальна (см. рис. 3, д).

Оси главного девиаторного напряжения сжатия, восстановленные за счет повторных сейсмических толчков Нуринского землетрясения разных энергетических диапазонов ($3.5 < M \leq 4.8$; $3.0 < M \leq 3.5$; $2.5 \leq M \leq 3.0$), сохраняют северо-западную ориентацию и больше соответствуют ориентации оси P в очаге главного события по данным [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017] (см. рис. 3, д, штриховая линия нодальных плоскостей). Преобладающее падение осей максимального сжатия происходит к северо-западу. Оси максимального растяжения, расположенные к востоку от эпицентра главного землетрясения, – субширотны ($3.6 \leq M \leq 4.8$), к западу – преимущественно северо-восточной ориентации (рис. 11). Положение осей растяжения не всегда согласуется с близвертикальной ориентацией оси T механизма главного землетрясения (см. рис. 3, д). Для следующего диапазона магнитуд ($3.0 < M \leq 3.5$) азимутальная ориентация осей максимального растяжения меняется от северо-восточной на востоке до северо-западной на юге, но также наблюдается и близширотное простирание на западе. Для более слабых событий ($2.5 \leq M \leq 3.0$) азимутальное положение осей растяжения более стабильное – близширотное. Геодинамический тип напряженного состояния по более

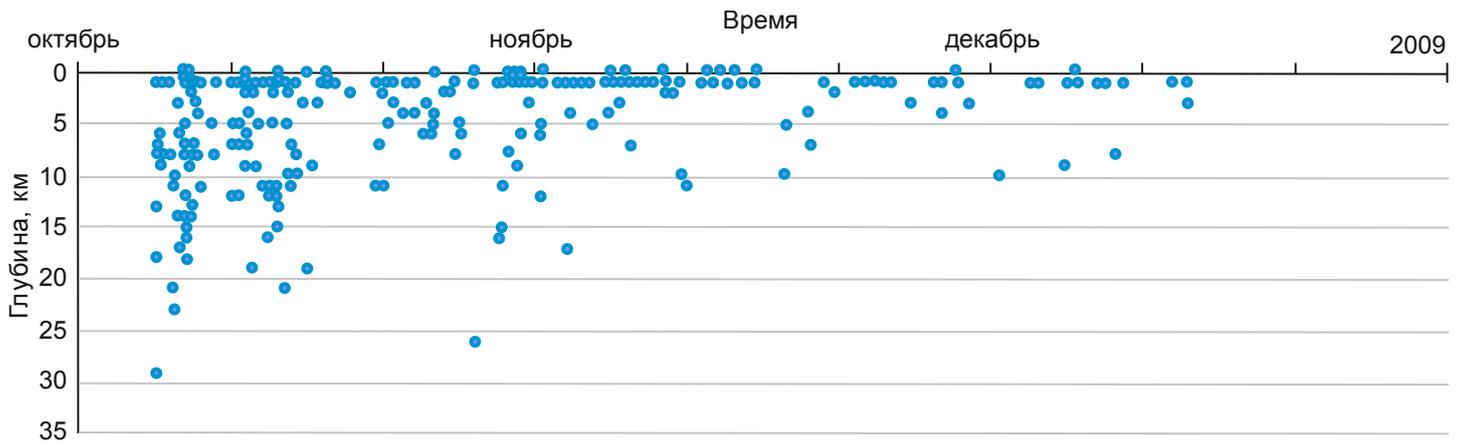


Рис. 10. Изменение глубины афтершоков Нурина землетрясения во времени [Dzhanuzakov, Shukurova, 2014].

Fig. 10. Changes in the depth of the aftershocks of the Nura earthquake in time [Dzhanuzakov, Shukurova, 2014].

сильным афтершокам ($3.5 < M \leq 4.8$) – вертикальный сдвиг, горизонтальное сжатие и сжатие со сдвигом, на юге и востоке присутствует горизонтальное растяжение и растяжение со сдвигом (рис. 11); по афтершокам умеренной силы ($3.0 < M \leq 3.5$) – вертикальный сдвиг, горизонтальное сжатие и сжатие со сдвигом, по самым слабым ($2.5 \leq M \leq 3.0$) – горизонтальный сдвиг и горизонтальное сжатие со сдвигом. Коэффициент Лодэ – Надаи принимает преимущественно значения от -0.6 до $+0.6$ ($3.5 < M \leq 4.8$), от -0.6 до $+1.0$ ($3.0 < M \leq 3.5$) и от -0.6 до $+0.6$ ($2.5 \leq M \leq 3.0$) (рис. 11).

Оси максимального сжатия, восстановленные по афтершокам всего диапазона магнитуд ($2.5 \leq M \leq 4.8$), имеют преимущественно СЗ ориентацию, меняя простирание на западе и юге. Разброс в ориентации осей максимального растяжения значительный (рис. 11, первый столбец).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами были рассмотрены пять сильных землетрясений Тянь-Шаня близкого энергетического уровня ($M=6.8-7.3$). Решения механизмов очагов главных сейсмических событий показывают, что все они произошли под действием субмеридионального близгоризонтального сжатия, в соответствии с региональным полем упругих напряжений Земли [Balakina et al., 1972; Zoback, 1992; Kuchay, Bushenkova, 2009; Rebetsky et al., 2012; Rebetsky, Alekseev, 2014]. Только для Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения, наиболее слабого из рассмотренных, азимут простирания оси Р составляет 330° , для всех остальных землетрясений – $350-355^\circ$ (см. рис. 3). Решения механизмов главных

землетрясений согласуются с восстановленными полями напряжений по очагам сильных повторных толчков. Но по мере уменьшения магнитуды афтершоков ориентация осей напряжений, восстановленная по ним, становится все менее упорядоченной.

Достаточно часто наиболее сильные афтершоки происходят вблизи главного сейсмического толчка в первые дни афтершоковой деятельности, обозначая своими эпицентрами некоторую область пространства. В нашем случае сильные землетрясения сопровождались афтершоками, большая часть которых локализована к западу от эпицентров главных событий. Исключение составляет Нурина землетрясение, у которого значительная часть афтершоков произошла северо-восточнее эпицентра.

Нужно отметить, что афтершоковая активность лишь некоторое время концентрируется вблизи главного толчка и плоскости разрыва. Через некоторое время эпицентры афтершоков начинают расплзаться в пространстве. Очевидно, что это события более низкого энергетического класса. Для двух землетрясений (Жаланаш-Тюпского и Нурина) данные позволили проследить распределение гипоцентров афтершоков во времени. Оказалось, что в первые часы процесс разрывообразования захватывает всю толщу сейсмоактивного слоя, затем стягивается к местоположению гипоцентра главного толчка (см. рис. 7). После этого сейсмические события происходят лишь на одном глубинном уровне: при Жаланаш-Тюпском землетрясении повторные толчки зарегистрированы только в слое ниже гипоцентра главного толчка; при Нурина землетрясении наоборот – только выше гипоцентра основного толчка (см. рис. 10). Такая особенность может быть связана с разли-

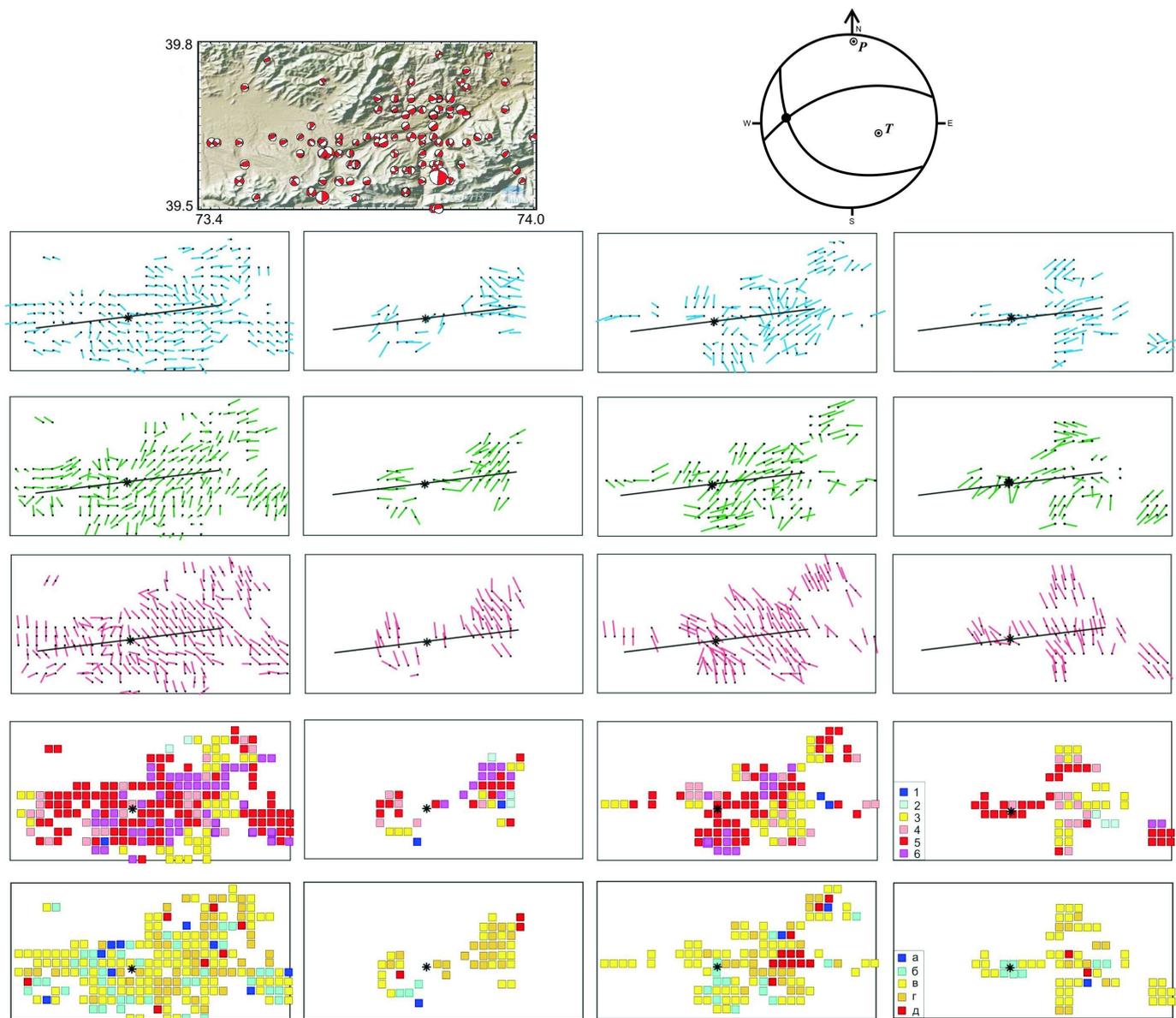


Рис. 11. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных девиаторных напряжений, восстановленных по афтершокам Нурина землетрясения с разными энергетическими интервалами: первый столбец – $2.5 \leq M \leq 4.6$, второй столбец – $3.6 \leq M \leq 4.6$, третий столбец – $3.1 \leq M \leq 3.5$, четвертый столбец – $2.5 \leq M \leq 3.0$. Первый ряд – ориентация осей главных напряжений растяжения, второй ряд – ориентация осей главных промежуточных напряжений, третий ряд – ориентация осей главных напряжений сжатия. Направление погружения осей осуществляется из точки. Точка в центре линии означает близгоризонтальное положение осей напряжения. Эти же точки являются центрами однородно деформирующихся доменов. Прямыми линиями схематично показаны предполагаемые плоскости разрыва. Звездочкой отмечен эпицентр главного события. Четвертый ряд – геодинамический тип напряженного состояния: 1 – растяжение, 2 – растяжение-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – сжатие-сдвиг, 5 – сжатие, 6 – вертикальный сдвиг. Пятый ряд – коэффициент Лодэ – Надаи: а – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. В левом верхнем углу показаны механизмы очагов афтершоков, в правом верхнем углу – механизм очага Нурина землетрясения, параметры которого использовались при анализе материала.

Fig. 11. Projection on the horizontal plane of the principal deviatoric stress axes reconstructed from the focal mechanisms of the aftershocks of the Nura earthquake ($M_S=6.9$; 05 October 2008) in different energy intervals: column 1 – $2.5 \leq M \leq 4.6$, column 2 – $3.6 \leq M \leq 4.6$, column 3 – $3.1 \leq M \leq 3.5$, column 4 – $2.5 \leq M \leq 3.0$. The orientations of the principal stress axes: row 1 – extension, row 2 – intermediate, row 3 – compression. A dip direction of each axis is from the relevant point. The point in the center of the line means the subhorizontal position of the stress axes. The same points are the centers of homogeneously deformed domains. Straight lines schematically show the assumed fault planes. Star – the epicenter of the main seismic event. Row 4 – geodynamic type of the state of stress: 1 – extension, 2 – extension – strike-slip, 3 – strike-slip, 4 – compression – strike-slip, 5 – compression, 6 – vertical strike-slip. Row 5 – Lode – Nadai coefficient: a – $(-1.0 \dots -0.6)$, б – $(-0.6 \dots -0.2)$, в – $(-0.2 \dots +0.2)$, г – $(+0.2 \dots +0.6)$, д – $(+0.6 \dots +1.0)$. Upper left corner – the focal mechanisms of the aftershocks; upper right corner – the focal mechanism of the Nura earthquake, which parameters were used in the analysis.

нием механизмов очагов главных событий. При сдвиге вдоль простирания разрыва с небольшой надвиговой составляющей (Жаланаш-Тюпское землетрясение) большому воздействию подвергаются глубокие слои, при надвиге (Нуринское землетрясение) – поверхностные.

Рассмотренные материалы позволяют сделать предположение, что афтершоковая деятельность сильных землетрясений состоит из двух этапов. Первый этап, состоящий из главного толчка и первых сильных афтершоков, заключается в образовании разрыва и связан с высвобождением некоторой части региональных напряжений. Второй этап представляет собой перераспределение напряжений на локальном уровне, вызванное высвобождением некоторой доли локальных напряжений.

Наиболее отчетливо это можно проследить на примере Дараут-Курганского (Алайского) землетрясения, когда через десять дней после главного толчка эпицентры землетрясений начинают расщепляться, а решения механизмов их очагов показывают переориентацию осей Р и Т (для наиболее слабых из рассмотренных афтершоков).

Очевидно, что реальность всегда намного сложнее и разнообразнее, чем любая схема. Рассмотренные нами сильные землетрясения расположены в районах, занимающих структурное положение разной сложности. Например, районы очагов Мар-

кансуйского и Нуринского землетрясений гораздо сложнее, чем район Жаланаш-Тюпского землетрясения. Тем не менее проведенное исследование позволяет сделать вполне определенные выводы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение сильных землетрясений с $M \geq 6.8$ на Тянь-Шане связано с высвобождением региональных напряжений Земли. Для рассматриваемой территории Тянь-Шаня они соответствуют субмеридиальному и север-северо-западному горизонтальному сжатию. Поля напряжений, полученные за счет сильных афтершоков, являются наиболее однородными. По мере уменьшения магнитуды повторных сейсмических толчков ориентация осей напряжений, восстановленная по ним, становится все менее упорядоченной. Несоосность в ориентации главных осей напряжений, полученных за счет механизмов афтершоков разных магнитуд, говорит об отсутствии подобия поля напряжений разных масштабных уровней.

Основная масса афтершоков происходит к западу от эпицентра сильных землетрясений. Исключение составляет Нуринское землетрясение, у которого часть афтершоков произошла восточнее эпицентра.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Abdrakhmatov K.E., Omuraliev M., Ormukov Ch.*, 2014. The Nura earthquake of October 5, 2008 ($K=15.4$, $M_w=6.7$, $I_0=8$) (Kyrgyzstan). In: Earthquakes of Northern Eurasia in 2008. GS RAS, Obninsk, p. 408–416 (in Russian) [*Абдрахматов К.Е., Омуралиев М., Ормуков Ч.* Землетрясение Нура 5 октября 2008 г. с $K=15.4$, $M_w=6.7$, $I_0=8$ (Кыргызстан) // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 408–416].
- Abdyraeva B.S., Muraliev A.M., Maldybaeva M.B., Zholbulakova A.*, 2014. Group mechanisms of the aftershocks of the Nura earthquake In: Earthquakes of Northern Eurasia in 2008. GS RAS, Obninsk, p. 417–420 (in Russian) [*Абдыраева Б.С., Муралиев А.М., Малдыбаева М.Б., Жолбулакова А.* Групповые механизмы афтершоков землетрясения Нура // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 417–420].
- Aitaliev Sh.M.* (Ed.), 1981. Zhalanash-Tyup Earthquake of March 25, 1978. Nauka, Alma-Ata, 136 p. (in Russian) [*Жаланаш-Тюпское землетрясение 25 марта 1978 года / Ред. Ш.М. Айталиев.* Алма-Ата: Наука, 1981. 136 с.].
- Balakina L.M., Vvedenskaya A.V., Golubeva N.V., Misharina L.A., Shirokova E.I.*, 1972. The Elastic Stress Field of the Earth and Earthquake Focal Mechanisms. Nauka, Moscow, 186 p. (in Russian) [*Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И.* Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 186 с.].
- Balakina L.M., Zakharova A.I., Moskvina A.G., Chepkunas L.S.*, 1993. Investigation of the focal mechanisms of strong earthquakes in the crust of Northern Eurasia, 1927–1991. In: V.I. Ulomov (Ed.), Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia, Vol. 1. UIPE RAS, Moscow, p. 123–131 (in Russian) [*Балакина Л.М., Захарова А.И., Москвина А.Г., Чепкунас Л.С.* 1993. Исследование механизмов очагов сильных коровых землетрясений Северной Евразии 1927–1991 гг. // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1 / Ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1993. С. 123–131].
- Barinova A.Ya., Katok A.P., Dzhanzuzakov K.D., Sadikov F.S., Ospanov A.B.*, 1982. The Regional Catalog of Earthquakes in Central Asia and Kazakhstan. In: Earthquakes in the USSR in 1978. Nauka, Moscow, 232 p. (in Russian) [*Баринова А.Я., Каток А.П., Джанузакوف К.Д., Садиков Ф.С., Оспанов А.Б.* Региональный каталог землетрясений Средней Азии и Казахстана // Землетрясения в СССР в 1978 году. М.: Наука, 1982. 232 с.].
- Bogachkin B.M., Pletnev K.G., Rogozhin E.A.*, 1993. The 1992 Suusamyr earthquake: the materials of geological and seismological studies in the near zone. In: V.I. Ulomov (Ed.), Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Vol. 1. UIPE RAS, Moscow, p. 143–147 (in Russian) [*Богачкин Б.М., Плетнев К.Г., Рогожин Е.А.* Суусамырское

- землетрясение 1992 г.: материалы геологического и сейсмологического изучения в ближней зоне. // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1 / Ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1993. С. 143–147].
- Dzhanuzakov K.D., Ilyasov B.I., Knauf V.I., Korolev V.G., Khristov E.V., Chedia O.K., 1977. Seismic Zoning of the Kirghiz SSR. Explanatory Note to the New Map of Seismic Zoning of Kyrgyzstan, Scale 1: 2500000. Ilim, Frunze (in Russian) [Джанузаков К.Д., Ильясов Б.И., Кнауф В.И., Королев В.Г., Христов Е.В., Чедия О.К. Сейсмическое районирование Киргизской ССР. Объяснительная записка к новой карте сейсмического районирования Киргизии масштаба 1:2500000. Фрунзе: Илим, 1977].
- Dzhanuzakov K.D., Ilyasov B.I., Muraliev A.M., Yudakhin F.N., 1997. The Suusamyр earthquake of August 19, 1992. In: Earthquakes of Northern Eurasia in 1992. Geoinformmark, Moscow, p. 49–54 (in Russian) [Джанузаков К.Д., Ильясов Б., Муралиев А.М., Юдахин Ф.Н. Суусамырское землетрясение 19 августа 1992 года // Землетрясения Северной Евразии в 1992 году. Москва: Геоинформмарк, 1997. С. 49–54].
- Dzhanuzakov K.D., Muraliev A.M., Shukurova I.B., Kalmykova N.A., Kholikova M.A., 2014. Central Asia. In: Earthquakes of Northern Eurasia in 2008. GS RAS, Obninsk, p. 119–127 (in Russian) [Джанузаков К.Д., Муралиев А.М., Шукурова И.Б., Калмыкова Н.А., Холикова М.А. Центральная Азия // Землетрясения Северной Евразии в 2008 году. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 119–127].
- Dzhanuzakov K.D., Omuraliev M., Omuralieva A., Ilyasov B.I., Grebennikova V.V., 2003. Strong Earthquakes. Ilim, Bishkek, 215 p. (in Russian) [Джанузаков К.Д., Омуралиев М., Омуралиева А., Ильясов Б.И., Гребенникова В.В. Сильные землетрясения. Бишкек: Илим, 2003. 215 с.].
- Dzhanuzakov K.D., Shukurova I.B., 2014. Aftershocks of the Nura earthquake of October 5, 2008 ($K_R=15.4$, $M_w=6.7$, $I_0=8$) (Kyrgyzstan) in 2008–2010 ($K_R=5.7-14.5$) ($N=2611$). Appendix on CD. In: Earthquakes of Northern Eurasia in 2008. GS RAS, Obninsk (in Russian) [Джанузаков К.Д., Шукурова И.Б. Афтершоки землетрясения Нура 5 октября 2008 г. с $K_R=15.4$, $M_w=6.7$, $I_0=8$ (Кыргызстан) за 2008–2010 гг. с $K_R=5.7-14.5$ ($N=2611$). Приложение на CD // Землетрясения Северной Евразии в 2008 году. Обнинск: ГС РАН, 2014].
- International Seismological Centre, 2017. On-line Bulletin. Thatcham, United Kingdom. Available from: <http://www.isc.ac.uk> (last accessed November 13, 2017).
- Kalmet'eva Z.A., Mikolaichuk A.V., Moldobekov B.D., Meleshko A.V., Zhantaev M.M., Zubovich A.V., 2009. Atlas of Earthquakes in Kyrgyzstan. Central-Asian Institute for Applied Geosciences, Bishkek, 73 p. (in Russian) [Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д., Мелешко А.В., Жантаев М.М., Zubovich A.V. Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. 73 с.].
- Kostrov V.V., 1975. Mechanics of Tectonic Earthquake Source. Nauka, Moscow, 176 p. (in Russian) [Костров В.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.].
- Kuchai O.A., Muraliev A.M., Abdrahmatov K.E., Delvaux D., Duchkov A.D., 2002. The 1992 Suusamyр earthquake and the aftershock strain field. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 43 (11), 1038–1048.
- Kuchay O.A., 2012. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (1), 59–68 (in Russian) [Кучай О.А. Особенности поля напряжений афтершоковых процессов землетрясений Алтае-Саянской горной области // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 1. С. 59–68]. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-1-0062>.
- Kuchay O.A., 2013. The stress fields of aftershock sequences in the transition zone from the Pamirs to the Tien Shan. In: Subsoil use. Mining. New directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology. Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Vol. 2, p. 160–164 (in Russian) [Кучай О.А. Поля напряжений афтершоковых последовательностей в зоне перехода от Памира к Тянь-Шаню // Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. С. 160–164].
- Kuchay O.A., Bushenkova N.A., 2009. Earthquake focal mechanisms in Central Asia. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 12 (1), 17–24 (in Russian) [Кучай О.А., Бушенкова О.А. Механизмы очагов землетрясений Центральной Азии // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 7–24].
- Kuchay O.A., Kozina M.E., Kalmet'eva Z.A., 2015. Stress fields revealed by aftershock sequences in Tien-Shan. In: Subsoil use. Mining. New directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology. Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Vol. 2, p. 130–135 (in Russian) [Кучай О.А., Козина М.Е., Кальметьева З.А. Поля напряжений по афтершоковым последовательностям на Тянь-Шане // Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология. Новосибирск: СГГА, 2015. Т. 2. С. 130–135].
- Leskova E.V., Emanov A.A., 2011. The stress-strain state of the Chuya-Kurai zone (Gorny Altai). In: Modern tectonics. Methods and results. Materials of the second youth school-seminar. IPE RAS, Moscow, Vol. 1, p. 154–160 (in Russian) [Лескова Е.В., Еманов А.А. Напряженно-деформированное состояние Чуйско-Курайской зоны (Горный Алтай) // Современная тектоника. Методы и результаты: Материалы второй молодежной школы-семинара. М.: ИФЗ РАН, 2011. Т. 1. С. 154–160].
- Leskova E.V., Emanov A.A., 2014. Some properties of the hierarchical model reproducing the stress state of the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50 (3), 393–402. <https://doi.org/10.1134/S1069351314030057>.

- Mikhailova P.S., 1980. Aftershocks of the 1978 Alai earthquake. In: Earthquakes of Central Asia and Kazakhstan. Donish, Dushanbe, p. 25–45 (in Russian) [Михайлова П.С. Афтершоки Алайского землетрясения 1978 г. // Землетрясения Средней Азии и Казахстана. Душанбе: Дониш, 1980. С. 25–45].
- Muraliev A.M., 1993. Focal mechanism of the Suusamyr earthquake of August 19, 1992. In: Seismological observations in Kyrgyzstan. Ilim, Bishkek, p. 64–68 (in Russian) [Муралиев А.М. Механизм очага Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 года // Сейсмологические наблюдения в Кыргызстане. Бишкек: Илим, 1993. С. 64–68].
- Muraliev A.M., Iskenderov S.A., 2015. On the method for detection of aftershocks of strong earthquakes in Tien Shan. *Bulletin of the Institute of Seismology, NAS Kyrgyzstan* (1), 80–87 (in Russian) [Муралиев А.М., Искендеров С.А. О методике выделения афтершоков сильных землетрясений Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2015. № 1. С. 80–87].
- Muraliev A.M., Moldybaeva M.B., Abdyaeva B., Poleshko N.N., Kaymachnikova N.I., 2014. Catalog of earthquake focal mechanisms of Central Asia for 2008. Appendix on CD. In: Earthquakes of Northern Eurasia in 2008. GS RAS, Obninsk (in Russian) [Муралиев А.М., Молдыбаева М.Б., Абдыраева Б., Полешко Н.Н., Каймачникова Н.И. Каталог механизмов очагов землетрясений Центральной Азии за 2008 г. Приложение на CD // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. Обнинск: ГС РАН, 2014].
- Omar Kh.M., Rebsky Yu.L., Arefiev S.S., 2011. Mechanisms of aftershocks of the 2003 Altai earthquake and the state of stress in its focal area for the period of 2004–2005. In: Modern tectonics. Methods and results. Materials of the second youth school-seminar. IPE RAS, Moscow, Vol. 1, p. 207–214 (in Russian) [Омар Х.М., Ребецкий Ю.Л., Арефьев С.С. Механизмы афтершоков Алтайского землетрясения 2003 г. и напряженное состояние его в очаговой области для периода 2004–2005 гг. // Современная тектоника. Методы и результаты: Материалы второй молодежной школы-семинара. М.: ИФЗ РАН, 2011. Т. 1. С. 207–214].
- Rautian T.G., 1960. Energy of earthquakes. In: Methods of detailed studies of seismicity. Publishing House of the USSR Acad. Sci., Moscow, p. 75–114 (in Russian) [Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 75–114].
- Rebskii Yu.L., Arefiev S.S., Nikitina E.S., 2000. Monitoring of stressed state in the aftershock region of the Spitak earthquake. *Doklady Earth Sciences* 375 (8), 1329–1334.
- Rebsky Yu.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Rock Massifs. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.].
- Rebsky Yu.L., Alekseev R.S., 2014. The field of recent tectonic stresses in Central and South-Eastern Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 257–290 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С. Поле современных тектонических напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 257–290]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0127>.
- Rebsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.E., 2012. Development of inversion methods on fault slip data: stress state in orogenes of the Central Asia. *Tectonophysics* 581, 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027>.
- Rebsky Yu.L., Marinin A.V., 2005. Reconstruction of the state of stress before and after the Sumatran earthquake of 26 December 2004. In: Active geophysical monitoring of the Earth's lithosphere. Materials of the 2nd international symposium. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 407–411 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Реконструкция напряженного состояния до и после Суматранского землетрясения 26.12.2004 // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Материалы 2-го международного симпозиума. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 407–411].
- Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.].
- The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017. Available from: <http://www.globalcmt.org> (last accessed November 13, 2017).
- Ulovov V.I., Fadina R.P., Katok A.P., Astafieva E.G., Shakirzhanova G.N., Dzhanzuzakvo K.D., Matasova L.M., Ospanov A.B., Kinyarina T.A., Iodko V.K., Dzhurav A., Yakovlev V.I., Kon'kov A.A., Kurmanalieva R.K., Mikhailova N.N., Zavalova A.V., Ulubeeva T.R., Krasnova A.F., Kasymov S.M., Nurmagambetov A., Dosymov A., Sadykov A., 1977. Earthquakes in Central Asia. In: Earthquakes in the USSR in 1974. Nauka, Moscow, p. 49–70 (in Russian) [Уловов В.И., Фадина Р.П., Каток А.П., Астафьева Е.Г., Шакиржанова Г.Н., Джанузакво К.Д., Матасова Л.М., Оспанов А.Б., Кинярина Т.А., Иодко В.К., Джурав А., Яковлев В.И., Коньков А.А., Курманалиева Р.К., Михайлова Н.Н., Завьялова А.В., Улубеева Т.Р., Краснова А.Ф., Касымов С.М., Нурмагамбетов А., Досымов А., Садыков А. Землетрясения Средней Азии // Землетрясения в СССР в 1974 г. М.: Наука, 1977. С. 49–70].
- Vvedenskaya A.V., 1969. Investigation of Stresses and Faults in Earthquake Foci by the Theory of Dislocations. Nauka, Moscow, 136 p. (in Russian) [Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].
- Zoback M.L., 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 97 (B8), 11703–11728. <https://doi.org/10.1029/92jb00132>.
- Zubovich A.V., Mikolaichuk A.V., Kalmet'eva Z.A., Mosienko O.I., 2009. Modern geodynamics of the Nura earthquake (M=6.6) (Pamir-Alai). In: Geodynamics, deep structure, and thermal field of the Earth. Interpretation of geophysical fields. The 5th scientific readings in memory of Yu.P. Bulashevich. Institute of Geophysics, Ural Branch of RAS,

Ekaterinburg, p. 195–198 (in Russian) [Зубович А.В., Миколайчук А.В., Кальметьева З.А., Мосиенко О.И. Современная геодинамика района Нурина землетрясения М=6.6 (Памиро-Алай) // Геодинамика, глубинное строение, тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2009. С. 195–198].



Кучай Ольга Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия
Тел.: +7(383)3308705; e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru

Kuchay, Olga A., Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
Tel.: +7(383)3308705; e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru



Кальметьева Зоя Арслановна, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли
720027, Бишкек, ул. Тимура Фрунзе, 73/2, Кыргызстан
Тел.: +996(312)555111; e-mail: caiaag@caiaag.kg

Kalmetyeva, Zoya A., Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
Central-Asian Institute for Applied Geosciences
73/2 Timur Frunze street, Bishkek 720027, Kyrgyzstan
Tel.: +996(312)555111; e-mail: caiaag@caiaag.kg



Козина Мария Евгеньевна, магистрант
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
Тел.: +7(383)3308705; e-mail: kozinamaria@gmail.com

Kozina, Maria E., master student
Novosibirsk National Research State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
Tel.: +7(383)3308705; e-mail: kozinamaria@gmail.com



Абдрахматов Канатбек Ермекович, докт. геол.-мин. наук, директор
Институт сейсмологии НАН КР
720060, Бишкек, мкр. Асанбай, 52/1, Кыргызстан
Тел.: +996(312)520952; e-mail: kis@mail.elkat.kg

Abdrakhmatov, Kanatbek Ye., Doctor of Geology and Mineralogy, Director
Institute of Seismology, National Academy of Sciences
52/1 Asanbai microdistrict, Bishkek 720060, Kyrgyzstan
Tel.: +996(312)520952; e-mail: kis@mail.elkat.kg