



SPECIALIZED MAPPING OF CRUSTAL FAULT ZONES. PART 2: MAIN STAGES AND PROSPECTS

K. Zh. Seminsky

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article is to complete the description of the special mapping method which theoretical basis and principles were published in [Seminsky, 2014]. With reference to data on the Ulirba site located in Priolkhonie (Western Pribaikalie), the content of special mapping is reviewed in detail. The method is based on paragenetical analysis of abundant jointing which specific feature is the lack of any visible displacement indicators. There are three stages in the special mapping method (Fig. 3) as follows:

Stage I: Preparation and analysis of previously published data on the regional fault structure (Fig. 1, A–I), establishment of a networks of stations to conduct structural geological monitoring and mass measurements of joints, record of rock data (Fig. 2, A), general state of the fault network (Fig. 1, J–3), fracture density (Fig. 2, B) and, if any, structures of the above-jointing level (Fig. 1, E, 3; Fig. 2, A).

Stage II is aimed at processing of field data and includes activities in four groups (II.1–II.4) as follows: Group II.1: construction of circle diagrams, specification of characteristics of joint systems and their typical scatters (Fig. 4, A), identification of simple (generally tippie) parageneses, and determination of dynamic settings of their formation (translocal rank) (Table 1), evaluation of densities and complexity of the joint networks, analysis of their spacial patterns within the site under mapping, and identification of the most intensively destructed zones in the rock massif (Fig. 2, B–B). Group II.2: comparison of jointing diagrams with reference ones showing joint poles (Fig. 4, B–B; E–3; J–H), and, in case of their satisfactory correlation, making a conclusion of potential formation of a specific joint pattern in the local zone of strike-slip, normal faulting or reverse faulting (Fig. 4, Г–Д, И–К, О–П; Fig. 5; Fig. 7, B), and determination of relative age relationships between such zones on the basis analysis of the scatter of joint systems, shearing angles and other relevant information. Group II.3: construction of a circle diagram for the specified mapping site with local fault poles (Fig. 8, B), identification of conjugated systems and dynamic settings of their formation (Fig. 2), plotting the information onto the schematic map of the location under study, and marking the transregional fault zones (Fig. 7, B–K) with observation sites showing similar settings and parageneses of local faults. Group II.4: comparison between diagrams of fault poles of local ranks with reference patterns selected according to the availability of conjugated pairs of fractures (Fig. 9, B–I); based on the above comparison, decision making on potential formation of a paragenesis of local faults in the strike-slip, normal and reserve/thrust fault zones (Fig. 9, J–Ж), and delineation of boundaries of such zones in the schematic map by connecting the observation sites with similar solutions (Fig. 7, J–H).

Stage III is aimed at interpreting and includes comprehensive analyses of mapping results and priori information, construction of a final scheme of the fault zones showing their subordination by ranks (Fig. 7, O) and schemes of fault zones for various structure formation stages, showing types of faults and specific features of their internal patterns, i.e. definition of the peripheral sub-zone, sub-zones of fractures of the 2nd order and, if established, the sub-zone of the major fault (Fig. 7, J–H).

Prospects of the special mapping method can be highlighted upon its comparison with the conventional structural methods applied in studies of faults. On the one side, the method requires time-consuming mass measurements and special processing of 'dumb' joints; on the other side, it provides for analyses of abundant jointing data, ensures a high level of detail in mapping of patterns of fault zones, reveals rank subordination of faults and helps to determine other specific features of fractures and faults. Hence, a conventional study of sites with evident tectonics can be based on traditional structural methods, while the special mapping method is recommendable as an additional means of analyses providing information on specific elements of the fault patterns, including establishment of the internal zoning of faults, hierarchy of dynamic settings of faulting etc. In cases when direct observation of faults is limited as the study area is poorly outcropped, or in case of specialized studies such as drilling of wells, the special mapping method can be most useful when applied in its full scope.

With account of its specific features, this method is a promising tool for solution of theoretical problems related to studies of divisibility of the Earth's crust into zones and blocks and researches of regularities in development of fault

zones in space and time. It can be useful for application-oriented surveys in geology, ore geology, engineering geology and hydrogeology that require detailed mapping of fault zones controlling many associated processes of key importance.

Key words: joints, fault zones, parageneses of fractures, stress field, ranks, stages of special mapping, Baikal rift.

Recommended by S.I. Sherman

For citation: Seminsky K.Zh. 2015. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: Main stages and prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 1–43. doi:10.5800/GT-2015-6-1-0170.

Для цитирования: Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // *Геодинамика и тектонофизика*. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43. doi: 10.5800/GT-2015-6-1-0170.

СПЕЦКАРТИРОВАНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ. СТАТЬЯ 2: ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

К. Ж. Семинский

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Статья завершает описание метода спецкартирования, теоретические основы и принципы которого были представлены в предыдущей публикации [Seminsky, 2014]. На примере участка «Улирба» в Приольхонье (Западное Прибайкалье) подробно рассмотрено содержание структурного метода, базирующегося на парагенетическом анализе повсеместно распространенной трещиноватости, особенностью которой является отсутствие видимых признаков смещений. Основные операции спецкартирования проводятся в рамках трех главных этапов (рис. 3).

В ходе подготовительного этапа (I) осуществляется анализ данных предшественников о разломной структуре региона (рис. 1, А–Г), на участке картирования создается сеть пунктов геолого-структурных наблюдений, в каждом из которых проводится массовый замер трещин, фиксируется информация о горных породах (рис. 2, А), общем состоянии сети разрывов (рис. 1, Д–З), их плотности (рис. 2, Б) и, если присутствуют, – структурах надтрещинного уровня (рис. 1, Е, З; рис. 2, А).

Этап обработки полевого материала (II) состоит из формализованных операций, образующих четыре группы (II.1–II.4). Операции первой группы (II.1) включают построение круговых диаграмм, характеристику систем трещин и свойственных им разбросов (рис. 4, А), выделение простых (обычно тройственных) парагенезисов с определением динамических обстановок их формирования (транслокальный ранг) (табл. 1), оценку показателей плотности и сложности трещинных сетей, анализ их пространственного распределения в пределах участка картирования и выявление на этой основе зон наиболее интенсивной деструкции породного массива (рис. 2, Б–В). Операции второй группы (II.2) состоят в сопоставлении каждой диаграммы трещиноватости с эталонными трафаретами полюсов трещин (рис. 4, Б–В; Е–З; Л–Н) и при их удовлетворительном совпадении – получении решения о возможности формирования определенной трещинной сети в сдвиговой, сбросовой или взбросовой (надвиговой) разломной зоне локального ранга (рис. 4, Г–Д, И–К, О–П; рис. 5; рис. 7, Б), а также установлении для этих зон относительных возрастных взаимоотношений на основе анализа разбросов у систем трещин, величин угла скалывания, априорной информации. Операции третьей группы (II.3) включают построение для участка картирования круговой диаграммы полюсов разломов локального ранга (рис. 8, Б), выявление пар сопряженных систем и динамических обстановок их формирования (табл. 2), вынесение этой информации на схему местности и оконтуривание разломных зон трансрегионального ранга (рис. 7, В–К), включающих точки наблюдения с однотипными обстановками и парагенезисами локальных разломов. Операции четвертой группы (II.4) состоят в сопоставлении диаграммы полюсов разломов локального ранга с выбранными согласно наличию сопряженных пар эталонными трафаретами разрывов (рис. 9, Б–Г) и на этой основе – получении решения о возможности формирования определенного парагенезиса локальных разломов в сдвиговой, сбросовой или взбросовой (надвиговой) зоне регионального ранга (рис. 9, Д–Ж), а также оконтуривании их границ на схеме участка картирования путем объединения точек наблюдения с однотипными решениями (рис. 7, Л–Н).

Этап интерпретации (III) заключается в комплексном анализе полученных при картировании материалов и априорной информации, результатами которого является итоговая схема разломных зон с их ранговой со-

подчиненностью (рис. 7, О), а также схемы разломных зон для отдельных этапов структурообразования с характеристикой их типа и особенностей внутреннего строения, т.е. выделением периферийной подзоны, подзоны разрывов 2-го порядка и, если установлена, – подзоны главного сместителя (рис. 7, Л–Н).

Перспективы спецкартирования определяются его особенностями в сравнении с известными геолого-структурными способами исследования разломов. С одной стороны, реализация метода связана с временными массовыми измерениями и специфической обработкой «немых» трещин, а с другой – дает возможность в качестве основы для анализа использовать повсеместно распространенную трещиноватость, обеспечивает высокий уровень детальности картирования разрывной структуры разломных зон, позволяет определять их ранговую соподчиненность и другие особенности. Как следствие, в ситуациях с ярко выраженной тектоникой ординарное исследование должно опираться на традиционные геолого-структурные методы, а приемы спецкартирования могут привлекаться в качестве дополнительных способов анализа, целью которых является получение информации по отдельным элементам строения разломной сети (установление внутренней зональности дизъюнктивов, иерархии динамических обстановок их формирования и др.). Напротив, при минимуме прямых наблюдений за разломами, характерном для слабообнаженных территорий или использования специфических видов исследования (например, бурение скважин), операции спецкартирования должны осуществляться в полном объеме.

Перечисленные особенности спецкартирования открывают перед методом широкие перспективы для решения теоретических задач, связанных с исследованием зонно-блоковой делимости земной коры и закономерностей пространственно-временного развития ее главных элементов – разломных зон. Области практического применения являются геологическая съемка, а также рудная геология, инженерно-геологические изыскания и гидрогеология, в рамках которых особое значение имеет детальность картирования разломных зон, контролирующих многие важные в прикладном отношении сопутствующие процессы.

Ключевые слова: трещины, разломные зоны, парагенезисы разрывов, поле напряжений, ранги, этапы спецкартирования, Байкальский рифт.

1. ВВЕДЕНИЕ

В первой части описания спецкартирования было показано [Seminsky, 2014], что этот геолого-структурный метод позволяет осуществлять картирование разломной структуры и реконструкцию полей тектонических напряжений земной коры на базе парагенетического анализа массовых замеров трещин, характеризующихся отсутствием видимых смещений и повсеместным распространением в горных породах.

Содержание спецкартирования в своих основных чертах сводится к следующему. Вначале на изученной территории в соответствующем масштабе организуется сеть пунктов, в каждом из которых проводятся массовый замер элементов залегания трещин и другие наблюдения, способствующие решению задач структурного картирования. Затем для каждого пункта наблюдений отстраивается круговая диаграмма трещиноватости, которая затем сопоставляется с трафаретами, отражающими идеализированные трещинные сети в разломных зонах разного морфогенетического типа. Полученные таким способом решения о присутствии в пункте наблюдения разломной зоны определенного типа и ориентировки выносятся в соответствующем месте на схему территории, после чего по точкам с однотипными парагенезисами фикси-

руется положение разломных зон. Для подтверждения достоверности картирования используется априорная информация о наличии сместителей, кинематике и возрасте перемещений по разрывам, полученная в отдельных коренных выходах и перенесенная на всю пространственно связанную с ними зону распространения однотипной трещинной сети.

Кроме составленной описанным способом схемы разломной структуры параллельно устанавливаются типы полей напряжений, в которых на отдельных этапах формировались или активизировались ее отдельные элементы. Для этого проводится поранговый анализ выделенных разломных зон, в ходе которого все полученные ранее локальные решения о их присутствии в отдельных пунктах массового замера сопоставляются по типу и ориентации с членами идеализированных парагенезисов разломов, формирующихся при сжатии (надвиги и взбросы), растяжении (сбросы) или сдвиге (правые и левые сдвиги). Установленные в итоге данной процедуры решения о наличии разнотипных разломных зон соответствуют региональному уровню поля напряжений, существовавшему в истории развития изучаемого участка земной коры. Далее эти решения используются в качестве основы для следующей итерации с идеализированными парагенезисами разломов, пока не бу-

дет исчерпана возможность объединения разломных зон в рамках сетей, соответствующих определенному полю напряжений. Несколько (обычно 3–4) оставшихся решений об ориентировке разломной зоны и динамической обстановке ее формирования отражают самый низкий (трансрегиональный или геоструктурный) уровень процесса деструкции в регионе. Они не могут развиваться в одно время и, таким образом, соответствуют разным этапам разломообразования, проявившимся на изучаемой территории. Далее эти этапы располагаются в последовательности, отражающей относительный возраст их проявления в зависимости от оценок, сделанных по косвенным (статистическая информация о частоте встречаемости и угловых соотношениях разрывных систем) или прямым (априорная информация) признакам. В заключение спецкартирования обратным ходом могут быть составлены схемы разломных зон для каждого из главных этапов формирования структуры. Для этого из общей сети выделяются те дизъюнктивы, которые возникли или активизировались в соответствующем поле напряжений.

Основной задачей статьи является рассмотрение и поэтапное представление на конкретном примере содержания всех операций рассматриваемого метода, что позволит применять его без специальной подготовки для картирования разломной структуры в большинстве природных регионов. Второстепенная задача – установить главные черты поперечной зональности внутреннего строения разломных зон на основе применения тектонофизического подхода к интерпретации результатов спецкартирования на мысе Улирба в Приольхонье (Западное Прибайкалье).

2. РЕГИОНАЛЬНАЯ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И РАЗЛОМЫ УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДАННЫМ ТРАДИЦИОННЫХ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Участок спецкартирования – узкая полоса берегового обрыва на восточной стороне м. Улирба, который располагается на западном побережье оз. Байкал (рис. 1), образовавшегося, как известно, при растяжении земной коры в процессе формирования одноименного рифта. Эта тектоническая структура в изучаемом регионе приурочена к границе древнего Сибирского кратона и Саяно-Байкальского складчатого пояса, представленного полихронными комплексами метаморфических пород. Контакт двух крупных тектонических единиц региона происходит по системе разломов краевого платформенного шва (Приморский сегмент), который выражен широкой полосой бластомилонитов

и разнотипных интрузивных проявлений, включая гранитоиды приморского комплекса [Zamaraev, 1967; Zamaraev et al., 1979; Sklyarov, 2005].

Активизация краевых разломов происходила неоднократно в геологической истории региона, однако характер деструктивного процесса со всей определенностью диагностируется лишь для фанерозойских этапов тектогенеза. Это связано с их относительной молодостью и выраженностью в деформациях «хрупкого типа»: открытых трещинах и разломных сместителях, представленных «рыхлыми тектонитами». Исследователи, занимавшиеся реконструкцией локальных стресс-тензоров на базе геолого-структурного анализа разрывов Западного Прибайкалья, выделили несколько наиболее значимых (по частоте встречаемости) динамических обстановок деструкции земной коры Прибайкалья. Поле сжатия с ориентировкой одноименной оси в направлении СЗ-ЮВ связывается с этапом раннепалеозойской коллизии [Mazukabzov, Sizykh, 1987; Aleksandrov, 1990; Seminsky, Gladkov, 1991; Sherman et al., 1994; Delvaux et al., 1995; Fedorovsky, 1997; Sklyarov, 2005; и др.]. Для раннего кайнозоя большинством исследователей выделяется обстановка сдвига с левосторонним характером перемещений по северо-восточным разломам [Sherman et al., 1994; Levi et al., 1997; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; и др.]. Наконец, начиная с позднеплиоценового времени в регионе фиксируется этап наиболее интенсивного растяжения земной коры в направлении СЗ-ЮВ [Sherman, Dneprovsky, 1989; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; Lunina et al., 2002; Cheremnykh, 2010; и др.]. Процесс растяжения земной коры продолжается в настоящее время, о чем свидетельствует сейсмическая активность, являющаяся следствием перемещений по рифтообразующим разломам [Doser, 1991; Logatchev, Zorin, 1992; Solonenko et al., 1993; Mats, 1993; Delvaux et al., 1997; Melnikova, Radzimovich, 1998; Seminskii, Radzimovich, 2011; и др.].

Главные сбросы западного плеча Байкальского рифта группируются в Обручевскую разломную систему, представленную крупнейшими Приморской и Морской ветвями, первая из которых наследует юго-восточную границу краевых платформенных структур, а вторая образует подводный склон главной котловины оз. Байкал. Между этими разломами находится Приольхонский блок, к которому принадлежит район исследований (рис. 1, Б), сложенный древними метаморфитами. Полуостров Улирба отделен от «материка» узким перешейком (рис. 1, В), который является отражением в рельефе крупной сбросовой зоны, параллельной крутому эскарпу Приморского разлома, находящемуся северо-западнее (рис. 1, Б). Кроме Улирбинского сброса, на полуострове находит отчетливое геоморфоло-

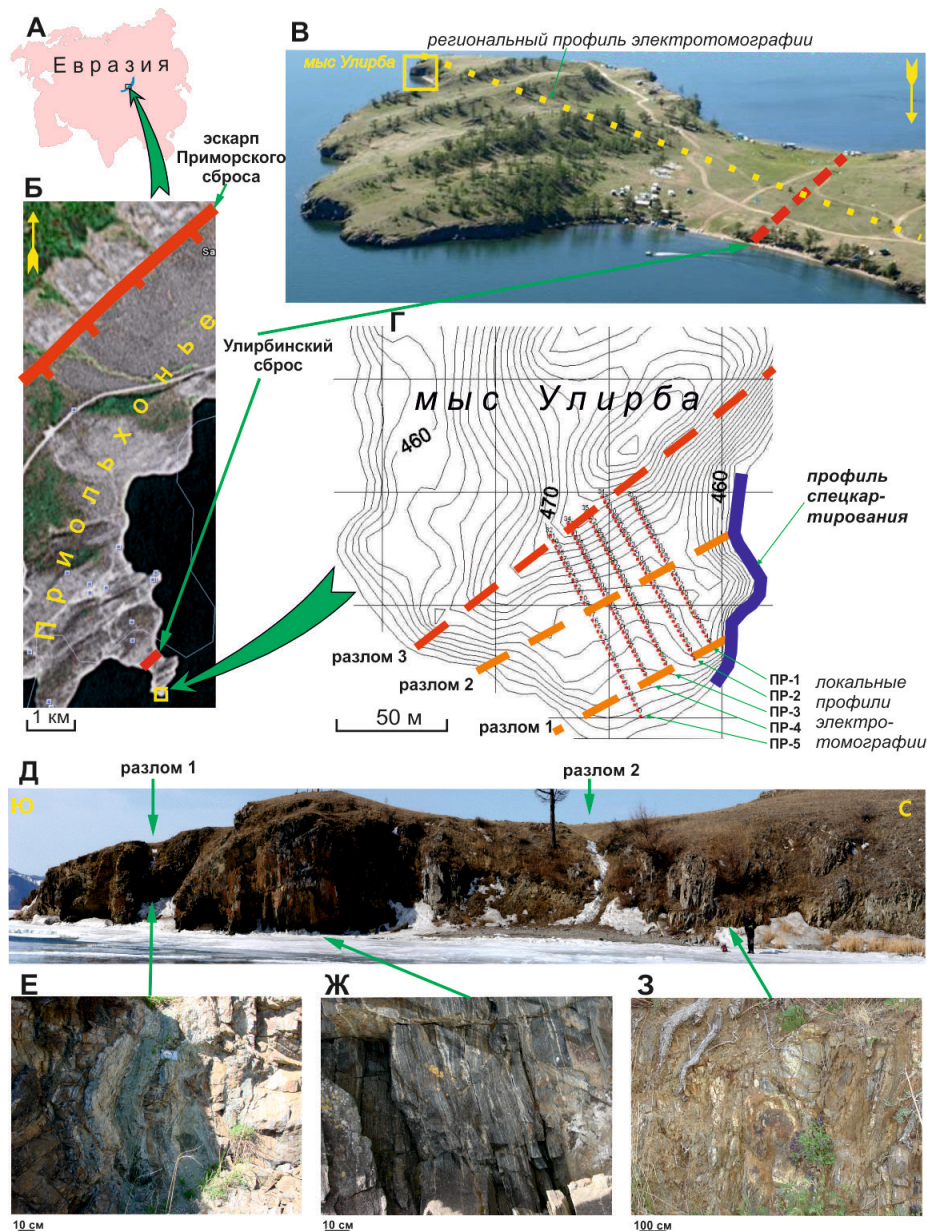


Рис. 1. Местоположение участка спецкартирования «Улирба» в Западном Прибайкалье (Восточная Сибирь) и разноранговые разломы региона.

А – обзорная схема. *Б* – положение участка «Улирба» (желтый квадрат) на космоснимке северной части Приольхонья (красные линии – Приморский и Улирбинский сбросы). *В* – положение участка «Улирба» на фотографии одноименного мыса, сделанной с вертолета (эл. ресурс: www.baikalvisa.ru) (красный пунктир – сместитель Улирбинского сброса; линия желтых точек – профиль малоглубинной электротомографии). *Г* – схема изолиний рельефа на м. Улирба, на которой показаны полосовидный участок спецкартирования (жирная фиолетовая линия), главные разломы (пунктирные линии) и положение локальных профилей малоглубинной электротомографии (пять линий красных точек). *Д* – фотография берегового обрыва, в котором ложбинами отчетливо выделяются разломы 1 и 2, являющиеся на участке спецкартирования главными объектами традиционных геолого-структурных наблюдений. *Е–З* – фотографии горных пород берегового обрыва, иллюстрирующие на уровне обнажений характерные структурные ситуации на участке спецкартирования, которые соответствуют зонам разломов 1 (*Е*) и 2 (*З*), а также блоку менее нарушенных пород между ними (*Ж*).

Fig. 1. Location of the Ulirba special mapping site in Western Pribaikalie, East Siberia, and regional faults of various ranks.

A – general scheme. *B* – location of the Ulirba site (yellow box) in the space image of the northern part of Priolkhonia (red lines show the Primorsky and Ulirba normal faults). *C* – location of the Ulirba site in the helicopter-view photo of the Ulirba cape (www.baikalvisa.ru) (the red line shows the Ulirba normal fault plane; the yellow dotted line shows the electrical resistivity tomography profile). *D* – isolines of the terrain at the Ulirba cape; the special mapping site is shown by the thick violet line; main faults are shown by dashed lines; locations of electrical resistivity tomography profiles are shown by red dotted lines. *E* – photo of the cliff where the main subjects of traditional geological and structural observations, i.e. faults 1 and 2, are clearly visible on the special mapping site. *E–3* – photos of cliff rocks as illustrations of typical structures at the level of outcrops on the special mapping site, which correspond to zones of fault 1 (*E*) and 2 (*3*), and the block of less destructed rocks between the zones (*Ж*).

гическое выражение серия более мелких субпараллельных разломных зон, представленных в рельефе линейно вытянутыми ложбинами (рис. 1, В). В противоположность этому интересующая нас юго-восточная оконечность полуострова имеет сравнительно ровную поверхность и принадлежит к блоку (рис. 1, Г), который был опущен по небольшому разлому (№ 3), выраженному, как и другие сбросы рассматриваемой территории, отчетливым уступом в рельефе.

В качестве участка для спецкартирования была выбрана узкая полоса берегового обрыва этой пониженной мысовой части п-ва Улирба, которая имеет длину около 120 м и характеризуется обнаженностью горных пород (рис. 1, Д), достаточной для проведения геолого-структурных наблюдений. Согласно их результатам (рис. 2, А), в береговом обрыве обнажаются субвертикально залегающие биотитовые гнейсы, в которых выделяется прослой амфиболовых гнейсов. Породы во многих местах несут следы тектонической переработки, проявляющейся в рассланцевании, катаклазе и милонитизации, свидетельствующих о глубинных условиях переработки вещества. Участки тектонитов были детально задокументированы [Cheremnykh, 2010], из этих материалов следует, что в пределах рассматриваемой части берегового обрыва они концентрируются в двух местах. Именно здесь в разные этапы фанерозойской истории тектонического развития региона происходила активизация подвижек, итогом которых стало формирование двух разломных зон с тектонитами «рыхлого» типа, характерными для приповерхностной части коры.

Большая по размерам разломная зона № 2 представлена интенсивно трещиноватыми и передробленными породами (рис. 2, А), которые подверглись дополнительному разрушению со стороны процессов выветривания (см. рис. 1, З). В зоне № 1 ширина передробленных и выветрелых пород значительно меньше (рис. 2, А), однако высокая локализованность перемещений у главного сместителя привела здесь к формированию зеленоватой глины трения мощностью 15 см (см. рис. 1, Е). Породы, примыкающие к участкам дробления, характеризуются интенсивной нарушенностью трещинами и, таким образом, представляют периферию разломных зон. Предшествующие измерения плотности мелких разрывов [Cheremnykh, 2010] свидетельствуют, что на мысе Улирба участки повышенной трещиноватости сопоставимы по размерам с блоками, характеризующимися «фоновой» трещиноватостью (см. рис. 1, Ж). Для оценки данного признака, связанного с выделением границ разломных зон, плотность трещин на 1 м^2 (D) была измерена в 14 точках, неравномерно распределенных вдоль

участка исследований ввиду особенностей обнаженности горных пород.

Как видно из построенного графика (рис. 2, Б), параметр D варьируется вдоль профиля, достигая максимальных значений (35–40 тр/м²) у разломов № 1 и 2. Вопрос определения границ разломной зоны в трещиноватости – тема специального исследования, отдельные аспекты которой будут затронуты и в данной статье. Здесь в качестве выделения границы «фон–аномалия» логично применить среднее арифметическое измеренных величин – критерий, который обычно используется при анализе количественных данных. Для участка «Улирба» это 23 тр/м², что близко к значению 20 тр/м², осредненному для разных участков Приольхонья в ходе наших предыдущих исследований [Seminsky et al., 2013], а также к величине (22 тр/м²), принятой предшественниками при детальном исследовании зоны Приморского сброса в районе р. Сарма [Lunina et al., 2002]. В соответствии с принятой граничной величиной ($D=23$ тр/м²), ширина участка повышенной трещиноватости, связанная с разломом № 1, равна 6 м, а с разломом № 2 – 27 м.

Рассматривая пространственное положение разломов № 1 и 2, следует отметить, что они субвертикальны, характеризуются близким простиранием и в первом приближении конформны залеганию пород. Как следствие, на участке исследований не удалось зафиксировать прямые кинематические признаки (смещение маркеров и др.), позволяющие достоверно определить характер движений по тектоническим нарушениям ни для одного из этапов деформаций. Штрихи скольжения на плоскостях трещин наблюдались в единичных случаях и, как правило, имели неясную природу. По их ориентации можно лишь сделать заключение о преобладании смещений блоков по падению и простиранию.

Таким образом, результаты традиционных геолого-структурных наблюдений на участке «Улирба» в контексте литературных данных об этапах тектогенеза в Западном Прибайкалье позволили сделать следующие выводы. Биотитовые и амфиболовые гнейсы, обнажающиеся в узкой полосе берегового обрыва на восточной стороне мыса Улирба, нарушены двумя субвертикальными разломами северо-восточной ориентировки, испытавшими неоднократную активизацию. На современном уровне эрозионного среза экспонируются рассланцованные, катаклазированные и милонитизированные породы, сформировавшиеся на существенных глубинах в процессе наиболее древних этапов разломообразования. Подвижки, происходившие в этих ослабленных зонах в фанерозойское время, привели к интенсивному трещинообразованию и дроблению древних тектонитов вплоть до образования глины трения у главных сместителей. Суб-

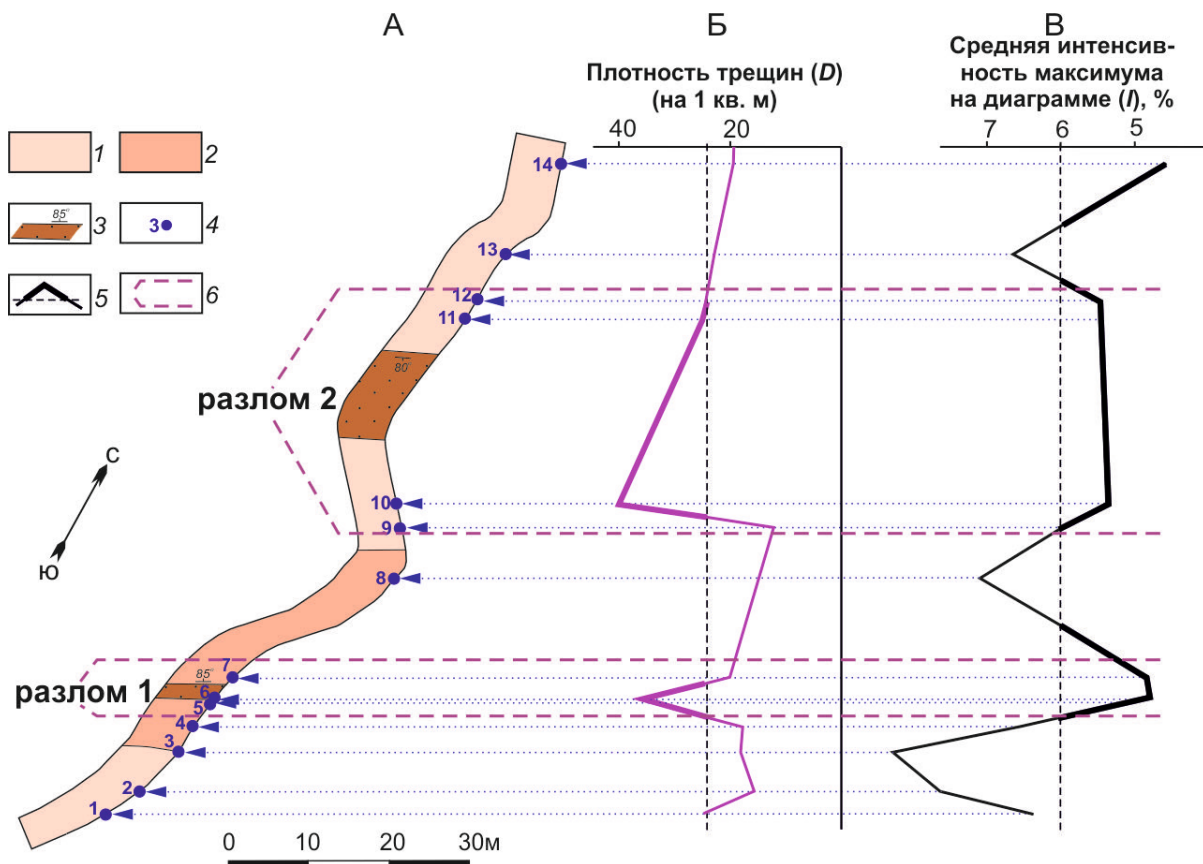


Рис. 2. Результаты традиционных геолого-структурных работ на участке спецкартирования «Улирба».

А – геологическая схема участка с четырнадцатью пунктами детальных наблюдений за трещиноватостью. Б–В – графики изменения вдоль участка спецкартирования параметров трещинной сети D (Б) и I (В), полученных для каждого пункта наблюдения: D – плотность трещин в 1 м² коренного выхода; I – средняя интенсивность максимума полюсов трещин на круговой диаграмме, в %. 1–2 – биотитовые (1) и амфиболовые (2) гнейсы; 3 – полосы проявления тектонитов (глинка трения, брекчия дробления), связанных с перемещениями по разломам 1 и 2, и элементы их залегания; 4 – положение пунктов массовых замеров трещин; 5 – участки графиков с аномальными величинами параметров D и I , т.е. большими (для D) или меньшими (для I), чем их средние арифметические значения на профиле; 6 – зоны наиболее интенсивной деструкции породного массива, которые отличаются трещиноватостью, хаотической по строению и аномальной по степени нарушенности.

Fig. 2. Results of traditional structural works on the Ulirba special mapping site.

А – geological scheme of the site showing 14 observation points whereat jointing was studied in detail. Б–В – curves showing changes of parameters of joint system D (Б) and I (В) along the special mapping site. Data from all the observation points are considered: D – density of joints in 1 m² basic rock outcrop; I – average intensity of the maximum of joint poles in the circle diagram, %. 1–2 – biotite (1) and amphibole (2) gneisses; 3 – zones of tectonites (gouge, crush breccia) associated with displacements along faults 1 and 2, and bedding elements; 4 – locations of mass joint measurement points; 5 – segments of curves with anomalous values of parameters D and I (higher for D and lower for I) as compared with arithmetic values at the profile; 6 – zones of the most intense destruction of the rocks massif where the structure of joint is chaotic and its destruction degree is anomalous.

страт разломных зон оказался в существенной степени дезинтегрирован, что многократно усилилось вследствие выветривания, интенсивно протекающего в близповерхностной части породного массива. Среди подавляющего преобладания «немых» трещин встречаются единичные плоскости со следами перемещений неясного типа, субгоризонтальная и субвертикальная ориентация которых в целом не противоречит известным для Западного Прибайкалья главным этапам разломообразования в условиях сжатия (ранний палеозой), сдвига (ран-

ний кайнозой) и растяжения (поздний кайнозой) земной коры.

Полосовидный участок исследований на м. Улирба полностью удовлетворяет задаче иллюстрирования на конкретном примере основных этапов спецкартирования. Во-первых, горные породы в пределах берегового уступа хорошо обнажены, что не создает проблем с массовыми замерами трещинных сетей. Во-вторых, эти сети сформировались в результате многоэтапных деформаций и практически не содержат информации о кинемати-

ке перемещений по отдельным разрывам, т.е. являются наиболее сложным объектом для проверки эффективности спецкартирования. В-третьих, на участке присутствуют два разлома, представленные «рыхлыми» тектонитами в осевых частях и интенсивной трещиноватостью – на периферии, что является «заверочным фактором» для одного из главных результатов применения метода, т.е. выделения зон разломов на основе парагенетического анализа «немой» трещиноватости. Целью приведенного ниже описания будет показать, как при последовательной реализации операций спецкартирования на примере участка «Улирба» решаются не менее важные задачи структурной съемки: выявление особенностей внутреннего строения разломных зон, реконструкция типов и иерархии динамических обстановок их формирования и другие.

3. СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВНЫХ ЭТАПОВ СПЕЦКАРТИРОВАНИЯ

Для удобства практического использования последовательность работ по спецкартированию иллюстрируется рис. 3, на котором для каждого этапа (столбец 1) и методической операции (столбец 2) приведены условные размеры изучаемого участка (столбец 3), разновидности анализируемых разрывов 2-го порядка (столбец 4), примеры их изображения на диаграммах в полюсах (столбец 5), вид разрыва 1-го порядка (столбец 6), примеры его изображения как зоны с разрывами 2-го порядка на диаграмме в форме дуг и линий (столбец 7), а также иерархический ранг рассматриваемого дизъюнктива и соответствующего ему поля напряжений (столбец 8).

3.1. Подготовительный этап

На подготовительном этапе проводится сбор полевых данных в пределах картируемого участка земной коры. Главной задачей является создание на площади сети пунктов геолого-структурных наблюдений. Маршруты проводятся параллельно друг другу вкрест простирания главных тектонических структур с целью освидетельствования наибольшего количества обстановок, характерных для изучаемой территории. Расстояние между линиями маршрутов и пунктами наблюдений в отдельных маршрутах зависит от детальности картирования и должно быть по возможности одинаковым. Полосовидный участок исследований на мысе Улирба выступает в качестве профиля, созданного в результате пересечения маршрутом главных тектонических структур изучаемой площади (см. рис. 1, Г; 2, А). Профиль составляют 14

пунктов наблюдения, располагающихся на разных расстояниях друг от друга, так как выдержать повсеместно предварительно выбранный шаг в 5 м не удалось ввиду особенностей обнаженности берегового склона.

Главным объектом исследования на рассматриваемом этапе спецкартирования является обнажение горных пород, а предметом изучения – нарушающие его трещины. Это разрывы 1-го порядка для (трещинного) уровня исследований, их внутренняя структура состоит из микротрещин, не доступных в основной своей массе для непосредственного изучения в коренном выходе.

Перед измерениями устанавливаются основные разновидности обнажающихся горных пород, определяется общая структура трещинной сети (системная, полигональная, хаотическая и пр.), фиксируются ее изменения в зоне гипергенеза. Результатом этих исследований является решение о тактике проведения массового замера в пункте наблюдения: один замер или отдельные замеры в каждой из разновидностей горных пород или трещинных сетей, в разных крыльях разлома (складки) и т.д. Наблюдения подобного типа, проведенные для участка «Улирба», показали, что в его пределах нет «специфических» сетей трещин (сфероидальная, полигональная), требующих отдельного рассмотрения. Структура трещиноватости в принципе не меняется при переходе от биотитовых к амфиболовым гнейсам, имеющим близкие прочностные свойства. Породы в целом интенсивно нарушены разрывами, формирующими четкие системы или сети хаотического типа, которые, согласно [Chernyshev, 1983], образуются при наложении друг на друга сравнительно простых парагенезисов трещин – производных разнотипных и разновременных динамических обстановок. Осложнения структурной ситуации на участке исследования связаны с двумя разломами, что предполагает, по возможности, отдельное проведение массовых замеров трещин, соответствующих осевой зоне и крыльям.

После сделанного заключения о тактике сбора статистической информации в отдельных пунктах участка проводится массовый замер, представляющий основу наблюдений за трещинами в каждом обнажении горных пород. Он осуществляется с использованием обычного горного компаса или его электронных аналогов в отдельном исполнении или совмещенных с современными смартфонами, что существенно ускоряет сбор структурного материала. Массовый замер проводится в соответствии с принятыми в структурной геологии правилами [Mikhailov, 1984] путем последовательного измерения трещин в пределах участка коренного выхода (площадью обычно не менее 10 м²). Количество

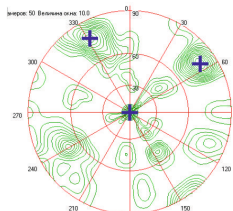
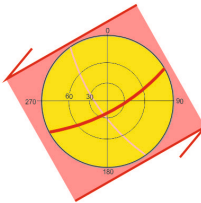
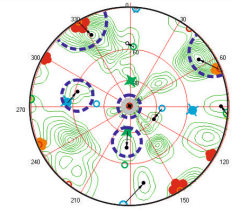
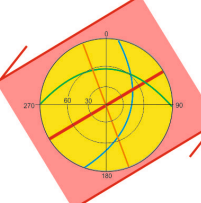
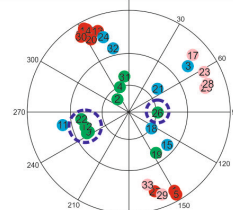
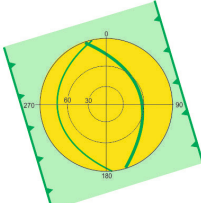
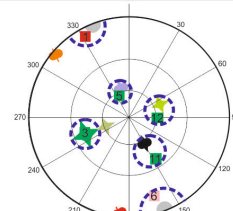
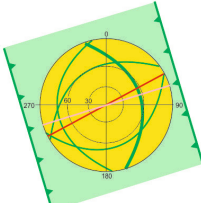
Этапы спецкартирования	Методические действия	Характеристика участка	Разрывы 2-го порядка		Разрыв 1-го порядка		Ранг дизъюнктивной структуры (поля напряжений)
			разновидности разрывов	изображение разрывов в полюсах на диаграмме	разновидность разрыва	изображение разрывов 1-го (зона) и 2-го порядка (дуги, линии)	
1	2	3	4	5	6	7	8
I. Подготовительный этап	Сбор данных в поле с замером трещин	Участок коренного выхода горных пород	Серия микротрещин		Трещина		Трещинный
II. Этап обработки	1. Построение диаграмм; анализ взаимного расположения и интенсивности максимумов; выявление простых парагенезисов (основа - тройки систем)	Коренной выход горных пород	Тройка систем трещин		Мелкий локальный разлом		Разломный транслокальный
	2. Сравнение совокупности максимумов круговой диаграммы с эталонными наборами систем трещин в зоне скалывания; выявление разломов локального ранга	Коренной выход горных пород	Серия мелких локальных разломов		Локальный разлом		Разломный локальный
	3. Сравнение ориентировки и типа локальных разломов с эталонами вторичных структур у разлома 1-го порядка; выявление разломов трансрегионального ранга	Группа коренных выходов горных пород	Пара сопряженных систем локальных разломов		Мелкий региональный разлом		Разломный трансрегиональный
	4. Сравнение ориентировки и типа мелких региональных разломов с эталонами вторичных структур у разлома 1-го порядка; выявление разломов регионального ранга	Группа коренных выходов горных пород	Серия мелких региональных разломов		Региональный разлом		Разломный региональный
III. Этап интерпретации	Сопоставление типов разломов и полей напряжений всех выделенных рангов с известными для региона тектоническими данными; выявление обстановки геоструктурного ранга	Участок земной коры	Серия региональных разломов		Разломная система		Геоструктурный

Рис. 3. Краткая характеристика основных операций спецкартирования и объектов, изучаемых в ходе их проведения.

Пояснение в тексте. Условные обозначения – см. на рис. 4, 7 и 9.

Fig. 3. Brief characteristics of the main special mapping operations and objects studied.

See explanations in the text. See the legend in Fig. 4, 7 and 9.

измерений, которые могут составить массовый замер, определяется характером обнаженности горных пород в пункте наблюдения. Однако, исходя из опыта, наиболее достоверными являются результаты картирования, базирующегося на точках с примерно одинаковым количеством измерений, заключенным в пределах от 50 до 100 трещин. Кроме элементов залегания, если возможно, фиксируется генетическая разновидность трещины, особенности взаимоотношений с другими трещинами, количественные параметры (зияние, примерная длина и пр.). При документировании коренных выходов на участке «Улирба» в подавляющем большинстве случаев (12 обнажений) было измерено по 50 трещин (см. рис. 2, А). В двух пунктах количество измерений равнялось 100, поскольку эти выходы располагались непосредственно у сместителя (разлом № 1) или были наиболее близки к зоне дробления (разлом № 2).

Массовый замер элементов залегания трещин, проведенный статистическим способом, – это та необходимая и достаточная для дальнейшей обработки информация, которая может быть собрана в пределах любого коренного выхода. Однако в обнажении иногда встречаются такие элементы разрывной структуры, как зоны дробления, тектонического расщепления, повышенной трещиноватости, а также трещины с признаками смещений (борозды, штрихи, смещения маркеров). Информация о их местоположении вместе с краткой характеристикой и параметрами должна фиксироваться параллельно с массовым замером трещиноватости. Наблюдения подобного типа на участке «Улирба» описаны в разделе 2, а в его заключительных абзацах приведены результаты обработки, которые представляют структурную информацию, являющуюся априорной для описываемых ниже основных этапов спецкартирования.

3.2. Этап ОБРАБОТКИ

Этап обработки – главный в спецкартировании, поскольку его итогом является выделение на изучаемой территории разломных зон, их ранжирование и реконструкция разновозрастных обстановок формирования разломной структуры. Он заключается в последовательном проведении четырех видов работ, содержание которых рассматривается ниже в отдельных разделах статьи.

3.2.1. Построение диаграмм и выделение простых парагенезисов трещин

Данный вид работ включает построение диаграмм трещиноватости и их анализ с выявлением троек взаимно перпендикулярных систем и пар со-

пряженных сколов, имеющих место практически в любом обнажении горных пород (рис. 3, этап II.1). Кроме этих простых парагенезисов, диаграммы изучаются на предмет наличия сочетаний систем в виде поясов, пирамид и конусов, которые отчетливо выделяются на диаграммах, но имеют ограниченное распространение в природе. Все эти трещинные сети представляют 2-й порядок, тогда как первичным для них является мелкий локальный разлом. Ранг поля напряжений в этом случае соответствует разломному транслокальному, т.е. переходному от ранга трещин к рангу разломов.

Построение круговых диаграмм трещиноватости осуществляется для каждой точки наблюдения в соответствии с приемами и принципами, представленными в различных руководствах по структурной геологии [Mikhailov, 1984; Nikolya, 1992]. В настоящее время у нас в стране и за рубежом они реализованы в различных прикладных программах, обеспечивающих возможность быстрого воспроизведения массового замера в виде диаграммы трещиноватости. Одной из таких программ является «Структура», созданная в лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН А.А. Бабичевым и Е.А. Левиной под методическим руководством А.С. Гладкова, А.И. Мирошников и автора данной статьи. Кроме построения диаграмм, в комплексе «Структура» запрограммированы формализованные операции ряда тектонофизических методов, которые позволяют при наличии для коренного выхода необходимой структурной информации восстановить поле напряжений (методики М.В. Гзовского и В.Д. Парфенова) или линию скольжения по разломному сместителю (методика В.Н. Даниловича). Комплекс «Структура» и подобные ему программы не только существенно ускоряют трудоемкий процесс обработки массовых замеров и повышают точность составления диаграмм трещиноватости, но также позволяют изменять при их построении серию руководящих характеристик (тип используемой палетки, размер окна осреднения, уровень изолиний и др.). Однако, с учетом их использования в рамках картирования, исходные для анализа диаграммы должны быть построены единообразно.

Прежде всего, в связи с важностью оценки в рамках метода угловых соотношений между системами трещин в качестве основы для построения диаграмм должна использоваться равноугольная проекция Вульфа (рис. 4, А). Кроме того, необходимо учитывать три момента, касающиеся плотностных характеристик максимумов полюсов трещин. Последние обладают в условиях статистических измерений большой информативностью и поэтому широко используются в дальнейших операциях обработки. Во-первых, изолинии на диаграммах должны быть рассчитаны в процентах, что обеспечивает воз-

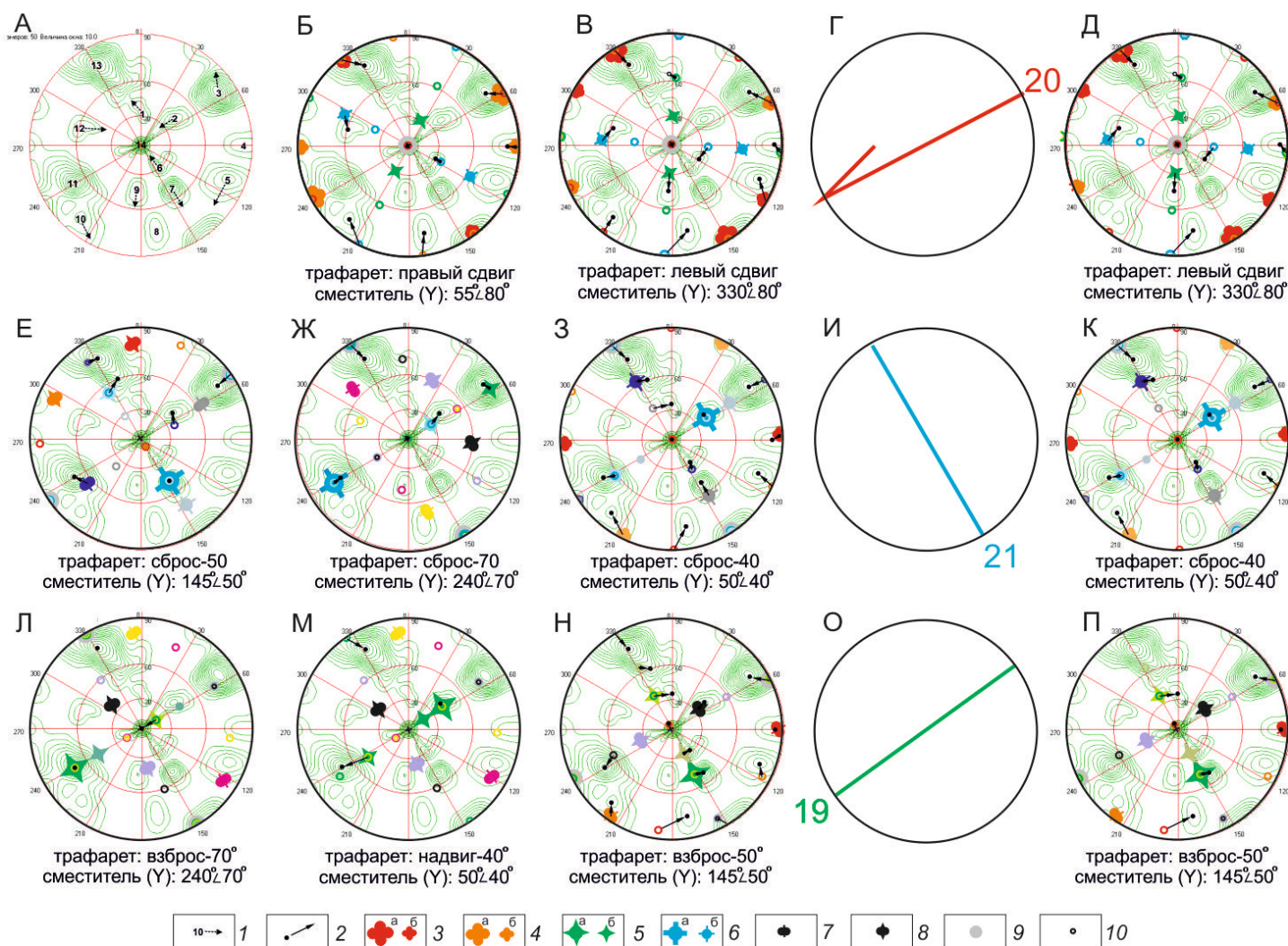


Рис. 4. Анализ круговой диаграммы трещиноватости № 8, позволяющий посредством наложения различных трафаретов с эталонным расположением трещинных систем в разнотипных разломных зонах получить, используя принцип наибольшего совпадения, итоговые решения о трех динамических обстановках локального ранга, в которых происходило формирование разрывной сети изучаемого обнажения горных пород.

А – круговая диаграмма трещиноватости для пункта наблюдения № 8 (сетка Вульфа; верхняя полусфера; количество замеров – 50; величина окна осреднения – 10° ; уровни изолиний – 1–2...– 13 %; 1 замер – 2 %) с тринадцатью обособленными максимумами, для части из которых, судя по рисунку изолиний, характерны отчетливо направленные разбросы полюсов трещин. Б–В, Е–Ж, Л–Н – варианты сопоставления диаграммы трещиноватости № 8 с эталонными парагенезисами трещин, формирующимися в разломной зоне при сдвиге с разным положением и типом сместителя (Б–В), а также при растяжении (Е–Ж) и сжатии (Л–Н) с разным пространственным положением сместителей. Под каждым рисунком охарактеризован вид трафарета (согласно рис. 6 из статьи [Семинский, 2014]) и элементы залегания максимума, который при совмещении диаграммы и трафарета считался соответствующим магистральному сместителю (Y) разломной зоны. Г, И, О – представление трех итоговых для пункта наблюдения № 8 решений локального ранга в виде номера и линии простирания разломной зоны, показанной для левого сдвига красным (Г), сброса – синим (И) и взброса – зеленым (О) цветом. Д, К, П – три итоговых решения локального ранга о динамических обстановках левого сдвига (Д), растяжения (К) и сжатия (П), каждую из которых представляет собственный набор тройственных парагенезисов трещин, выделенных ранее по круговой диаграмме № 8 (см. столбец 11 в табл. 1). Под каждым рисунком обозначен вид трафарета и элементы залегания максимума, соответствующего магистральному сместителю (Y) разломной зоны, в которой формировались показанные на диаграмме тройки систем трещин. 1 – номер максимума и направление разброса составляющих его полюсов трещин (по П.Н. Николаеву); 2 – центр максимума полюсов трещин (черный кружок), который соответствует одной из разрывных систем (см. начало стрелки) эталонного парагенезиса разрывов, имеющих место в зоне разлома определенного морфогенетического типа и представленных на рисунке в виде совокупности полюсов, т.е. диаграммы-трафарета; 3–10 – полюсы разрывных систем, составляющих эталонные трафареты (согласно рис. 6 из статьи [Seminsky, 2014]): 3 – полюс левосдвигового сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 4 – полюс правосдвигового сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 5 – полюс взбросового (надвигового) сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 6 – полюс сбросового сместителя 1-го (а) или 2-го (б) порядка; 7 – полюс сбросо-сдвигового сместителя 2-го порядка (полюсы одного тройственного парагенезиса показаны одинаковым цветом); 8 – полюс взбросо(надвига)-сдвигового сместителя 2-го порядка (полюсы одного тройственного парагенезиса показаны одинаковым цветом); 9 – полюс трансформационного сместителя 2-го порядка; 10 – полюс второстепенной

или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин. На эталонном трафарете все три полюса каждой тройки примерно перпендикулярных систем трещин показаны одним цветом, что в ряде случаев отражается наложением 2–4 разноцветных и разнотипных значков.

Fig. 4. Analysis of jointing circle diagram No. 8: faults zones of various types are compared against various patterns of standard positions of joint systems, and with reference to the principle of the highest coincidence, final decisions are made on three dynamic settings of the local rank, in which the fracture networks of the studied outcrop were developed.

A – circle diagram of jointing for observation point No. 8 (Wolf net; upper hemisphere; 50 measurements; averaging interval – 10°; levels of isolines – 1–2...– 13 %; 1 measurement – 2 %) with 13 independent maximums, some of which, as suggested by the patterns of isolines, are characterized by clearly directional scatter of joint poles. *B–B*, *E–3*, *L–H* – comparison of jointing circle diagram No. 8 with standard parageneses of joints formed in the fault zone in case of strike-slip with different positions of types of fault planes (*B–B*), extension (*E–3*) and compression (*L–H*) with different spatial positions of fault planes. Under every figure, descriptions (according to Fig. 6 in [Seminsky, 2014]) are provided for standard pattern types and bedding elements of the maximum that was viewed as corresponding to the main fault plane (*Y*) of the fault zone when the diagram was compared to the standard pattern. *Г*, *И*, *О* – three final solutions of the local rank for observation point No. 8; the local rank is marked by the number and the strike line of the fault zone: red line – left-lateral strike-slip (*Г*), blue line – normal fault (*И*), green line – reverse fault (*О*). *Д*, *К*, *П* – three final solutions of the local rank for dynamic settings of the left-lateral strike-slip (*Д*), extension (*К*) and compression (*П*), each represented by its own combination of tripple parageneses of joints identified from circle diagram No. 8 (see column 11 in Table 1). Under every figure, descriptions are provided for standard pattern types and bedding elements of the maximum that was viewed as corresponding to the main fault plane (*Y*) of the fault zone wherein the tripple systems of jointss (shown in the diagram) were formed. 1 – number of the maximum and direction of scatter of joint poles comprising the maximum (according to P.N. Nikolaev); 2 – centre of the maximum of joint poles (black circle) which corresponds to one of the fracture systems (see the start of the arrow) of the standard paragenesis of fractures that are found in the fault zone of specific morphogenetic types and represented in the figure as a cluster of poles, i.e. standard diagram; 3–10 – poles of fracture systems comprising standard patterns (according to Fig. 6 in [Seminsky, 2014]): 3 – pole of the left-lateral fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 4 – pole of the right-lateral fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 5 – pole of the reverse /thrust fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 6 – pole of the normal fault plane of the 1st (a) or 2nd (б) order; 7 – pole of the normal/strike-slip fault plane of the 2nd order (poles of the same tripple paragenesis are shown in the same colour); 8 – pole of the reverse/thrust/strike-slip fault plane of the 2nd order (poles of the same tripple paragenesis are shown in the same colour); 9 – pole of the transformational fault plane of the 2nd order; 10 – pole of the auxiliary or additional systems of the tripple paragenesis of joints. In the standard pattern, all the three poles of each tripple set of nearly perpendicular joints systems are shown in the same colour; in some cases, two to four symbols of various colours and types are overlapping.

возможность сравнения абсолютных значений плотностей полюсов трещин в максимумах с диаграмм, построенных по различному числу замеров. Во-вторых, по этой же причине для подсчета плотности при построении всех диаграмм необходимо использовать одинаковую величину окна палетки, так как изменение данного параметра существенно влияет на рисунок изолиний. Как показывает опыт, при количестве замеров, близком к ста, удобно пользоваться величиной окна с радиусом в 10°. В-третьих, при сравнении интенсивности распространения отдельных систем трещин можно пользоваться плотностью полюсов трещин у соответствующих максимумов на диаграмме. Однако нужно учитывать, что более точными подобные оценки будут при введении в значение каждого максимума поправки, величина которой зависит от угла падения составляющих его трещин: $0 \div 10^\circ - 1.4$; $11 \div 20^\circ - 1.6$; $21 \div 30^\circ - 1.4$; $31 \div 40^\circ - 1.2$; $41 \div 50^\circ - 0.9$; $51 \div 60^\circ - 0.9$; $61 \div 70^\circ - 0.8$; $71 \div 80^\circ - 0.8$ и $81 \div 90^\circ - 0.8$. Необходимость использования поправочных коэффициентов-множителей обоснована в специальной публикации [Seminsky, 1994] и связана с наличием систематической ошибки полевых измерений, когда крутые трещины оказываются в более «выгодном» положении при наборе статистики, чем пологие.

Перечисленные особенности построений были учтены при обработке в программном комплексе «Структура» четырнадцати массовых замеров трещин, сделанных на участке «Улирба». Использовались сетка Вульфа, 10-градусное окно осреднения и процентные уровни изолиний плотности полюсов трещин (рис. 5, Б).

Единообразно построенные диаграммы в первую очередь анализируются на предмет взаимного расположения и интенсивности максимумов, что позволяет сделать наиболее общие выводы о характере разрывных сетей на участке картирования. Следует отметить, что, кроме максимумов, образованных одним замером (он может быть случайным), здесь и в последующих операциях анализируются все максимумы, выделяющиеся на диаграммах. Отказ от использования различных (в т.ч. статистических) способов выделения систем трещин в данном случае является намеренным. Как показали специальные наблюдения, в статистически незначимый максимум иногда попадают крупные трещины или разрывы со штрихами, исключение которых из анализа может существенно повлиять на его достоверность.

На данном этапе спецкартирования рассматриваются максимумы на отдельных диаграммах и в

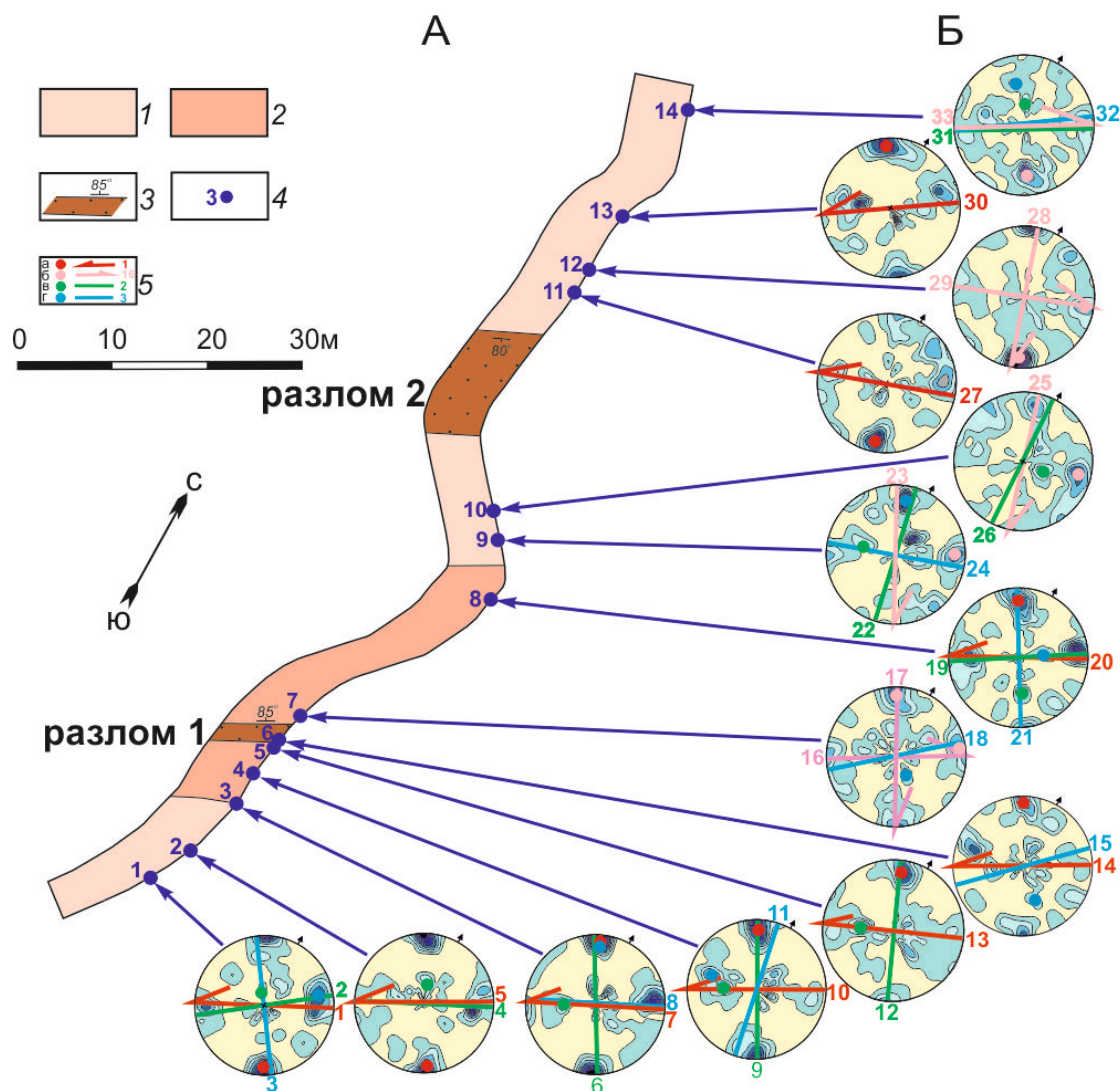


Рис. 5. Тридцать три решения о разнотипных разломных зонах локального ранга, полученных в результате парагенетического анализа диаграмм трещиноватости (сетка Вульфа; верхняя полусфера; количество замеров – 50; величина окна осреднения – 10° ; уровни изолиний – 1–2...%) (Б), построенных по результатам массового замера трещин в 14 пунктах наблюдения на участке «Улирба» (А).

1–2 – биотитовые (1) и амфиболовые (2) гнейсы; 3 – полосы проявления тектонитов (глинка трения, брекчия дробления), связанных с перемещениями по разломам 1 и 2, и элементы их залегания; 4 – положение пунктов массовых замеров трещин; 5 – представление на круговой диаграмме решения (цифра – порядковый номер) о типе (цвет), простирации (линия) и полном пространственном положении (кружок) локальной разломной зоны, в которой формировалась трещинная сеть изученного коренного выхода: а – зона левого сдвига, б – зона правого сдвига, в – зона взброса (надвига), г – зона сброса.

Fig. 5. Thirty three solutions of local fault zones of various types, which are revealed by paragenetical analyses of the jointing diagrams (Wolf net; upper hemisphere; 50 measurements; averaging interval – 10° ; levels of isolines – 1–2...%) (B) that are constructed based on mass measurements of joints at 14 observation points on the Ulirba site (A).

1–2 – biotite (1) and amphibole (2) gneisses; 3 – zones of tectonites (gouge, crush breccia) associated with displacements along faults 1 and 2, and bedding elements; 4 – locations of mass joint measurement points; 5 – solutions in the circle diagram (numbers correspond to sequential numbers) showing types (colour), strike (line) and spatial position (circle) of the local fault zone wherein the fracture system was formed in the base rock outcrop under study: a – left-lateral strike-slip zone, б – right-lateral strike-slip zone, в – reverse/thrust fault zone, г – normal fault zone.

их группах, выбранных согласно визуальному сходству рисунка изолиний. При этом анализу подвергаются два главных признака: преобладающие системы трещиноватости и степень сложности сети в

целом с выходом на конкретные разрывные парагенезисы.

Системы трещин, доминирующие на диаграммах участка «Улирба» (рис. 5, Б), простираются в двух

основных направлениях – СВ ($\approx 65^\circ$) и СЗ ($\approx 330^\circ$) – при преобладании первого в большинстве пунктов наблюдения. Это в геодинамически активном регионе является косвенным свидетельством того, что структуры более крупного ранга, определяющие формирование трещиноватости, должны иметь аналогичные пространственные ориентировки. Обе системы субвертикальны, что в совокупности с тяготением второстепенных максимумов на многих диаграммах к периферии большого круга свидетельствует о присутствии сдвиговой обстановки среди этапов формирования разрывной структуры изучаемого участка земной коры. Кроме субвертикальных разрывных направлений, на диаграммах имеют место системы тех же двух ориентировок в плане, но характеризующихся углами падения в 70° и 50° , причем интенсивность соответствующих максимумов зачастую не уступает основным (например, т.н. 4 или т.н. 10 на рис. 5, Б). Таким образом, вполне реальной является возможность деформирования изучаемого участка земной коры в условиях сжатия или растяжения земной коры с образованием наклонных сместителей.

Степень сложности трещинной сети обычно оценивают по различным характеристикам ее геометрии, которая в целом отражает условия трещинообразования. Массовые замеры трещин, представленные в виде различных диаграмм, позволяют по сравнению с обычными структурными наблюдениями более точно классифицировать тип разрывной сети, в том числе и на количественной основе. Особую трудность и большое значение такой анализ имеет для системной и хаотической трещиноватости, повсеместно распространенных в тектонически активных регионах, поскольку сфероидальная и полигональная сети, образованные первичными трещинами, обычно успешно определяются уже при визуальном осмотре коренного выхода. Согласно критериям [Rats, Chernyshev, 1970], системная сеть, как правило, состоит из трех направлений трещин, а при количестве систем больше 10 сеть является хаотической. Ю.П. Бурзунова [Burzunova, 2014] проанализировала серию количественных параметров массового замера трещин (количество максимумов, средняя интенсивность максимума, величина самого интенсивного максимума, информационная энтропия) и показала, что для разделения рассматриваемых типов трещинных сетей наиболее эффективным показателем является средняя интенсивность максимума на круговой диаграмме (I). Она рассчитывается без учета максимумов, образованных одним (возможно случайным) измерением и в геодинамически активных регионах обычно изменяется от 2 до 8 %. Нам представляется, что при средней интенсивности до 6 %

трещинная сеть может считаться хаотической, а более 6 % – системной, хотя автор классификации выделяет сети переходного типа со значениями параметра, попадающими в интервал 5.0–6.4 %.

Для участка «Улирба» значение, равное 6 %, кроме того, является средним для величин параметра I , определенных по 14 круговым диаграммам трещиноватости. На графике изменений данного параметра (см. рис. 2, В) рассматриваемое значение позволяет отделить друг от друга участки развития системной и хаотической трещиноватости. Два из трех отрезков профиля со сложной структурой трещинной сети практически совпадают с выделенными ранее участками высокой плотности мелких разрывов, характерной в Приольхонье для зон разломов. Параметры D и I имеют разную смысловую нагрузку, так как первый из них отражает интенсивность деструкции, а второй – сложность истории тектонического развития, включающей этапы с разной ориентировкой деформирующих сил. Как следствие, участки с высокой плотностью трещиноватости хаотического типа в тектонически активном регионе практически однозначно соответствуют положению неоднократно активизированной разломной зоны. Таким образом, уже на данном этапе спецкартирования участка «Улирба» можно сделать вывод о том, что пункты наблюдения 5, 6 и 7, а также 10, 11, 12 и, возможно, 9 принадлежат к разломным зонам 1 и 2. Кроме того, профиль обоими окончаниями, вероятно, входит в участки осложненного строения: южный по критерию плотности трещиноватости, а северный – по степени ее хаотичности.

После рассмотренного выше интегрального анализа трещинной сети следующим шагом изучения круговых диаграмм является выделение простых парагенезисов, представленных совокупностями разрывных систем, находящихся в определенных пространственных взаимоотношениях. Для участка «Улирба» из таких парагенезисов лишь тройки примерно перпендикулярных систем трещин имеют повсеместное распространение (рис. 5, Б). По расположению центров максимумов на отдельных диаграммах можно выделить пояса вращения, но они не вытягиваются вдоль дуг большого круга в виде «шлейфа» полюсов мелких разрывов, что позволяет сделать вывод о их происхождении за счет сочетания (наложения) разноориентированных троек систем трещин [Seminsky, 2003]. Таким образом, тройственный структурный парагенезис в породах мыса Улирба по распространенности резко преобладает над другими известными сочетаниями трещинных систем, условия образования которых специфичны и имеют место в ограниченном круге структурных ситуаций.

Выделение троек систем трещин проводится

для каждой диаграммы в отдельности, причем отклонения от прямого угла между некоторыми системами разрывов могут достигать 20° в связи с объективно существующими вариациями угла скалывания, рассмотренными в теоретическом обосновании спецкартирования [Seminsky, 2014]. В качестве примера здесь анализируется круговая диаграмма с пункта наблюдения № 8, которая располагается в центре участка «Улирба» и характеризуется сравнительно невысокой плотностью трещин, образующих сеть системного типа (см. рис. 2). На круговой диаграмме выделяется 14 максимумов (см. рис. 4, А), 10 из которых имеют плотность более 3 %, в т.ч. № 3, 13 и 11 с величинами рассматриваемого параметра (соответственно, 13, 12 и 10 %), существенно большими, чем у других систем трещин. У большинства максимумов – 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10 и 12 – выделяются направления разбросов полюсов трещин (по Николаеву).

При последовательном переборе максимумов было выделено четыре тройственных парагенезиса (табл. 1), в которые вошли все наиболее интенсивные системы трещин коренного выхода, причем две из них (№ 3 и 13), а также максимум № 14 являются составляющими двух троек. Из пяти максимумов, не вошедших в тройственные парагенезисы, три (№ 4, 8 и 12) имеют минимальную плотность (2 %), а два оставшихся направления трещин (№ 9 и 6) характеризуются величиной данного параметра, равной, соответственно, 3 и 4 %. Пространственное положение выделенных парагенезисов свидетельствует о том, что № 1 и 4 формировались в обстановке сдвига, а № 2 и 3 – сжатия или растяжения. В первом случае классической парой сопряженных сколов являются субвертикальные направления трещин, а во втором – наклонные системы, субпараллельные друг другу [Seminsky, 2014]. Определенные ранее направления разбросов у максимумов, отвечающих в парагенезисах за классические пары сопряженных сколов, позволяют, с использованием метода П.Н. Николаева [Nikolaev, 1992], уточнить, что парагенезис № 2 сформировался в обстановке растяжения, а № 3 – при сжатии. Что касается сдвиговых парагенезисов, то, согласно разбросам, в тройке № 1 направление с азимутом падения $330^\circ \angle 80^\circ$ является левым сдвигом, а с азимутом падения $55^\circ \angle 80^\circ$ – правым сдвигом; в тройке № 4 направление с азимутом падения $110^\circ \angle 80^\circ$ – это левый сдвиг, а с азимутом падения $220^\circ \angle 80^\circ$ – правый сдвиг.

Количество троек систем трещин, выделенных по другим диаграммам участка «Улирба», в среднем равно 6–7. Несмотря на то, что, как и в случае с пунктом № 8, в них не были задействованы все максимумы на диаграммах, общий массив составил немногим более 100 тройственных парагенезисов,

сформировавшихся в разноориентированных обстановках сжатия, растяжения и сдвига. Теоретически [Seminsky, 2014], выделяя на местности линейно вытянутый участок распространения однотипного тройственного парагенезиса, можно картировать по меньшей мере зону мелкого локального разлома, т.е. осуществляется переход от трещинного ранга дизъюнктивной структуры (или поля напряжений) к разломному (см. рис. 3). Однако такое картирование требует густой сети пунктов массового замера, при которой смысл подобного анализа (по крайней мере, в его полном объеме) теряется ввиду возможности прослеживания разрывного нарушения путем прямых геолого-структурных наблюдений.

Часть из выявленных по диаграмме троек систем трещин представляет мелкие локальные разломы, соответствующие по типу и ориентировке более крупным разломам, в зоне влияния которых находится рассматриваемое обнажение горных пород. Это открывает возможность осуществлять картирование таких крупных разломов путем изучения участков распространения однотипных парагенезисов на площади исследования. Последовательность и детали подобного анализа отражают содержание 1-го варианта метода спецкартирования, разработанного 20 лет назад [Seminsky, 1994]. Однако опыт его реализации в различных регионах позволил установить, что трещинные сети, представленные только одним главным тройственным парагенезисом, вблизи крупных разломных сместителей встречаются достаточно редко. Следовательно, достоверность картирования таких разломных зон, включая особенности внутреннего строения, будет существенно выше при использовании в анализе всей совокупности троек систем трещин, образующихся при закономерных изменениях напряженного состояния массива в ходе формирования зоны разлома.

Таким образом, в обычной по обнаженности природной ситуации объемный массив выявленных по диаграммам тройственных парагенезисов используется далее в рамках очередной операции по обработке данных спецкартирования в качестве исходного фактического материала для выделения следующего ранга разломных структур и динамических обстановок их формирования. В то же время некоторые особенности разломной структуры изучаемой площади оказываются в первом приближении установленными в результате описанного выше анализа круговых диаграмм. Так, для участка «Улирба» характерна общая высокая нарушенность пород трещинами, обусловленная существованием разломных структур двух основных направлений – 65° и 330° . Первое из них представлено двумя разломами (№ 1 и № 2), выявление которых оказалось

Т а б л и ц а 1. Количественная характеристика тройственных парагенезисов трещин (ПГ), выделенных при анализе круговой диаграммы с пункта наблюдения № 8 на участке «Улирба» в Приольхонье (Западное Прибайкалье)

Table 1. Quantitative characteristics of tripple paragenesises (PG) of joints revealed by analysis of the circle diagram for observation point No. 8 on the Uliba site in Priolkhonie, Western Pribaikalie

№ ПГ	Главная система в ПГ	Второстепенная система в ПГ	Дополнительная система в ПГ		Средняя плотность ПГ, %	Принадлежность к решению локального ранга по разным группам признаков				
			№ (рис. 4, А)	Плотность, %		№ (рис. 4, А)	Плотность, %	по положению и разбросам	по положению, разбросам и углам	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3	13	13	12	14	6	10.3	20(т)	20(т)	20(т)
2	11	10	2	4	13	12	8.7	19(т) 21(о)	21(о)	21(о)
3	7	7	1	2	3	13	7.3	19(т) 21(о)	19(т)	19(т)
4	5	4	10	4	14	6	4.7	19(о)	19(о)	21(о)
								20(о)	20(о)	
								21(о)	21(о)	
5	9	3	?	3	4	2	2.7	20(т)	20(т)	20(т)
6	12	2	?	2	8	2	2	20(т)	20(т)	20(т)
7	4	2	8	2	14	6	3.3	19(т)	19(т)	19(т)
								21(т)	21(т)	
8	?	6	6	4	3	13	7.7	19(о) 21(о)	21(о)	21(о)

Примечание. В столбцах 2 и 4 цветом для систем с установленным направлением разброса обозначены динамические обстановки формирования парагенезиса, определенные на основе применения метода П.Н. Николаева [Nikolaev, 1992]: красный – сдвиг, синий – растяжение, зеленый – сжатие. В столбцах 9–11 буквой в скобках у номера решения дана характеристика двугранного угла между главной и второстепенной системами парагенезиса, в котором находится ось главных нормальных напряжений сжатия: т – тупой; о – острый.

Note. Columns 2 and 4 show data on dynamic settings of formation of paragenesises as determined by P.N. Nikolaev's method [Nikolaev, 1992] for systems with established direction of scatter, which are marked by different colours as follows: red – strike-slip, blue – extension, green – compression. In columns 9–11, letters in brackets show characteristics of dihedral angles between the main and auxiliary systems of the paragenesis wherein the axis of main normal stresses of compression is located: т – broad angle; о – narrow angle.

возможным благодаря поперечной к структурам ориентации полосовидного участка исследований (см. рис. 2). Зоны разломов, кроме высокой нарушенности пород, выделяются присутствием сетей трещин хаотического типа, сформировавшихся вследствие подвижек в разновозрастных обстановках сжатия, растяжения и сдвига. Последующие операции спецкартирования позволяют уточнить эти выводы, а также существенно углубить их за счет выявления особенностей внутреннего строения разломных зон, деления их на ранги, установления этапности формирования разрывной сети и др.

3.2.2. Выявление разломных зон локального ранга

Объектом для анализа в ходе рассматриваемого в данном разделе очередного шага по обработке материалов спецкартирования является серия мелких локальных разломов, каждый из которых в обнажении горных пород представлен определенным тройственным парагенезисом трещин (см. рис. 3, этап II.2). Эти мелкие разломы составляют сеть разрывов 2-го порядка в зоне более крупного дизъюнктива локального ранга (1-й порядок), для которого решение о типе и ориентировке принимается по результатам парагенетического анализа тройственных парагенезисов, выделенных ранее по диаграмме трещиноватости. Реконструкция решения локального ранга осуществляется путем последовательного сравнения круговой диаграммы с каждым из эталонных сочетаний трещинных сетей, имеющих место в зонах действия скалывающих напряжений при разнотипных подвижках (сдвиговых, сбросовых, взбросовых и пр.). В итоге для одного коренного выхода при высокой степени хаотичности трещинной сети может быть получено несколько (обычно 2–3) локальных решений, что свидетельствует о принадлежности небольшого породного массива в разные эпохи тектогенеза к разнотипным зонам скалывания.

Круговые диаграммы-трафареты, которые являются сочетанием полюсов трещинных систем, составляющих структуру каждого из наиболее часто встречающихся в земной коре разломов (левые и правые сдвиги, сбросы и взбросы с разными углами падения), были представлены ранее (рис. 5, 6 из статьи 1 [Seminsky, 2014]). Отметим, что подобные трафареты использовались ранее для определения морфогенетического типа разломов, нарушающих породы мыса Улирба [Cheremnykh, 2010]. Здесь особенности анализа рассматриваются более подробно на примере результатов массового замера трещин в пункте наблюдений № 8 (см. рис. 4).

Выбор трафаретов и последовательность их применения определяются, соответственно, типом

и степенью значимости в трещинной сети тех тройственных парагенезисов, которые были выделены на предыдущем этапе анализа круговой диаграммы (табл. 1). Оценка степени выраженности парагенезиса проведена в таблице 1 по простому среднему арифметическому плотностей входящих в его состав максимумов, но могут использоваться и более точные показатели [Seminsky, 1994]. Поскольку наибольшая величина средней плотности характерна для тройки систем трещин № 1 (10.3), именно она должна рассматриваться как разломная (т.е. соответствующая Y -сколам главного сместителя) в эталонном парагенезисе, выбираемом для анализа первым. Согласно положению в пространстве главной и второстепенной систем, это парагенезис для разлома сдвигового типа, причем в первую очередь необходимо рассмотреть трафарет правого сдвига для системы $55-80^\circ$ (см. рис. 4, Б). Она имеет соответствующий данной динамической обстановке разброс полюсов трещин, а также формально (на 2 %) большую плотность по сравнению с сопряженной системой $330^\circ \angle 80^\circ$. С другой стороны, это превышение минимально, и вполне правомерным является сопоставление диаграммы с трафаретом левого сдвига для последней из упомянутых разрывных систем (см. рис. 4, В).

Как видно из сравнения рис. 4, Б, и рис. 4, В, именно второй вариант следует принять в качестве итогового, так как он включает в себя большее количество разрывных структур, образовавшихся в полях напряжений 2-го порядка. Кроме собственно разломной тройки № 1 (табл. 1), на диаграмме имеет место отчетливо выраженный (4.7 %) парагенезис № 4 для сколов R -типа. Характерные расширения у максимумов № 13 и 6 дают основание для выделения троек систем трещин № 5 и 6, сформировавшихся во вторичных обстановках, соответственно, сжатия и растяжения. В отличие от этого, решение о правом сдвиге в разломной зоне с элементами залегания $55-80^\circ$ поддерживается только тремя тройственными парагенезисами, причем, за исключением тройки № 1, они слабо выражены на диаграмме. Это уже упомянутый выше парагенезис № 6, а также тройка № 7, не отмеченная ранее в связи с тем, что ее главная и второстепенная системы представлены максимумами с низкой плотностью (2 %).

Следует отметить, что формальный подход к перебору трафаретов подразумевает проверку для рассматриваемой сдвиговой ситуации еще двух эталонных парагенезисов: правого сдвига для разломной системы $330^\circ \angle 80^\circ$ и левого сдвига для системы $55^\circ \angle 80^\circ$. Однако такие решения подразумевают смену динамических обстановок формирования разрывов 2-го порядка на противоположную. Это противоречит разбросам полюсов трещин (см.

рис. 4, А; табл. 1), которые определены хотя бы для одного из сопряженных максимумов в каждой из четырех троек (№ 1, 4, 5 и 6), составляющих во 2-м порядке рассмотренное выше решение о левосдвиговой зоне с элементами залегания $330^\circ \angle 80^\circ$ (рис. 4, В). Решение объясняет существование и направления разбросов для большинства максимумов на круговой диаграмме и, таким образом, характеризуется высоким уровнем достоверности. Среди других определений локального ранга, полученных для участка «Улирба» в целом, оно имеет порядковый номер 20 и при дальнейших построениях с анализом простираций разрывов обозначается красным знаком в виде левосторонней стрелки (см. рис. 4, Г; рис. 5, Б), а при сравнении в том числе и падений – кружком того же цвета (рис. 5, Б).

Кроме тройки № 1, являющейся ключевой для локального решения 20, на рассматриваемой круговой диаграмме имеют место еще два тройственных парагенезиса трещин (№ 2 и 3 в табл. 1), образованные системами с плотностью больше 2 % и характеризующиеся высокими средними показателями (соответственно, 8.7 и 7.3). Учитывая пространственную ориентировку троек, они могли образоваться у разрывов 2-го порядка в разломных зонах сжатия или растяжения, имеющих северо-восточную или северо-западную ориентировку. При выборе трафаретов в качестве собственно разломных использовались три наиболее интенсивных максимума – $240^\circ \angle 70^\circ$, $145^\circ \angle 50^\circ$ и $50^\circ \angle 40^\circ$. На рис. 4, Е–З, и рис. 4, Л–Н, с ними совмещены главные разломные сместители, образующиеся при растяжении (сбросы) и сжатии (взбросы и надвиг) земной коры. Сравнительный анализ совмещений трафаретов с диаграммой показал, что в качестве итоговых могут рассматриваться только два решения: сброс с элементами залегания $50^\circ \angle 40^\circ$ (см. рис. 4, З) и взброс с элементами залегания $145^\circ \angle 50^\circ$ (рис. 4, Н). В ряду решений локального ранга для участка «Улирба» они имеют порядковые номера 21 и 19 и обозначаются синим и зеленым кружками (рис. 5, Б) или линиями аналогичного цвета, ориентированными согласно простираанию соответствующих разломных зон (рис. 4, И, О; рис. 5, Б). Эти два эталонных парагенезиса «связывают» по пять троек систем трещин, тогда как оставшиеся варианты – лишь по одной (рис. 4, Л–М) или по две (рис. 4, Е–Ж). Как видно из табл. 1, в сбросовом решении 21 (см. рис. 4, З), согласно пространственному положению, могут участвовать тройки систем трещин № 2, 3, 4, 7, а также 8, существование которой следует предполагать, если максимуму № 6 поставить в соответствие неявное сгущение полюсов трещин, формирующих вытянутость максимума № 13 в сторону меньших углов падения. Взбросовое решение 19 (см. рис. 4, Н) составляют те же

пять тройственных парагенезисов (№ 2, 3, 4, 7 и 8), так как, несмотря на кардинально различную ориентировку и тип разломов, положение составляющих их внутреннюю структуру разрывных систем в пределах принятых 20° подобно.

Выбор решения может быть сделан на основе привлечения данных о положении разломного сместителя или/и кинематике трещинных систем, определенной по маркерам в коренном выходе. Однако, учитывая возможность существования обоих решений, необходимо иметь подобную информацию для каждой из выделенных в пункте наблюдений троек систем трещин, что даже в тектонически активных регионах невозможно для подавляющего большинства обнажений горных пород. За неимением полноценной априорной информации разделение тройственных парагенезисов между двумя решениями производится по двум независимым признакам. Первым является наличие закономерных разбросов у максимумов полюсов трещин, позволяющих определить по методу П.Н. Николаева динамическую обстановку формирования объединяющего их тройственного парагенезиса. Согласно оценкам разбросов, сделанным ранее для максимумов трещин с пункта наблюдений № 8 (табл. 1, столбцы 2 и 4), тройки № 2, 3 и 8, принадлежащие по пространственному положению к обоим решениям (табл. 1, столбец 9), удалось отнести к одному из них (табл. 1, столбец 10): № 2 и 8 – к решению 21 (растяжение); № 3 – к решению 19 (сжатие).

Второй возможностью для сортировки троек по решениям является анализ двугранного угла между главной и второстепенной системами парагенезиса, в котором находится ось главных нормальных напряжений сжатия (удвоенный угол скалывания). Он отражает условия разрывообразования и должен быть в первом приближении близким по величинам для парагенезисов 2-го порядка, формирующихся в одной разломной зоне. Это приближение определяется тем, что при прочих равных условиях он может в пределах 15° отличаться в обстановках растяжения, сдвига и сжатия [Seminsky, 2014]. Как следствие, имеет смысл при анализе углов пользоваться качественными оценками (тупой–острый), что и было сделано на примере круговой диаграммы № 8. Кроме сбросового и взбросового решений локального ранга, анализ был сделан и для сдвигового решения 20, так как тройки систем трещин № 7 и 4 по пространственному положению могут входить, соответственно, в два (19 и 21) и три (19, 20 и 21) решения.

Как видно из табл. 1 (столбец 10), для тройки № 3, отвечающей согласно положению и разбросам за главный сместитель во взбросовом решении 19, характерен тупой угол (при оси сжатия) между

классической парой сопряженных систем, что отражает сравнительно глубокие уровни протекания деформации. Аналогичный вывод делается для сдвигового решения 20, поскольку тупой угол при оси сжатия имеет место для сопряженной пары в главном парагенезисе № 1. В противоположность этому сбросовое решение 21 свидетельствует о близповерхностных условиях деформации, так как рассматриваемый угол в главной тройке № 2 является острым. Относительно глубинные условия деформации для решения 20 поддерживают принадлежащие только к нему тройственные парагенезисы № 5 и 6 с острыми двугранными углами (столбец 9). Близповерхностные условия деформации для сбросового решения 21 подтверждаются острым углом в тройке № 8, принадлежащей к нему согласно положению и разбросам (столбец 10). Таким образом, после анализа разбросов каждая из двух оставшихся «спорных» троек (№ 4 и 7) после оценки углов может быть отнесена только к одному из решений (столбец 11): № 4 – к решению 21, где во 2-м порядке все углы должны быть острыми; № 7 – к решению 19, где углы тупые.

В итоге можно заключить, что трещинная сеть в пункте наблюдений № 8 сформировалась в зонах влияния трех разломов: взброса с элементами залегания $145^\circ/50^\circ$ (решение 19), левого сдвига с элементами залегания $330^\circ/80^\circ$ (решение 20) и сброса с элементами залегания $50^\circ/40^\circ$ (решение 21). Тройственные парагенезисы трещин благодаря привлечению к анализу разбросов и углов скалывания отчетливо разделились между полученными решениями (см. рис. 4, Д, К, Л), хотя это не исключает активизацию некоторых из них на двух и даже трех этапах тектогенеза (например, тройка № 4 в табл. 1, столбец 10). Данный вывод однозначен для отдельных систем трещин, которые характеризуются наибольшей плотностью (№ 3, 13 и 14), так как входят в состав разных тройственных парагенезисов и поэтому участвуют в двух или трех решениях. Наиболее проявленными в трещиноватости пород коренного выхода следует считать обстановки растяжения (решение 21) и сдвига (решение 20), в которых задействовано по три тройственных парагенезиса и по девять систем. Далее следует решение 19 с двумя тройками и шестью системами. Обстановки сдвига и сжатия развивались в глубинных условиях, когда двугранный угол при оси сжатия между сопряженными системами трещин из первоначально острого становился тупым в ходе прогрессирующей пластической деформации. Это, как правило, не характерно для близповерхностного трещинообразования и свидетельствует об относительной древности обоих динамических обстановок. Таким образом, проведенное сопоставление свидетельствует о сравни-

тельно молодом возрасте растяжения: представляющая его трещинная сеть формировалась на меньших глубинах и лучше сохранилась в коренном выходе, чем разрывы этапов сдвига и, тем более, сжатия.

Аналогичным образом для участка «Улирба» были проанализированы все круговые диаграммы. Отправным моментом при выборе трафаретов для сопоставления с рисунком изолиний была необходимость объяснения происхождения вначале наиболее интенсивных тройственных парагенезисов трещин, а затем всех (или большинства) систем трещин коренного выхода – в минимальном количестве решений рассматриваемого локального ранга. Для отдельных коренных выходов реконструированы от одной до трех динамических обстановок, как это видно из рис. 5, Б, где эти решения показаны на каждой диаграмме кружком, соответствующим положению магистрального сместителя (У), а также знаком простирания разломной зоны по примеру пункта наблюдений № 8 (см. рис. 4, Г, И, О).

Всего для 14 пунктов наблюдений, располагающихся на полосовидном участке спецкартирования «Улирба», было получено 33 решения о наличии разломных зон локального ранга. Не останавливаясь на специфике каждого конкретного решения, следует отметить, что они объясняют происхождение всех значимых систем трещиноватости на мысе Улирба. Судя по характеру решений (рис. 5, Б), на участке исследования доминируют разломные структуры северо-восточной и северо-западной ориентировки, большинство из которых субвертикальны. Таким образом, в разные эпохи тектонического развития территории изученные коренные выходы принадлежали к зонам влияния разломов различного типа и ранга, пространственные и временные взаимоотношения которых устанавливаются в ходе дальнейших операций спецкартирования.

3.2.3. Выявление разломных зон трансрегионального ранга

Объектом для анализа в ходе рассматриваемого в данном разделе очередного шага по обработке материалов спецкартирования являются пары сопряженных систем локальных разломов, которые имеют место в серии смежных коренных выходов горных пород (см. рис. 3, этап II.3). Они составляют сеть разрывов 2-го порядка в зоне мелкого регионального разлома (1-й порядок), для которого динамическая обстановка формирования определяется исходя из пространственных соотношений осей главных нормальных напряжений и двух систем разрывов скалывания. В геодинамически ак-

тивных регионах подобным образом восстанавливается несколько полей напряжений вследствие наличия разных этапов деформаций, причем даже для одного этапа в разных местах территории обычно выделяется несколько разломных зон различного морфогенетического типа. Динамические обстановки реконструируются путем выбора пар сопряженных (по типу и пространственной ориентировке) систем локальных разломов. Коренным отличием построений в данном случае является переход от локальных пунктов-обнажений к анализу площадного распространения выявленных обстановок, т.е. к собственно картированию разломных зон на участке исследования. При этом информация о выделенном локальном разломе в виде его элементов залегания выносится в соответствующем месте на план местности, после чего проводится анализ их пространственного распределения с итоговым трассированием положения отдельных зон трансрегионального ранга.

Следует отметить, что картирование разломных структур надлокального ранга может осуществляться по крайней мере двумя способами. Последовательный путь заключается в выделении посредством парагенетического анализа локальных решений вначале разломных зон трансрегионального, а затем на их основе – регионального ранга с отдельным изучением проявления каждой группы разномасштабных дизъюнктивов на местности. Этот подход являлся главным при картировании разломных зон на участке «Улирба», так как он более формализован в методическом отношении и в связи с этим позволяет обоснованно выделять ранги разломных зон, а также получать дополнительную информацию о их внутреннем строении. Однако, прежде чем проиллюстрировать его практическую реализацию, необходимо кратко охарактеризовать второй, сравнительно быстрый, путь, эффективность которого была показана в работе Ю.П. Бурзуновой [Burzunova, 2015] при картировании разломных зон Тажеранского массива Сибири. Интрузивный массив располагается в прибрежной части Приольхонья (рис. 6, А) на расстоянии примерно 20 км от участка «Улирба» и, таким образом, имеет сходную с последним историю тектонического развития.

Локальные решения о наличии разломных зон в виде элементов залегания сместителей вначале выносились на план местности в местах проведения массовых замеров, которые на участке «Тажеран» располагались примерно в 250–500 м друг от друга (всего – 108 пунктов наблюдения). Затем смежные точки с аналогичными решениями объединялись в зоны с уже определенным типом подвижек. Кроме того, автору исследования удалось разделить закартированные разломные зоны на

три ранга вследствие разницы в протяженности и поперечном размере участков проявления однотипных решений, хотя последний параметр существенно зависит от расположения пунктов наблюдения. Ввиду отсутствия на большей части слабообнаженной площади признаков смещений выявленные разломные структуры в основном имеют статус разломов ранней стадии развития, представленных зонами парагенетически связанной трещиноватости. Однако в пределах некоторых из них при изучении обрывистых берегов оз. Байкал были задокументированы сместители с продуктами дробления (рис. 6, А). Это, вероятно, связано с интенсивными перемещениями блоков вблизи находящегося под водой сместителя Морского сброса, по которому происходит опускание дна Байкальской впадины вследствие растяжения земной коры.

Поранговый анализ локальных решений, проведенный Ю.П. Бурзуновой [Burzunova, 2015] по элементам залегания главных сместителей в соответствии с методическими приемами, представленными в нашей предыдущей публикации [Seminsky, Cheremnykh, 2011], позволил выделить для участка «Тажеран» пять динамических обстановок 1-го порядка. Далее были использованы косвенные признаки относительного возраста разрывных сетей, сформировавшихся в этих обстановках (величина удвоенного угла скалывания, интенсивность распространности и др.), что позволило распределить их с известной долей условности последовательно – от древних к более молодым (рис. 6, Б–Е). Полученный ряд хорошо согласуется с этапами деформаций, выделенными предшественниками на основе комплексного анализа всего объема накопленной для Прибайкалья структурно-геологической информации и данных применения кинематических методов реконструкции полей напряжений [Mazukabzov, Szykh, 1987; Aleksandrov, 1990; Delvaux et al., 1995, 1997; Levi et al., 1997; Fedorovsky, 1997; San'kov et al., 1997; Sklyarov, 2005; и др.]. Полностью совпадают обстановки древнего (раннепалеозойского) сжатия в направлении СЗ–ЮВ (рис. 6, Б), а также кайнозойские поля сдвига (рис. 6, Г) и растяжения земной коры той же северо-запад–юго-восточной ориентировки (рис. 6, Е). Обстановка субмеридионального сжатия также известна для Западного Прибайкалья, хотя, согласно материалам предшественников [Danilovich, 1963; Delvaux et al., 1997; и др.], ареал ее распространения находился в 120 км юго-западнее Приольхонья (район истока р. Ангара). Такое сходство выполненных разными методами реконструкций дает основание полагать, что выявленная посредством структурно-парагенетического анализа обстановка кайнозойского растяжения в субмеридиональном направлении

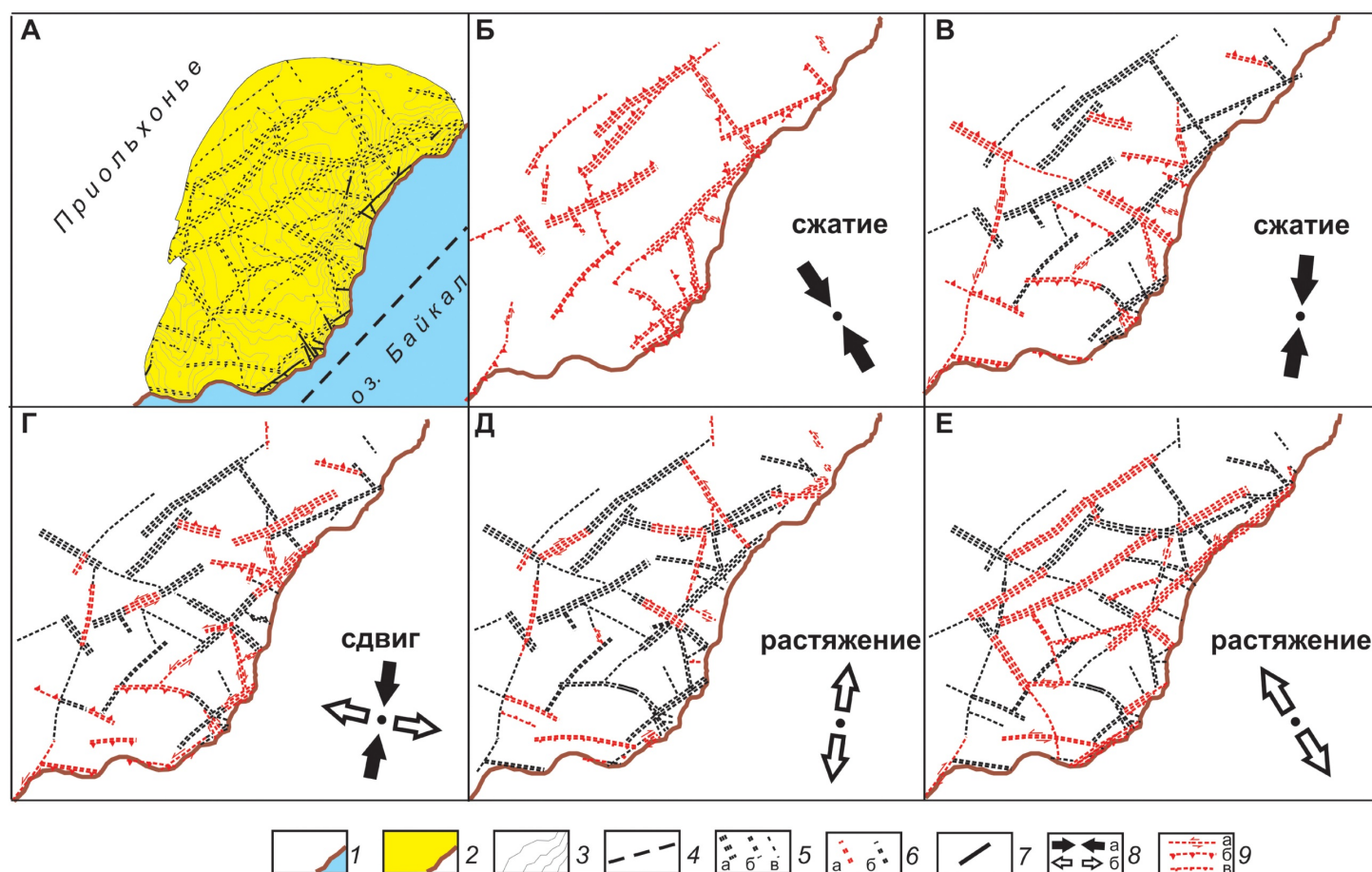


Рис. 6. Результаты применения парагенетического анализа трещиноватости на участке структурного картирования «Тажеран» в Западном Прибайкалье (по Ю.П. Бурзуновой [Burzunova, 2015] с изменениями и добавлениями).

А – схема разноранговых разломных зон, выявленных в пределах Тажеранского интрузивного массива при парагенетическом анализе трещиноватости. Б–Е – схемы разломных зон участка «Тажеран», соответствующие пяти последовательным этапам деформаций земной коры, которые были выявлены в результате парагенетического анализа «немой» трещиноватости: сжатие в направлении СЗ-ЮВ (Б), субмеридиональное сжатие (В), сдвиг (Г), субмеридиональное растяжение (Д) и растяжение в направлении СЗ-ЮВ (Е). 1 – берег оз. Байкал; 2 – интрузивный массив; 3 – горизонтали рельефа; 4 – предполагаемый сместитель зоны Морского сброса; 5 – крупные (а), средние (б) и мелкие (в) разломные зоны; 6 – активные (а) и неактивные (б) разломные зоны на схемах Б–Е; 7 – сегменты зон на схеме А, представленные разломными сместителями в соответствии с прямыми структурными признаками; 8 – положение субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 9 – кинематика подвижек по активной (на рассматриваемом этапе деформации) разломной зоне, установленная при парагенетическом анализе трещиноватости: а – сдвиг, б – взброс (надвиг), в – сброс.

Fig. 6. Result of paragenetical analysis of jointing on the Tazheran structural mapping site, Western Pribaikalie (according to [Burzunova, 2015] with amendments and additions).

А – scheme of fault zones of various ranks which are revealed in the Tazheran intrusive massif by paragenetical analysis of jointing. Б–Е – scheme of fault zones on the Tazheran site, the zones correspond to five sequential stages of deformation of the crust which were revealed by paragenetical analysis of 'dumb' joints: compression in the NW-SE direction (Б), submeridional compression (В), strike-slip (Г), submeridional extension (Д), and extension in the NW-SE (Е). 1 – shore of Lake Baikal; 2 – intrusive massif; 3 – terrain horizontal lines; 4 – assumed fault plane in the Morskoi normal fault zone; 5 – large (а), medium-sized (б) and small (в) fault zones; 6 – active (а) and inactive (б) fault zones in schemes Б–Е; 7 – segments of zones in scheme А which are represented by fault planes in accordance with direct structural features; 8 – positions of subhorizontal axes of main normal stresses of compression (а) and extension (б); 9 – kinematics of displacements along the active (in the given stage of deformation) fault zone which is revealed by paragenetical analysis of joints: а – strike-slip fault, б – reverse/thrust fault, в – normal fault.

(рис. 6, Д) может иметь локальное распространение (в районе Тажеранского массива), но существует объективно. Затем обратным ходом для каждой динамической обстановки были выделены и пока-

заны красным цветом разломные структуры, которые, согласно эталонным парагенезисам разрывов 2-го порядка [Seminsky, 2014], могут активно развиваться при сжатии, сдвиге и растяжении соответ-

ствующих ориентировок (рис. 6, Б–Е). Таким образом, наглядно проиллюстрирован процесс формирования от этапа к этапу разломной сети на участке исследований.

Представленный путь следует считать эффективным, так как он позволяет, основываясь главным образом на анализе массовых замеров повсеместно распространенной «немой» трещиноватости, закартировать на изучаемой территории сеть разломных зон надлокального ранга и установить главные этапы ее формирования. Вместе с тем, для данного подхода характерна определенная условность разделения выделенных структур по рангам, так как в большинстве природных ситуаций обнаженность пород не позволяет с необходимой достоверностью устанавливать ширину разломных зон и, тем более, определять особенности их внутреннего строения. Ниже это будет показано на примере участка «Улирба» в ходе реализации формализованного подхода к выделению отдельных рангов разломных зон и их картированию на местности. Однако для дальнейшего сопоставления результатов применения двух разных подходов на одном и том же фактическом материале вначале для участка «Улирба» должно быть проанализировано пространственное распределение локальных решений (рис. 7, Б).

Поскольку участок, по сути, является профилем с пунктами наблюдения, проследить отдельные локальные разрывы по простиранию, как это делалось для площади «Тажеран», практически не представляется возможным. В то же время отчетливо видно, что в южной половине участка близкие по типу и ориентировке решения встречаются в смежных пунктах наблюдения. По два пункта – № 9 и 10, № 6 и 7, № 1 и 2 – объединяются, соответственно, решениями правого сдвига, сброса и надвига. В трех смежных коренных выходах (пункты № 3, 4 и 5) выявлено однотипное взбросовое решение. Наконец, наиболее распространенное на участке «Улирба» решение левого сдвига имеет место в шести рядом располагающихся пунктах наблюдения, образуя зону шириной 15 м. Таким образом, анализ пространственного распределения локальных решений свидетельствует о пересечении профилем пяти разломных зон надлокального ранга, причем левосдвиговый разлом по поперечным размерам существенно преобладает над правым сдвигом, сбросом, надвигом и взбросом.

Сопоставление результата картирования с имеющейся априорной информацией позволяет с большой долей вероятности предположить, что широкий участок проявления однотипных локальных решений представляет зону влияния разлома 1 (рис. 7, А), который, таким образом, является левым сдвигом. В то же время эта зона лишь самой

своей северной частью (пункты наблюдений № 5 и 6) заходит в полосу с высокой плотностью трещин и сложным строением их сетей, выделенной на этапе II.1 в качестве зоны влияния разлома 1 (см. рис. 2, Б, В). Что касается выявленной аналогичным способом и большей по ширине зоны разлома 2, то в принадлежащих ей пунктах наблюдения № 9, 10, 11 и 12 лишь в двух первых встречается решение правого сдвига. Однако этот сдвиг имеет поперечное положение к разлому 2, согласно априорной структурно-геологической информации (рис. 7, А), и, как следствие, не может считаться главным структурным элементом в зоне его влияния. Таким образом, проиллюстрированный подход к выделению разломных зон на основе объединения смежных точек с однотипными локальными решениями позволил обнаружить лишь одну (причем меньшую) из существующих на участке «Улирба» разломных зон. Это явилось следствием неравномерного расположения точек наблюдения за трещиноватостью и, в частности, их отсутствия в осевой части разлома 2, что, как известно, типично для многих регионов в связи с разрушением тектонизированных пород, дополнительно ослабленных под действием процессов выветривания.

Последовательный путь формализованного выделения рангов разломов и их картирования на местности, как показано ниже, является для таких сложных ситуаций более эффективным. Его кардинальное отличие состоит в том, что выход на разломные структуры надлокальных рангов осуществляется не столько при трассировании решения из одного коренного выхода (локальный уровень) к другому (региональный уровень), сколько по принадлежности разрыва, соответствующего данному локальному решению, вместе с другими локальными разломами к парагенезису зоны регионального ранга. Данный подход находится в полном соответствии с принципами спецкартирования и на его начальном этапе II.1 был реализован, когда из множества направлений разрывов коренного выхода на основе анализа круговой диаграммы выявлялись самые простые парагенезисы данного уровня – тройки примерно перпендикулярных систем трещин (см. рис. 3). Они составляют основу трещинной сети зоны небольшого разлома трансллокального (т.е. переходного от трещинного к разломному) ранга. На разломном уровне таким ординарным парагенезисом является формирующаяся в одном поле напряжений пара сопряженных систем разрывов скалывания, характеризующихся противоположным характером подвижек, направления которых субперпендикулярны линии пересечения разрывных плоскостей. По аналогии ранг разлома, в зоне которого такой парагенезис составляет основу сети разрывов 2-го порядка, назван трансре-

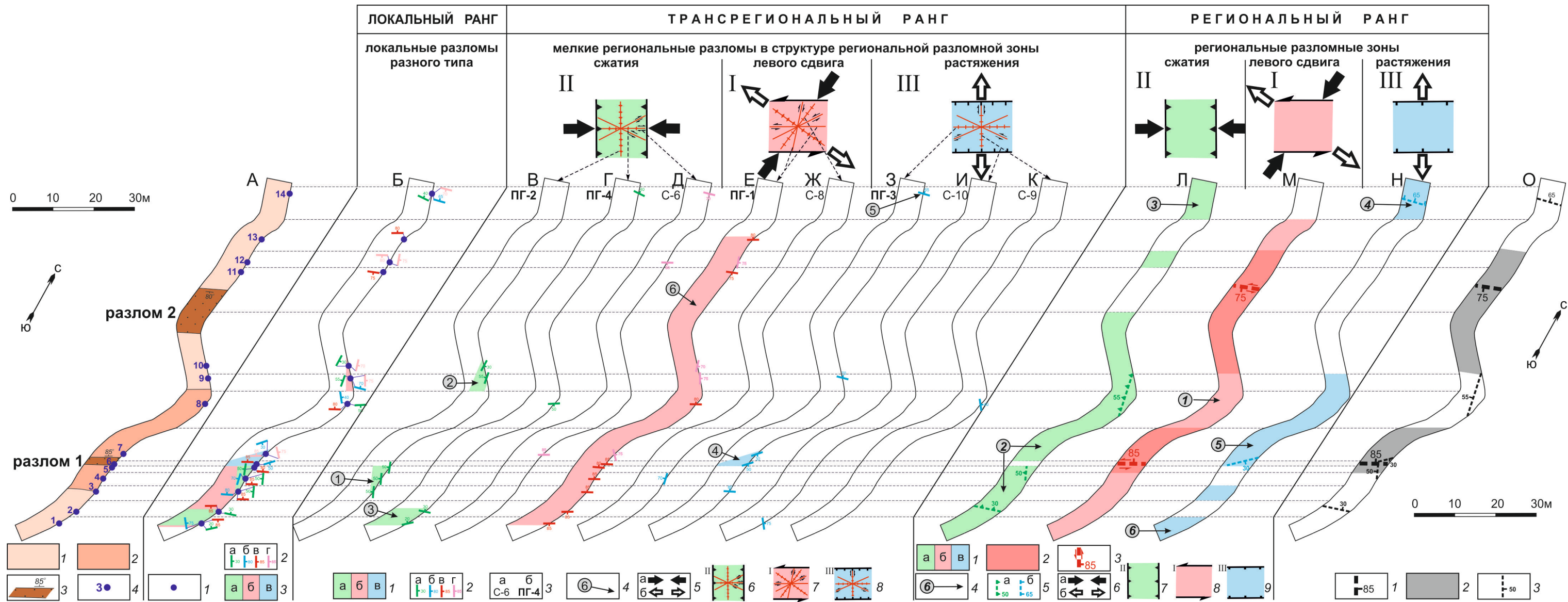


Рис. 7. Результаты реализации последовательных операций спецкартирования на участке «Улирба», отразившиеся в установлении положения разломных зон локального, трансрегионального и регионального ранга, сформировавшихся в разных динамических обстановках. Пояснения в тексте.

А – геологическая схема участка с четырнадцатью пунктами детальных наблюдений за трещиноватостью: 1–2 – биотитовые (1) и амфиболовые (2) гнейсы; 3 – полосы проявления тектонитов (глинка трения, брекчия дробления), связанных с перемещениями по разломам 1 и 2, и элементы их залегания; 4 – положение пунктов массовых замеров трещин. *Б* – разломные зоны локального ранга, в которых происходило формирование трещинных сетей в отдельных пунктах наблюдения: 1 – положение пункта массового замера трещин; 2 – элементы залегания разломной зоны локального ранга со взбросовым (надвиговым) (а), сбросовым (б), левосдвиговым (в) и правосдвиговым (г) типом перемещений; 3 – участки профиля, объединяющие точки наблюдения с однотипными решениями локального ранга, соответствующими взбросу (надвику) (а), левому сдвигу (б) или сбросу (в). *В–К*. Разломные зоны трансрегионального ранга, которые формировались на трех этапах деформации изучаемого участка земной коры как взбросы (*В–Г*) и правые сдвиги (*Д*) в северо-западной зоне сжатия (II), левые и правые сдвиги (*Е*) и сбросы (*Ж*) в северо-восточной зоне левого сдвига (I), а также сбросы (*З–К*) в северо-восточной зоне растяжения (III): 1 – участки проявления трансрегиональных разломных зон со взбросовым (надвиговым) (а), левосдвиговым (б) и сбросовым (в) типом перемещений; 2 – элементы залегания разломной зоны локального ранга со взбросовым (надвиговым) (а), сбросовым (б), левосдвиговым (в) и правосдвиговым (г) типом перемещений; 3 – индексы систем разломов локального ранга (а) и их сопряженных пар (б), использованные для выделения на участке картирования зон трансрегионального ранга; 4 – индексация трансрегиональных разломных зон; 5 – положение субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 6–8 – парагенезисы разломов 2-го порядка в зоне взброса (надвига) (6), левого сдвига (7) и сброса (8), представленные простирациями плоскостей в плане, согласно рис. 8 из статьи [Seminsky, 2014]. *Л–Н* – разломные зоны регионального ранга со взбросовым (надвиговым) (*Л*), левосдвиговым (*М*) и сбросовым (*Н*) типом перемещений, сформировавшиеся на трех этапах деформации изучаемого участка земной коры, и некоторые особенности их внутреннего строения: 1 – участки взбросовых (надвиговых) (а), левосдвиговых (б) и сбросовых (в) региональных разломных зон, соответствующие ранней дизъюнктивной стадии развития внутренней структуры; 2 – участки левосдвиговой региональной разломной зоны, соответствующие поздней дизъюнктивной стадии развития внутренней структуры; 3 – предполагаемое положение главных сместителей, сформировавшихся на стадии полного разрушения в левосдвиговых зонах регионального ранга; 4 – индексация региональных разломных зон; 5 – положение трансрегиональных разломных зон со взбросовым (надвиговым) (а) и сбросовым (б) типом перемещений; 6 – положение субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 7–9 – схематичное изображение региональных разломных зон, формирующихся при сжатии (7), левом сдвиге (8) и растяжении (9). *О* – схема разломных структур регионального и трансрегионального ранга, выявленных на участке «Улирба» в результате спецкартирования: 1 – предполагаемое положение главных сместителей, сформировавшихся на стадии полного разрушения в зонах регионального ранга; 2 – участки региональных разломных зон, соответствующие поздней дизъюнктивной стадии развития внутренней структуры; 3 – положение разломных структур трансрегионального ранга.

Fig. 7. Special mapping results for the Ulirba site. Positions of fault zones of the local, transregional and regional ranks are revealed; such fault zones developed in different geodynamic settings. See explanations in the text.

A – the geological scheme of the site showing 14 observation points whereat jointing was studied in detail: 1–2 – biotite (1) and amphibole (2) gneisses; 3 – zones of tectonites (gouge, crush breccia) associated with displacements along faults 1 and 2, and bedding elements; 4 – locations of mass joint measurement points. *B* – fault zones of the local ranks wherein joint networks were developed at observation points: 1 – positions of the mass joint measurement points; 2 – bedding elements of the fault zone of the local rank with reverse/thrust (a), normal fault (б), left-lateral strike-slip (в) and right-lateral strike-slip (г) types of displacement; 3 – segments of the profile which connect observation points with similar solutions of the local rank, corresponding to reverse/thrust (a), left-lateral strike-slip (б) or normal fault (г). *B–K*. Fault zones of the transregional rank that formed at three stages of deformation of the crust on the site under study: reverse faults (*B–Г*) and right-lateral strike-slip faults (*Д*) in the NW compression zone (II), left- and right-lateral strike-slip faults (*Е*) and normal faults (*Ж*) in the NE zone of the left-lateral strike-slip fault (I), and normal faults (*З–К*) in the NE extension zone (III): 1 – sites with transregional fault zones with reverse/thrust (a), left-lateral (б) and normal fault (в) types of displacements; 2 – bedding elements of the fault zone the local rank with reverse/thrust (a), normal fault (б), left-lateral strike-slip (в) and right-lateral strike-slip (г) types of displacement; 3 – indexes of fault systems of the local rank (a) and their conjugated pairs (б) which are referred to for identification of zones of the transregional rank on the special mapping site; 4 – indexation of transregional fault zones; 5 – positions of subhorizontal major stress axes of compression (a) and extension (б); 6–8 – paragenesises of faults of the 2nd order in the zone of reverse/thrust (6), left-lateral strike-slip (7) and normal fault (8), which are represented by plane strikes according to Fig. 8 in [Seminsky, 2014]. *Л–Н* – fault zones of the regional rank with reverse/thrust (*Л*), left-lateral strike-slip (*М*) and normal fault (*Н*) types of displacements which developed through the three stages of deformation in the area of the crust under study, and some features of their internal structure: 1 – sites of regional reverse/ thrust (a), left-lateral strike-slip (б) and normal fault (в) zones which correspond to the late disjunctive stage of development of the internal structure; 2 – sites of the regional left-lateral strike-slip zone which correspond to the late disjunctive stage of development of the internal structure; 3 – assumed positions of main fault planes formed at the stage of complete destruction in the regional left-lateral strike-slip zones; 4 – indexation of regional fault zones; 5 – positions of transregional fault zones with reverse/thrust (a) and normal fault (б) types of displacement; 6 – positions of subhorizontal axes of main normal stresses of compression (a) and extension (б); 7–9 – schemes of regional fault zones formed in case of compression (7), left-lateral strike-slip (8) and extension (9). *О* – scheme of regional and transregional fault structures revealed on the Ulirba site by the special mapping method: 1 – assumed positions of main fault planes formed at the stage of complete destruction in the regional fault zones; 2 – sites of the regional fault zones which correspond to the late disjunctive stage of development of the internal structure; 3 – positions of transregional fault structures.

гиональным, т.е. переходным от локального к региональному (см. рис. 3), внутренняя структура которого характеризуется наличием более сложного парагенезиса вторичных разрывных структур.

На этапе II.3 перед выявлением простых разломных парагенезисов выделяются системы локальных разломов. Так, все решения, полученные для участка «Улирба», подвергались группировке на основе анализа круговой диаграммы, объединяющей полюсы магистральных сместителей (рис. 8, А). По их сближенному положению отчетливо выделяется 12 систем разломов локального ранга (рис. 8, Б–В): система 1 ($330^\circ/85^\circ$) – 9 решений (1, 5, 7, 10, 13, 14, 20, 27 и 30), система 2 ($70^\circ/75^\circ$) – 4 решения (17, 23, 25 и 28), система 3 ($250^\circ/50^\circ$) – 4 решения (6, 9, 12 и 22), система 4 ($340^\circ/75^\circ$) – 3 решения (8, 24 и 32), система 5 ($340^\circ/30^\circ$) – 3 решения (2, 4 и 31), система 6 ($165^\circ/75^\circ$) – 3 решения (16, 29 и 33), система 7 ($130^\circ/45^\circ$) – 2 решения (15 и 18), система 8 ($260^\circ/70^\circ$) – 1 решение (11), система 9 ($50^\circ/40^\circ$) – 1 решение (21), система 10 ($50^\circ/70^\circ$) – 1 решение (3), система 11 ($145^\circ/50^\circ$) – 1 решение (19), система 12 ($90^\circ/30^\circ$) – 1 решение (26).

Среди установленных разрывных направлений можно выделить четыре пары сопряженных систем разломов (табл. 2), одна из которых (парагенезис № 1) формируется при сдвиге, две (парагенезисы № 2 и 4) – при сжатии и одна (парагенезис № 3) – при растяжении земной коры. Если судить по представленности локальными решениями, то наиболее значимым для участка исследований является сдвиговый парагенезис, у которого данный показатель (табл. 2, столбец 6) почти в три раза выше, чем у остальных парагенезисов. Четыре из двенадцати разломных систем – 6, 8, 9 и 10 – не образуют сопряженных пар (рис. 8, В), причем три последних являются малозначимыми для участка «Улирба», так как представлены одним локальным решением. Несмотря на это, они (С-6, С-8, С-9 и С-10), наряду с сопряженными парами (ПГ-1, ПГ-2, ПГ-3 и ПГ-4), выносятся на план участка «Улирба» (см. рис. 7, В–К) для анализа их пространственного распределения, поскольку данная информация может быть полезной при выделении следующего – регионального – ранга разломных зон.

Как видно из рис. 7, В–К, системы локальных разломов, не образующие сопряженные пары (рис. 7, Д, Ж, И–К), встречаются в обособленных пунктах наблюдения, что характерно даже для системы 6, представленной тремя решениями (см. рис. 7, Д). То же отмечается и для некоторых участков распространения решений, входящих в состав сопряженных пар (см. рис. 7, В–Г, Е, З). При этом, если их существование в краевых пунктах может предпола-

гать продолжение зоны за границами участка, то наличие одиночных решений в его центральной части не дает формальных оснований вывести описанные разломные структуры на трансрегиональный уровень. К зонам данного ранга уверенно относятся пять участков проявления однотипных решений в смежных пунктах наблюдения (см. рис. 7, В–Г, Е, З). Их ширина определяется положением пунктов, в которых выявлен парагенезис, а протяженность – краями изучаемой площади или/и границами участков профиля (горизонтальные пунктиры), до которых формально можно распространять информацию из одного пункта структурных наблюдений (середина интервала между ними). Следует отметить, что кроме встречаемости локальных решений в смежных пунктах, выделенные зоны с разной степенью, но удовлетворяют и второму критерию – существованию на одном участке обеих сопряженных систем. Для зон 2 и 6 это имеет место в явном виде, а в остальных случаях (зоны 1, 3 и 4) можно предполагать наличие сопряженного локального сместителя за границей участка специкартирования. Поскольку аналогичная ситуация может иметь место для самого северного пункта наблюдений № 14, здесь также следует предполагать наличие разломной зоны, что косвенно подтверждается тремя одноориентированными в плане локальными решениями (см. рис. 7, Г–Д, З).

Все выделенные зоны, согласно выбранным критериям, должны быть отнесены к трансрегиональному рангу (см. рис. 7, В–К), хотя ширина зоны 6 существенно превышает размеры остальных разломных структур. С одной стороны, это следует считать особенностью ранга дизъюнктивов, являющегося переходным от локального к региональному. С другой стороны, истинный размер пяти первых участков может по описанным выше причинам быть большим, чем это зафиксировано на участке, являющемся, по сути, профилем, поперечным к зоне 6. Кроме того, непрерывность этой широкой зоны может объясняться наличием двух протяженных интервалов профиля между пунктами 7 и 8, а также 10 и 11, где массовые замеры не проводились и, следовательно, возможно отсутствие парагенезиса ПГ-1. Однако во всех случаях очевидно, что левосдвиговая зона является главной разломной структурой, нарушающей породы изучаемого участка, который пересекает ее центральную часть, где интенсивность процесса разрывообразования была наибольшей.

Итак, результаты, полученные для участка «Улирба», проиллюстрировали переходный – трансрегиональный – характер рассмотренного уровня. Часть из выделенных разломных зон не вышла за пределы локального ранга; другие структуры относятся к собственно трансрегиональному

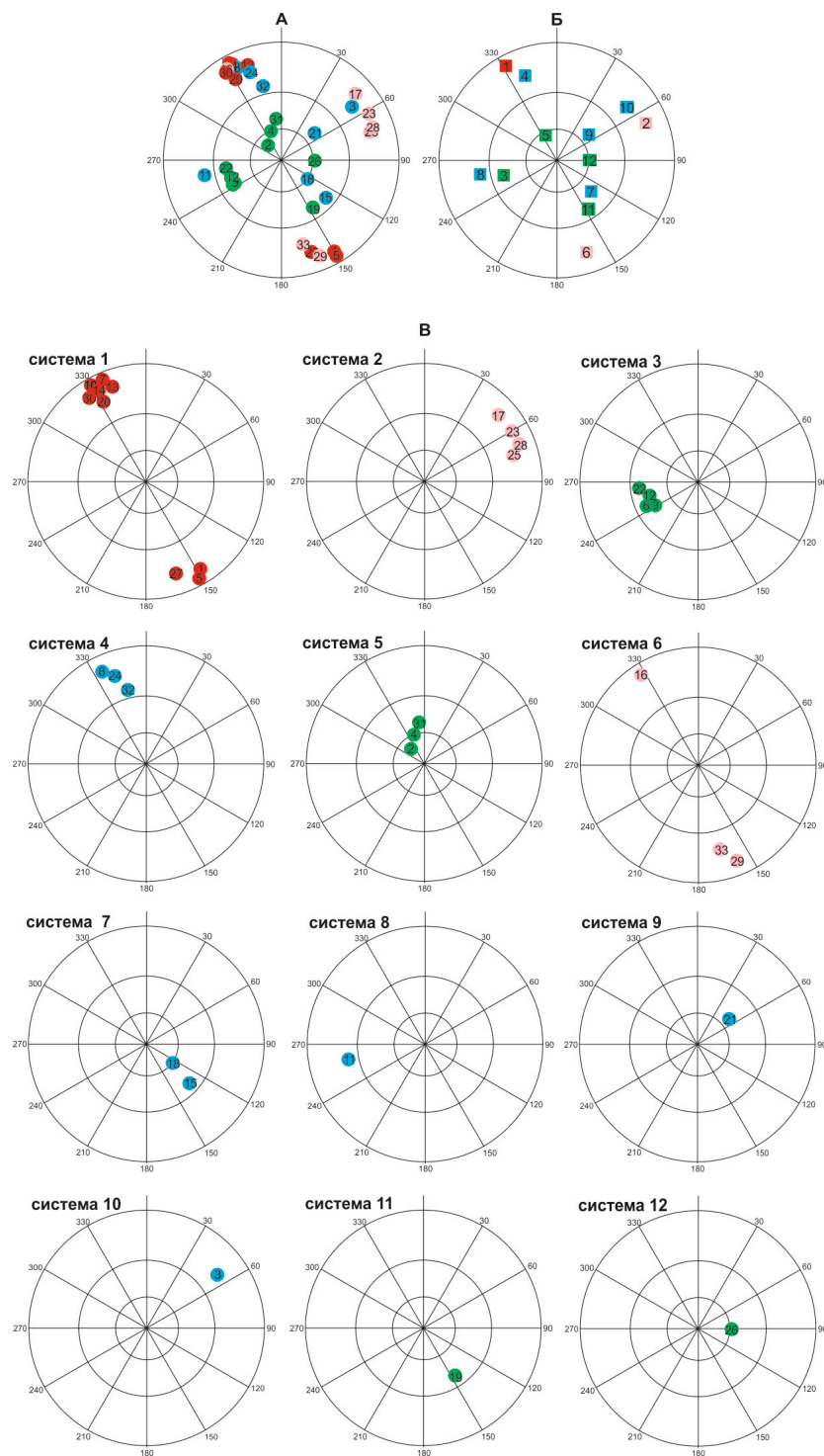


Рис. 8. Выделение для участка «Улирба» двенадцати систем локальных разломов, типы которых на круговых диаграммах показаны символами разного цвета (красный – левый сдвиг, розовый – правый сдвиг, зеленый – взброс или надвиг, синий – сброс).

A – круговая диаграмма, на которой кружками показаны полюсы разломов, полученных на участке спецкартирования в качестве тридцати трех решений локального ранга. *Б* – круговая диаграмма, на которой квадратами показано положение двенадцати систем разломов локального ранга. *В* – круговые диаграммы, на каждой из которых показаны полюсы тридцати трех локальных разломов, относящихся к отдельной системе.

Fig. 8. Identification of 12 local fault systems on the Ulirba site. Types of the faults are shown in circular diagrams by different colours: red – left-lateral strike-slip fault, pink – right-lateral strike-slip fault, green – reverse/thrust fault, blue – normal fault.

A – in the circle diagram, circles show poles of faults revealed on the special mapping site as 33 solutions of the local rank. *B* – in the circle diagram, boxes show positions of 12 local fault systems. *В* – each circle diagram shows poles of 33 local faults comprising a separate system.

Т а б л и ц а 2. Количественная характеристика парагенезисов из двух сопряженных систем локальных разломов, выделенных на участке «Улирба» в Приольхонье (Западное Прибайкалье)

Table 2. Quantitative characteristics of parageneses comprising two conjugated systems of local faults revealed on the Ulirba site in Priolkhonie, Western Pribaikalie

№ парагенезиса (ПГ)	Главная система		Второстепенная система		Общее количество локальных решений	Принадлежность к решению регионального ранга
	№ (рис. 8, Б)	Количество локальных решений	№ (рис. 8, Б)	Количество локальных решений		
1	2	3	4	5	6	7
1	1	9	2	4	13	I
2	3	4	12	1	5	II
3	4	3	7	2	5	III
4	5	3	11	1	4	II

П р и м е ч а н и е. Цветом обозначены системы разломов, сформировавшихся при растяжении (синий), сжатии (зеленый), левом (красный) и правом (розовый) сдвиге.

N o t e. Systems of faults that formed in different settings are marked by different colours as follows: blue – extension, green – compression, red – left-lateral strike-slip, and pink – right-lateral strike-slip.

рангу. При этом очевидно, что наиболее крупная из них (см. рис. 7, Е) должна составлять структурную основу для разломной зоны следующего – регионального – ранга. Эта зона является левым сдвигом, тогда как другие трансрегиональные разломы принадлежат сбросовым и взбросовым зонам, пространственное положение которых предполагает наличие нескольких этапов деформации изучаемого участка земной коры, что и нашло подтверждение в ходе описываемого далее анализа.

3.2.4. Выявление разломных зон регионального ранга

Объектом для анализа в рамках очередного шага по обработке материалов спецкартирования является серия мелких региональных разломов, внутренняя структура которых представлена двумя системами сопряженных локальных разрывов (см. рис. 3, этап II.4). Мелкие региональные разломы составляют сеть разрывов 2-го порядка в зоне более крупного дизъюнктива регионального ранга (1-й порядок), решение о типе и ориентировке которого принимается по результатам парагенетического анализа на уровне разломов, нарушающих смежные выходы горных пород. Подобных решений регионального ранга в тектонически активных регионах, как правило, бывает несколько (2–3), что свидетельствует о принадлежности участка земной коры в разные эпохи тектогенеза к разнотипным разломным зонам. Получение решения о их присутствии сводится к последовательному сравнению круговой диаграммы, отражающей положение

выделенных для участка картирования разрывных нарушений предыдущих локального и трансрегионального рангов, с эталонным сочетанием разломных систем, имеющим место в зонах действия скалывающих напряжений при разнотипных подвижках. Далее информация о полученных решениях анализируется на плане местности с последующим выделением участков земной коры, принадлежащих к зонам разломов регионального ранга.

В качестве эталонных трафаретов при обработке данных по разломам используются диаграммы, разработанные для разломных зон главных морфогенетических типов [Seminsky, 2014], из которых по понятным причинам исключены собственно трещинные системы. Ранее [Seminsky, Cheremnykh, 2011] материалы по участку «Улирба» анализировались на основе эталонных парагенезисов разломов 2-го порядка в зоне сдвига (левого), сброса и взброса (надвига), представленных простирающимися плоскостями в плане (рис. 8 из [Seminsky, 2014]). Здесь будут использованы круговые диаграммы-трафареты (рис. 5, 6 из [Seminsky, 2014]), позволяющие также учитывать азимуты падения разрывных структур, что повышает достоверность анализа, как это было показано Ю.П. Бурзуновой [Burzunova, 2015] на материалах участка «Тажеран». В этом случае основные операции обработки аналогичны анализу круговых диаграмм трещиноватости при помощи трафаретов, представляющих эталонные сочетания систем трещин в локальных зонах сбросов, взбросов (надвигов) и сдвигов (см. раздел 4.2.2).

Сопоставление осуществляется на основе диа-

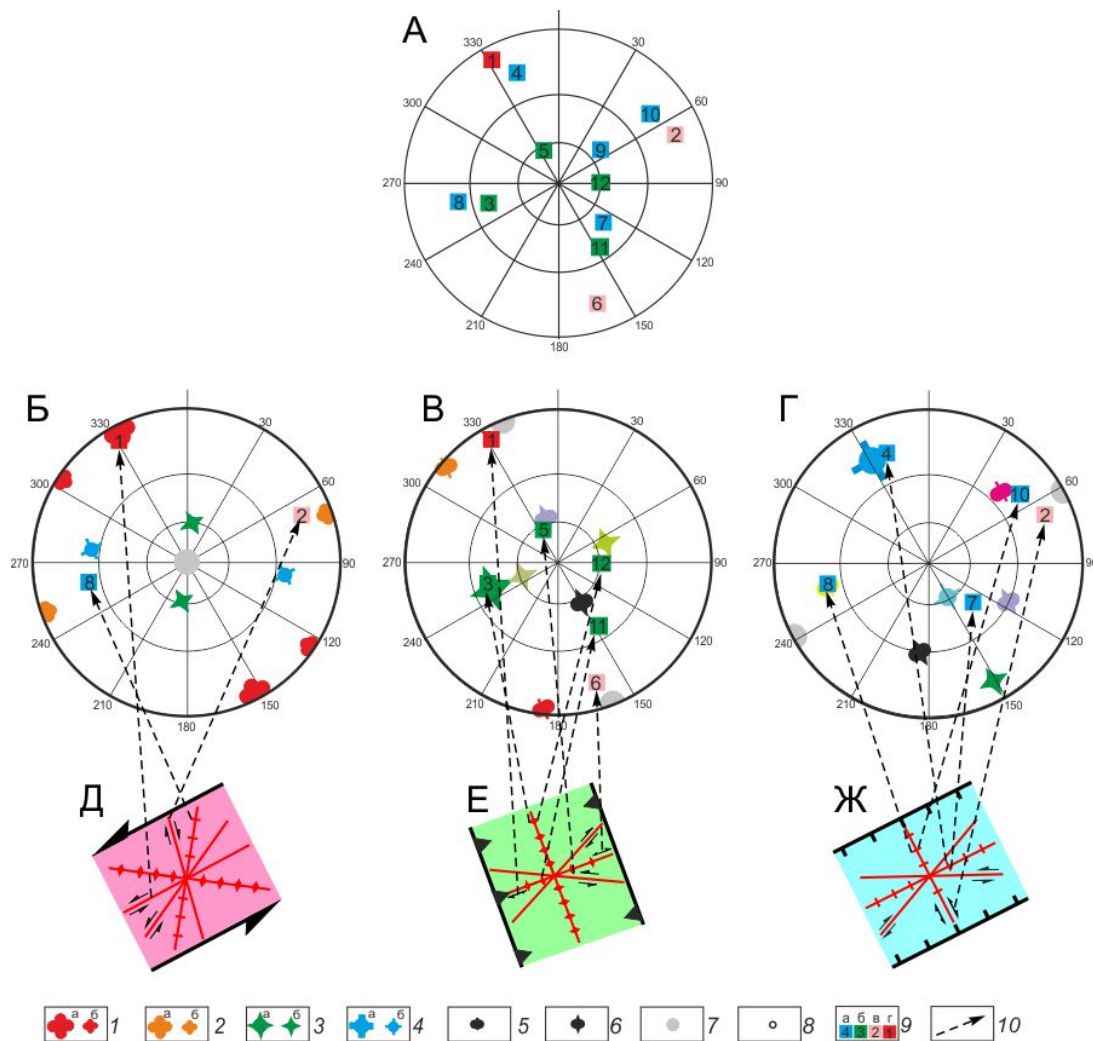


Рис. 9. Выделение трех показанных разным цветом динамических обстановок регионального ранга, в которых сформировалась разломная структура участка спецкартирования (красный – левый сдвиг, зеленый – сжатие, синий – растяжение).

A – круговая диаграмма, на которой квадратами показано положение двенадцати систем разломов локального ранга. Б–Г – трафареты парагенезисов разрывов 2-го порядка в зонах левого сдвига (Б), взброса (Б) и сброса (Г), на которых квадратами показано положение систем локальных разломов, соответствующих отдельным элементам эталонного парагенезиса. Д–Ж – парагенезисы разломов 2-го порядка в зоне левого сдвига (Д), взброса (Е) и сброса (Ж), представленные простирациями плоскостей в плане, согласно рис. 8 из статьи [Seminsky, 2014]. 1–8 – обозначения разрывных систем, составляющих эталонные трафареты (см. на рис. 4); 9 – номера и типы систем разломов локального ранга: а – сброс, б – взброс или надвиг, в – правый сдвиг, г – левый сдвиг; 10 – соответствие разрывных систем эталонного и природного парагенезисов.

Fig. 9. Three dynamic settings of the regional rank which are revealed on the special mapping site: red – left-lateral strike-slip, green – compression, blue – extension.

A – in the circle diagram, boxes show positions of 12 local fault systems. Б–Г – standard patterns of parageneses of fractures of the 2nd order in zones of left-lateral strike-slip (Б), reverse (Б) and normal (Г) faults; boxes show positions of systems of local faults corresponding to elements of the standard parageneses. Д–Ж – parageneses of fractures of the 2nd order in zones of left-lateral strike-slip (Д), reverse (Е) and normal (Ж) faults which are represented by plane strikes in plan, according to Fig. 8 in [Seminsky, 2014]. 1–8 – fault systems comprising standard patterns (see Fig. 4); 9 – numbers and types of local fault systems: a – normal fault, б – reverse/ thrust, в – right-lateral strike-slip fault, г – left-lateral strike-slip fault; 10 – concordance between fault systems of the standard and natural parageneses.

граммы с положением 12 систем локальных разломов (рис. 8, Б, рис. 9, А), а порядок подбора трафаретов определяется значимостью выявленных для рассматриваемого участка земной коры простых разломных парагенезисов – пар сопряженных си-

стем разрывов (табл. 2), которые отражают структуры трансрегионального ранга. Сдвиговое решение I регионального ранга (рис. 9, Б), согласно результатам сравнительного анализа эталонных (для северо-восточного левого сдвига) и реально суще-

ствующих разломных направлений, включает наиболее распространенную на участке пару систем северо-восточных левых и северо-западных правых сдвигов (табл. 2, ПГ-1), а также систему субмеридиональных сбросов (№ 8 на рис. 8). На основе второй по значимости пары север-северо-западных взбросов и надвигов (табл. 2, ПГ-2) формируется взбросовое решение II (рис. 9, В), в рамках которого получает объяснение формирование перпендикулярно простирающейся пары взбросов и надвигов (табл. 2, ПГ-4), а также могут быть в качестве трансформационных активны разломы, принадлежащие к системам 1 и 6. Сбросовое решение III (рис. 9, Г) объединяет последний из значимых для участка «Улирба» простых разломных парагенезисов (табл. 2, ПГ-3), систему 10, а также уже фигурировавшие в решении I субмеридиональные сбросы (система 8) и правые сдвиги (система 2).

Выявленные решения левого сдвига, взброса и сброса объясняют происхождение всех систем разломов локального ранга, исключая 9 (рис. 9, А). Однако оно представлено единственным разломом, что не может являться поводом для выделения самостоятельной обстановки регионального ранга. Вероятно, его происхождение связано с обстановкой растяжения в северо-западном направлении (решение III), в которой во 2-м порядке присутствуют поперечные сбросы. Три реконструированные решения по типу и ориентировке не могут быть объединены в рамках одного или двух полей напряжений более низкого порядка. Таким образом, каждая из региональных динамических обстановок отражает 1-й ранг поля напряжений, который определял процесс деструкции изучаемого участка земной коры на одном из трех этапов тектогенеза.

Сформировавшиеся в обстановках сжатия, сдвига и растяжения разломные зоны регионального ранга могут быть околочены по материалам трех схем (см. рис. 7, Л–Н), основой для составления которых служит информация о существовании в точке наблюдения разломной зоны, являющейся членом соответствующего парагенезиса разрывов 2-го порядка. При этом для получения непрерывной пространственной картины данные о наличии или отсутствии решения рассматриваемого типа переносились на половину расстояния между соседними пунктами наблюдения. Составы парагенезисов для зон сжатия, сдвига и растяжения представлены над рис. 7, В–К, в виде схем, где для наглядности изображены простирающиеся разрывные системы, хотя исходный анализ проводился с учетом азимутов и углов падений (рис. 8, 9). При этом, как и ранее для троек систем трещин при выявлении локальных разломов, системы локальных разрывов, по которым выделялись региональные реше-

ния, были разделены между последними без перекрытий. При картировании зон неучет возможной активизации некоторых систем на разных этапах деформации является меньшей ошибкой, чем распространение решения на участок профиля, не затронутого деструкцией в рассматриваемом поле напряжений. Так, система 1 не рассматривалась в составе взбросового решения II, а системы 2 и 8 не привлекались для анализа пространственного распределения сбросового решения III, так как эти направления разрывов составили парагенезис регионального левого сдвига (решение I), который без систем 1 или 2 не имеет права на существование.

В итоге исходным материалом для картирования региональных разломных зон сдвигового этапа развития земной коры на участке «Улирба» (см. рис. 7, М) послужила информация о распространении пары сопряженных правых и левых сдвигов (ПГ-1), а также сброса по системе 8 (см. рис. 7, Е–Ж). В результате проведенного анализа выделенная на предыдущем этапе зона левостороннего сдвига (зона 6 на рис. 7, Е) заняла место среди региональных структур, хотя ее поперечные размеры не изменились (зона 1 на рис. 7, М). Формирующие ее внутреннее строение парагенезисы разрывов 2-го порядка проявлены на всей площади за исключением Крайнего Севера (пункт № 14).

Исходным материалом для выявления разломных зон этапа сжатия земной коры (рис. 7, Л) послужила информация о присутствии в пунктах наблюдения всех взбросовых и надвиговых систем (ПГ-2 и ПГ-4), а также системы 6 правосторонних сдвигов трансформационного типа (см. рис. 7, В–Д). По полученному площадному распространению отмеченных парагенезисов можно уверенно судить о наличии двух участков, деформированных при сжатии. Один из них (2) занимает практически всю южную половину изучаемой площади за исключением пункта 6, чем, учитывая небольшую область его влияния, в данном случае можно пренебречь. Еще один участок (3), начинаясь с пункта № 14, по видимому, может продолжаться далее на север, так как в изученном пункте обстановка регионального сжатия выделяется с большой степенью достоверности решениями о надвиге (см. рис. 7, Г) и правом сдвиге (см. рис. 7, Д). Принадлежность еще одного пункта (№ 12) к обстановке сжатия (см. рис. 7, Л) вызывает сомнение, так как он представлен локальным решением о правом сдвиге трансформационного типа при отсутствии обстановок сжатия в соседних точках наблюдения.

Участки проявления региональной обстановки растяжения (см. рис. 7, Н) выявлены согласно площадному распределению всех систем сбросовых разрывов (рис. 7, З–К). Северный участок (4) вклю-

чает пункт наблюдений № 14 и, возможно, более северные территории. Участок 5 объединяет четыре смежных пункта наблюдения (№ 6–9) в центральной части площади. Участок 6 представлен крайним пунктом № 1 и, теоретически, может иметь продолжение на юг. Между зонами растяжения 5 и 6 рассматриваемая обстановка встречается в обособленном пункте № 3, который вряд ли имеет самостоятельное значение, а, скорее, тяготеет к объединению с зоной 5, если принять во внимание возможность активизации при региональном растяжении сбросового решения в пункте № 4, которое также принадлежит и к обстановке левого сдвига (см. рис. 7, Ж).

Таким образом, этап обработки данных спецкартирования для участка «Улирба» может считаться полностью завершенным. В итоге осуществления четырех последовательных операций II.1–II.4. (см. рис. 3) установлено существование трех полей напряжений 1-го ранга, в которых на разных этапах тектогенеза происходило формирование разрывной сети в районе исследования. Наибольший след в трещиноватости пород оставила обстановка сдвига с левосторонними подвижками по разломам северо-восточной ориентировки, так как она реконструирована практически во всех пунктах наблюдения. Менее активными были воздействия северо-восточного сжатия и северо-западного растяжения. В результате процесса деструкции в каждом из полей напряжений сформировалась иерархия разломных зон, границы которых были установлены в ходе спецкартирования и показаны на разных схемах для структур локального, трансрегионального и регионального рангов (см. рис. 7). Следующим этапом работ является интерпретация полученных материалов, позволяющая определить особенности внутреннего строения разломных зон, отразить положение выделенных структур на единой схеме участка исследований, а также установить закономерности их пространственных и временных взаимоотношений.

3.3. Этап интерпретации

3.3.1. Составление схемы разломных структур и характеристика особенностей их внутреннего строения

Итоговым продуктом спецкартирования является схема разломных зон изучаемой территории, которая аккумулирует информацию о разноранговых и разновозрастных структурах, полученную в ходе реализации отдельных операций обработки и отраженную на предварительных графических материалах (см. рис. 2; рис. 7, Б–Н). В регионах с многоактной историей развития и высокой поздней

кайнозойской активностью, к которым относится и Западное Прибайкалье, составление такой схемы не является тривиальным, поскольку предполагает вычленение главных элементов разломного строения изучаемого участка земной коры из большого объема полученной структурной информации. Основой для такого анализа служат главные закономерности внутренней организации разломных зон земной коры, представленные в предыдущей статье в общем виде [Seminsky, 2014] и ниже – в применении к трещинной структуре разломов.

Строение разломной зоны характеризуется внутренней поперечной зональностью, являющейся следствием неравномерного во времени формирования дизъюнктива, который в своем развитии проходит три главные стадии – раннюю и позднюю дизъюнктивные, а также дизъюнктивную стадию полного разрушения. Процесс формирования такой зональности для небольшого разлома показан на обобщенном рис. 10. Разрывами 2-го порядка в данном случае являются трещины, образующие при скалывании парагенезис из трех примерно перпендикулярных систем. Две из них – главная и второстепенная – являются классической парой сопряженных разрывов, причем R -сколы характеризуются продольной, а R' -сколы – поперечной ориентировкой по отношению к оси зоны. Субпараллельное будущему сместителю (Y -тип) положение R -сколов, получающих преимущественное развитие в процессе скалывания, приводит к быстрой локализации деформации (рис. 10, Б). Таким образом, специфической особенностью формирования мелкого разлома является небольшая (по сравнению с более крупными дизъюнктивами) продолжительность поздней стадии (II), в течение которой развивающиеся на ранней стадии (I) опережающие трещины относительно быстро объединяются в магистральный сместитель, что свидетельствует о наступлении стадии полного разрушения (III).

В итоге имеет место существенное различие в поперечных размерах разломной зоны ранней и более поздних стадий разрывообразования (рис. 10, Б). Зона полностью сформировавшегося разлома представляет собой участок земной коры (рис. 10, А), состояние внутренней структуры которого по параметрам плотности и системности трещиноватости в своей основе соответствует ранней дизъюнктивной стадии. Лишь вблизи магистрального сместителя имеется сравнительно узкая полоса, в пределах которой породы подверглись интенсивному разрушению и дроблению на поздней дизъюнктивной стадии и стадии полного разрушения. Для более крупных разломных зон относительные поперечные размеры полосы разрывообразования, соответствующей стадиям II и III,

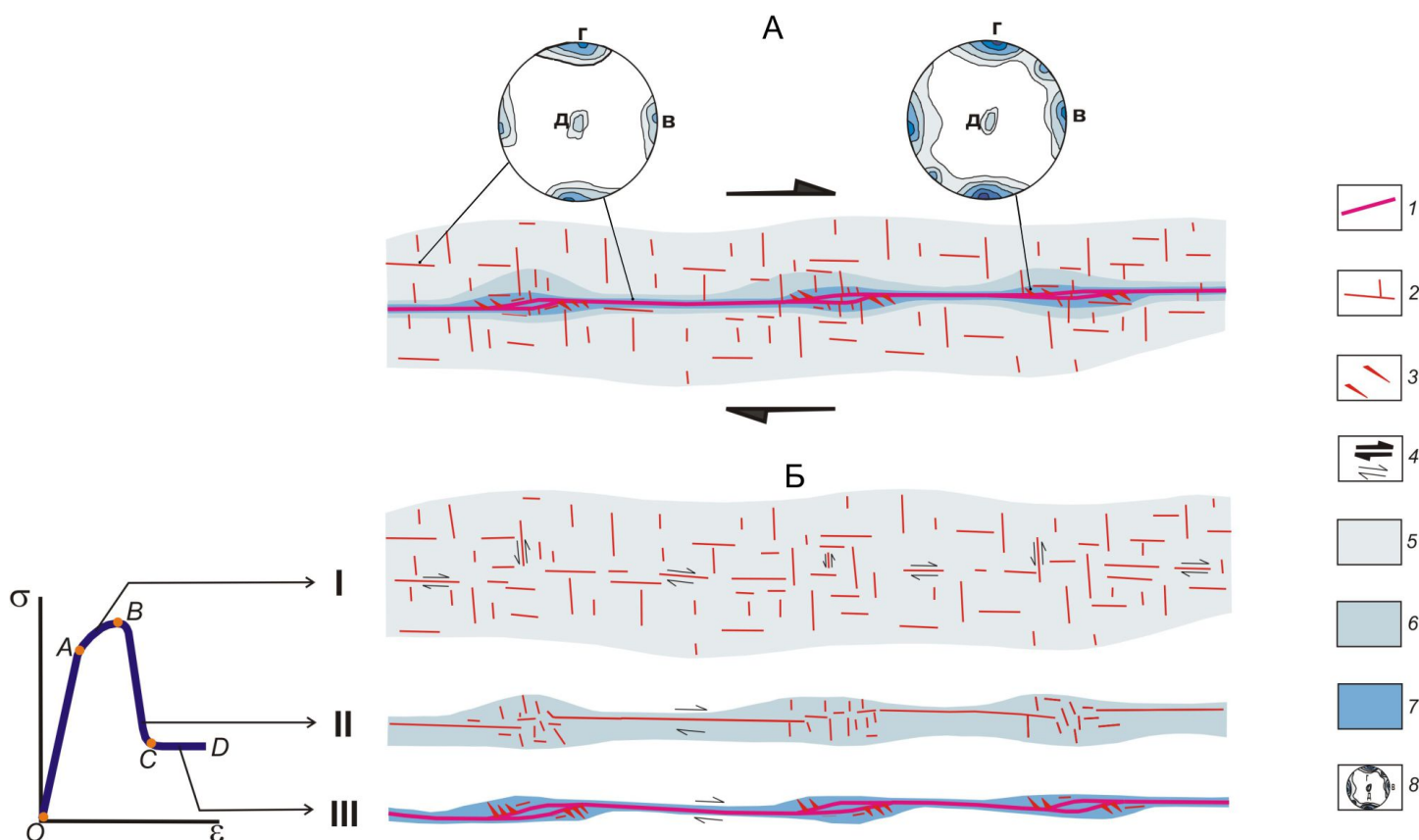


Рис. 10. Принципиальная схема трещинообразования в зоне мелкого разлома с правосдвиговым характером смещения крыльев [Seminsky, 2003].

А – внутренняя структура полностью сформировавшегося разлома со схематичными круговыми диаграммами, отражающими строение трещинных сетей на участках разломной зоны, развивающихся по-разному. Б – схемы активной трещинной структуры на стадиях упрочнения (I) и ослабления (II) деформируемого субстрата в разломной зоне, а также на стадии скольжения блоков по магистральному сместителю (III), каждой из которых соответствуют характерные участки кривой «нагрузка–деформация» ($\sigma = f(\epsilon)$). 1 – магистральный сместитель; 2 – опережающие трещины скола; 3 – опережающие трещины растяжения; 4 – характер смещения крыльев по разломной зоне в целом и составляющим ее трещинам скола; 5 – разломная зона на ранней стадии; 6 – то же на поздней стадии; 7 – то же на стадии полного разрушения; 8 – принципиальный вид круговых диаграмм, основу которых составляет парагенезис из трех примерно перпендикулярных систем трещин: главной (г), второстепенной (в) и дополнительной (д).

Fig. 10. Principal scheme of jointing in the zone of the small fault with the right-lateral displacement of the fault wings [Seminsky, 2003].

А – internal structure of the completely formed fault, and schematic circle diagrams showing joint systems in segments of the fault zone which differ in their development. Б – schemes of the active jointing system at stages of hardening (I) and weakening (II) of the deformed material in the fault zone, and at the stage when the blocks were sliding along the main fault plane (III); for each scheme, there is a corresponding segment of the stress-strain curve, $\sigma = f(\epsilon)$. 1 – main fault surface; 2 – lead shear fractures; 3 – feather joints of extension; 4 – mode of displacement of fault wings in the fault zone as a whole and along shear joints comprising the zone; 5 – fault zone in the early stage; 6 – late stage; 7 – complete destruction stage; 8 – principal circle diagrams that are based on the paragenesis of three almost perpendicular systems of joints: main (г), auxiliary (в), and additional (д) systems.

увеличиваются вследствие большей длительности процесса локализации деформации. Однако они и в этом случае существенно меньше полной ширины разломной зоны, определяемой внешними границами области разрывообразования на ранней стадии.

Особенностью процесса деструкции в тектонически активном регионе [Seminsky et al., 2013] явля-

ется превалирование по размерам участков, представляющих разломные зоны, над смежными сравнительно слабонарушенными блоками. Более того, при отсутствии возможности непрерывного изучения разрывной структуры на местности подавляющее большинство наблюдений проводится в пределах коренных выходов, нарушенных разрывами на ранней дизъюнктивной стадии формирования

разломной зоны. Как следствие, в полевой геологии подобные сети трещин относят к фону, а разломные зоны выделяют только в границах распространения структур, сформировавшихся на поздних стадиях (II и III). В практическом отношении такой подход оправдан, поскольку в осевых частях разломных зон трещинная сеть является аномальной по величине плотности (превышает средние значения), а в регионах с многоэтапной историей деформаций – и по количеству разрывных систем (становится хаотической). В противовес этому главным признаком отнесения к разломной зоне обширных площадей распространения пород, деформированных на ранней стадии развития, является сочетание трещинных систем (парагенезисов), генетически связанных с кинематикой перемещения крыльев.

Рассмотренные закономерности составляют основу интерпретации материалов спецкартирования, что может быть продемонстрировано на примере участка «Улирба» в Приольхонье. Эта территория, располагаясь между крупными Приморским и Морским разломами, нарушена системой разрывов более высокого порядка (см. рис. 1, Б), характеризующихся многоэтапной историей развития. Одним из них является Улирбинский разлом (см. рис. 1, В), который располагается в 300 м от участка спецкартирования и в позднекайнозойскую эпоху отличается сбросовым характером перемещения крыльев. Таким образом, для данного региона в полной мере справедливо положение о принадлежности практически любого локального объема горных пород к разломной зоне, прошедшей, по меньшей мере, раннюю стадию формирования. Результаты спецкартирования не только это подтверждают (см. рис. 7, Л–Н), но также свидетельствуют о том, что некоторые из изученных коренных выходов в разное время испытывали на себе воздействие двух и даже всех трех выделенных для участка динамических обстановок регионального ранга. Внешний вид трещинной сети подобного типа представлен на фото (см. рис. 1, Ж).

Теперь необходимо, основываясь на полученных данных спецкартирования «немой» трещиноватости, установить главные особенности внутреннего строения выделенных зон. Для этого привлекаются результаты анализа количественных показателей трещинных сетей (см. рис. 2, Б), согласно которым на изучаемой площади выделено два интервала (пункты наблюдения № 5–7 и № 9–12), где трещиноватость характеризуется аномально высокой плотностью и хаотичностью. Сеть мелких разрывов в пункте № 14 также является хаотической, хотя величина плотности трещин не выходит за границу фона. Согласно описанным в начале раздела тектонофизическим представлениям о строении

разломных зон, состояние нарушенности пород на этих участках соответствует поздней дизъюнктивной стадии разломообразования. При этом, как будет показано ниже, данная стадия по большому счету могла иметь место только в обстановке сдвига, что и отмечено на рис. 7, М, более темным оттенком красного цвета.

В пределах участков интенсивной нарушенности, возникающих на заключительных стадиях разломообразования, должны иметь место трансрегиональные разрывы с элементами залегания, соответствующими магистральному сместителю зоны регионального ранга. Для сдвига это азимут простирания 240° (см. рис. 9, Б), сжатия – азимут падения 250° – 50° (рис. 9, В) и для растяжения – азимут падения 340° – 70° (см. рис. 9, Г). Для сдвига разломы с подобными элементами залегания выявлены в пунктах № 5, 6 и 11 (см. рис. 7, Е), т.е. на обоих крупных участках интенсивной нарушенности пород, что и показано для них традиционным знаком на рис. 7, М. На южном участке в пункте № 5 выявлен трансрегиональный взброс № 1 с элементами залегания 250° – 50° (см. рис. 7, В). Однако это лишь формально дает основание связывать данный участок с обстановкой сжатия, так как в смежном с севера коренном выходе № 6, тоже интенсивно нарушенном трещинами многочисленных систем, такая обстановка не зафиксирована. Кроме того, взброс № 1 был отнесен к трансрегиональному рангу лишь предположительно, поскольку в пределах зоны его влияния не зафиксирована вторая, сопряженная с главной, система разрывов (см. рис. 7, В).

В целом, согласно проведенному анализу, главной разломной структурой участка «Улирба» является зона северо-восточного левого сдвига (см. рис. 7, М, зона 1), так как соответствующие ей разрывные парагенезисы зафиксированы во всех пунктах наблюдения за исключением самого северного из изученных коренных выходов. На двух участках характер разрывообразования достиг поздней дизъюнктивной стадии развития, что соответствует зонам разломов в их традиционном понимании. В пределах южного участка предполагаемый сместитель должен иметь элементы залегания 330° – 85° , а в северном – 160° – 70° , причем, судя по ширине участков, последний является главным сместителем зоны левого сдвига, а первый – оперяющим его тектоническим нарушением. Разломные зоны 2 и 3 (см. рис. 7, Л), связанные с обстановкой сжатия в северо-восточном направлении, с большой долей достоверности можно считать сформированными на ранней стадии разломообразования. Их наиболее деформированные осевые части, видимо, располагаются за пределами полосовидного участка «Улирба», ориентировка которого не спо-

способствует полноценному изучению структур северо-северо-западной ориентировки. Разломные зоны 4, 5 и 6 (см. рис. 7, Н), связанные с обстановкой растяжения в северо-западном направлении, также формально находятся на ранней дизъюнктивной стадии развития, хотя их благоприятная по отношению к профилю ориентировка предполагает и иную интерпретацию, базирующуюся на представленном в следующем разделе статьи анализе пространственно-временных взаимоотношений выявленных полей.

Таким образом, анализ расположения разноранговых и разновозрастных разломных зон в совокупности с данными о степени нарушенности и сложности трещинных сетей, проведенный на основе представлений тектонофизики о процессе разломообразования, позволил установить главные особенности внутреннего строения дизъюнктивов, нарушающих породный массив на участке «Улирба». Это дает возможность составить единую схему разломных структур изучаемой территории, которая является одним из основных результатов спецкартирования (см. рис. 7, О). Предваряя описание особенностей построения схемы, необходимо отметить, что состояние нарушенности всех изученных на участке спецкартирования коренных выходов соответствует ранней стадии разломообразования, поскольку каждый из них входил в зону влияния одного из региональных разломов, формирующихся в разное время под действием сжатия, растяжения или сдвига.

На интегральной схеме (см. рис. 7, О) разломы наиболее крупного – регионального – ранга показаны в виде зон, в границах которых степень зрелости внутренней структуры достигла поздней дизъюнктивной стадии развития. На участке «Улирба» это две зоны, объединяющие смежные пункты наблюдений с аномально высокой плотностью трещин, сеть которых классифицируется как хаотическая. В связи с тем, что процесс разломообразования в выделенных зонах мог достичь стадии полного разрушения, на схеме показываются предполагаемые положения магистральных сместителей. Их пространственное положение отмечено согласно элементам залегания разрывов локального ранга, реконструированных в тех пунктах, которые располагаются в пределах рассматриваемых интенсивно нарушенных участков. Пунктиры показаны в центре отрезков профиля, относящихся к соответствующим пунктам наблюдения (№ 6 и 11). Кроме того, на итоговую схему выносятся предполагаемое положение пяти выделенных разломных структур трансрегионального ранга. Единообразие подхода к построению схемы позволяет показать их лишь в виде предполагаемых сместителей, поскольку в данном масштабе картирования устано-

вить степень зрелости внутренней структуры для разломов данного ранга без привлечения априорной информации не представляется возможным.

В итоге обработки данных кроме масштабного ранга для каждой из разломных зон была установлена кинематика перемещений, соответствующая главному этапу формирования их внутренней структуры. Это позволило обратным ходом отразить их положение на рис. 7, Л, М, Н, дополнив пунктиры принятыми в структурной геологии навесными знаками. Таким образом, для участка «Улирба» получены схемы разломов, активных в обстановках сжатия, сдвига и растяжения земной коры, что является не менее важным результатом спецкартирования, чем интегральная схема (см. рис. 7, О).

После составления интегральной и поэтапных схем разломной структуры изучаемого участка производится их заверка и уточнение на основе привлечения информации, являющейся априорной по отношению к представленным выше результатам анализа «немой» трещиноватости. Прежде всего, это информация по геодинамике региона и геолого-структурные данные непосредственно по участку картирования, приведенные в разделе 2. По сравнению с обычными площадями, в данном случае априорные материалы отличаются содержательностью, так как результаты спецкартирования на участке «Улирба», выбранном с целью иллюстрации основных операций метода, должны быть проверяемы по основным позициям (положению крупных разломных сместителей, разновидностям главных динамических обстановок и др.).

Как видно из сопоставления рис. 7, А, О, две зоны тектонитов, выявленные до обработки данных по трещиноватости, пропорциональны по размерам и находятся в пределах разломных зон регионального ранга, выделенных при спецкартировании. Следовательно, кроме заверки присутствия региональных разломов априорные данные уточняют их поперечную зональность добавлением осевых участков проявления магистральных сместителей, свидетельствующих о том, что процесс разломообразования достиг стадии полного разрушения. Положение и элементы залегания сместителей, измеренных в обнажениях, с одной стороны, и определенных при обработке массовых замеров трещин – с другой, для разлома 1 совпадают, а для разлома 2 отличаются не более чем на 5°. Сдвиговый тип региональных разломов, определенный в результате спецкартирования, согласуется с априорной информацией об отсутствии контрастного рельефа в месте их локализации, а также с наличием нескольких субвертикальных трещин со штрихами скольжения горизонтальной ориентировки.

Штрихи скольжения по падению плоскостей,

зафиксированные для отдельных трещин, могли формироваться как при сдвиге в полях напряжений 2-го порядка, так и в региональных обстановках сжатия или растяжения, выявленных при анализе «немой» трещиноватости. В целом эти обстановки соответствуют трем главным этапам деформаций, известным для Западного Прибайкалья из работ предшественников. Северо-восточные сбросовые зоны регионального ранга (см. рис. 7, *Н*) могли образовываться при позднекайнозойском растяжении в направлении СЗ-ЮВ, северо-восточные левые сдвиги (см. рис. 7, *М*) – в раннекайнозойском сдвиговом поле напряжений, а северо-западные взбросы (см. рис. 7, *Л*) – как разломные структуры 2-го порядка (поперечные взбросы) при раннепалеокайнозойском сжатии в направлении СЗ-ЮВ. Таким образом, кроме заверки, априорная информация уточняет данные спецкартирования в плане соотношений выявленных для участка «Улирба» полей напряжений регионального ранга и обстановок, относящихся к наиболее низкому – геоструктурному рангу (см. рис. 3) в масштабах всего Западного Прибайкалья. Действительно, поля сдвига и растяжения, выявленные в ходе поэтапной обработки данных по трещиноватости на полосовидном участке длиной 120 м, полностью соответствуют обстановкам, имевшим место в истории тектонического развития такой крупной геоструктуры, как граница между блоками литосферы. Поле сжатия, реконструированное на участке «Улирба», входит в обстановку сжатия геоструктурного ранга во 2-м порядке и, таким образом, занимает промежуточное положение в иерархии.

Кроме априорной информации, рассмотренной выше и являющейся традиционной для исследования разломной структуры, на мысе Улирба были проведены целенаправленные геофизические исследования, которые позволяют через независимый показатель оценить степень нарушенности изучаемого участка земной коры. Таким показателем является удельное электрическое сопротивление (ρ_k), которое для горных пород в естественном залегании определяется количеством пор, пустот и трещин, заполненных влагой и мелкодисперсными продуктами разрушения, существенно снижающими значения ρ_k . Распределение удельного электрического сопротивления было получено в ходе реализации метода электротомографии (оборудование «Скала-48»), являющегося современной разновидностью вертикальных электрических зондирований [Multi-electrode electric survey station..., 2010]. Геоэлектрический разрез глубиной 40 м (рис. 11) составлен для профиля, южная часть которого располагается в 15 м и субпараллельно участку спецкартирования, а северная пересекает зону Улирбинского сброса (см. рис. 1, *В*).

На геоэлектрическом разрезе отчетливо видно неоднородное распределение удельного электрического сопротивления, которое меняется от первых тысяч Ом·м в слабонарушенном массиве до первых единиц Ом·м в зонах разломов. Зона Улирбинского сброса выделяется в поле ρ_k в виде аномалии, имеющей характерную лапполитоподобную форму. Ее поперечные размеры от глубины 40 м к поверхности увеличиваются не менее чем в два раза за счет разрыхления массива вследствие разгрузки напряжений и активного выветривания. Интенсивное разрушение является причиной характерной выраженности разломной зоны в виде широкого понижения в рельефе практически до уровня воды в оз. Байкал. Судя по рисунку изолиний, граница неоднородной по внутреннему строению нарушенной зоны, связанной с Улирбинским сбросом, на геоэлектрическом разрезе должна быть проведена по желтому полю (≈ 564 Ом·м), хотя не исключено, что и коричневые участки могут быть разломными.

В обоих случаях по степени нарушенности весь участок спецкартирования, если судить по геоэлектрическому разрезу (рис. 11), соответствует зоне разлома. В его пределах выделяются два участка наиболее интенсивно нарушенных пород, сопротивление которых уменьшается в два раза и более. По положению и размерам они соответствуют разломам 1 и 2, причем, если для первого из них детальность электротомографии (шаг между электродами – 5 м) не позволила выявить главный сместитель с глинкой трения, то раздробленные и выветрелые тектониты во втором случае отчетливо выделяются широкой полосой с наиболее низким из установленных на разрезе электрических сопротивлений. Полоса имеет субвертикальное положение, что косвенно свидетельствует о сместителе сдвигового типа. Материалы более детальных электротомографических исследований по пяти коротким профилям вблизи участка спецкартирования (см. рис. 1, *Г*) подтвердили эти результаты.

Между разломной зоной, зафиксированной на участке спецкартирования, и зоной Улирбинского сброса располагается высокоомный блок, который вследствие слабой нарушенности пород занимает сравнительно высокое положение в рельефе (рис. 11). У поверхности его размеры существенно уступают ширине разломных зон. Однако уже на глубине 30–40 м картина нарушенности меняется на противоположную: массивные блоки доминируют по размерам над зонами их контактирования, характеризующимися интенсивным разрывообразованием и выветриванием.

Таким образом, материалы малоглубинной электротомографии полностью подтверждают результаты исследования разломной структуры с

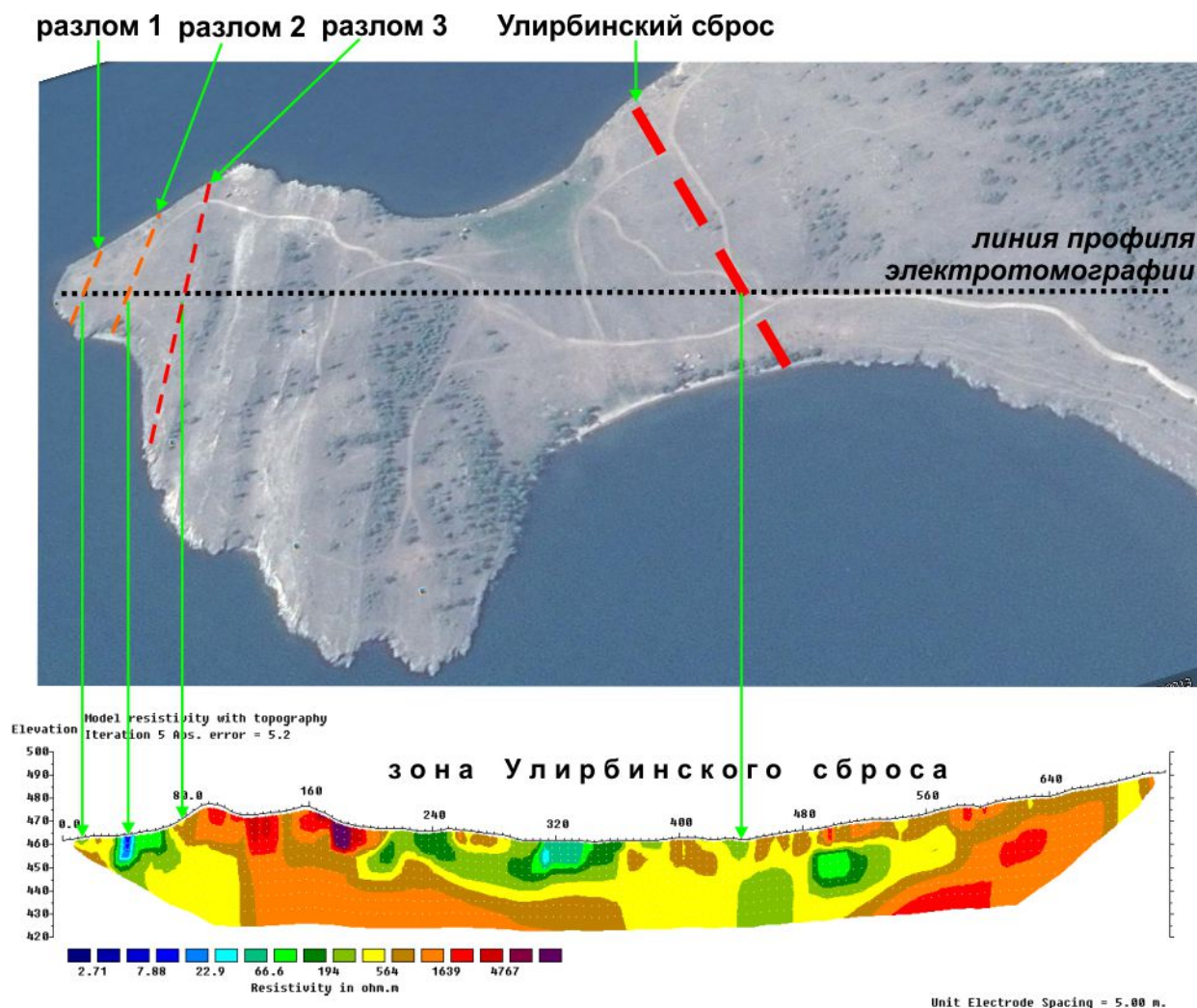


Рис. 11. Геоэлектрический разрез (внизу), построенный по данным электротомографии вдоль профиля, пересекающего разломы мыса Улирба в Приольхонье (вверху) (материалы Р.М. Зарипова).

Характеристики съемки: оборудование – многоэлектродная станция сопротивлений «Скала-48» [Multi-electrode electric survey station..., 2010]; схема расположения электродов – симметричная установка Шлюмберже; расстояние между электродами – 5 м; инверсия данных – в программном комплексе «Res2DInv» [Loke, 2010].

Fig. 11. The geoelectric profile (bottom) constructed from electrical resistivity tomography data along the profile across faults at the Ulirba cape in Priolkhonie (top) (data provided by P.M. Zaripov).

Survey information: equipment – multi-electrode electric survey station Skala-48 [Multi-electrode electric survey station..., 2010]; locations of electrodes – symmetric pattern by Schlumberger; spacing of electrodes – 5 m; data inversion software – Res2DInv [Loke, 2010].

поверхности. Участок спецкартирования «Улирба» принадлежит разломной зоне, субстрат которой оказался неравномерно дислоцированным в ходе сдвиговых перемещений. Выделяются два аномальных по степени нарушенности участка, которые ассоциируются с главным и второстепенным сместителями разломной зоны. Для первого из них установлена высокая степень дезинтеграции субстрата, которая стала причиной образования большого объема глинистой фракции и/или проникновения воды, т.е. появления факторов, обеспечивающих крайне низкие значения удельного

электрического сопротивления.

Материалы, представленные в данном разделе, завершают описание основных операций спецкартирования рассмотрением априорной информации, которая подтверждает и уточняет особенности разломного строения, установленные в ходе формализованных операций порангового анализа «немой» трещиноватости. Итогом картировочных работ является схема местоположения трансрегиональных и региональных разломных структур (см. рис. 7, 0), для главных из которых о контурены границы зоны наиболее интенсивного проявления де-

струкции, формирующиеся на завершающих стадиях разломообразования. Кроме того, для участка исследований выделяются главные этапы деформации, и для каждого из них составляются схемы разрывной структуры (см. рис. 7, *Л–Н*). Содержание схем, кроме положения парагенетически связанных (т.е. активных) разломных сместителей, включает контуры зон распространения разрывных деформаций, соответствующих рассматриваемому этапу деформации. Для этапов, играющих главную роль в формировании разломной структуры участка картирования (см. рис. 7, *М*), кроме внешних границ проявления разрывов ранней стадии разломообразования, показан ключевой элемент внутренней поперечной зональности – участки наиболее высокой плотности разрывов, формирующиеся на завершающих стадиях разломообразования.

Полученные при спецкартировании материалы могут являться информативной основой для различного рода прикладных и фундаментальных исследований. Для этого необходимо провести их интерпретацию путем выявления временных и пространственных взаимоотношений закартированных разломных структур. В следующем разделе такой анализ сделан на примере участка «Улирба», имеющего сложную историю тектонического развития и в настоящее время принадлежащего к западному плечу сейсмоактивного Байкальского рифта.

3.3.2. Интерпретация пространственных и временных взаимоотношений закартированных разломных структур

В соответствии с полученными схемами (см. рис. 7, *Л–О*) массив горных пород на мысе Улирба по характеру и степени нарушенности разрывами принадлежит к разломной зоне, отдельные участки которой представляют разные стадии разломообразования – от ранней дизъюнктивной до стадии полного разрушения. Кроме широкого разнообразия трещинных систем, выделяется серия ортогонально располагающихся разломных сместителей трансрегионального и регионального ранга. Наиболее крупными являются два северо-восточных разлома (главный и второстепенный), сместители которых представлены «рыхлыми» тектонитами и сопровождаются широкими (6 и 27 м) полосами пород, интенсивно нарушенными разрывами на поздней стадии разломообразования. Эти разломы, а также включающая их 100-метровая зона парагенетически связанных более мелких разрывов и трещин сформировались в обстановке левого сдвига (см. рис. 7, *М*). Кроме нее для участка «Улирба» реконструированы еще два поля напряжений реги-

онального ранга – сжатия (см. рис. 7, *Л*) и растяжения (рис. 7, *Н*) в направлении СЗ–ЮВ – с соответствующим набором трансрегиональных и локальных разломов.

Восстановление истории формирования разломной структуры изучаемого участка земной коры, как главная задача интерпретации материалов спецкартирования, предполагает определение последовательности существования этих трех полей напряжений. Логично предположить, что сжатие происходило в раннем палеозое, сдвиг – в раннем кайнозое и растяжение – в позднем кайнозое, поскольку эти этапы тектогенеза, согласно данным предшественников, оставили наибольший след на территории всего Западного Прибайкалья. Пространственные взаимоотношения выделенных при спецкартировании разломных структур, хотя и косвенно, но независимым образом свидетельствуют о справедливости данной последовательности в деструкции горных пород на участке «Улирба». Так, одним из показателей глубинного уровня трещинообразования в породах, оказавшихся в настоящее время на поверхности, и, таким образом, относительного возраста процесса является величина угла скалывания. Результаты ее анализа на участке «Улирба» иллюстрируются в разделе 3.2.2 на примере пункта наблюдений № 8 и свидетельствуют о том, что поля сжатия и сдвига (удвоенный угол скалывания – тупой) являются более древними по сравнению с полем растяжения (удвоенный угол скалывания – острый).

Еще один косвенный признак возрастных взаимоотношений рассматриваемых динамических обстановок может быть получен в результате анализа площадей их распространения на участке спецкартирования. Из сопоставления рис. 7, *Л, М*, видно, что на участках интенсивного проявления сдвиговых перемещений по разломам 1 и 2 (пункты наблюдения № 6 и 11) отсутствуют разрывные парагенезисы, связанные с обстановкой сжатия. Подобная закономерность была отмечена ранее А.В. Черемных [Cheremnykh, 2010] на основе анализа геолого-структурных данных по нескольким участкам детальных исследований разломных зон Приольхонья. Это позволило сделать вывод об относительно древнем возрасте поля сжатия, результаты проявления которого не обнаруживаются в осевых частях сдвиговых разломных зон, как местах наиболее интенсивного проявления деформаций следующего тектонического этапа. Простая активизация надвиговых и взбросовых разломных структур в режиме сдвига вряд ли возможна ввиду существенного несовпадения в ориентации разломных поверхностей. Для наиболее молодой динамической обстановки (см. рис. 7, *Н*) отмечается приуроченность широкого участка растяжения к

зоне разлома № 1, а также тектонического нарушения, главный сместитель которого, вероятно, располагается за северной границей участка исследований и отчетливо выражен уступом в рельефе.

В свете установленных закономерностей истории формирования разломной структуры участка «Улирба» может быть представлена следующим образом. В раннепалеозойскую эпоху сжатия земной коры региона в направлении СЗ-ЮВ породный массив, обнажающийся в настоящее время на мысе Улирба, принадлежал к зоне взброса северо-западной ориентации, формирующейся во 2-м порядке по отношению к северо-восточным взбросам и надвигам. Он находился на ее периферии, где формирование разрывной сети соответствовало ранней стадии разломообразования и выражалось в возникновении разломных структур трансрегионального ранга, а также парагенетически связанной с ними тектонической трещиноватости.

Следующий этап интенсивной деструкции породного массива на мысе Улирба происходил в обстановке сдвига с субмеридиональным положением оси сжатия и субширотным – оси растяжения (см. рис. 7, М). Он имел место в раннем кайнозое и был главным для рассматриваемого участка, так как в это время здесь формируется зона интенсивного сдвигообразования. Процесс достиг стадии полного разрушения, когда локализация деформации привела к образованию на поверхности двух северо-восточных левых сдвигов, которые на глубине, по всей вероятности, образуют единый разломный сместитель. Разрывы и трещины предшествовавшего этапа деформации на участках интенсивного сдвижения были подчинены формированию более крупных разломов, но на удалении от них сохранились в первоначальном виде.

Позднекайнозойский этап растяжения земной коры в направлении СЗ-ЮВ относительно слабо затронул породы участка исследований, так как напряжения в существенной степени снимались за счет вертикальных подвижек в зонах смежных более крупных сбросов (см. рис. 1). Одним из них из них является Улирбинский разлом, а другим – сброс, скрытый водами оз. Байкал на юго-востоке. Более мелкая сбросовая структура – разлом 3 (см. рис. 1, Г; рис. 11) – формирует уступ в рельефе за северной границей изучаемой площади, проявляясь в пределах последней только в пункте № 14 (зона 4 на рис. 7, Н). Разлом 2 не был активизирован в данной динамической обстановке, в отличие от разлома 1, к которому приурочен наиболее широкий участок растяжения. Можно предположить, что плоскость раннекайнозойского левого сдвига в этот этап деформации активизировалась как сброс. Северное крыло было смещено по падению и деформировано в условиях растяжения с образовани-

ем системы небольших разнонаправленных нарушений, среди которых выделяется трансрегиональный противосброс с углом падения 30°. Обособленно обстановка растяжения была реконструирована в пунктах № 3 и 1, хотя в последнем случае можно предполагать ее распространение за границы участка спецкартирования, где имеет место скрытый под водой сбросовый сместитель.

Участок «Улирба», по сути, представляет профиль из 14 пунктов наблюдения. Информативность картирования возрастет при наличии серии субпараллельных профилей. Однако она, скорее всего, будет касаться повышения значимости тех разломных зон, которые занимают по отношению к ним продольное положение. При этом основные выводы по закономерностям формирования разломов района останутся неизменными.

В целом представленная интерпретация пространственных и временных взаимоотношений разломных структур, выявленных при спецкартировании на участке «Улирба», не противоречит известной для Западного Прибайкалья этапности тектонического развития. При этом она объясняет происхождение основных трещинных систем, измеренных в пунктах наблюдения. Для структур разломного ранга установлены границы зон влияния в трещиноватости, а для наиболее крупных дизъюнктивов – элементы внутренней зональности, обусловленные пространственно-временной неравномерностью процесса разломообразования. Подобные знания по разломной тектонике в совокупности с графическими материалами спецкартирования обуславливают широкие перспективы применения метода для решения общегеодинатических и прикладных задач даже в слабообнаженных регионах.

4. ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦКАРТИРОВАНИЯ

Проведение спецкартирования в объеме рассмотренных в статье операций подготовительного этапа, этапа обработки и этапа интерпретации позволяет получить информацию обо всех аспектах разломной структуры изучаемой площади. Определяются геометрические характеристики разрывной сети через картирование пространственного положения и размеров отдельных разломов. Оценивается их иерархическая соподчиненность путем объективного деления на ранги и порядки, устанавливаются основные элементы внутренней зональности. Для каждого разрыва определяется морфогенетический тип, а для их совокупностей – динамическая обстановка возникновения и активизации с выходом на отдельные этапы. Наконец,

через оценку относительного возраста разнотипных парагенезисов разломов устанавливается история формирования разломной структуры изучаемой территории.

Преимуществом и отличительной особенностью спецкартирования является то, что эта информация о разломной структуре по большому счету – результат исследования повсеместно распространенной трещиноватости без видимых признаков смещений и, таким образом, установлена по косвенным признакам. В то же время точность оценок, полученных по многим из перечисленных выше пунктов, зависит от количества и качества априорной информации о разломной структуре, т.е. сведений непосредственно о разломах изучаемой территории. Такая информация в минимальном количестве присутствует всегда, а в некоторых регионах может обеспечить получение большей части необходимых сведений без изучения трещиноватости, т.е. применения операций спецкартирования.

Таким образом, объем спецкартирования в конкретных ситуациях определяется задачами исследования тектонической структуры, а также качеством и количеством информации о разломах, которая имеется или может быть получена без применения времяземных массовых измерений и специфической обработки «немой» трещиноватости. Как следствие, в ситуациях с ярко выраженной тектоникой ее ординарное исследование должно опираться на традиционные геолого-структурные методы, а приемы спецкартирования могут привлекаться в качестве дополнительных способов анализа, целью которых является получение информации по отдельным элементам строения или формирования разломной сети (установление внутренней зональности дизъюнктивов, иерархии динамических обстановок их формирования и др.). Напротив, при минимуме прямых наблюдений за разломами, характерном для слабообнаженных территорий или применения специфических видов исследования (например, бурение скважин), операции спецкартирования при широко поставленных структурных задачах должны осуществляться в полном объеме. Следует отметить, что рассмотренный в статье район Западного Прибайкалья отражает только одну из тектонических обстановок, тогда как в других структурных ситуациях интерпретация данных спецкартирования должна проводиться с учетом вкладов первичной трещиноватости, складчатых разрывов и пр.

Доминирование обстановок с недостаточной обнаженностью горных пород и возрастающие требования к глубине получаемой структурной информации, с одной стороны, а также интенсивное развитие методов автоматизированного сбора и обработки статистической информации, – с дру-

гой, выдвигают спецкартирование в разряд современных методов исследования разломной структуры земной коры. Его перспективы в плане решения традиционных задач, связанных с разломной тектоникой, не требуют отдельного рассмотрения. Важно отметить только те аспекты, которые обусловлены его спецификой, позволяющей получать оригинальные данные для решения серии теоретических и прикладных задач. Эта специфика определяется, во-первых, разновидностью исходного для анализа объекта (т.е. трещиноватостью) и, во-вторых, тектонофизическим подходом к его исследованию, базой которого являются закономерности неравномерного в пространстве и времени процесса разломообразования.

Как следствие, главное достоинство спецкартирования – высокий уровень детальности исследования разрывной структуры, позволяющий определять происхождение ее элементов вплоть до отдельных трещинных систем. Достаточно отметить, что эталонные парагенезисы трещинных систем, используемые при спецкартировании в виде трафаретов, по сути, представляют модель приразломной сети трещин, обобщенную для доминирующих в верхней части коры условий деформации. Информация о строении и генезисе трещинной сети – исходное звено для построения частных моделей разрывной структуры отдельных участков земной коры, востребованных во многих видах прикладных и теоретических исследований. В нашей стране это направление интенсивно развивалось в 60–70-х годах прошлого века [Smekhov, 1961; Knorring, 1969; Rats, Chernyshev, 1970; Chernyshev, 1983], имея своей целью оценку свойств дислоцированных пород (прочность, проницаемость) на основе тестирования моделей, составленных по известным параметрам разрывной сети. За рубежом подобные работы стали особенно активно проводиться в связи с необходимостью оценки проницаемости трещиноватых коллекторов и расширением возможностей анализа численных моделей нарушенной среды на современных компьютерах [Oliver, 2001; Matthaii, 2003; Wibberley et al., 2008; Agosta et al., 2010a; и мн. др.].

Вторым достоинством спецкартирования является возможность получить качественно новую информацию о внутреннем строении разломных зон. Трехстадийное, с позиций тектонофизики, формирование дизъюнктивов обеспечивает (при полном цикле развития) их поперечно-зональное строение, отраженное в обобщенном виде на рис. 12, Б. От периферии к центру происходит последовательная смена участков зоны, сформировавшихся на ранней дизъюнктивной стадии (подзона III), поздней дизъюнктивной стадии (подзона II) и стадии полного разрушения (подзона I).

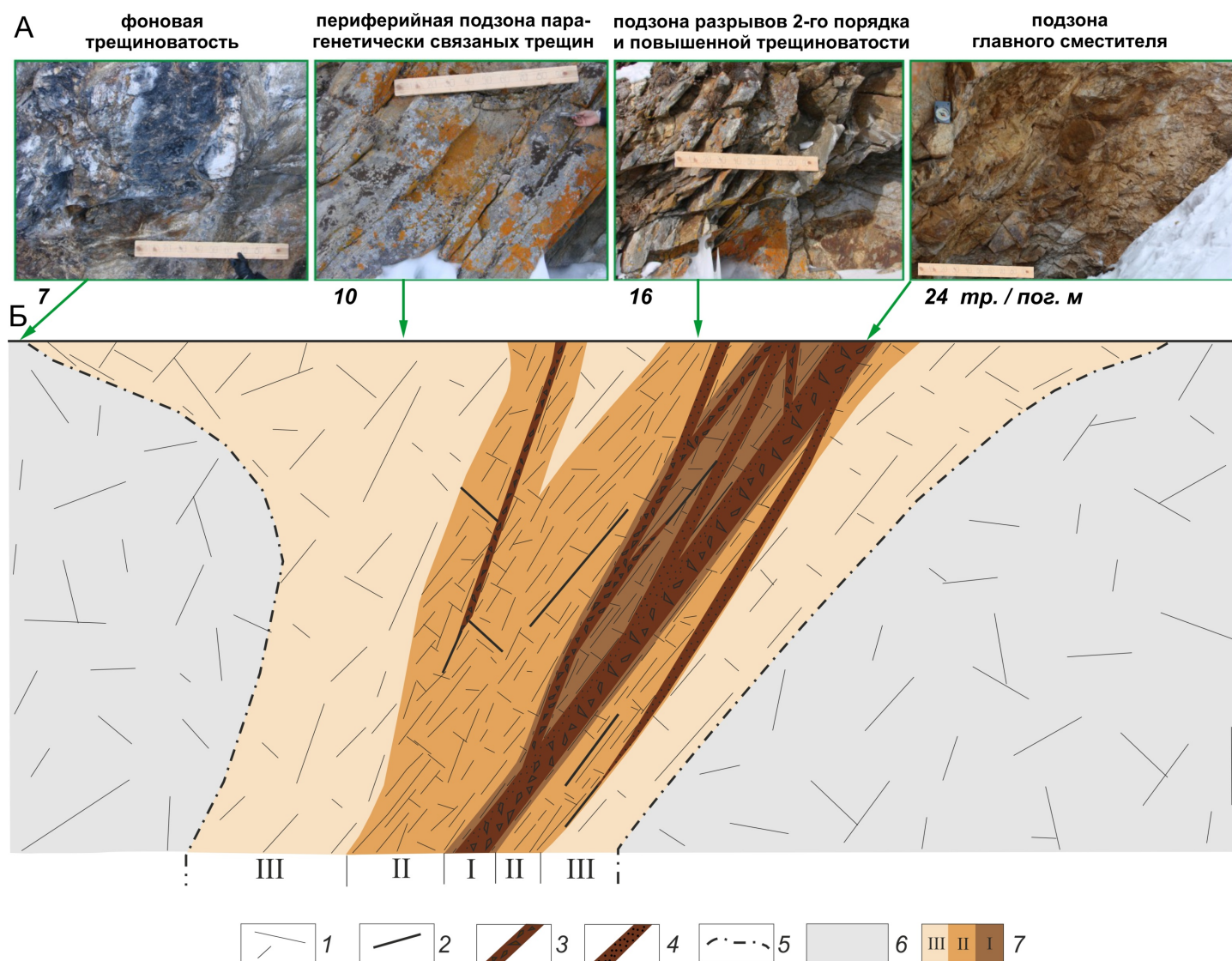


Рис. 12. Принципиальная модель внутреннего строения разломной зоны в разрезе.

А – фотографии, иллюстрирующие характерные состояния трещинных сетей вблизи разломного сместителя, нарушающего породный массив на одном из участков Приольхонья (масштабная линейка имеет длину 1 м, для которой получены плотности трещин, приведенные под каждой фотографией). Б – модель поперечной зональности разлома, прошедшего в своем развитии все три стадии разрывообразования. 1 – трещиноватость; 2 – крупные трещины; 3 – сместитель, заполненный брекчией дробления; 4 – сместитель, заполненный глиной трения; 5 – внешняя граница разломной зоны; 6 – слабонарушенный породный массив; 7 – главные элементы внутреннего строения разломной зоны, сформировавшиеся на разных стадиях разрывообразования: III – периферийная подзона парагенетически связанных трещин, II – подзона разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости, I – подзона главного сместителя.

Fig. 12. The model showing the profile view of the fault zone's internal structure.

А – photos of the typical state of joint networks near the fault plane that disturbs the rock massif in Priolkhonie (with reference to the one-meter plotting scale, densities of joints are determined and shown under each photo). Б – transverse fault zonation model (the fault has developed through all the three stages of fracturing). 1 – jointing; 2 – large joints; 3 – fault place filled in with crush breccias; 4 – fault place filled in with gouge; 5 – external boundary of the fault zone; 6 – rock massif with insignificant disturbance; 7 – main elements of the internal structure of the fault zone which developed at different stages of fracturing: III – peripheral sub-zone of paragenetically related joints, II – sub-zone of fractures of the 2nd order and higher jointing, I – sub-zone of the main fault surface.

При традиционных структурно-геологических исследованиях у разлома обычно выделяют два элемента внутреннего строения под названиями «зона сместителя» и «зона разлома», которым в зарубежной терминологии отвечают понятия «fault core» и

«damage zone». Эти элементы, как правило, соответствуют участкам I и II в зональности, представленной на рис. 12, Б. Подзона III больше по ширине и обычно относится к фоновой трещиноватости, так как по плотности трещин она не так резко кон-

трастирует с фоновой трещиноватостью, как это характерно для ее границы с подзоной II. Отличием подзоны III от смежных участков вмещающего массива («host rock») является не столько интенсивность распространения трещин, сколько набор разрывных систем, закономерно связанный с характером подвижек по разлому. На рис. 12, А, в качестве иллюстрации рассматриваемой зональности приводятся фотографии трещинных сетей у одного из разломов Приольхонья (Западное Прибайкалье). Плотности трещин (D), зафиксированные в представленных обнажениях, соответствуют для многих изученных в данном регионе разломов тем пределам, которые отделяют в распределении параметра D участок с фоновой трещиноватостью от подзоны III (10 тр./пог.м), подзону III от подзоны II (16 тр./пог.м), подзону II от подзоны I (24 тр./пог.м).

В регионах, подобных Приольхонью по многоэтапности и степени тектонической активности, участки с истинной фоновой трещиноватостью не имеют подавляющего распространения. Подзоны III, принадлежащие к смежным, часто разновозрастным разломам, сближены в пространстве, а зачастую и вовсе перекрываются, создавая «псевдофон» для разломов, во внутреннем строении которых остаются лишь две наиболее нарушенные подзоны (II и I). Роль этих зон в нарушенности породного массива, безусловно, является ключевой. Однако для многих сопутствующих разломообразованию процессов (например, миграция воды, гидротермальных флюидов, дегазация и др.) знание полных размеров и особенностей внутреннего строения разломной зоны имеет принципиальное значение. В этом плане результаты спецкартирования дают наиболее полную информацию, открывая новые возможности для анализа взаимоотношений разломной структуры и проявлений сопутствующих процессов, важных в практическом отношении.

Еще одним специфическим результатом спецкартирования является деление разломов (и, соответственно, динамических обстановок их формирования) на ранги, в основе которого лежат не традиционные количественные оценки, а качественные критерии в системе взаимоотношений порядков разрывных структур. Согласно тектонофизическим представлениям, разрыв 1-го порядка формируется посредством эволюции разрывов 2-го порядка, что позволяет путем парагенетического анализа переходить от сравнительно мелких нарушений к более крупным, от них – к еще более крупным, последовательно выделяя все ранги разрывов – от трещин до крупных региональных разломов. Операции переходов в рамках спецкартирования формализованы, что позволяет получать

единообразные шкалы рангов для различных структурных обстановок, т.е. сопоставлять регионы по важному дополнительному признаку. Результат подобных исследований по мере накопления фактического материала может в будущем если не составить альтернативу традиционным способам выделения рангов разломов по их размерам, то существенно дополнить подобные оценки независимой информацией.

Принимая во внимание отмеченные особенности спецкартирования, можно предполагать некоторые области, в которых применение метода может быть наиболее эффективным. При теоретических исследованиях результаты спецкартирования позволят продвинуться в выявлении общих закономерностей делимости земной коры, так как они в качестве границ блоков, кроме явных разломных сместителей, фиксируют зоны проявления парагенетически связанных разрывов. Картина делимости получает полную завершенность и может быть представлена в виде численных и физических моделей для дальнейшего тестирования. Особое значение для таких моделей представляет реализованное в методе деление разломов на ранги, открывающие новые перспективы для установления иерархических уровней процесса деструкции и закономерностей их активизации в различных тектонических режимах.

Еще одной теоретической областью, для которой особую значимость имеют материалы спецкартирования, является исследование собственно процесса разломообразования, так как получаемая информация позволяет полноценно изучить все его стадии, включая и раннюю, предшествующую интенсивной локализации деформации. В этом плане открывается возможность более полного сопоставления закономерностей разрывообразования, выявленных при исследовании деструкции в физических моделях, с деформационным состоянием пород в разломных зонах земной коры, выделяя их индивидуальные особенности, как следствие влияния первичных структурно-вещественных неоднородностей или специфики неравномерного воздействия эндогенных сил. В целом, результаты спецкартирования упрощают применение законов механики разрушения к интерпретации сложной картины природных деформаций, что способствует выявлению наиболее общих закономерностей их развития в пространстве и времени.

В области прикладных исследований спецкартирование может найти самое широкое применение через внедрение его операций в собственно геологическую съемку. В настоящее время эта съемка, по сути, является картированием вещественных комплексов, которые существенно более доступны для полевого изучения, чем традиционно

документируемые тектонические структуры (разломы, складки и др.). Поскольку объекты спецкартирования – трещины, как собственно и горные породы, встречаются в каждом коренном выходе, целесообразно проводить их массовый замер в каждом пункте геологической съемки. Это при наличии электронных средств для полевых измерений, а также трафаретов для камеральной обработки не осложнит в существенной степени производство работ. Однако будет получена возможность анализировать совместно данные по веществу и структуре, сопоставимые по объему и значимости. Две составляющие единого по своей природе объекта будут анализироваться вместе и в одном масштабе съемки. Это не только ликвидирует существующий «конфликт» между структурными и вещественными исследованиями, а, наоборот, объединит их в единое целое, что явится фундаментом качественно нового знания о природе того или иного участка земной коры. Материалы съемочных работ в этом случае будут прочной основой для любого типа геологических и негеологических исследований.

Прикладные области, для которых материалы спецкартирования имеют наиболее важное значение, прежде всего, связаны с месторождениями полезных ископаемых. Тектонофизика трещин зарождалась трудами В.М. Крейтера [Kreiter, 1956], Ф.И. Вольфсона и Л.И. Лукина [Volfson, Lukin, 1960], А.В. Королева и П.А. Шехтмана [Korolev, Shekhtman, 1954] и многих других при изучении рудных месторождений. Методики картирования трещиноватости создавались в процессе изучения месторождений нефти и газа [Smekhov, 1961, 1969]. Активизация исследований трещин, наблюдающаяся с начала века за рубежом [Cello et al., 2000; Schulz, Evans, 2000; Billi et al., 2003; Agosta et al., 2010b; Caine et al., 2010; Guerriero et al., 2010; и др.], также в существенной мере определяется необходимостью оценки емкости коллекторов, вмещающих углеводороды. Таким образом, применение спецкартирования, базирующегося на изучении повсеместно распространенной трещиноватости, наиболее перспективно при поисках и разведке месторождений разнотипных полезных ископаемых, причем эффективность этих работ напрямую связана с высокой детальностью и качеством отражения состояния разрывной структуры изучаемых объектов.

Еще одной прикладной областью, для которой материалы спецкартирования могут иметь принципиальное значение, является гидрогеология. Увеличение объема информации о нарушенности земной коры разрывами позволит при составлении гидрогеологических карт более полно оценить роль структурного фактора в состоянии подземной гидросферы. В частности, выделение периферий-

ных подзон парагенетически связанных трещин существенно расширяет зоны влияния межблоковых границ, что необходимо учитывать при исследовании закономерностей динамики подземных вод. Более того, в тектонически активных регионах, где роль разломных зон в строении верхней коры является определяющей, имеет смысл в качестве структурной основы гидрогеологических карт использовать схемы спецкартирования, наиболее полно отражающие степень нарушенности горных пород [Seminsky, Tugarina, 2011]. Аналогичные построения могут проводиться при оценке распределения почвенных газов, имеющей применение в практике. Прежде всего это касается радона, концентрации которого в разы увеличиваются в зонах влияния активных разломов [Seminsky et al., 2014].

Наконец, материалы спецкартирования могут быть основой для инженерно-геологических исследований, связанных со строительством зданий и сооружений, проходкой открытых и подземных горных выработок, оценкой герметичности природных хранилищ для отходов и радиоактивного сырья, т.е. там, где требуется оценка степени нарушенности породного массива во избежание аварийных ситуаций. Исследование трещиноватости с позиций тектонофизического подхода может использоваться на разных стадиях изыскательского процесса и в различных объемах в зависимости от конкретных производственных задач. В большинстве случаев наиболее востребованными результатами спецкартирования являются схемы разломов с отражением зональности внутреннего строения, а также данные о геометрии трещинных сетей – в качестве основы для создания численных моделей, используемых для тестирования на прочность, деформируемость, проницаемость и другие инженерно-геологические показатели.

В заключение следует подчеркнуть, что перспективы спецкартирования определяются многоцелевым характером этого парагенетического метода, отдельные операции которого могут использоваться самостоятельно для решения частных или более общих вопросов, связанных с разломной структурой земной коры. Материалом для анализа служат разные по объему совокупности массовых замеров трещин, но достоверность полученного результата возрастает с увеличением статистики наблюдений. Операции спецкартирования в достаточной степени формализованы и могут осуществляться специалистом с обычной геологической квалификацией. Получаемые результаты легко представляются в количественной форме (карты распределения плотности трещин, интенсивности однотипных троек систем трещин, степени сложности трещинной сети и др.) и в этом виде могут сопоставляться с распределениями параметров

любого типа (геофизические, геохимические и пр.). Все это в совокупности характеризует спецкартирование как эффективный метод, дополняющий возможности структурных исследований земной коры.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье на примере участка «Улирба» в Приольхонье (Западное Прибайкалье) подробно рассмотрено содержание работ по спецкартированию разломной структуры на основе парагенетического анализа повсеместно распространенной трещиноватости. В кратком виде этапы и основные операции метода состоят в следующем.

I. Подготовительный этап

- I.1. Анализ материалов предшественников о региональной тектонической обстановке и выбор участка спецкартирования (см. рис. 1, А–Г).
- I.2. Создание на изучаемом участке сети пунктов наблюдения (см. рис. 2, А), в каждом из которых проведен массовый замер трещин, а также собрана и проанализирована геолого-структурная информация о горных породах коренного выхода (см. рис. 2, А), общем состоянии сети разрывов (см. рис. 1, Д–З), их плотности (см. рис. 2, Б) и структурах надтрещинного уровня (зонах дробления, повышенной трещиноватости, разрывах со смещениями, штрихами скольжения и др.) (см. рис. 1, Е, З; рис. 2, А; рис. 3).

II. Этап обработки

- II.1. Построение диаграмм и выделение простых парагенезисов трещин.
 - II.1.1. Построение и общий анализ круговых диаграмм трещиноватости, результатом которого является выделение систем трещин и установление направлений разбросов их полюсов (см. рис. 4, А).
 - II.1.2. Оценка по диаграммам степени сложности разрывных сетей с выносом этой информации на местность (см. рис. 2, В), привлечение к площадному анализу данных о плотности трещин (см. рис. 2, Б) и оконтуривание зон наиболее интенсивной деструкции породного массива, которые отличаются трещиноватостью, хаотической по строению и/или аномальной по степени нарушенности (см. рис. 2).
 - II.1.3. Выявление по круговым диаграммам троек примерно перпендикулярных систем трещин (см. табл. 1) и других простых парагенезисов (пояса, конусы и пр.) с определением для каждого из них динамической обстановки

формирования, соответствующей переходному (от трещин к разломам) транслокальному рангу (см. рис. 3).

II.2. Выявление разломных зон локального ранга.

- II.2.1. Подбор на базе выделенных ранее тройственных парагенезисов трещин круговых диаграмм-трафаретов (эталонный набор полюсов систем трещин), их сопоставление с диаграммой трещиноватости (см. рис. 4, Б–В; Е–З; Л–Н) и в итоге – получение решения о типе и ориентировке разломной зоны локального ранга (см. рис. 4, Г), в которой формировалась та или иная совокупность трещинных систем в пункте наблюдения (см. рис. 3; рис. 4; рис. 5; рис. 7, Б).

- II.2.2. Анализ полученных для одного коренного выхода локальных решений на предмет относительного возраста и представленности разными тройственными парагенезисами (см. рис. 4, Д, К, Л) на базе сопоставления установленных для них ранее динамических обстановок формирования (по разбросам полюсов трещин), величин удвоенного угла скалывания, а также привлечения априорной информации о смещении маркеров, штрихах скольжения и пр.

II.3. Выявление разломных зон трансрегионального ранга.

- II.3.1. Построение круговой диаграммы полюсов разломов локального ранга, выявленных на участке спецкартирования, и выделение их систем, согласно сходству элементов залегания и типа подвижек (см. рис. 8).
- II.3.2. Выделение по круговой диаграмме (см. рис. 8, Б) пар сопряженных систем локальных разломов с последующим определением для каждой из них динамической обстановки формирования (см. табл. 2), соответствующей переходному (от локальных разломов к региональным) трансрегиональному рангу (рис. 3).
- II.3.3. Составление для каждой из выявленных обстановок и не образующих сопряженные пары систем локальных разломов отдельных схем встречаемости на местности, а также их последующий анализ, позволяющий в случае проявления членов однотипного парагенезиса в смежных пунктах наблюдения закартировать на изучаемой площади разломные зоны (или их фрагменты) трансрегионального ранга (см. рис. 7, В–К).

II.4. Выявление разломных зон регионального ранга.

- II.4.1. Подбор на базе выделенных ранее сопряженных пар диаграмм-трафаретов, представляющих эталонные наборы полюсов разломов,

их сопоставление с круговой диаграммой систем локальных разломов (см. рис. 9, Б–Г) и в итоге – получение решения о типе и ориентировке разломной зоны регионального ранга, в которой на отдельных этапах тектогенеза формировалась та или иная совокупность разломных систем на участке спецкартирования (см. рис. 3; рис. 9, Д–Ж).

- II.4.2. Составление для каждого из полученных решений отдельных поэтапных схем встречаемости (на базе схем трансрегионального уровня), а также их последующий анализ, позволяющий в случае проявления членов однотипного парагенезиса в смежных пунктах наблюдения закартировать на изучаемой площади разломные зоны (или их фрагменты) регионального ранга (см. рис. 7, Л–Н).

III. Этап интерпретации

- III.1. Анализ схем регионального уровня с привлечением ранее полученной информации о положении участков с аномальной (по степени хаотичности и плотности) трещиноватостью (см. рис. 2) и выявление для главных разломных зон изучаемой площади основных элементов внутреннего строения: периферийной подзоны, подзоны разрывов 2-го порядка и, если установлена, подзоны главного сместителя (см. рис. 7, Л–Н).
- III.2. Составление для участка спецкартирования итоговой схемы, на которой отражается положение и типы всех выделенных ранее разломных зон трансрегионального и регионального ранга с установленными особенностями внутреннего строения (см. рис. 7, О).
- III.3. Реконструкция истории поэтапного формирования разрывной сети на участке спецкартирования в соподчинении к наиболее крупным элементам геоструктурного ранга на базе комплексной интерпретации итоговой и поэтапных схем разломных зон с привлечением априорной информации об отдельных сместителях и главных этапах тектогенеза в регионе (см. рис. 1, 2, 11), а также оценок относительного возраста обстановок разрывообразования, полученных ранее при анализе удвоенного угла скалывания, пространственной распространенности разнотипных парагенезисов и др. (см. рис. 3).

Содержание спецкартирования, данное выше в виде краткого описания последовательных этапов и формализованных операций, в совокупности с теоретическими положениями и принципами, опубликованными в предыдущей статье [Seminsky,

2014], представляет метод во всех его компонентах. Он позволяет, используя информацию о «немой» трещиноватости и формализованные операции обработки, провести детальное картирование разломной структуры региона с выделением тектонических нарушений, границ зон их влияния и особенностей поперечной зональности, а также установить иерархию динамических обстановок разломообразования и этапность формирования разрывной структуры. Наличие априорной информации (прямые признаки присутствия разломных сместителей, данные о их кинематике, возрасте подвижек и др.) дает возможность заверить и уточнить полученные результаты, а также сократить объемы спецкартирования. Более того, некоторые операции метода могут проводиться отдельно, в дополнение к традиционной структурной съемке, когда в задачи конкретного исследования входит детальная расшифровка происхождения разрывных сетей.

Перечисленные возможности спецкартирования открывают перед методом широкие перспективы для решения теоретических задач, связанных с исследованием зонно-блоковой делимости земной коры и закономерностей пространственно-временного развития ее главных элементов – разломных зон. Областями практического применения являются геологическая съемка, а также рудная геология, инженерно-геологические изыскания и гидрогеология, в рамках которых особое значение имеет детальность картирования разломных зон, контролирующих многие важные в прикладном отношении сопутствующие процессы.

С наибольшей эффективностью спецкартирование может применяться в тектонически активных участках земной коры с многоэтапной историей развития разрывной структуры, так как именно для регионов интенсивного разломообразования разрабатывался и тестировался метод. Возможности метода при исследовании структуры земной коры в районах с доминирующим развитием первичной или планетарной трещиноватости должны исследоваться в процессе будущих целенаправленных работ. В целом опыт спецкартирования в регионах с различными режимами развития позволит отработать для каждого из них конкретные виды и способы реализации, что и представляет задачу дальнейших методических исследований.

Автор благодарен профессору С.И. Шерману и ведущему инженеру Ю.П. Бурзуновой за творческое обсуждение отдельных положений статьи, а также сотрудникам лаборатории тектонофизики, использовавшим в своих работах метод спецкартирования и тем самым способствовавшим его развитию и продвижению в практике структурного анализа.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Agosta F., Alessandroni M., Antonellini M., Tondi E., Giorgioni M., 2010a. From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics* 490 (3–4), 197–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2010.05.005>.
- Agosta F., Alessandroni M., Tondi E., Aydin A., 2010b. Oblique normal faulting along the northern edge of the Majella Anticline, Central Italy: Inferences on hydrocarbon migration and accumulation. *Journal of Structural Geology* 32 (9), 1317–1333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.10.007>.
- Aleksandrov V.K., 1990. Thrust and Overthrust Structures in the Pribaikalie. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Александров В.К. Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1990. 102 с.].
- Billi A., Salvini F., Storti F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25 (11), 1779–1794. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00037-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00037-3).
- Burzunova Yu.P., 2014. Fracture systems in rocks in tectonically active regions: assessment of randomness degrees. *Vestnik IrGTU* (4 (87)), 45–49 (in Russian) [Бурзунова Ю.П. Трещинные сети в породах тектонически активных регионов: оценка степени хаотичности // Вестник ИрГТУ. 2014. № 4 (87). С. 45–49].
- Burzunova Yu.P., 2015. Fault zones of the Tazheran syenite massif (Western Pribaikalie) according to results of structural paragenetical analyses of fracturing. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle RAEN. Geologiya, Poiski i Razvedka Rudnykh Mestorozhdeniy* (1(45)) (in press) (in Russian) [Бурзунова Ю.П. Разломные зоны Тажеранского массива сиенитов (Западное Прибайкалье) по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 1 (45) (в печати)].
- Caine J.S., Bruhn R.L., Forster C.B., 2010. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada. *Journal of Structural Geology* 32 (11), 1576–1589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.03.004>.
- Cello G., Gambini R., Mazzoli S., Read A., Tondi E., Zucconi V., 2000. Fault zone characteristics and scaling properties of the Val d'Agri Fault System (Southern Apennines, Italy). *Journal of Geodynamics* 29 (3), 293–307. [http://dx.doi.org/10.1016/S0264-3707\(99\)00043-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0264-3707(99)00043-5).
- Cheremnykh A.V. 2010. Internal structures of fault zones in Priolkhonie and evolution of the state of stresses of the upper crust of the Baikal rift. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (3), 273–284 (in Russian) [Черемных А.В. Внутренняя структура разломных зон Приольхонья и эволюция напряженного состояния верхней коры Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 3. С. 273–284]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2010-1-3-0021>.
- Chernyshev S.N., 1983. Rock Fractures. Nauka, Moscow, 240 p. (in Russian) [Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.].
- Danilovich V.N., 1963. Arcogenic type of thrusts. *Russian Geology and Geophysics* (2), 5–12 (in Russian) [Данилович В.Н. Аркогенный тип надвигов // Геология и геофизика. 1963. № 2. С. 5–12].
- Delvaux D., Moeys R., Stapel G., Melnikov A., Ermikov V., 1995. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution. *Tectonophysics* 252 (1), 61–101. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00090-9](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(95)00090-9).
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V., 1997. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting. *Tectonophysics* 282 (1), 1–38. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2).
- Doser D.I., 1991. Faulting within the Eastern Baikal rift as characterized by earthquake studies. *Tectonophysics* 196 (1), 109–139. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90292-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(91)90292-Z).
- Fedorovsky V.S., 1997. Dome tectonics in the Caledonian collision system of the Western Pribaikalie. *Geotectonics* 31 (6), 483–497 (in Russian) [Федоровский В.С. Купольный тектогенез в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геотектоника. 1997. № 6. С. 56–71].
- Guerriero V., Iannace A., Mazzoli S., Parente M., Vitale S., Giorgioni M., 2010. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues: Implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks. *Journal of Structural Geology* 32 (9), 1271–1278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2009.04.016>.
- Knorring L.D., 1969. Mathematical Methods in Studies of Tectonic Fracturing Mechanism. Nedra, Leningrad, 87 p. (in Russian) [Кнорринг Л.Д. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л.: Недра, 1969. 87 с.].
- Korolev A.V., Shekhtman P.A., 1954. Postmagmatic Ore Bodies and Methods of Their Geological Analysis. Gosgeoltekhizdat, Moscow, 376 p. (in Russian) [Королев А.В., Шехтман П.А. Постмагматические рудные тела и методы их геологического анализа. М.: Госгеолтехиздат, 1954. 376 с.].
- Kreiter V.M., 1956. Structures of Ore Fields and Deposits. Gosnauchtekhizdat, Moscow, 272 p. (in Russian) [Крейтер В.М. Структуры рудных полей и месторождений. М.: Госнаучтехиздат, 1956. 272 с.].

- Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu., Kirillov P.G., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ruzhitch V.V., San'kov V.A., 1997. Recent geodynamics of the Baikal rift. *Razvedka i okhrana neдр* (1), 10–20 (in Russian) [Леву К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кириллов П.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А. Современная геодинамика Байкальского рифта // *Разведка и охрана недр*. 1997. № 1. С. 10–20].
- Logatchev N.A., Zorin Yu.A., 1992. Baikal rift zone: structure and geodynamics. *Tectonophysics* 208 (1), 273–286. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90349-B](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90349-B).
- Loke M.H., 2010. Tutorial. RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software, Malaysia. 148 p.
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.V., 2002. Fracturing in the Primorsky fault zone (Baikal rift system). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 43 (5), 446–455 (in Russian) [Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система) // *Геология и геофизика*. 2002. Т. 43. № 5. С. 446–455].
- Mats V.D., 1993. The structure and development of the Baikal rift depression. *Earth-Science Reviews* 34 (2), 81–118. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252\(93\)90028-6](http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(93)90028-6).
- Matthaii S.K., 2003. Fluid flow and (reactive) transport in fractured and faulted rock. *Journal of Geochemical Exploration* 78–79, 179–182. [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6742\(03\)00094-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6742(03)00094-3).
- Mazukabzov A.M., Sizykh V.I., 1987. On the overburden lamellar structure of the Western Pribaikalie. *Geotektonika* (3), 87–90 (in Russian) [Маукабзов А.М., Сизых В.И. О покровно-чешуйчатом строении Западного Прибайкалья // *Геотектоника*. 1987. № 3. С. 87–90].
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal region over the period 1991–1996. *Geologiya i Geofizika* 39 (11), 1598–1607.
- Mikhailov A.E., 1984. Structural Geology and Geological Mapping. Nedra, Moscow, 464 p. (in Russian) [Михайлов А.Е. Структурная геология и геологическое картирование. М.: Недра, 1984. 464 с.].
- Multi-electrode electric survey station Skala-48 for works using the method of resistance and induced polarization. User Guidebook, 2010. INGG, SB RAS, Novosibirsk, 46 p. (in Russian) [Многоэлектродная электроразведочная станция «Скала-48» для работы методом сопротивлений и вызванной поляризации. Руководство пользователя. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. 46 с.].
- Nikolaev P.N., 1992. Tectonodynamic Analysis Method. Nedra, Moscow, 295 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.].
- Nikolya A., 1992. Fundamentals of Rock Deformation. Mir, Moscow, 167 p. (in Russian) [Николя А. Основы деформации горных пород. М.: Мир, 1992. 167 с.].
- Oliver N.H.S., 2001. Linking of regional and local hydrothermal systems in the mid-crust by shearing and faulting. *Tectonophysics* 335 (1), 147–161. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00054-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00054-3).
- Rats M.V., Chernyshev S.N., 1970. Fracturing and Properties of Fractured Rocks. Nedra, Moscow, 164 p. (in Russian) [Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.].
- San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D., 1997. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone. *Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production* 21 (2), 435–455.
- Schulz S.E., Evans J.P., 2000. Mesoscopic structure of the Punchbowl Fault, Southern California and the geologic and geophysical structure of active strike-slip faults. *Journal of Structural Geology* 22 (7), 913–930. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00019-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00019-5).
- Seminskii K.Zh., Radziminovich Ya.B., 2011. Cross-sectional sizes and lateral zonality of the Baikal seismic belt. *Doklady Earth Sciences* 438 (1), 645–648. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11050084>.
- Seminsky K.Zh., 1994. Principles and stages of specialized mapping of fault-block structures based on studies of fracturing. *Geologiya i Geofizika* 35 (9), 112–130 (in Russian) [Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 9. С. 112–130].
- Seminsky K.Zh., 2003. The Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO Branch, Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 243 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 243 с.].
- Seminsky K.Zh., 2014. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 1: Basic theoretical concepts and principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.
- Seminsky K.Z., Bobrov A.A., Demberel S., 2014. Variations in radon activity in the crustal fault zones: Spatial characteristics. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50 (6), 795–813. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351314060081>.
- Seminsky K.Zh., Cheremnykh A.V., 2011. Jointing patterns and stress tensors in Cenozoic sediments of the Baikal rift: development of the structural-genetic approach. *Russian Geology and Geophysics* 52 (3), 353–367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.008>.

- Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., 1991. The new approach to studies of tectonic fracturing in fault zones. *Geologiya i Geofizika* (5), 130–140 (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С. Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах // *Геология и геофизика*. 1991. № 5. С. 130–140].
- Seminsky K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospeeva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Zaripov R.M., Cheremnykh A.S., 2013. Interblock zones in the crust of the southern regions of East Siberia: tectonophysical interpretation of geological and geophysical data. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 203–278 (in Russian) [Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потопов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. 2013. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0099>.
- Seminsky K.Zh., Tugarina M.A. 2011. Results of comprehensive studies of the underground hydrosphere within the western shoulder of the Baikal rift (as exemplified by the Bayandai – Krestovsky Cape site). *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (2), 126–144 (in Russian) [Семинский К.Ж., Тугарина М.А. Результаты комплексных исследований подземной гидросферы западного плеча Байкальского рифта (на примере участка п. Баяндай – м. Крестовский) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2011. Т. 2. № 2. С. 126–144]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2011-2-2-0037>.
- Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Tectonic stress fields in the Baikal rift zone. *Geotektonika* (2), 101–112 (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля тектонических напряжений Байкальской рифтовой зоны // *Геотектоника*. 1989. № 2. С. 101–112].
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A. et al., 1994. Faulting in the Lithosphere. Compression Zones. Nauka, Novosibirsk, 262 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: зоны сжатия. Новосибирск: Наука, 1994. 262 с.].
- Sklyarov E.V. (Ed.), 2005. Structural and Tectonic Correlation Across the Central Asia Orogenic Collage: North-Eastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480). IES SB RAS, Irkutsk, 291 p.
- Smekhov E.M., 1961. Regularities in Development of Rock Fracturing and Fractured Reservoirs. Nedra, Leningrad, 118 p. (in Russian) [Смехов Е.М. Закономерности развития трещиноватости горных пород и трещинные коллекторы. Л.: Недра, 1961. 118 с.].
- Smekhov E.M. (Ed.), 1969. Methods of Studies of Rock Fracturing and Fractured Reservoirs of Oil and Gas. Nedra, Leningrad, 129 p. (in Russian) [Методика изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа / Ред. Е.М. Смехов. Л.: Недра, 1969. 129 с.].
- Solonenko A.V., Solonenko N.V., Mel'nikova V.I., Koz'min B.M., Kuchai O.A., Sukhanova S.S., 1993. Stresses and displacements in earthquake foci in Siberia and Mongolia. In: Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia. Issue 1. IPE RAS, Moscow, p. 113–122 (in Russian) [Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 113–122].
- Volfson F.I., Lukin L.I., 1960. Main Issues and Methods in Studies of Structures of Ore Fields and Deposits. Gosnauchtekhizdat, Moscow, 622 p. (in Russian) [Вольфсон Ф.И., Лукин Л.И. Основные вопросы и методы изучения структур рудных полей и месторождений. М.: Госнаучтехиздат, 1960. 622 с.].
- Wibberley C.A.J., Yielding G., Di Toro G. 2008. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. In: C.A.J. Wibberley, W. Kurz, J. Imber, R.E. Holdsworth, C. Colletti (Eds.), The internal structure of fault zones: implications for mechanical and fluid-flow properties. Geological Society of London, Special Publication, vol. 299, p. 5–33. <http://dx.doi.org/10.1144/SP299.2>.
- Zamaraev S.M., 1967. Marginal Structures of the Southern Part of the Siberian Platform. Nauka, Moscow, 248 p. (in Russian) [Замараев С.М. Краевые структуры южной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 248 с.].
- Zamaraev S.M., Vasiliev E.P., Mazukabzov A.M., Ruzhitch V.V., Ryazanov G.V., 1979. The Ratio of Ancient and Cenozoic Structures in the Baikal Rift Zone, Nauka, Moscow, 126 p. (in Russian) [Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М., Ружич В.В., Рязанов Г.В. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1979. 126 с.].



Семинский Константин Жанович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: 8(3952)423027; e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminsky, Konstantin Zh., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Tectonophysics
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: 8(3952)423027; e-mail: seminsky@crust.irk.ru