

УДК 551.243

ГЕОДИНАМИКА КАТУНСКОГО РАЗЛОМА (ГОРНЫЙ АЛТАЙ) ПО СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Татьяна Юрьевна Тверитинова¹✉, Антон Витальевич Маринин²,
Евгений Викторович Деев³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tvertat@yandex.ru

² Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; marinin@ifz.ru

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН; Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия; deev@ngs.ru

Аннотация. Методами структурно-парагенетического и катакластического анализа дизъюнктивов определены кинематические характеристики разломов, входящих в структуру активного Катунского разлома Горного Алтая. Доказано, что Катунский разлом — сдвиг, развивающийся на разных участках в транспрессивных или транстенсивных условиях. Новейшие грабены вдоль Катунского разлома формировались при сдвиговых смещениях и локально проявленной обстановке горизонтального растяжения или растяжения со сдвигом.

Ключевые слова: разрывы, грабены, зеркала скольжения, отрывы, сколы, трещины, жилы, Катунский разлом, Горный Алтай

Для цитирования: Тверитинова Т.Ю., Маринин А.В., Деев Е.В. Геодинамика Катунского разлома (Горный Алтай) по структурно-кинематическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 1. С. 46–59. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-46-59

GEODYNAMICS OF THE KATUNSKY FAULT (GORNYY ALTAI) ACCORDING TO STRUCTURAL AND KINEMATIC DATA

Tatiana Yu. Tveritinova¹✉, Anton V. Marinin², Evgeny V. Deev³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tvertat@yandex.ru

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; marinin@ifz.ru

³ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia; deev@ngs.ru

Abstract. In the Katun Fault Zone, the structural-paragenetic analysis of stress indicators and the method of cataclastic analysis of discontinuous faults have been used to determine the features of the structure of this fault and the conditions of its formation at the Late Alpine stage. It is proved that the Katun Fault Zone is the strike-slip fault that develops at different sites in transpressive or transtensive conditions. The newest grabens along the zone were formed under strike-slip fault displacements and locally manifested conditions of horizontal extension or horizontal extension with shear.

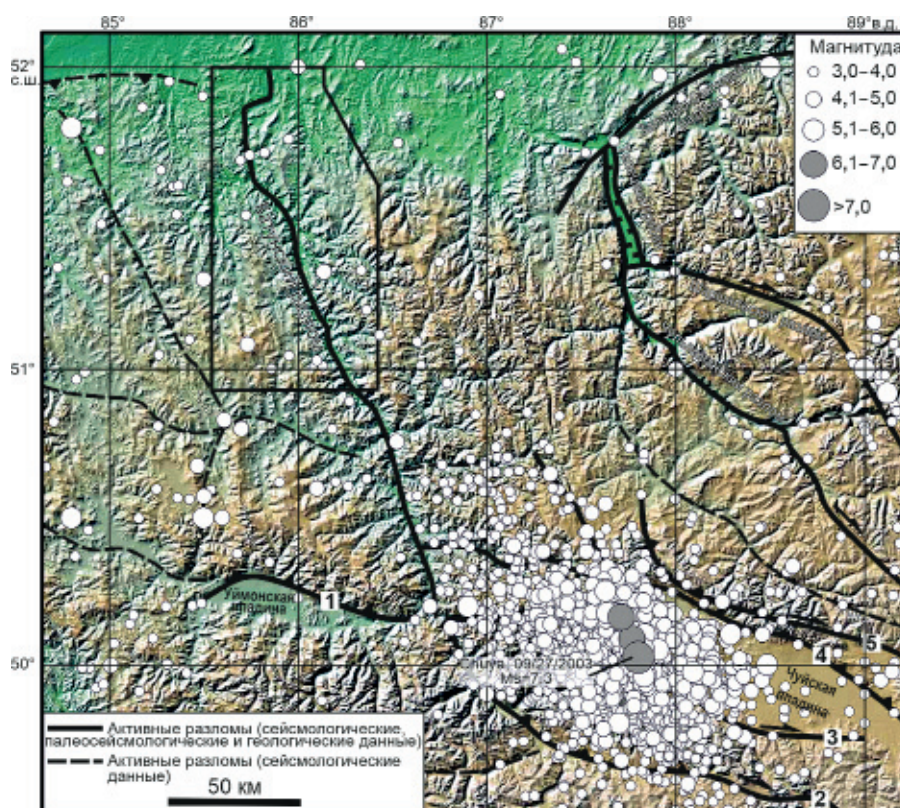
Key words: fault, graben, slickenside, tension gash, joint, crack, vein, Katun Fault, Gornyy Altai

For citation: Tveritinova T.Yu., Marinin A.V., Deev E.V. Geodynamics of the Katunsky fault (Gornyy Altai) according to structural and kinematic data. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 1: 46–59. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-46-59 (In Russ.).

Введение. Горный Алтай — каледоно-герцинское складчатое сооружение, преобразованное на неотектоническом этапе во внутриконтинентальный ороген с четко проявленной блоковой структурой и абсолютной высотой горных хребтов более 4000 м. Амплитуда относительных вертикальных перемещений небольших блоков составляет несколько десятков–сотен метров, межблоковые смещения в зонах сочленения горных хребтов и крупных внутригорных впадин достигают 3–3,5 км [Деев и др. 2012б; Неведрова и др., 2014; Русанов и др., 2017]. Средняя скорость тектонической составляющей современных движений Горного Алтая по данным космической геодезии за период 2000–2011 гг. составляет 1,2 мм/год, а перед Чуйским землетрясением 2003 г. в юго-восточной части

Горного Алтая зафиксированы аномально высокие значения скорости смещения до 3–12 мм/год. Постсейсмическая скорость движений за 2004–2012 гг. достигает 2–3 мм/год [Тимофеев и др., 2009, 2014], в эпицентральной области при этом фиксируется правосдвиговое смещение. Для большинства межблоковых границ (кайнозойских разломов) отсутствуют геолого-структурные и палеосейсмологические данные, указывающие на их активность и геодинамические обстановки формирования, направление, скорость и величину смещения по ним. Отсюда вытекает актуальность исследований — выявление геодинамических обстановок формирования таких разломов. В качестве объекта исследований нами выбрана северная часть активного Катунского разлома (рис. 1).

Рис. 1. Основные активные разломы Горного Алтая и сейсмичность Горного Алтая, по [Deev et al., 2019] с изменениями. Цифры на рисунке — разломы: 1 — Южно-Теректинский, 2 — Джазаторский, 3 — Южно-Чуйский, 4 — Курайский, 5 — Кубадринский



Геологическое строение долины р. Катунь и прилегающих территорий. Изученный нами участок долины р. Катунь расположен в средней приосевой части Бийско-Катунской зоны, выраженной выходами на поверхность поздненеопротерозойско-кембрийских островодужных комплексов между Ануйско-Чуйской зоной деформированных ордовикско-силурийских и девонских вулканогенных толщ на западе и Уйменско-Лебедским девонским рифтогенным прогибом на востоке. На исследуемой территории широко развиты позднепротерозойско-раннепалеозойские комплексы (рис. 2), связанные с развитием в Палеоазиатском океане вдоль окраины Сибирского континента Кузнецко-Алтайской островной дуги [Добрецов и др., 1995; Сафонова и др., 2004; Добрецов, Буслов, 2007; Федак и др., 2011]. Здесь, кроме островодужных образований, выделяются фрагменты офиолитовых ассоциаций, кремнисто-карбонатных чехлов океанических палеоподнятий, склоновых олистостромовых комплексов, осадочного выполнения преддуговых и задуговых бассейнов.

Древнейшие в районе — поздненеопротерозойско-кембрийские образования: кремнисто-карбонатные толщ океанических палеоподнятий, островодужные вулканогенно-осадочные и вулканические базальтовые комплексы с дайками и силлами диабазов, кремнисто-терригенно-карбонатные и туфогенные породы задуговых бассейнов. С конца среднего кембрия происходит аккреция островодужных комплексов к окраине Сибирского континента и вулканическая деятельность прекращается. Аккреция завершается коллизией Сибирского кон-

тинента с Алтае-Монгольским микроконтинентом, которая сопровождается интенсивной деформацией аккрелируемых комплексов.

В среднем-позднем кембрии–ордовике регион развивался в режиме пассивной окраины с формированием в шельфовом бассейне мелководных карбонатно-терригенных и терригенных флишидных отложений. В девоне территория Горного Алтая входила в состав активной континентальной окраины с мощным проявлением вулканизма и формированием разнофациальных осадочно-вулканогенных толщ в рифтогенных прогибах, что сопровождалось внедрением гранитоидных массивов преимущественно в консолидированных структурах их рамы.

В целом докайнозойская структура на севере изученной территории представлена сложной системой узких тектонических субмеридиональных блоков в зоне северо-северо-западного простираения, на юге — системой субпараллельных зоне блоков. В палеозойской структуре разломы субмеридионального простираения выражены взбросо-надвигами и левыми сдвигами [Добрецов и др., 1995; Добрецов, Буслов, 2007]. В районе пос. Чемал Бийско-Катунская зона косо сечется системой разломов западно-северо-западного простираения с признаками левосдвиговых смещений. Общий структурный рисунок палеозойских структур соответствует правокулискому расположению узких линзовидных, интенсивно деформированных сжатых субмеридиональных блоков в зоне северо-северо-западной ориентировки, что указывает на формирование структуры в обстановке субширотного сжатия.

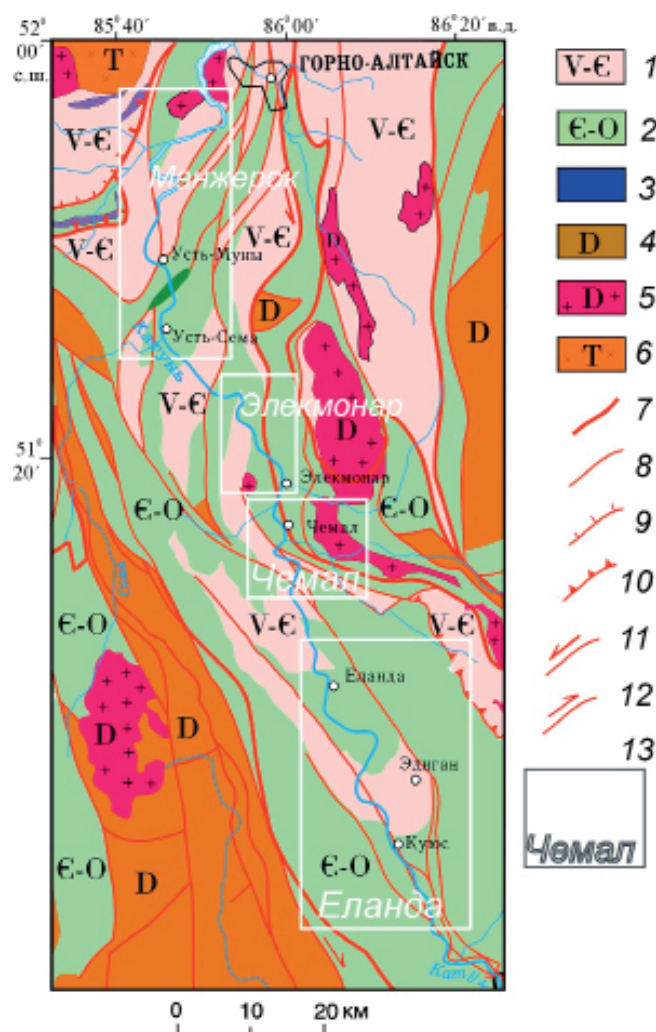


Рис. 2. Схема геологического строения долины р. Катунь с участками полевых наблюдений. Геологическая основа составлена с учетом данных [Федак и др., 2011]: 1 — верхнепротерозойско-нижнекембрийские метавулканогенно-осадочные комплексы (Бийско-Катунская островная дуга); 2 — среднекембрийско-ордовикские терригенно-карбонатные образования (пассивная окраина); 3 — позднепротерозойско-раннепалеозойские интрузивные тела основного и ультраосновного состава; 4 — девонские вулканогенно-осадочные толщи (наложенные рифтогенные прогибы); 5 — девонские гранитоидные массивы; 6 — триасовые гранитоидные массивы; 7–8 — разрывные нарушения: 7 — крупные, 8 — средние; 9–12 — кинематика разрывных нарушений: 9 — надвиги, 10 — покровы, 11 — левые сдвиги, 12 — правые сдвиги; 13 — участки структурно-кинематических наблюдений

В конце позднего палеозоя и в мезозое рассматриваемая часть Горного Алтая была областью денудации. В меловое–эоценовое время в платформенных условиях здесь развивались коры выветривания, в позднем кайнозое наступила неотектоническая стадия: территория испытала повторный орогенез, произошли активные дифференцированные тектонические движения и сформировался горный рельеф с высотой до 4,5 км. Основной этап неотектонических движений пришелся на четвертичный период [Добрецов и др., 1995; Деев и др., 20126].

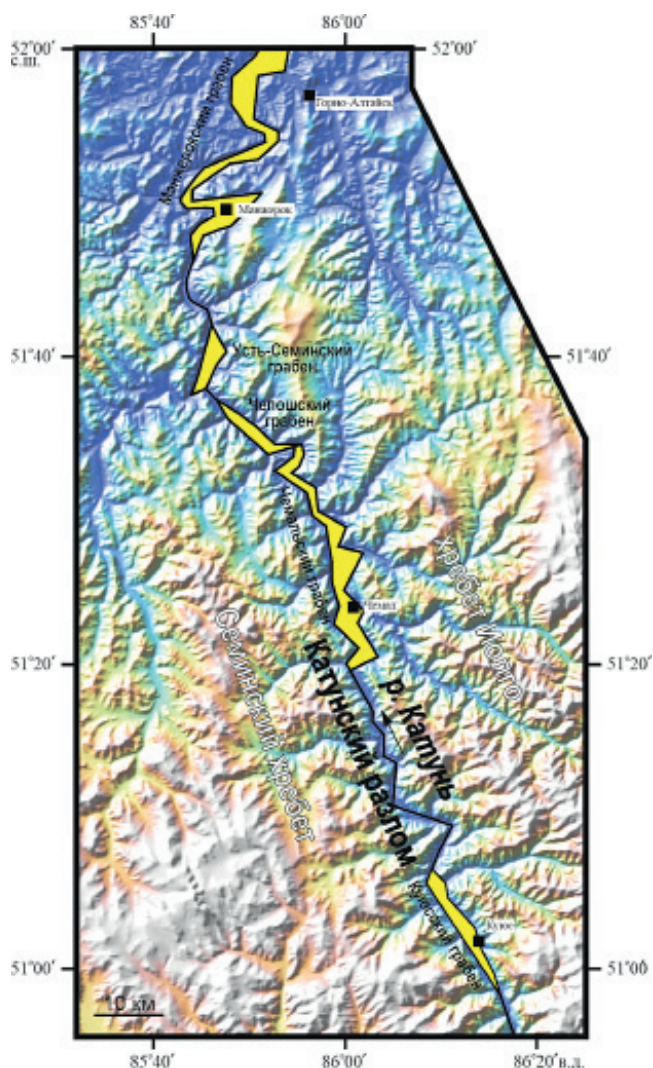


Рис. 3. Положение приразломных грабенов в северной части Катунской разломной зоны (грабены показаны желтой заливкой)

Среди кайнозойских межблоковых границ особое место занимает активный Катунский разлом субсогласно или резко несогласно секущий палеозойские комплексы и дренируемый текущей с юга на север одноименной рекой. Катунский разлом трактуется как правый сдвиг [Yin, 2010] или как раздвиг [Лукина, 1996; Трифонов и др., 2002]. Эти трактовки объединяет режим напряженного состояния коры, соответствующий субгоризонтальному растяжению со сдвигом. Он определен для южной части разлома на основе сейсмологических данных. При этом субгоризонтальные или наклонные оси растяжения имеют северо-восточную ориентировку, оси максимального сжатия — северо-западную или вертикальные [Жалковский и др., 1995; Гольдин, Кучай, 2007; Ребецкий и др., 2013].

Неоднородность строения зоны Катунского разлома отражена в распределении вдоль нее новейших грабенов, имеющих протяженность до 40 км, ширину до 3 км и выполненных комплексом четвертичных отложений, мощность которых может достигать 400 м [Деев и др., 2012a, 2015; Deev et al., 2019]. С севера на юг на исследуемом участке — это



Рис. 4. Примеры зеркал скольжения в долине р. Катунь. Слева — зеркало скольжения широтного простирания с левосдвиговой кинематикой в т. н. № 17551 (участок Чемал), справа — взбросовое зеркало скольжения в т. н. № 17539 (участок Еланда). Ручка указывает на направление относительного смещения вдоль линий штриховки отсутствующего блока (лежащего на левом фото и висячего — на правом)

Манжерокский, Усть-Семинский, Чепошский, Чемальский и Куюсский грабены (рис. 3).

Практически все оперяющие Катунский разлом дизъюнктивы дренируются крупными и мелкими правыми и левыми притоками Катунь, приустьевые части которых часто имеют невыработанный профиль равновесия, что указывает на молодые движения по разлому. С разломом связаны эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений с магнитудой до 5. В разрезах отложений, выполняющих приразломные грабены, выявлены многочисленные плейстоценовые и голоценовые вторичные сейсмогенные деформации, в том числе в Манжерокском грабене — сейсмогенные нарушения конструкций археологических объектов [Деев и др., 2012a, 2015; Deev et al., 2019].

Материалы и методы исследований. Для сбора структурно-геологической информации в северной части Катунского разлома проведены полевые тектонофизические исследования, которые сконцентрировались вдоль береговых обнажений р. Катунь на участке от пос. Рыбалка до р. Бельтир-Туюк (правый приток р. Катунь). Выделено четыре участка: Манжерок, Электронар, Чемал и Еланда (рис. 2). Основное внимание уделено сбору сведений о зеркалах скольжения, по которым возможно установить относительные перемещения их крыльев (рис. 4). Кроме того, собраны данные об ориентировке трещин отрыва, жил, зон дробления и других индикаторов деформаций.

Анализ полученных систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов и их объединение в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) проведен с использованием структурно-парагенетического метода Л.М. Расцветаева [1987]. Положение осей главных напряжений при помощи метода структурно-парагенетического анализа установлено на основе сравнения полученных стереографических диаграмм с распределением

полюсов геологических индикаторов деформаций со структурными рисунками типовых парагенетических семейств дизъюнктивных нарушений [Расцветаев, 1987].

Полевые замеры по зеркалам скольжения обрабатывали с помощью метода катакластического анализа разрывных нарушений [Ребецкий, 2007]. Метод позволяет определить количественные характеристики напряженно-деформированного состояния в точке наблюдения: положение осей главных напряжений и коэффициент Лоде–Надаи. Применяемая для расчетов компьютерная программа STRESSgeol, разработанная в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН, использует принцип разделения сколов на однородные выборки, определяющие временные фазы квазиоднородного деформирования макрообъема, для достижения максимальной суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых фаз. В некоторых точках было реконструировано по 2–3 обстановки, а в отдельных точках наблюдения выделено 4 условных этапа деформирования. Относительную хронологическую последовательность для них в настоящее время установить не удалось, хотя определенные предположения далее в статье будут сделаны.

Результаты исследований и их обсуждение. Геолого-геоморфологические условия, тектоническая трещиноватость и напряженно-деформированное состояние района исследований по участкам. Участок Манжерок расположен в северной части района (рис. 2), между пос. Усть-Сема и Рыбалка. Долина р. Катунь при зигзагообразной форме русла имеет общее субмеридиональное простирание, пересекая систему линзовидных блоков северо-северо-восточного простирания в ограниченной крупными разломами зоне северо-северо-западного простирания. В новейшей структуре (рис. 3) здесь выражено два грабена (Манжерокский и Усть-Семинский), разде-

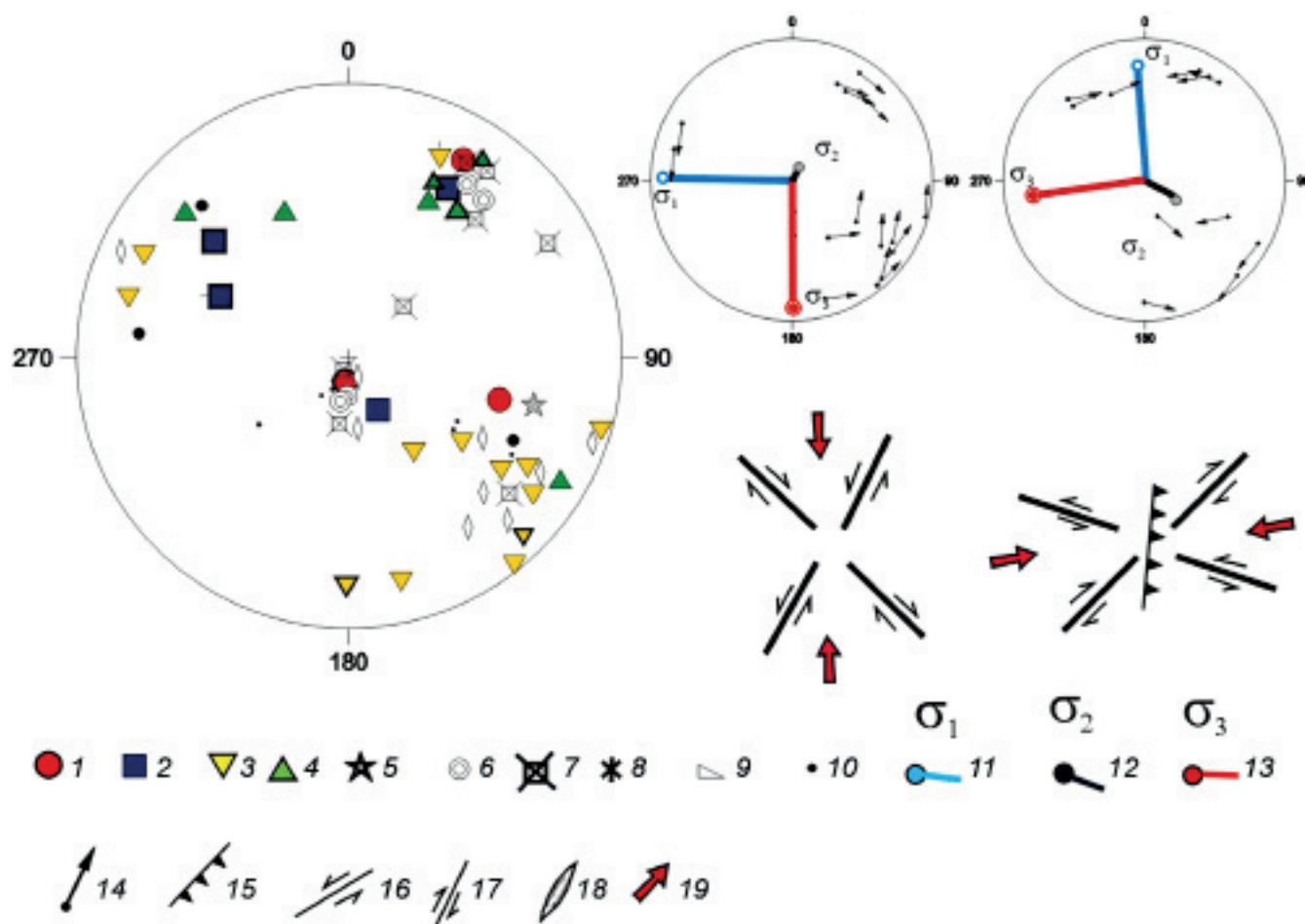


Рис. 5. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюсы плоскостей тектонических трещин разного типа (слева) и положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (справа) в т. н. № 17548 (участок Манжерок): 1–8 — полюсы тектонических трещин с преимущественным типом перемещений: 1 — взбросы, 2 — сбросы, 3 — левые сдвиги, 4 — правые сдвиги, 5 — взбросовые или сбросовые перемещения (по падению/восстанию без определения относительного направления), 6 — отрывы, 7 — жилы, 8 — стресс-стилолиты; 9 — элементы залегания слоистости (нормальное); 10 — шарнир антиклинали; 11–13 — оси главных нормальных напряжений: 11 — минимальные, 12 — промежуточные, 13 — максимальные; 14 — направление перемещения висячего блока в полюсах трещин (зеркал скольжения) со структурно-кинематическими данными, которые использованы при реконструкции; 15–18 — положение выделенных парагенезов дизъюнктивных нарушений на план-схеме: 15 — взбросы и надвиги, 16 — левые сдвиги, 17 — правые сдвиги, 18 — отрывы, 19 — направление максимального сжатия на план-схеме

Полюсы плоскостей зеркал скольжения (1–4) с высокой степенью достоверности определения кинематики относительного смещения выделены толстой линией по краям значков, внизу — основные структурные парагенезы

ленных суженным участком речной долины [Деев и др., 2012a]. Примеры результатов структурно-кинематических наблюдений по участку приведены на рис. 5 и 6. При преобладающем северо-западном простирании крутопадающей сланцеватости в толще зеленосланцево измененных осадочных пород раннепалеозойской горно-алтайской серии развиты разноориентированные трещины различного кинематического типа. Вдоль сланцеватости развиты правосдвиговые структуры (рис. 5). Вместе с левыми сдвигами вдоль поперечной сланцеватости крутопадающей системы северо-восточного простирания они образуют главный структурный парагенез меридионального сжатия–широтного растяжения. В этот же парагенез входят менее выраженные субмеридиональные (северо-северо-восточной ориентировки) сбросы и структуры

отрывного типа. Обстановки поперечного структурному плану субширотного (восточно-северо-восточного) сжатия (помимо субмеридионального сжатия) реконструируются выраженными субмеридиональными взбросами, правыми сдвигами северо-восточного и левыми сдвигами северо-западного простирания. Представлены также пологие структуры покровного типа.

В точке наблюдения (т. н.) № 17560 вулканогенно-осадочные породы базальтового состава среднекембрийской усть-семинской свиты залегают с крутым падением на восток. Для трещиноватости характерна субмеридиональная (с большим разбросом) система сдвигов и сбросов (рис. 6). Основные парагенезы минидизъюнктивов связаны с условиями северо-западного и северо-восточного сжатия в сдвиговом поле напряжений. Структур-

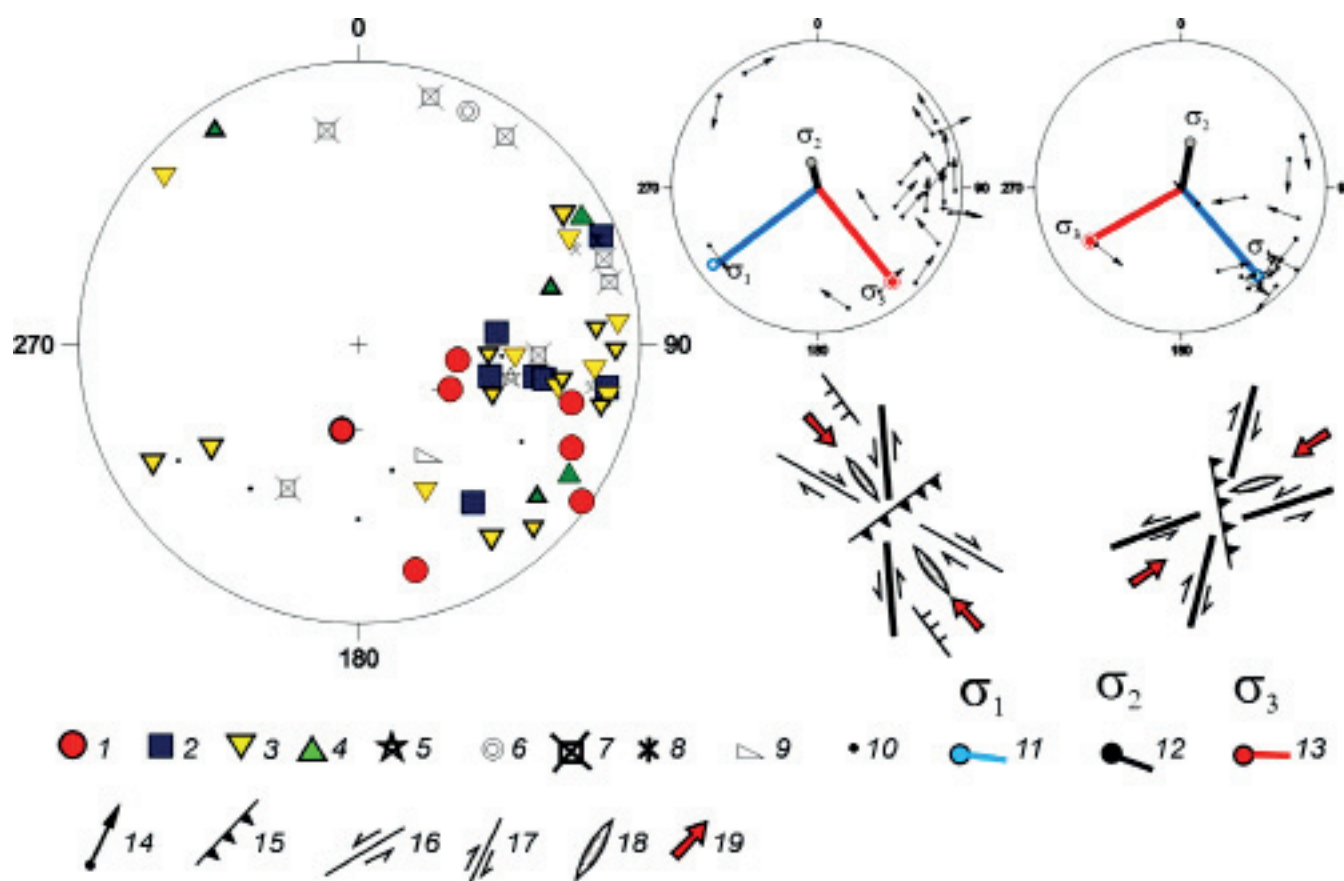


Рис. 6. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюсы плоскостей тектонических трещин разного типа (слева), и положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (справа) в т. н. № 17560 (участок Манжерок). Условные обозначения см. на рис. 5

ный парагенезис северо-западного сжатия — северо-восточного растяжения включает взбросы северо-восточного простираения, левые сдвиги субмеридионального простираения (наиболее представительная на участке система структур), а также структуры отрыва и сбросы северо-западной ориентировки. Менее представительный парагенез структур, формировавшихся в условиях северо-восточного сжатия — северо-западного растяжения: правые сдвиги субмеридионального простираения (от северо-северо-западного до северо-северо-восточного), сбросы и левые сдвиги северо-восточного простираения. Присутствуют также меридиональные системы сбросовых деформаций и находящиеся с ними в парагенезе субширотные взбросы, вместе отражающие условия меридионального сжатия и широтного растяжения.

Участок Электронар. Здесь долина р. Катунь ориентирована в северо-западном направлении и почти поперек пересекает палеозойские структуры северо-северо-восточно ориентировки (рис. 2). В современной структуре выделяется северная часть Чемальского грабена (рис. 3). Пример структурно-кинематических наблюдений и их интерпретация показаны на рис. 7. Вулканогенно-осадочные толщи нижнепалеозойской (кембрийско-нижеордовикской) горно-алтайской серии залегают с падением

на северо-восток. В них фиксируются различные структурно-кинематические системы трещиноватости: структуры отрывно-жильного типа, сдвиговые, взбросовые и сбросовые зеркала скольжения. Установлено наличие двух основных парагенетических семейств нарушений, формировавшихся в условиях субмеридионального сжатия-субширотного растяжения (наклонного) и субширотного (западно-северо-западного) сжатия и субмеридионального (северо-северо-восточного) растяжения. К первому относятся правые сдвиги вдоль сланцеватости, поперечные левые сдвиги, субширотные взбросы и субмеридиональные сбросо-раздвиговые структуры. Второе представлено левыми сдвигами северо-западного и правыми сдвигами северо-восточного простираения, а также субмеридиональными взбросами и субширотными отрывами.

Участок Чемал. На этом участке долина р. Катунь параллельна палеозойским структурам субмеридионального простираения, которые с юга ограничены зоной разломов западно-северо-западного простираения (рис. 2). В современной структуре здесь выражена южная часть Чемальского грабена (рис. 3). Для участка характерна структурная обстановка с меняющейся ориентировкой сланцеватости метаморфических толщ и развитием в них трещиноватости разного кинематического типа. Результаты

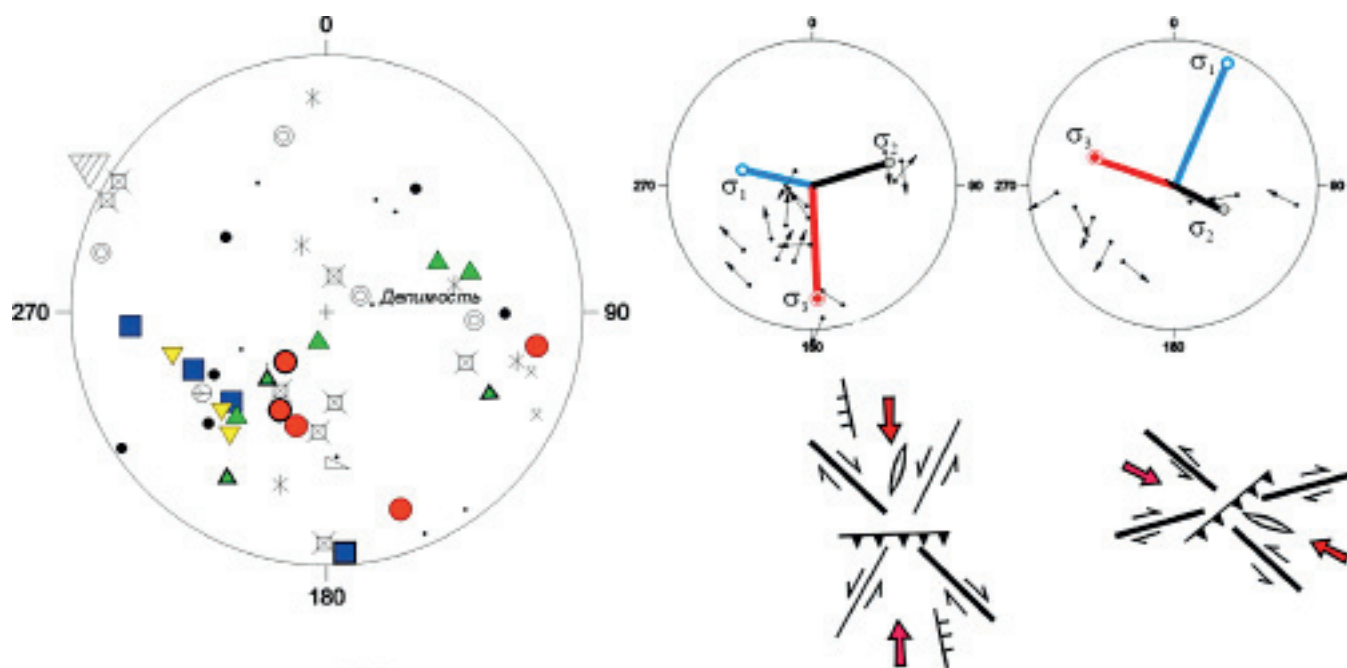


Рис. 7. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюсы плоскостей тектонических трещин разного типа (слева), и положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (справа) в т. н. № 17562 (участок Элекмонар). Условные обозначения см. на рис. 5

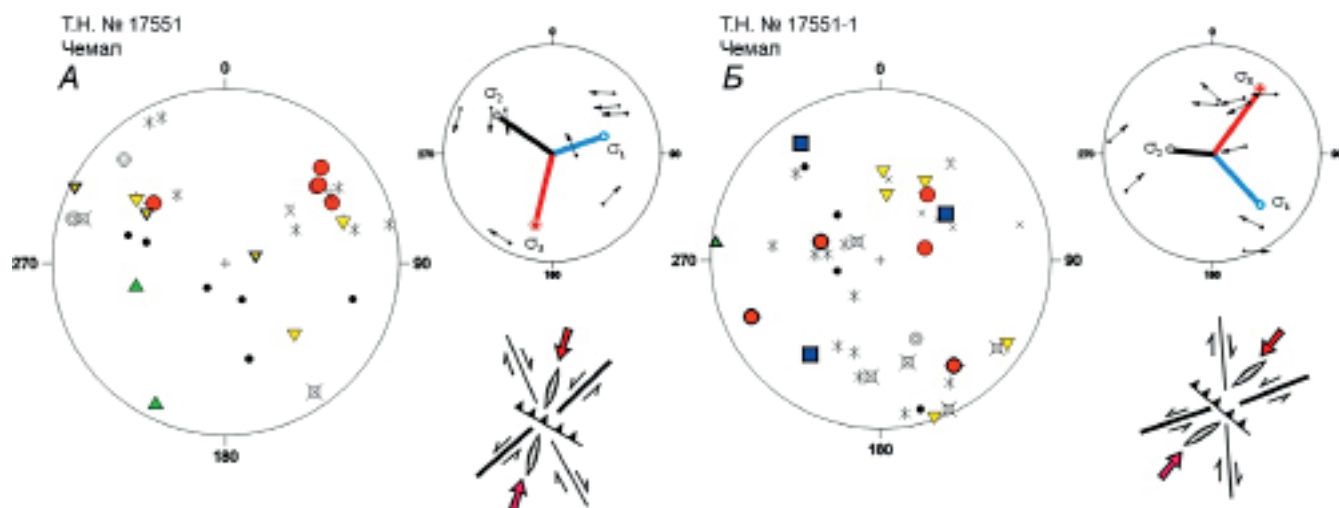


Рис. 8. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (слева), и положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (справа) в т. н. № 17551 и 17551-1 (участок Чемал). Условные обозначения см. на рис. 5

структурно-кинематических наблюдений приведены на рис. 8.

В т. н. № 17551 вулканогенно-осадочные породы раннекембрийской чемальской свиты залегают с падением сланцеватости на северо-восток. Вдоль сланцеватости отмечены структуры взбросового типа, сопровождающиеся жильным выполнением. Характерны поперечные сланцеватости крутопадающие и пологие отрывно-жильные структуры (большой пояс отрывов, поперечный сланцеватости) и трещины сколового типа. По трещинам северо-восточного простирания отмечаются левые сдвиги, северо-западного — правые. По реконструкции

напряженного состояния четко выявлены условия северо-северо-восточного сжатия и субвертикального растяжения.

В т. н. № 17551–1 падение сланцеватости северо-восточное. Вдоль сланцеватости развиты взбросы и левые сдвиги (при отклонении системы до субширотного простирания). Здесь выделяется поперечный сланцеватости пояс структур отрывного и сколового типов. Среди сдвигов преобладают левые сдвиги от субширотного до северо-восточного простирания, встречаются единичные правые сдвиги субмеридионального простирания. Отмечено также несколько различно ориентированных сбросов. По

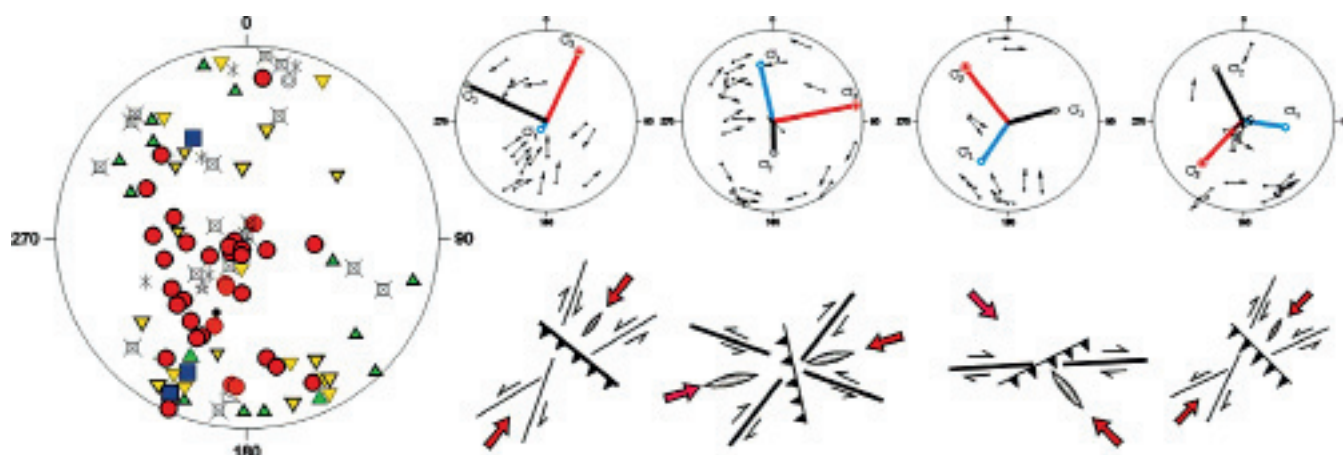


Рис. 9. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (слева), и положение осей главных напряжений, определенных методом катакlastического анализа разрывных нарушений (справа) в т. н. № 17539 (участок Еланда). Условные обозначения см. на рис. 5

реконструкции напряженного состояния выявляются условия северо-северо-восточного сжатия и субвертикального растяжения. Таким образом, по этим двум точкам реконструируются условия поперечного сланцеватости субгоризонтального субмеридионального (северо-северо-восточного) сжатия с поперечным субвертикальным залеганием плоскости σ_1 – σ_2 , в которой обе оси занимают наклонное положение (сдвиг в сочетании с горизонтальным сжатием).

В целом для участка выявляются условия субмеридионального и северо-восточного сжатия, что отражено в ориентировке сланцеватости, широком развитии отрывов северо-восточного и субмеридионального простирания, продольных сланцеватости и субширотных взбросо-левосдвиговых систем нарушений. Именно последние структуры, вероятно, определяют ориентировку главных структурно-эрозионных систем на данном участке.

Участок Еланда. Участок долины р. Катунь на юге от пос. Чемал ориентирован в северо-северо-западном направлении практически параллельно системе выраженных здесь структур в палеозойском основании. В новейшей структуре участок выражен расширением речной долины — Куюским грабеном — и ее сужениями к северу и югу от грабена. Для участка характерны сложные структурные рисунки трещиноватости с развитием зеркал скольжения преимущественно взбросового и сдвигового типа. Различно ориентированные сдвиговые зеркала скольжения часто образуют периферийные (преимущественно крутопадающие трещины) пояса тектодинамического вращения. Широко представленные взбросовые нарушения концентрируются в центральных поясах взбросо-сбросового вращения.

В т. н. № 17539 (рис. 9) в базальтах манжерокской свиты развита субширотная крутопадающая сланцеватость, испытывающая флексурные изгибы. Согласно со сланцеватостью кварцевые жилы и отрывы сопровождаются дроблением и милонитиза-

цией. Вдоль сланцеватости развиты многочисленные зеркала скольжения с тонкой штриховкой разного типа. На диаграмме четко фиксируется большой пояс взбросов, отрывов и сдвиговых нарушений (ось пояса погружается на юго-запад 250° , $\angle 20^\circ$). Максимум взбросов отмечен по пологим трещинам (азимут падения 200° , $\angle 20^\circ$). Структурный рисунок интерпретируется следующим образом: расплющивание вдоль сланцеватости в условиях субмеридионального сжатия (смещения в разных направлениях) и формирование в этих же условиях сбросо-взбросового пояса вращения. Среди сдвигов отмечены правые сдвиги северо-восточного и левые северо-западного простирания, которые хорошо увязываются с субширотными крутопадающими отрывами и вместе с ними образуют структурный парагенез субмеридионального сжатия–субширотного растяжения.

Обработка замеров в точке наблюдения по программе STRESSgeol дает дополнительные структурные парагенезы северо-западного и северо-восточного сжатия (рис. 9). Наиболее выразителен субмеридиональный сбросо-взбросовый пояс вращения. Здесь также широко представлены сдвиговые нарушения с преобладанием субширотного и северо-восточного простирания. Характерно развитие пологих структур отрывного типа.

Как видно из описания конкретных диаграмм, структурная ситуация в зоне Катунского разлома на различных участках значительно отличается — изменяется ориентировка сланцеватости, а также набор структур разного кинематического типа. В точках наблюдения установлено от одного до четырех структурных парагенезов. Вероятно, это связано и с числом замеров, и с размером охваченной замерами площади. Тем не менее выявлен ряд очевидных закономерностей. Вдоль всей долины преобладает северо-западная ориентировка сланцеватости метаморфических пород. Среди структурных парагенезисов малых дизъюнктивов один

определяется сжатием, поперечным сланцеватости, другой — субмеридиональным сжатием, вероятно, наложенным неотектоническим. В некоторых местах выявлены дополнительные парагенезисы с другими ориентировками осей максимального сжатия–растяжения, что отражает наличие локальных структурных неоднородностей.

Кинематика разрывных нарушений и реконструкции тектонических напряжений для района исследований. Более 1/3 от всех зафиксированных при полевых исследованиях структурно-кинематических индикаторов тектонических смещений составляют крутопадающие сдвиги [Маринин и др., 2019]. Преобладающие среди всех нарушений левые сдвиги (295 измерений) характеризуются разной ориентировкой, образуя максимумы северо-восточной, северо-западной, меридиональной и широтной ориентировки. Правые сдвиги (237 измерений) ориентированы исключительно в северо-западном направлении. Для широко развитых взбросов (203 измерения) характерны нарушения преимущественно субширотной и северо-западной ориентировки при пологом и крутом залегании. Среди структур отрывно-жильного типа (жилы и отрывы, 150 и 143 измерения соответственно) представлены различно ориентированные структуры, причем по широтным структурам распознается центральный пояс трещиноватости. Менее представительные сбросы (131 измерение) ориентированы, как и правые сдвиги, в северо-западном направлении. Это направление выделяется и по сланцеватости, преобладающей в метаморфических толщах.

По общей картине распределения кинематических индикаторов деформаций отчетливо установлено, что крутопадающие структуры северо-западной ориентировки, сопровождающие главную сланцеватость, представлены структурами правого сдвига и сбросо-раздвига. Это можно считать признаком природы Катунского разлома как сбросо-раздвигово-правосдвиговой зоны. С этой системой можно увязать два парагенезиса: 1) северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения — вместе со сбросо-раздвигами северо-западного простирания могли формироваться субмеридиональные левые и субширотные правые сдвиги; 2) субмеридионального сжатия и субширотного растяжения — формирование правых сдвигов северо-западной ориентировки дополняется формированием левых сдвигов северо-восточного простирания, меридиональных структур отрывно-жильного типа и широтных взбросо-надвиговых структур.

Остальные структуры, по-видимому, отражают проявление локальных вариаций поля напряжений. При этом необходимо отметить, что характерные структуры растяжения представлены поперечными и косыми к главной системе сланцеватости крутопадающими структурами различного типа, выраженными не только сдвиговыми или взбросо-

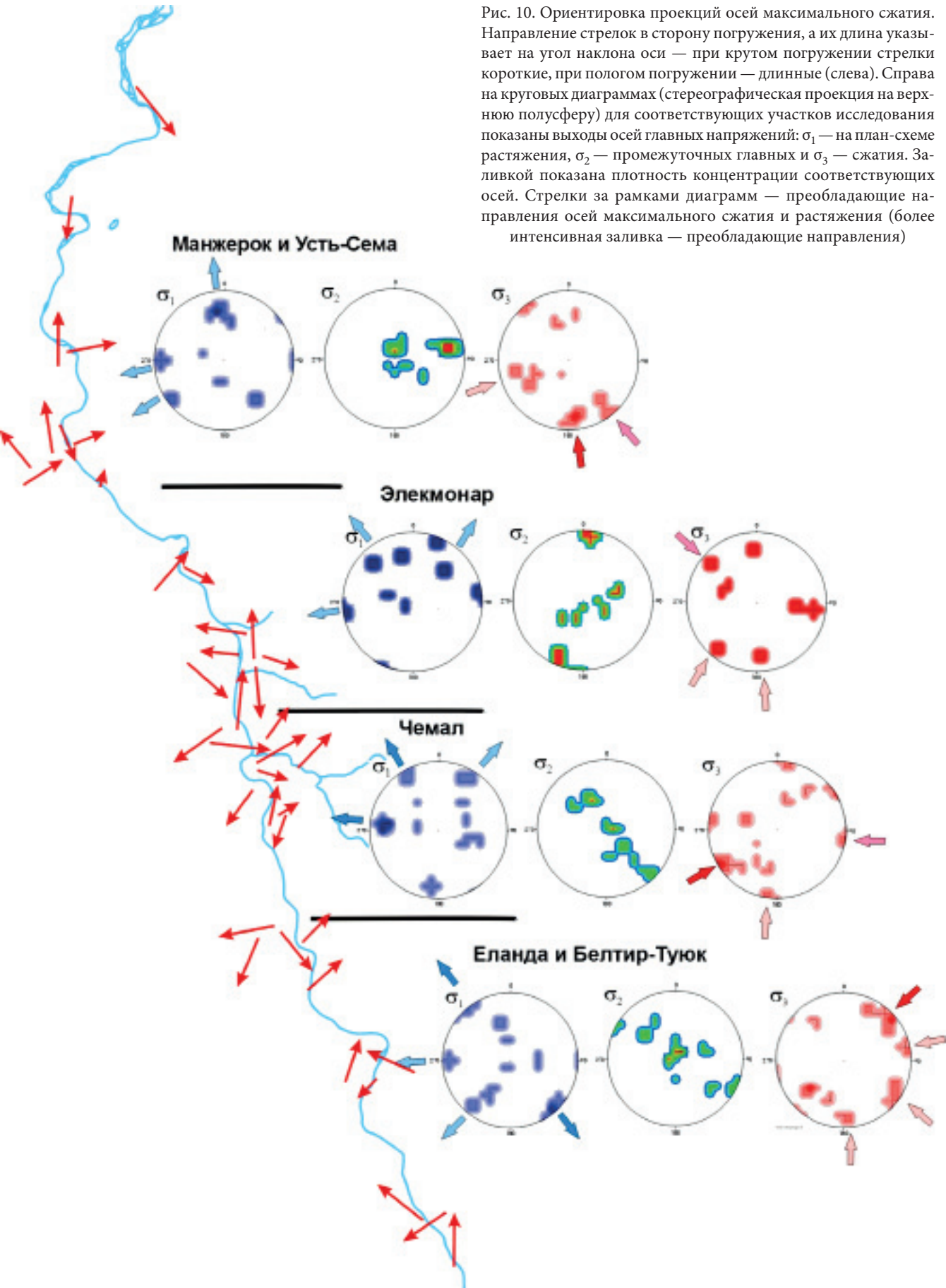
сбросовыми нарушениями, но также трещиноватостью, сколами, зонами дробления.

Результаты катакластического анализа по станциям (группировкам) точек наблюдения. Статистическая обработка расчетов по выделенным участкам и всей зоне в целом дала следующие результаты. При рассмотрении территориально близких участков наблюдения вдоль Катунского разлома (рис. 10) выявлены довольно устойчивые ориентировки осей главных напряжений, которые можно объяснить в зависимости от характерных для участков структурных условий.

В северной части вблизи пос. Манжерок и Усть-Сема преобладают меридиональная (до северо-северо-западной) и северо-западная ориентировки оси максимального сжатия, слабее проявлены условия широтного сжатия. В центральной части, на Электмонарском и Чемальском участках наблюдения, распространены преимущественно широтные и северо-восточные направления максимального сжатия соответственно. В южной части изученного участка долины р. Катунь (в районе сел. Еланда и р. Бельтир-Туюк) преобладают меридиональные и северо-восточные направления максимального сжатия.

Практически везде установлены обстановки поля напряжений с осями сжатия, поперечными ориентировке региональных разломов, а также ориентировке сланцеватости в данном месте, т. е. оси сжатия ориентированы поперечно не только к региональным структурам (блокам, ограниченными региональными разломами Катунской зоны), но и к локальным структурам в их пределах. Выделены ориентировки северо-западные, субширотные и северо-восточные. Кроме того, практически повсеместно установлены субмеридиональные направления осей сжатия, ориентированные близко к простиранию структур или с некоторым отклонением от них. Зависимость ориентировки осей сжатия от простирания локальных и региональных региональных структур хорошо выражена в некотором развороте осей от северо-западной в северной части через широтную в центральной и до северо-восточной в южной — поперечно к дугообразной структуре, в центре которой расположен Югагинский гранитоидный массив. Повсеместное присутствие поля напряжений с субмеридиональной ориентировкой осей максимального сжатия отражает, на наш взгляд, его наложенный, т. е. более молодой возраст.

По результатам катакластического анализа на всей изученной территории выявлена высокая вариабельность положения осей главных напряжений (рис. 11). По распределению осей сжатия можно заметить, что они занимают близпериферийное положение на диаграмме, тогда как оси растяжения образуют вполне выраженную область в центре диаграммы, т. е. достаточно четко проявлены условия горизонтального сжатия–субвертикального растяжения (горизонтальное сжатие). Оси сжатия



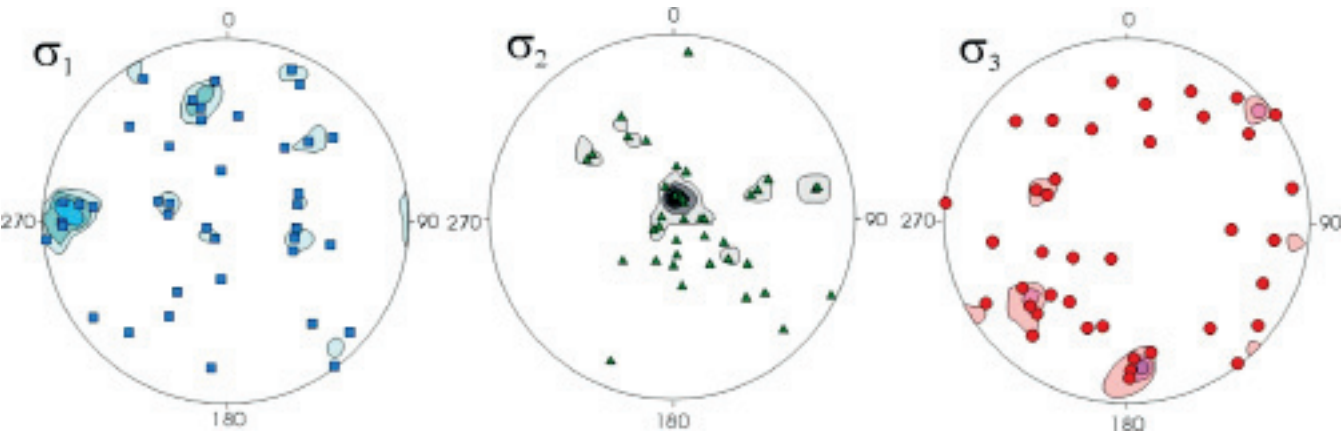


Рис. 11. Ориентировка осей главных напряжений по результатам реконструкции. На круговых диаграммах (стереографическая проекция верхней полусферы) показаны выходы осей главных напряжений и изолинии равной плотности их распределения (цветовая заливка). Оси $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — минимальных (девиаторное растяжение), промежуточных и максимальных сжимающих напряжений

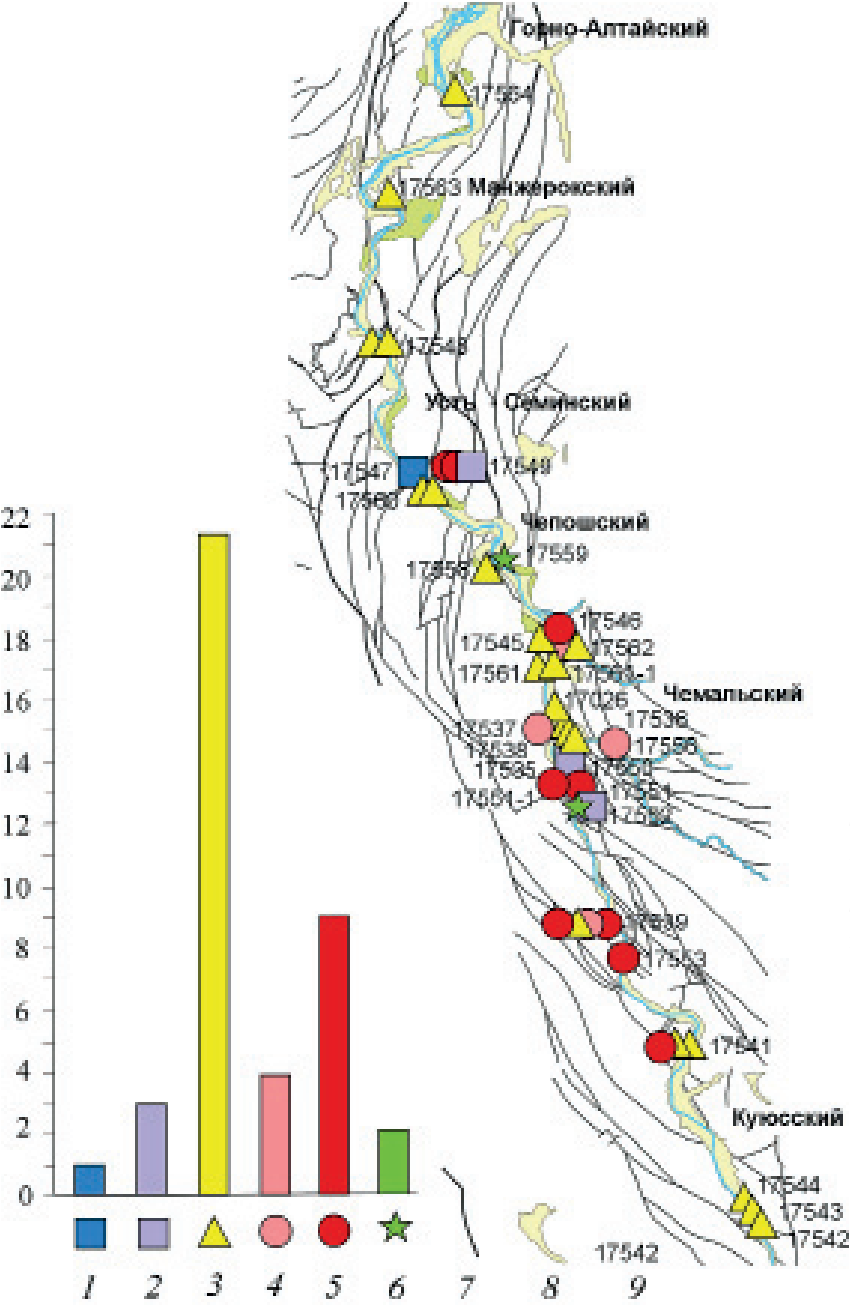


Рис. 12. Типы напряженного состояния (по данным реконструкции) и четвертичные грабены (показаны серой заливкой) в долине р. Катунь: 1 — горизонтальное растяжение; 2 — горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом; 3 — горизонтальный сдвиг; 4 — горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом; 5 — горизонтальное сжатие; 6 — сдвиг в вертикальной/горизонтальной плоскости; 7 — разрывные нарушения; 8 — четвертичные отложения; 9 — номера точек наблюдения

тяготеют к северо-восточному и юго-западному квадрантам, тогда как оси растяжения сконцентрированы вместе с осями σ_2 в центральный пояс северо-западной ориентировки.

По сочетанию всех трех осей можно сказать, что главное поле напряжений характеризуется меридиональным сжатием и широтным растяжением при сдвиговом типе (вертикальная ось σ_2). Четко установлены также условия северо-восточного сжатия и северо-западного растяжения, причем в северо-западном направлении бывает ориентирована и промежуточная ось, т.е. северо-восточное сжатие проявляется как одноосное. Лучшая выраженность условий меридионального сжатия указывает на самый молодой возраст этой обстановки. Северо-восточное сжатие в целом соответствует главному региональному структурному плану палеозойских толщ с северо-западной ориентировкой сланцеватости. При этом реализация северо-восточного сжатия осуществлялась как в обстановке горизонтально сдвига, так и в условиях горизонтального сжатия и вертикального растяжения.

Несмотря на упомянутую выше большую вариабельность положения осей главных напряжений, выделяются некоторые их преобладающие направления. Для оси максимального сжатия характерны субмеридиональное и северо-восточное направления при субгоризонтальном положении. Ось девиаторного растяжения ориентирована в субширотном направлении. Промежуточная ось главных напряжений ориентирована субвертикально, отвечая, таким образом, обстановке горизонтального сдвига. Вывод об условиях меридионального сжатия–широтного растяжения полностью совпадает с выводом о наиболее четко проявленном структурном парагенезисе меридионального сжатия, предположенного нами на основании анализа пространственного распределения и взаимоотношения кинематических индикаторов различного типа. Условия северо-восточного сжатия можно трактовать как кинематогенное поле напряжений в условиях развития главного структурного плана северо-западной ориентировки.

По типам напряженного состояния, определяемого пространственным положением осей главных напряжений, повсеместно преобладают обстановки горизонтального сдвига (субгоризонтальное положение осей максимальных и минимальных сжимающих напряжений). Число локальных стресс-состояний с этим типом напряженного состояния составляет более 1/2 от общего числа реконструированных (рис. 12). Существенно меньше обстановок горизонтального сжатия, горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом и растяжения в сочетании со сдвигом. Преобладающий тип напряженного состояния зависит и от положения в общей структуре Горного Алтая. На севере (Манжерокский участок) отмечены только обстановки горизонтального сдвига. Далее в районе Усть-Семы среди преобладающих обстановок горизонтального сдвига встречаются

локально проявленные обстановки горизонтального сжатия и растяжения. Чемальский участок, находящийся на пересечении разрывных и складчатых структур разного простирания, характеризуется разнообразными типами напряженного состояния. На расположенном южнее участке Еланда преобладают обстановки горизонтального сжатия. Участок расположен в зауженной части долины р. Катунь, в которой практически отсутствуют речные четвертичные отложения.

Таким образом, палеозойские толщи в долине р. Катунь характеризуются широким развитием зеркал скольжения и других кинематических индикаторов, что мы рассматриваем как одно из доказательств кайнозойских подвижек по палеозойским дизъюнктивным структурам. Трещиноватость, в том числе кинематическая, ориентирована вдоль сланцеватости, а также косо и поперечно сечет ее. Структурные рисунки трещиноватости различного кинематического типа свидетельствуют о преобладающей обстановке субмеридионального сжатия–широтного растяжения.

Обращает на себя внимание то, что по ориентировкам структур различного кинематического типа (правые сдвиги, сбросы, отрывы) и преобладающей ориентировке сланцеватости особое место занимают структуры северо-западного простирания, отвечающие ориентировке Катунской линейной зоны. Часто по минидизъюнктивам одной и той же системы установлено два и более направления смещения, что свидетельствует о неоднородных условиях деформирования, обусловленных как сменой условий нагружения породных массивов во времени, так, вероятно, и в связи с наложением разнопорядковых тектодинамических обстановок (связанных со структурами разного ранга).

Наши исследования подтверждают существенный вклад в формирование кайнозойской структуры Горного Алтая сдвиговых перемещений, а также связанных с ними локальных обстановок горизонтального сжатия и растяжения [Лукина, 1996; Трифонов и др., 2002; Новиков и др., 2008]. Помимо новообразованных разломов в региональном сдвиговом рисунке принимают участие активизированные участки разломных зон, которые определяли структурный план Горного Алтая в палеозойское и мезозойское время [Dobretsov et al., 1996; Чиков и др., 2004].

Полученные характеристики напряженно-деформированного состояния породных массивов верхних горизонтов земной коры Горного Алтая близки к установленным ранее при анализе сейсмологических данных [Ребецкий и др., 2008; Lunina et al., 2008; Ребецкий и др., 2013], по которым также выявлено преобладание субмеридиональной ориентировки оси максимального сжатия (в обстановках горизонтального сдвига и реже горизонтального сжатия). При этом отметим, что отчетливо проявленный при реконструкции палеонапряжений максимум с северо-восточной ориентировкой оси

максимального сжатия намного слабее проявлен на диаграммах, полученных на основе анализа современного напряженного состояния по сейсмологическим данным. Разворот направления максимального сжатия от северо-западного в северной части Катунского разлома до северо-восточного на юге согласуется с реконструкциями напряженного состояния на основе сейсмологических данных [Гольдин, Кучай, 2007; Ребецкий и др., 2008, 2013].

Изменение напряженно-деформированного состояния в разных частях Катунского разлома обуславливает его кинематические проявления в виде правосдвиговой и раздвиговой составляющих, при этом тип напряженного состояния согласуется с четвертичной структурой Катунского разлома. В местах сужения долины реки преобладают геодинамические типы горизонтального сдвига, сдвига со сжатием, сдвига в вертикальной плоскости и горизонтального сжатия. На окончаниях наиболее крупного Чемальского грабена установлены обстановки горизонтального сдвига с растяжением и горизонтального растяжения. Обстановки горизонтального растяжения выявлены преимущественно в бортовых частях Катунской зоны при удалении от ее осевой части.

Главная тектодинамическая обстановка на всем протяжении долины р. Катунь — обстановка горизонтального сдвига, что однозначно свидетельствует о сдвиговой природе новейшего Катунского разлома. При этом по ориентировке осей главного поля напряжений наиболее проявлено поле напряжений с меридиональным сжатием и широтным растяжением. В сложной структуре палеозойских толщ локально отмечены дополнительные ориентировки осей сжатия, обычно поперечных простиранию метаморфических толщ. Обстановки горизонтального сжатия характерны для участков окончания четвертичных грабенов, что свидетельствует о пулл-апартовой природе последних. Грабены разделены перемычками с неоднородным характером поля напряжений.

Общий анализ подтверждает, что главная тектодинамическая обстановка в регионе — меридиональное горизонтальное сжатие. Восстанавливаемые условия северо-западного, северо-восточного и субширотного сжатия сопоставляются с преобладающей ориентировкой складчато-разрывных структур в палеозойских толщах. Условия горизонтального сжатия–вертикального растяжения отвечают сохранению в палеозойских толщах подвижек на структурах покровного типа.

Методом структурно-парагенетического анализа также установлено преобладание парагенезов, связанных с меридиональным направлением максимального сжатия. Менее проявлены парагенезы северо-восточного и северо-западного сжатия,

а парагенезы широтного сжатия примерно в 2 раза менее распространены, чем связанные с наиболее проявленным меридиональным сжатием. Отметим, что в работе [Delvaux et al., 2013] все эти основные ориентировки максимального горизонтального сжатия увязаны с тремя стадиями деформирования региона, которые проявлены на неотектоническом этапе: субширотная в эоцен-олигоценное время, субмеридиональная и северо-западная в позднем плиоцене–раннем плейстоцене, а северо-восточная в среднеплейстоцен-голоценное время.

Однако данные проведенных нами исследований показывают, что необходимо осторожно подходить к выделению временных стадий с единообразной ориентировкой максимального сжатия для всего исследованного региона [Ребецкий и др., 2019]. В работе [Lunina et al., 2008] также показано господство субмеридионального сжатия по данным трещиноватости в одном из сейсмоактивных районов Горного Алтая, в котором произошло Чуйское землетрясение 2003 г.

Новейшей тектонике с разнообразными малоамплитудными перемещениями по малым дизъюнктивам, вероятно, предшествовала сложная многократная деформация посредством более пластических механизмов, в том числе с формированием структур латерального выжимания в геодинамические убежища [Туркин, 2018].

Заключение. Рассмотренные результаты структурно-кинематических исследований позволяют сделать следующее заключение.

На современном этапе Горный Алтай развивается преимущественно в условиях меридионального сжатия и широтного растяжения. В сложной структуре палеозойских толщ это поле осложнено дополнительными тектодинамическими обстановками с ориентировкой оси максимального сжатия поперек простирания сланцеватости. В обстановке основного меридионального сжатия Катунский разлом северо-северо-западного простирания представляет собой хрупкую сколовую структуру правосдвигового типа с некоторой тенденцией к приоткрыванию. Несмотря на то что участки поля напряжений с реализацией обстановок горизонтального растяжения и горизонтального сжатия со сдвигом отмечены только на окончаниях наиболее крупного Чемальского грабена, мы считаем что эти структуры представляют собой присдвиговые структуры растяжения типа пулл-апорт.

Благодарности. Авторы выражают признательность Ю.Л. Ребецкому, Е.В. Поречной и Н.Т. Майдану за помощь при организации и проведении полевых работ.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке госзаданий ИФЗ РАН и ИНГГ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы коллизионно-блочной геодинамики // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 7. С. 692–723.
- Деев Е.В., Зольников И.Д., Бородавский А.П., Гольцова С.В. Неотектоника и палеосейсмичность долины нижней Катунь (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2012а. Т. 53, № 9. С. 1154–1168.
- Деев Е.В., Зольников И.Д., Лобова Е.Ю. Позднеплейстоцен-голоценовые сейсмогенные деформации в долине р. Малый Яломан (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 9. С. 1601–1620.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д. и др. Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2012б. Т. 53, № 1. С. 120–139.
- Добрецов Н.Л., Берзин Н.А., Буслов М.М., Ермиков В.Д. Общие проблемы эволюции Алтайского региона и взаимоотношения между строением фундамента и развитием неотектонической структуры // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 10. С. 5–19.
- Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 10. С. 20–30.
- Лукина Н.В. Активные разломы и сейсмичность Алтая // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 11. С. 71–74.
- Маринин А.В., Деев Е.В., Тверитинова Т.Ю., Поречная Е.В. Первые данные реконструкции палеонапряжений в долине р. Катунь (Горный Алтай) // Российская тектонофизика. К 100-летию юбилею М.В. Гзовского. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. С. 87–97.
- Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Санчаа А.М. Глубинное строение и характеристики краевых структур Курайской впадины (Горный Алтай) по данным геоэлектрики с контролируемым источником // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 1. С. 119–132.
- Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В. и др. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 11. С. 1139–1149.
- Расцветов Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М.: Наука, 1987. С. 173–235.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской складчатой области перед Чуйским (Алтайским) землетрясением 2003 года // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: Изд. ИФЗ, 2008. С. 245–299.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 2. С. 271–291.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В., Сим Л.А. Проблема интерпретации результатов тектонофизической реконструкции палеонапряжений и возможные пути её решения // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 6. С. 860–880.
- Русанов Г.Г., Деев Е.В., Зольников И.Д. и др. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 8. С. 1220–1233.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В. Современные движения Горного Алтая // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12, № 1. С. 45–55.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В. и др. Поля смещений блоков Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 3. С. 481–497.
- Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 224 с.
- Туркин Ю.А. Структуры латерального выжимания западной части Алтае-Саянской складчатой области // Геосферные исследования. 2018. № 1. С. 33–43.
- Федак С.И., Туркин Ю.А., Гусев А.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Алтае-Саянская. Лист М-45 (Горно-Алтайск). Объясн. зап. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 567 с.
- Чиков Б.М., Зиновьев С.В., Деев Е.В. Структуры внутриконтинентальной коллизии Кузнецко-Алтайского региона // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Мат-лы науч/ совещ/ по программе фундаментальных исследований. Т. 2. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2004. С. 152–155.
- Deev E., Turova I., Borodovskiy A., Zolnikov I. et al. Large earthquakes in the Katun Fault zone (Gorny Altai): Paleoseismological and archaeoseismological evidence // Quaternary Sci. Rev. 2019. Vol. 203. P. 68–89.
- Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F. et al. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai–Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // Tectonophysics. 2013. Vol. 602. P. 194–222.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D. et al. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt; effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes // Intern. Geol. Rev. 1996. Vol. 38, N 5. P. 430–466.
- Lunina O.V., Gladkov A.V., Novikov I.S. et al. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms.=7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // Tectonophysics. 2008. Vol. 453. P. 276–294.
- Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis // Tectonophysics/ 2010. Vol. 488. P. 293–325.

Статья поступила в редакцию 27.07.2022,
одобрена после рецензирования 12.12.2022,
принята к публикации 12.03.2022