

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-35-49>

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ТРЕЩИНОВАТОСТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ИНТРУЗИВНОГО МАССИВА ТАЖЕРАН В ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© Ю.П. Бурзунова^а

^аИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Провести комплексный анализ трещиноватости и сравнить результаты двух принципиально различных методов реконструкции полей тектонических напряжений на основе геолого-структурных данных участка Тажеран в Прибайкалье. **Методы.** В работе применен новый подход к парагенетическому анализу статистических замеров «немой» трещиноватости, позволяющий восстановить напряженное состояние локального объема горных пород и установить его принадлежность к зоне разлома определенного морфогенетического типа и ориентировки. Вторым способом реконструкции полей напряжений являлся кинематический метод на основе анализа векторов смещений по разрывам. **Результаты.** Проведен анализ 22 массовых замеров элементов залегания трещин (по 100 шт.) и 158 замеров штрихов скольжения в 16 пунктах наблюдения. Получено 70 решений парагенетического метода и 26 решений кинематического метода о полях напряжений локального ранга. Трещинные парагенезисы формировались в полях сжатия, сдвига и растяжения примерно в равном количестве, следы смещений больше проявлены в сдвиговых полях. Сравнение итогов по каждому пункту наблюдений показало, что большая часть решений кинематического метода (22 из 26) имеет аналогичное по типу и ориентировке решение парагенетического метода о поле напряжений первого или второго порядка. **Выводы.** Результаты реконструкции локальных полей напряжений двумя методами сопоставимы и в целом дополняют и частично подтверждают друг друга. Восстановленные разными методами идентичные поля напряжений предположительно относятся к одному этапу. Остальные – преимущественно парагенетические – решения свидетельствуют о полях напряжений на ранних стадиях развития мелких разломных зон в пределах участка. Рекомендуется комплексное применение парагенетического и кинематического методов.

Ключевые слова: реконструкция поля напряжений, разрывы, разломная зона, трещинная сеть, разрывной парагенезис, зеркало скольжения, штрихи скольжения.

Информация о статье. Дата поступления 31 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Бурзунова Ю.П. Применение различных методов анализа трещиноватости для реконструкции полей тектонических напряжений (на примере интрузивного массива Тажеран в Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 35–49. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-35-49

^аБурзунова Юлия Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер лаборатории тектонофизики, e-mail: burzunova@crust.irk.ru

Yulia P. Burzunova, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Leading Engineer of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: burzunova@crust.irk.ru

USE OF DIFFERENT FRACTURE ANALYSIS METHODS FOR TECTONIC STRESS FIELDS RECONSTRUCTION (ON EXAMPLE OF THE TAZHERAN INTRUSIVE MASSIF IN PRIBAIKALIE)

© Yu.P. Burzunova^a

^aInstitute of the Earth's Crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to carry out a complex analysis of fracturing and compare the results of two fundamentally different reconstruction methods of tectonic stress fields on the basis of geological and structural data of the Tazheran site in Pribaikalie. **Methods.** The study employs a new approach to the paragenetic analysis of statistical measurements of «mute» fracturing, which allows to restore the stressed state of a local rock volume and determine its belonging to the fault zone of a certain morphogenetic type and orientation. The second reconstruction method of stress fields is a kinematic method based on the analysis of fracture displacement vectors. **Results.** The analysis of 22 mass measurements of fracture attitude (100 joints each) and 158 measurements of slickensides at 16 observation points has been carried out. We have obtained 70 solutions of the paragenetic method and 26 solutions of the kinematic method on local stress fields. Fracture parageneses were formed in the fields of compression, shear and strike-slip in approximately equal amounts. The traces of displacements are more developed in strike-slip fields. A comparison of results for each observation point has showed that most of kinematic solutions (21 of 26) have a paragenetic solution similar in type and orientation for the stress field of the first or second order. **Conclusions.** The reconstruction results of local stress fields by two methods are comparable and in general complement and partially confirm each other. The identical stress fields restored by different methods are presumably referred to one stage. The other mainly paragenetic solutions indicate stress fields in the early development stages of small fault zones within the site. A complex use of paragenetic and kinematic methods is recommended.

Keywords: reconstruction of a stress field, fractures, fault zone, joint system, fracture paragenesis, slickenside, slickenlines

Article info. Received 31 July 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Burzunova Yu.P. Use of different fracture analysis methods for tectonic stress fields reconstruction (on example of the Tazheran intrusive massif in Pribaikalie). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 35–49. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-35-49 (In Russian).

Введение

Исследование напряженного состояния земной коры, позволяющее определять механизмы формирования и развития тектонических структур, является одной из основных задач геодинимики и тектонофизики. Широко применяются полевые тектонофизические методы изучения тектонических напряжений, основанные на представлениях о деформации и разрушении горных пород и опирающиеся на данные физических экспериментов, натуральных наблюдений и теоретических исследований. Посредством измерений и последующего

анализа геолого-структурных данных решается обратная задача – реконструкция разновозрастных полей напряжений какого-либо участка верхней части земной коры по следам воздействия этих напряжений. Методы определения напряженного состояния в специализированных обзорах [1, 2 и др.] делятся на две группы, предполагающие анализ различных типов исходных данных: структурно-парагенетические, основанные на изучении парагенезисов (определенные совокупности пластических и разрывных структур), и кинематические, использующие признаки смещений по

разрывам или механизмы очагов землетрясений. Каждая группа позволяет получить уникальную информацию – поля напряжений, действовавшие при деформации и разрушении горных пород (парагенетические методы) или способствующие перемещению блоков пород относительно друг друга (кинематические методы). Комплексирование методик из разных групп и обобщение полученных результатов повышает достоверность решений обратной задачи [1, 3–5 и др.] в случае, когда поле напряжений послужило причиной формирования одновременно трещинных парагенезисов и следов смещения. С другой стороны, отличные друг от друга решения разных методов на одном участке исследования могут свидетельствовать о разновременных напряженных состояниях и, таким образом, взаимно дополнять друг друга при реконструкции истории геодинамического развития.

В настоящее время в результате многолетних исследований трещиноватости в разломных зонах методическую завершенность получил метод спецкартирования разломной структуры и полей напряжений, базирующийся на парагенетическом анализе трещинных сетей [6, 7]. Фактическим материалом служат статистические массовые замеры ориентировок тектонических трещин. Парагенетический анализ позволяет определять элементы зоны скалывания и восстанавливать поле напряжений, в котором сформирована изучаемая трещинная сеть. В настоящей работе впервые поставлена задача на примере участка в Прибайкалье применить данную методику совместно с одним из видов кинематического анализа полевых геологоструктурных данных, на локальном уровне сопоставить между собой результаты и провести сравнительную оценку полученных решений. В качестве второго способа обработки данных по трещиноватости применялась методика

кинематического анализа Д. Дельво [8, 9] на основе метода инверсии Ж. Анжелле [10], которая дает возможность проводить реконструкцию палеонапряженного состояния, инициировавшего смещения блоков горных пород, путем анализа векторов тектонических перемещений на зеркалах скольжения.

Полигон для комплексного исследования полей напряжений локального ранга находится в тектонически активной области, неоднократно подвергавшейся активизации, – центральной части Байкальской рифтовой системы (рис. 1, А), в зоне регионального Морского (Ольхонского) разлома. В таких районах происхождение трещин в горных породах преимущественно тектоническое (либо под значительным влиянием тектонических напряжений), что является необходимым условием для применения парагенетического метода. Геологоструктурные наблюдения проведены в районе Тажеранского интрузивного массива [11], ограниченного с юго-востока опущенной и скрытой под водой частью рифтового грабена. В процессе сбора исходного материала следы смещений были обнаружены только в прибрежной, наиболее близкой к сместителю Морского разлома и более нарушенной разрывами юго-восточной части массива, которая в данной работе принята в качестве участка для комплексного исследования полей напряжений (рис. 1, В). На уровне денудационного среза участок сложен палеозойскими породами: сиенитами, нефелиновыми сиенитами, габбро, метаморфизованными вулканическими основными породами, карбонатами, подчиненное значение имеют граниты, пегматиты, сиенито-гнейсы, кварциты [12]. Участок имеет сложное геологическое строение, тем не менее в целом структурно-вещественные неоднородности различных типов не препятствуют применению парагенетического метода [13].

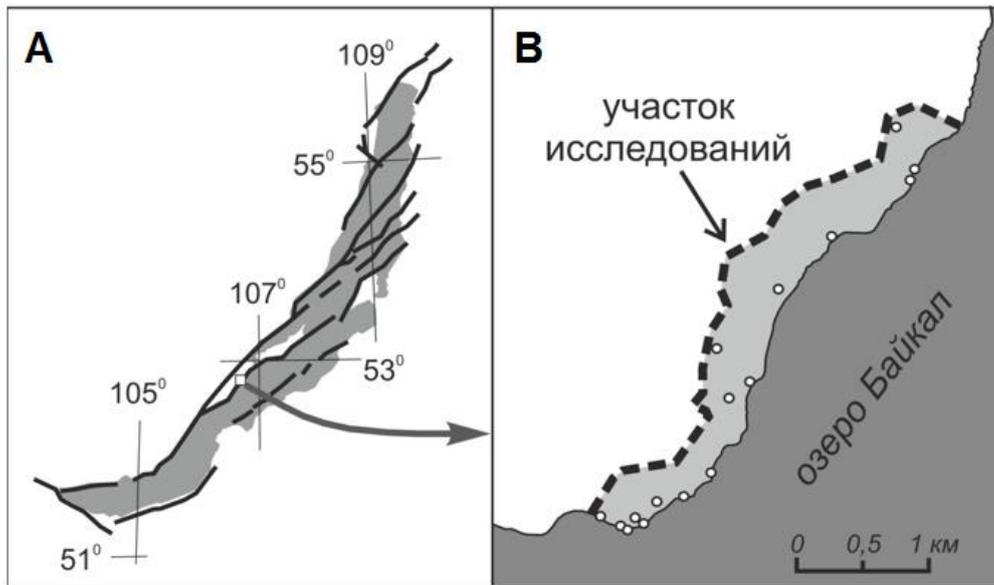


Рис. 1. Участок комплексного исследования трещиноватости:
А – местонахождение участка на карте главных структурообразующих активных разломов Байкальской впадины (по источнику [14] с изменениями);
В – схема расположения пунктов геолого-структурных наблюдений
51°, 53°, 55° – широта; 105°, 107°, 109° – долгота

Fig. 1. Area of complex fracture research:
А – site location on the map of main structure-forming active faults of Baikal depression (according to [14] with changes);
В – location scheme of the points of geological and structural observations
Latitude is 51°, 53°, 55°; longitude is 105°, 107°, 109°

В горных породах наблюдаются системные или хаотические (многосистемные) (по 8–16 систем) разрывные сети, в основном с преобладанием трещин сколового типа, что свидетельствует об их тектоническом генезисе [13].

Для сравнительного анализа результатов реконструкции локальных полей напряжений двумя методами выбрано 16 пунктов наблюдения, в которых зафиксированы следы смещений по плоскостям разрывов – штрихи и борозды скольжения. Количество данных по штрихам в каждом пункте наблюдения составляет от 4 до 43. Кроме того, выполнена стандартная документация структурных особенностей коренных выходов, проведено 22 массовых замера элементов залегания трещин (по 100 шт. в каждом замере).

Методы

Применяемые в работе методические приемы позволяют восстанавли-

вать поля тектонических напряжений, действовавших при разрушении горных пород трещинами и при смещении блоков пород относительно друг друга.

Парагенетический подход к анализу приразломной трещиноватости в рамках метода спецкартирования [6, 7] заключается в сравнении природных сетей трещин с эталонными трещинными сетями. Эталонные сети (эталонные) – это модели трещинных сетей в зонах скалывания разломного типа, составленные для трех основных типов динамических обстановок: сжатия, сдвига и растяжения. Эталон включает главный разломный сместитель первого порядка и семь направлений опережающих мелких разломов второго порядка (R -, t -, n -, T -типа), а также соответствующие каждому из них парагенезисы еще более мелких разрывов в виде троек взаимно перпендикулярных систем опережающих трещин. Исходным материалом для анали-

за служат статистические массовые замеры элементов залегания широко распространенных «немых» трещин в горных породах с указанием их типа (скол или отрыв), представленные в виде круговых диаграмм (стереограмм) в изолиниях плотности стереографических полюсов трещин (сетка Вульфа, верхняя полусфера, окно осреднения 10° , шаг между изолиниями – 1 %) (рис. 2).

Для сравнения и сопоставления с диаграммами природных трещинных сетей каждый эталон представлен в виде кругового трафарета в равноугольной проекции верхней полусферы, на котором значками показаны полюсы плоскостей магистрального сместителя, второстепенных разломов и троек систем трещин. Наиболее подходящий для диаграммы эталон по совокупности совпадающих систем определяет решение: поле напряжений, в котором сформировалась трещинная сеть, а также ориентировку и морфогенетический тип зоны скалывания (разломной зоны) локального ранга и структур второго порядка (см. рис. 2). Данные о задокументированных структурных особенностях коренного выхода служат дополнительным подтверждением тому или иному решению. Для одной диаграммы может быть получено 1–3 и более решений (см. рис. 2, А, В, С). Метод позволяет восстановить напряженное состояние локального объема горных пород для одного коренного выхода и установить его принадлежность к зоне локального разлома.

Кинематический метод реконструкции главных нормальных векторов осей напряжений основан на анализе направлений тектонических сдвиговых перемещений, возникающих под действием единого поля напряжений как по вновь образованным разрывам, так и по существующим более древним различно ориентированным разрывным нарушениям [10, 15, 16]. В основу метода положена зависимость между погружением глав-

ных осей напряжений, направлением смещения по трещине и компонентами тензора напряжений, вызвавших это смещение. В данной работе реконструкция поля напряжений и расчет параметров стресс-тензора проводилась с помощью программы TENSOR, разработанной Д. Дельво [9] на основе метода инверсии Ж. Анжелье [10] с добавлением метода оптимизации вращением Д. Дельво [8]. Исходными данными для анализа являются в первую очередь элементы залегания зеркал скольжения на плоскостях трещин. Вначале с помощью программы определяется предварительный тензор напряжений с использованием процедур PBT (определение средней ориентировки кинематических осей для всех данных по штрихам скольжения) и усовершенствованного метода Right Dihedra (определение по взаимному положению частных квадрантов сжатия и растяжения наиболее подходящего для выборки положения осей с минимальной суммой отклонений частных решений от рассчитанного общего стресс-тензора). Затем результаты уточняются с помощью процедуры оптимизации вращения.

Программа TENSOR позволяет разделять массив трещин на несколько групп и для каждой выборки реконструировать поле тектонического напряжения, в котором была активной данная генерация трещин. Итоговое решение представлено в виде тензора осей главных нормальных напряжений с выборкой геолого-структурных данных (трещин со штрихами скольжения), по которой восстановлено данное поле напряжений (рис. 3). В соответствии с пространственным положением осей и значением коэффициента формы эллипсоида напряжений полученный стресс-тензор относится к одному из режимов деформирования – радиальное растяжение, чистое растяжение, трансенсия, чистый сдвиг, транспрессия, чистое сжатие,

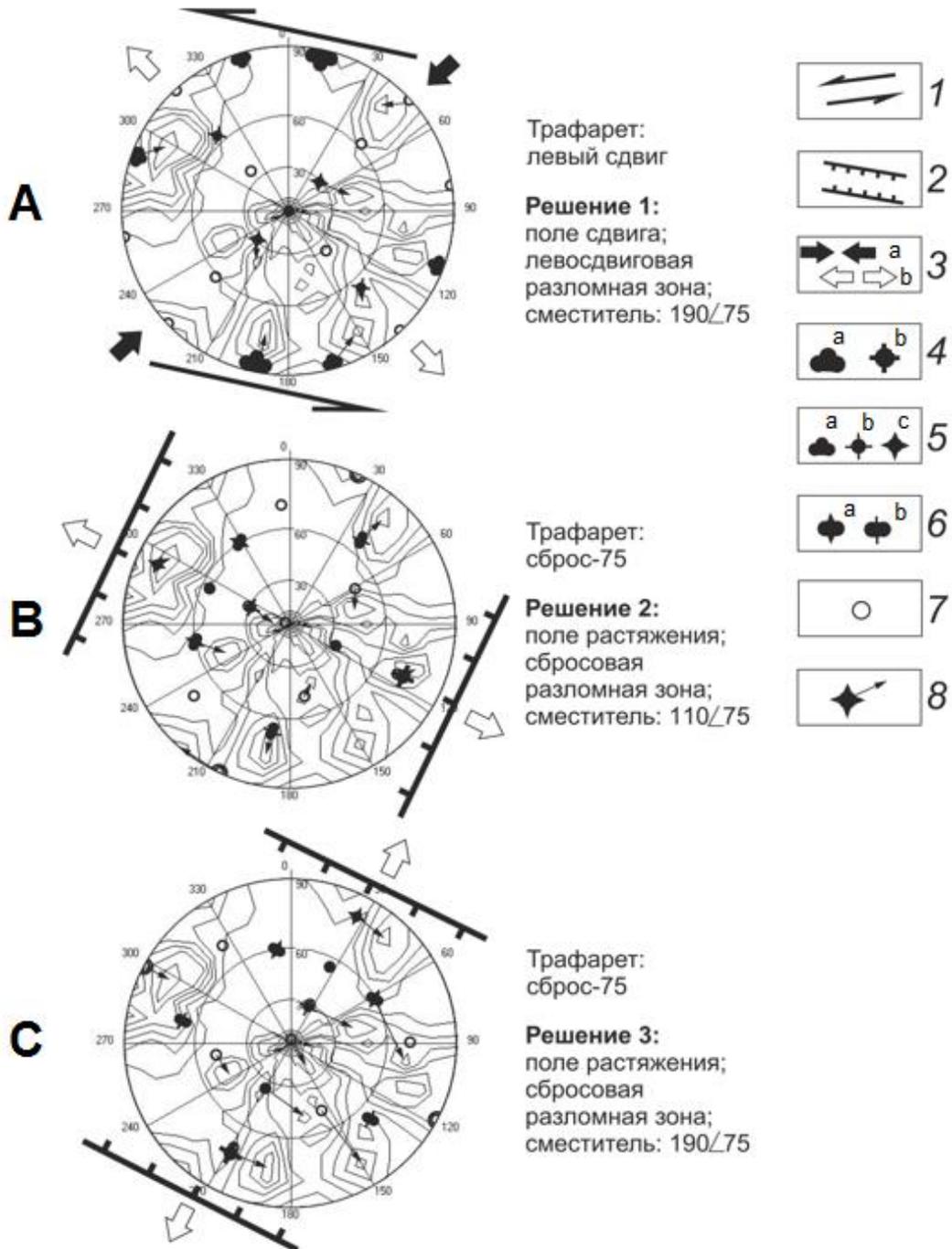


Рис. 2. Реконструкция полей напряжений локального ранга методом парагенетического анализа (на примере трещинной сети в пункте наблюдения b1020, участок Тажеран в Прибайкалье, количество трещин – 100 шт.):

А–С – три итоговых решения о динамических обстановках сдвига и растяжения
 1–2 – положение левосдвиговой (1) и сбросовой (2) зоны локального ранга, в которых формировалась часть систем трещин, представленных на стереограмме; 3 – направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (b); 4–7 – элементы эталонного трафарета: 4 – полюсы сдвигового (а) и сбросового (b) сместителя первого порядка; 5 – полюсы сдвигового (а), сбросового (b) и взбросового (с) сместителя второго порядка; 6 – полюсы взбросо-сдвигового (а), сдвига-сбросового (b) сместителя второго порядка; 7 – полюс второстепенной или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин; 8 – стрелкой указаны центры максимумов плотности трещин, которые соответствуют разрывам эталонного парагенезиса

Fig. 2. Reconstruction of local stress fields by the method of paragenetic analysis (on example of a fracture system in the observation point b1020, Tazheran site in Pribaikalie, number of fractures – 100 pcs):

A–C – three final solutions of dynamic conditions of the strike-slip and extension
 1–2 – position of the sinistral strike-slip (1) and fault (2) local zones where a part of fracture sets represented on the stereogram was formed; 3 – direction of axes of the main normal stresses of compression (a) and extension (b); 4–7 – elements of the standard paragenesis stereogram: 4 – poles of strike-slip (a) and fault (b) 1st order plane; 5 – poles of strike-slip (a), fault (b) and thrust (c) 2nd order planes; 6 – poles of thrust strike-slip (a), faulting strike-slip (b) 2nd order plane, 7 – pole of the secondary or additional set of triple fracture paragenesis; 8 – arrow indicates the centers of joint density maxima that correspond to the fractures in the standard paragenesis

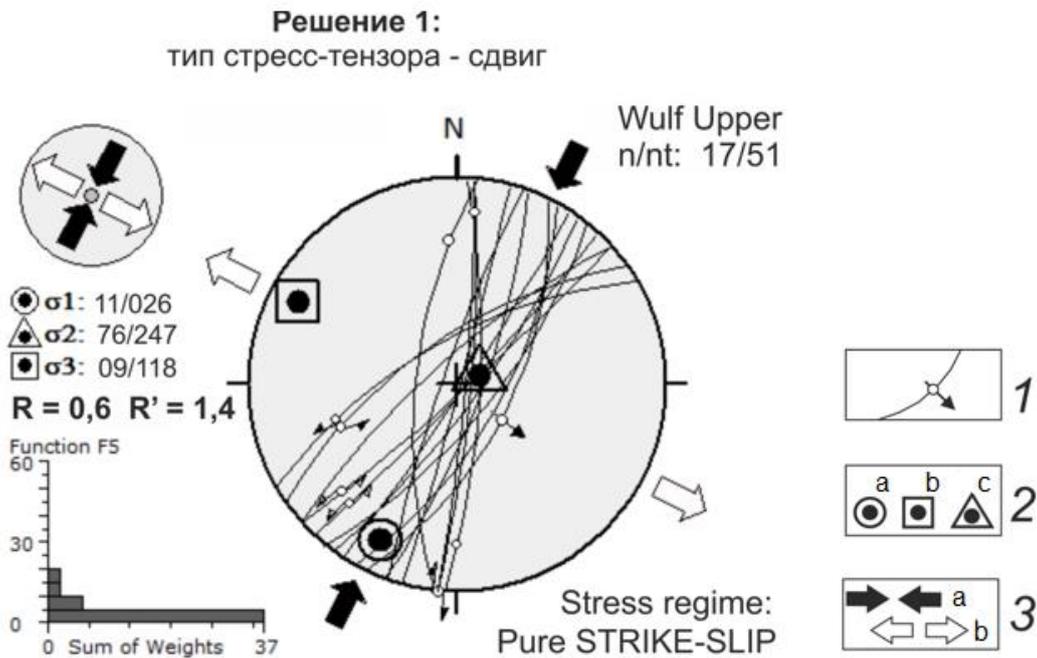


Рис. 3. Реконструкция поля напряжений локального ранга методом кинематического анализа (на примере трещинной сети в пункте наблюдения b1020, участок Тажеран в Прибайкалье, количество штрихов скольжения – 17 шт.) – итоговое решение о динамической обстановке сдвига:

1 – трещина в виде дуги большого круга и направление кинематики штрихов скольжения на ней (стрелкой показано смещение лежачего крыла); 2 – полюсы осей главных нормальных напряжений сжатия (а), промежуточной оси (б) и растяжения (в); 3 – направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б)

Fig. 3. Reconstruction of a local stress field by the method of kinematic analysis (on example of a fracture system in the observation point b1020, Tazheran site in Pribaikalie, number of slickenlines – 17) – final solution of fault dynamic condition:

1 – joint in the form of an arc of a large circle and the direction of slickenline kinematics on it (arrow shows the displacement of the footwall); 2 – poles of axes of the main normal compressive stresses (a), intermediate axis (b) and extension (c); 3 – direction of axes of the main normal stresses of compression (a) and extension (b)

радиальное сжатие, а тип стресс-режима полностью определяется рассчитанным стресс-индексом R' (от 0 до 3) [17].

Результаты

Собранные в пределах участка данные об ориентировках трещин и штрихов скольжения послужили исход-

ным материалом для восстановления полей тектонических напряжений с применением парагенетического и кинематического методов.

По методике в ходе парагенетического анализа 22 трещинных сетей получены решения о напряженном состоянии

локального ранга на уровне обнажения горных пород, в котором произведен статистический массовый замер элементов залегания трещин. Для каждого коренного выхода определено несколько решений (2–4 шт.), что характерно для тектонически активных районов. Это свидетельствует о разновозрастных напряженных состояниях, имевших место в процессе тектонического развития исследуемого участка [7]. Специальные критерии оценки диаграмм [13] определяют уровень достоверности каждого решения и обеспечивают надежность полученных решений: специфический структурный рисунок эталонной диаграммы, количественные и качественные структурные характеристики сети трещин, геолого-структурные данные коренного выхода, повторяемость трещинного парагенезиса в соседних пунктах наблюдения. Всего восстановлено 70 локальных полей напряжений разного морфогенетического типа и различной ориентировки. Кроме того, метод позволяет определить в полученных решениях поля напряжений второго порядка.

В ходе кинематического анализа ряды исходных данных о штрихах скольжения дополнены полевой информацией о зонах тектонитов, зеркалах скольжения без видимой штриховки, смещениях маркеров, трещинах отрыва. Это позволило повысить качество решений, которое определяется количеством и типом исходных материалов и уровнем достоверности кинематического типа. Всего в процессе анализа кинематическим методом получено 26 решений о режиме деформирования и поле напряжений (в среднем 1–2 решения о стресс-тензоре в одном пункте наблюдения), из которых 2 решения имеют смешанный тип поля (угол падения всех трех осей главных нормальных напряжений варьирует в диапазоне от 26° до 47°).

Парагенетический анализ показал, в каких полях напряжений формирова-

лась трещиноватость, а кинематический анализ – при каких условиях происходили смещения по трещинам. В целом оценка типов полученных решений показала, что трещинные сети в горных породах исследуемого участка формировались в полях сжатия, растяжения и сдвига приблизительно в равном количестве случаев (рис. 4, А). В частности, парагенетический анализ дает возможность установить не только погружение осей главных нормальных напряжений, но и ориентировку зоны скалывания, что определяет в сдвиговом поле лево- или правостороннее направление смещения ее крыльев. Выяснилось, что сдвиговые локальные поля напряжений инициировали больше смещений, чем поля сжатия и растяжения (рис. 4, В). Это может свидетельствовать о более интенсивных напряжениях сдвигового типа по сравнению с остальными.

В процессе парагенетического анализа трещиноватости в пунктах наблюдения получено значительно больше решений (70 шт.), чем по итогам кинематического (26 шт.), то есть снятие напряжений большей части восстановленных полей происходило только за счет формирования сети трещин при превышении предела прочности горных пород в условиях всестороннего сжатия, но без значительных смещений породных блоков, необходимых для образования макроскопически определяемых штрихов скольжения. В процессе эволюции разломной зоны это, как правило, характерно для ранней стадии [6, 18], когда вдоль будущего сместителя формируется широкая зона относительно равномерно расположенных в массиве мелких разрывов. Если внешнее поле напряжений на первой стадии ослабевает или перестает действовать, дальнейшее развитие разломной зоны прекращается (зона скрытого разлома). В случае последующего развития разломной зоны происходит объединение мелких

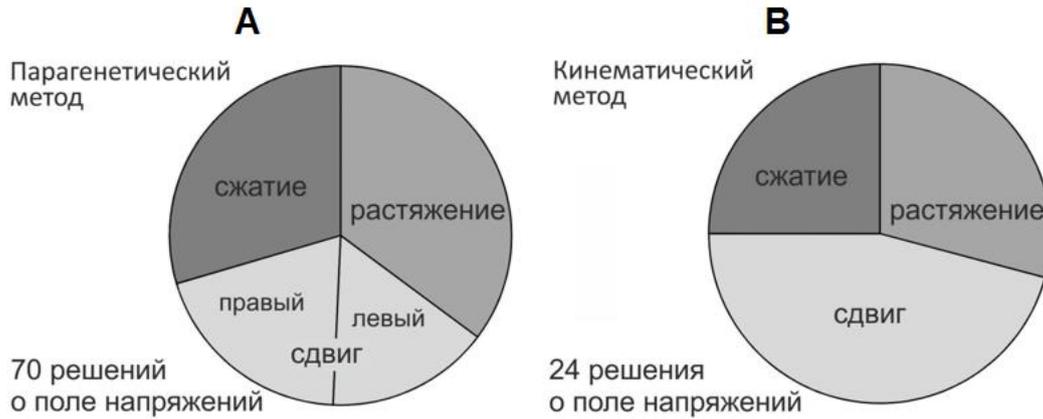


Рис. 4. Типы локальных полей напряжений на участке исследования, восстановленных разными методами
Fig. 4. Types of local stress fields in the study area reconstructed by different methods

разрывов в более крупные, по которым осуществляются более существенные перемещения блоков (поздняя стадия и стадия полного разрушения по источникам [6, 18]). При этом на поверхности разрывов под давлением крыльев образуются зеркала скольжения, штрихи и борозды, которые сконцентрированы обычно в узких зонах крупных дизъюнктивов или в сложно деформированных участках. В случае расположения пункта наблюдения вблизи такой зоны тип напряженного состояния можно восстановить по парагенезису трещин и одновременно по следам смещений. Кроме того, штрихи скольжения могут образоваться в последующем поле напряжений другого типа и ориентировки, когда сформированные ранее трещины используются в качестве путей транспорта материала.

При сравнении результатов разных методов в отдельных пунктах наблюдения (таблица) проводилось сопоставление погружения осей главных нормальных напряжений (сжатия, промежуточная, растяжения) в полученных локальных решениях о поле напряжений, включая поля второго порядка в парагенетических решениях. Выяснилось, что большинство решений кинематического

метода (22 из 26) имеют аналогичное по типу и ориентировке решение (о поле напряжений первого или второго порядка) парагенетического анализа трещинной сети в частных пунктах. На данном локальном уровне исследований предполагается, что идентичные поля напряжений (обозначены как «общие» в таблице), восстановленные разными методами, относятся к одному этапу. При этом угловое расстояние между выходами на верхнюю полусферу одной и той же оси в решениях разных методов составляла, как правило, 5–15° (реже до 40°). Это может быть обусловлено изменчивостью локального поля напряжения в процессе длительного трещинообразования, а также возможными вариациями изменения ориентировок трещин при последующих деформациях и, как следствие, различной точностью восстановления направления главных напряжений.

Вблизи 14 (из 16) пунктов наблюдения (таблица) получены сходные с парагенетическими решениями поля напряжений в результате применения кинематического метода. Например, для пункта наблюдения b1020 имеется кинематическое решение сдвига с СЗ-ЮВ простиранием оси растяжения и СВ-ЮЗ

Локальные поля напряжений, восстановленные разными методами
Local stress fields reconstructed by different methods

Пункты геолого-структурных наблюдений				Восстановленные поля напряжений – количество решений				
Номер	Наименование	Количество МЗ		Парагенетический метод		«Общие» решения для обоих методов	Кинематический метод	
		В пункте	На расстоянии от пункта	Всего	«Новые»		Всего	«Новые»
1	b1020	1	–	3	2	1	–	1
2	b1028	1	–	3	1	2	–	2
3	b1031	1	–	3	1	2	–	2
4	b1041	1	–	4	3	1	–	1
5	b1047	1	–	3	2	1	–	1
6	b1048	4	–	10	9	1	–	1
7	b1056	1	–	4	3	1	–	1
8	b1058	1	–	4	3	1	–	1
9	b1059	1	–	5	3	2	–	2
10	b1062	2	–	5	2	3–4	1	5
11	s1071	1	–	2	2	–	1	1
12	b1097	2	–	7	5	2	–	2
13	b1034	–	1 МЗ в 30 м	4	2	2	–	2
14	b1033	–	1 МЗ в 85 м	4	3	1	–	1
15	s1061	–	1 МЗ в 50 м	3	3	–	2	2
16	s10167	–	2 МЗ в 95 м	6	5	1	–	1
Всего				70	49	21–22	4	26

Примечание. МЗ – массовый замер элементов залегания трещин.
Note. M3 is a statistical mass measurement of fracture attitude.

простираем оси сжатия (см. рис. 3), подобное одному из трех парагенетических решений (см. рис. 2, А, решение 1). В пункте наблюдения b1062 одному и тому же парагенетическому решению (сдвиг) подходят два кинематических решения (сжатие и растяжение) как второстепенные поля напряжений. В четырех пунктах данные по штрихам и массовый замер ориентировок трещин были отобраны на расстоянии в пределах 100 м друг от друга (см. таблицу). Тем не менее в трех случаях кинематические решения совпали с парагенетическими, что объясняется принадлежностью мест отбора данных к одной разломной зоне.

Кроме «общих» решений по результатам применения каждого методического подхода имеются также «новые» решения (см. таблицу) – полученные только по одной методике. Во время действия «новых» полей напряжений, восстановленных в зонах скалывания парагенетическим методом, физико-механические условия по глубине, давлению, напряженному состоянию, скорости и амплитуде перемещения крыльев зоны в каждом изучаемом локальном массиве, по-видимому, не отвечали необходимым условиям для формирования зеркал скольжения. Вероятнее всего, развитие соответствующих разлом-

ных зон прекратилось на ранней стадии. Кроме того, не исключен вариант, когда пункт наблюдения расположен в отдалении от частных и магистральных сместителей зоны в случае их наличия. «Новые» решения кинематического метода о полях напряжений, не связанных с трещинными парагенезисами, обусловлены тем, что смещения происходили по имеющимся разрывам благоприятной ориентировки более древней трещинной сети.

При комплексном применении методов необходимо учитывать особенности проведения полевых работ по сбору и первичной обработке исходного геолого-структурного материала по трещиноватости в соответствии с требованиями рассмотренных методов. Массовые измерения трещин для парагенетического анализа и процедура первоначального сравнения с эталонными разрывными сетями трудоемки и требуют больше времени. С другой стороны, повсеместная распространенность «немых» трещин позволяет строить и детализировать сравнительно равномерную сеть пунктов наблюдений согласно поставленным задачам исследования и в рамках уровня обнаженности пород участка. Для кинематического метода наблюдается обратная ситуация: сбор данных менее трудозатратен, однако имеет место неравномерность пространственного распределения зеркал скольжения. Например, на исследовательском полигоне Тажеран [11] штрихи скольжения в пунктах площадной сети обнаружены только на склоне береговой зоны. Встречаемость следов смещений в обнажениях горных пород зависит преимущественно от близости расположения пункта наблюдения к разломному сместителю, а полевые маршруты при целенаправленном сборе кинематических данных проходят, как правило, вдоль разломов.

Принимая во внимание площадную

неравномерность расположения данных о смещениях в горных породах, а также различные условия формирования трещин и зеркал скольжения, которые возникают в одном и том же либо в разных полях напряжений, рекомендуется совместное применение рассматриваемых методик. Результаты реконструкции полей напряжений парагенетического и кинематического методов дополняют друг друга при исследовании истории тектонического развития района.

Необходимо подчеркнуть, что приведенная сравнительная оценка затрагивает локальный уровень исследования в пределах объемов документированных коренных выходов. С другой стороны, полученные разнотипные парагенетические и (или) кинематические локальные решения о напряженном состоянии могут быть связаны общим региональным полем более низкого порядка. Это обусловлено известными закономерностями разрывообразования [19 и др.], согласно которым внутренняя структура разломных зон земной коры формируется в разнотипных полях напряжений второго порядка, которые сменяют друг друга при переиндексации осей напряжений в одном и том же объеме горных пород. Для анализа генетической соподчиненности различающихся («новых») решений, а также для более достоверной оценки принадлежности одинаковых («общих») решений к одному этапу необходимы исследования на основе большего статистического материала с применением порангового анализа полей напряжений.

Выводы

1. На примере комплексного исследования приразломной трещиноватости одного из участков в Прибайкалье проведена сравнительная оценка результатов применения двух методик по реконструкции полей тектонических напряжений – парагенетического анализа и кинематического метода. Получены

решения о полях напряжений локально-го ранга разного типа и ориентировки. Исходный фактический материал представляет статистические массовые замеры элементов залегания трещин и ориентировки зеркал скольжения, задокументированные в одних и тех же пунктах наблюдения (16 пунктов).

2. Парагенетический анализ позволил получить в целом больше решений о локальном напряженном состоянии (70 шт.), чем кинематический метод (26 шт.). По-видимому, большая часть реконструированных локальных полей сжатия, сдвига и растяжения действовала на ранних стадиях развития мелких разломных зон разного возраста до формирования фрагментов разломного сместителя и проявилась в образовании трещинных парагенезисов без значительных смещений по трещинам. Что касается случаев подвижек породных блоков, они реализованы на более поздних стадиях развития разломов и в большей степени в сдвиговых полях напряжений.

3. Сравнительная оценка результатов по каждому пункту наблюдений показала, что большинство решений кинематического метода имеет аналогичное по типу и ориентировке решение

среди парагенетических решений о локальном поле напряжений первого или второго порядка, полученных вблизи или в этом же коренном выходе. Идентичные решения двух методов о напряженном состоянии предположительно относятся к одному этапу. Остальные решения относятся к периодам действия полей напряжений, проявленных только в образовании парагенезиса трещин (49 решений) либо в следах перемещений по активизированным более древним разрывам (4 решения).

4. Результаты реконструкции локальных полей напряжений на участке Тажеран, полученные разными методами, дополняют и частично подтверждают друг друга при изучении разновозрастных напряженных состояний, в этой связи рекомендуется совместное применение методов.

Автор выражает искреннюю благодарность кандидату геолого-минералогических наук А.В. Черемных, ведущему инженеру А.А. Тарасовой за помощь в экспедиционных работах.

Исследования проводились при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-05-00154А).

Библиографический список

1. Шерман С. И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.

2. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.

3. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М.: Изд-во ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.

4. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.

5. Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A.. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms=7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gornyy Altai // Tectonophysics. 2008. № 453. P. 276–294.

6. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014.

Т. 5. № 2. С. 445–467.
<https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.

7. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43.

8. Delvaux D. The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones // Terra Nova. 1993. Vol. 5. P. 216.

9. Delvaux D., Sperner B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In.: New Insights into Structural Interpretation and Modelling / ed. D. Nieuwland // Geological Society London Special Publications. 2003. Vol. 212. P. 75–100.

10. Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data // Journal of Structural Geology. 1989. Vol. 11. P. 37–50.

11. Бурзунова Ю.П. Разломные зоны Тажеранского массива сиенитов (Западное Прибайкалье) по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 1 (50). С. 58–67.

12. Федоровский В.С., Скляр Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Старикова А.Е. Геологическая карта массива Тажеран. Масштаб 1:10000. М: Группа компаний А1 ТИС, 2009.

13. Бурзунова Ю.П. Трещины горных пород вблизи разломов: особенности применения структурно-парагенетического анализа // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 3. С. 673–693.

14. Levi K.G., Miroshnitchenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D. Active faults of the Baikal depression // Bulletin du Centre de recherches Elf Exploration Production. 1997. № 21 (2). P. 399–434.

15. Гущенко О.И. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 331–334.

16. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25.

17. Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. Vol. 282. P. 1–38.

18. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 243 с.

19. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.

References

1. Sherman S. I., Dneprovskii Yu.I. *Polya napryazhenii zemnoi kory i geologo-strukturnye metody ikh izucheniya* [Earth crust stress fields and the geological-structural methods of their study]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1989, 158 p. (In Russian).

2. Rebetskii Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metody i algoritmy* [From slickenside to tectonic stresses. Methods and algorithms]. Moscow: GEOS Publ., 2017, 234 p. (In Russian).

3. Rastsvetaev L.M. *Parageneticheskii metod strukturnogo analiza diz'yunktivnykh tektonicheskikh narushenii* [Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic disturbances]. *Problemy strukturnoi geologii i fiziki tektonicheskikh protsessov* [Problems of structural geology and physics of tectonic processes]. Part 2. Moscow: Geological Institute of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1987, pp. 173–235. (In Russian).

4. Gintov O.B. *Polevaya tektonofizika i ee primeneniye pri izuchenii deformatsii zemnoi kory Ukrainy* [Field tectonophysics and its application to study Earth's crust deformations in Ukraine]. Kiev: Feniks Publ., 2005, 572 p. (In Russian).

5. Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A.. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms=7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai. *Tectonophysics*, 2008, no. 453, pp. 276–294.

6. Seminskii K.Zh. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 1: Basic theoretical concepts and principles. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2014, vol. 5, no. 2, pp. 445–467. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>. (In Russian).

7. Seminskii K.Zh. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: Main stages and prospects. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2015, vol. 6, no. 1, pp. 1–43. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>. (In Russian).

8. Delvaux D. The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones. *Terra Nova*, 1993, vol. 5, p. 216.

9. Delvaux D., Sperner B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* / ed. D. Nieuwland. Geological Society London Special Publications, 2003, vol. 212, pp. 75–100.

10. Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 1989, vol. 11, pp. 37–50.

11. Burzunova Yu.P. Tazheran syenite massif fault zones (West Pribaikalie) by the results of structural paragenetic analysis of meso-fracturing. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2015, no. 1 (50), pp. 58–67. (In Russian).

12. Fedorovskii V.S., Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E. *Geologicheskaya karta massiva Tazheran* [Geological map of the Tazheran massif]. Scale 1:10000. Moscow: Gruppa kompanii A1 TIS Publ., 2009. (In Russian).

13. Burzunova Yu.P. Rock fractures near faults: specific features of structural-paragenetic analysis. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2017, vol. 8, no. 3, pp. 673–693. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0312>. (In Russian).

14. Levi K.G., Miroshnitchenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D. Active faults of the Baikal depression. *Bulletin du Centre de recherches Elf Exploration Production*, 1997, no. 21 (2), pp. 399–434.

15. Gushchenko O.I. Analysis of the orientations of the shear tectonic displacements and their tectonophysical interpretation under paleostress reconstruction. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1973, vol. 210, no. 2, pp. 331–334. (In Russian).

16. Gushchenko O.I. *Metod kinematicheskogo analiza struktur razrusheniya pri*

rekonstruktsii polei tektonicheskikh napryazhenii [Method of kinematic analysis of fracture structures under tectonic stress fields reconstruction]. *Polya napryazhenii i deformatsii v litosfere* [Fields of stresses and deformations in lithosphere]. Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 7–25. (In Russian).

17. Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal

region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 1997, vol. 282, pp. 1–38.

18. Seminskii K.Zh. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon. Tektonofizicheskii aspekt* [Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2003, 243 p. (In Russian).

19. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

Критерии авторства

Бурзунова Ю.П. написала статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Burzunova Yu.P. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.