

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ АНАЛИЗА ТРЕЩИНОВАТОСТИ (на примере зоны Морского разлома в Прибайкалье)

Ю.П. Бурзунова

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Проведен комплексный анализ трещиноватости в горных породах зоны Морского разлома (Прибайкалье) с целью сравнить результаты двух принципиально различных методов тектонофизической реконструкции тектонического поля палеонапряжений по геолого-структурным данным. В работе применялся новый подход к парагенетическому анализу статистических замеров «немых» трещин, позволяющий восстановить напряженное состояние локального объема горных пород и установить его принадлежность к зоне разлома определенного морфогенетического типа и ориентировки. Вторым способом реконструкции поля напряжений являлся метод кинематического анализа Анжелье—Дельво, позволяющий рассчитать стресс-тензор и определить стресс-режим на основе анализа векторов смещений на трещинах. Для участка исследований с помощью двух методов получены решения о напряженном состоянии локального и регионального уровней. Парагенетический анализ выявил в два раза больше локальных решений при равном количестве пунктов наблюдений. Это связано с различными условиями формирования трещинных сетей и штрихов скольжения — во времени (стадии развития разломной зоны) и пространстве (близость к сместителям разлома). Большая часть локальных решений кинематического анализа совпадает с идентичными решениями парагенетического метода о напряженном состоянии первого или второго порядка. «Новых» (не повторяющихся в другом методе) парагенетических решений на порядок больше, чем кинематических. На следующем уровне иерархии парагенетический анализ позволил реконструировать поле напряжений и разломные зоны более крупного ранга. Результаты обоих методов охватывают несколько этапов тектонического развития массива горных пород. Восстановленные разными методами идентичные региональные поля напряжений предположительно относятся к одному этапу. Изученный фрагмент зоны Морского разлома по результатам обоих методов был активизирован в трех наиболее интенсивно выраженных обстановках — сжатие, левый сдвиг, растяжение. Сдвиговые напряжения сконцентрированы ближе к сместителю разлома. Кроме того проявлены обстановки субмеридионального растяжения и северо-восточного сжатия. Результаты реконструкции поля напряжений двумя методами сопоставимы и в целом успешно дополняют и частично подтверждают друг друга, при этом парагенетический метод дает более многочисленные и разнообразные решения, позволяющие выйти на региональный уровень и построить карту разломных зон участка. Рекомендуется комплексное применение обоих методов.

Реконструкция напряженного состояния, стресс-тензор, поле напряжений, структурно-парагенетический анализ, кинематический анализ, разломная зона, трещинная сеть, разрывной парагенезис, зеркало скольжения, штрихи скольжения

RECONSTRUCTION OF TECTONIC STRESSES BY DIFFERENT METHODS OF JOINTING ANALYSIS (as the example of the Morskoi fault zone in Cisbaikalia)

Yu.P. Burzunova

Complex analysis of jointing in the Morskoi fault zone rocks (Cisbaikalia) has been carried out to compare two principally different methods of tectonophysical reconstruction of paleostress tectonic field, by geologic-structural data. A new approach to the paragenetic analysis of statistic measurements for ‘mute’ joints has been used; this approach makes it possible to reconstruct the stress state in the local rock exposure and to understand whether it belongs to the fault zone of a certain morphogenetic type and orientation. The second approach to reconstruct the stress field is the Angelier–Delvaux kinematic analysis, which allows us to calculate the stress tensor and determine the stress regime, based on the analysis of strike-slip vectors on joints. Using the two methods we obtained the stress state solutions of local and regional levels for the study area. The paragenetic analysis gave twice as many local solutions for the same number of observation points. This is due to different environments of the formation of jointing sets and slickenlines in time (stages of fault zone evolution) and space (closeness to the fault plane). Most of the local solutions of the kinematic analysis coincide with the identical solutions of the paragenetic method on the stress state of the first or second orders. We obtained by an order of magnitude more ‘new’ (not repeated in the other method) paragenetic solutions than kinematic ones. At the next hierarchic level, the paragenetic analysis made it possible to reconstruct the stress field and fault zones

of a higher rank. The results of both methods involve several stages of tectonic evolution of the rock massif. The identical regional stress fields reconstructed by different methods seem to belong to one stage. The studied fragment of the Morskoi fault, according to both methods, was activated in the three most intensively pronounced settings: compression, left-lateral strike-slip, and extension. Strike-slip stresses are concentrated closer to the fault plane. Moreover, we also revealed submeridional extension and NW compression. The results of the stress field reconstruction using the two methods are compatible and, in general, successfully complement and justify each other; however, the paragenetic method gives more numerous and variable solutions, resulting in the transition to the regional level and construction of the map for the study area fault zones. Complex application of both methods is recommended.

Reconstruction of stress state, stress tensor, stress field, structural-paragenetic analysis, kinematic analysis, fault zone, joint system, fracture paragenesis, slickenside, slickenlines

ВВЕДЕНИЕ

Исследование напряженного состояния и разломного строения земной коры, позволяющее определять механизмы формирования и развития тектонических структур, является одной из основных задач геодинамики и тектонофизики. Под термином «разломная зона» в работе понимается часть трехмерной области динамического влияния разлома, в которой фиксируются следы остаточных пластических и разрывных деформаций, вызванных формированием разлома и подвижками по нему. Неотъемлемой частью структуры разломной зоны является тектоническая трещиноватость в горных породах. Представленные разрывами мезоструктурного уровня трещины доступны для непосредственного изучения при исследовании разломов и связанных с ними тектонических напряжений в верхней части коры с применением полевых тектонофизических методов, основанных на представлениях о деформации и разрушении пород. Посредством измерений и анализа геолого-структурных данных решается обратная задача — реконструкция разновозрастных полей напряжений по следам воздействия этих напряжений.

Геолого-структурные методы определения напряженного состояния по трещинам в специальных обзорах [Шерман, Днепровский, 1989; Ребецкий, 2002; Ребецкий и др., 2017; и др.] делятся на две группы, предполагающие анализ различных типов исходных данных. Первая группа включает структурно-парагенетические методы (или методы структурного анализа), использующие в основном информацию о пространственной ориентации разрывов, составляющих структурные парагенезисы (М.В. Гзовский, П.Н. Николаев, О.Б. Гинтов, В.М. Исая, Л.А. Сим, К.Ж. Семинский и др. авторы). Напомним, что структурный парагенезис (или парагенез) — это совокупность близких по месту и времени формирования в едином поле тектонических напряжений элементарных структур (в нашем случае — разрывы в горных породах). Ко второй группе относятся методы кинематического (или дислокационного) анализа, использующие наряду с первой группой данных сведения о направлениях смещений по разрывам (О.И. Гуценко, Ж. Анжелье, В.Д. Парфенов, С.Л. Юнга, Ю.Л. Ребецкий и др. авторы). Каждая группа методов позволяет получить уникальную информацию о напряженном состоянии, действующем при деформации и разрушении горных пород (методы парагенетического анализа) или преимущественно способствующем перемещению блоков пород относительно друг друга (методы кинематического анализа). Комплексирование методик из разных групп повышает достоверность решений обратной задачи [Расцветаев, 1987; Шерман, Днепровский, 1989; Гинтов, 2005; Lunina et al., 2008; Маринин, Сим, 2015; Сим и др., 2018; и др.] в случае, когда трещинные парагенезисы и следы смещений формировались в одно время в едином поле напряжений. С другой стороны, отличные друг от друга решения разных методов могут свидетельствовать о одновременных напряженных состояниях в горном массиве и, таким образом, взаимно дополнять друг друга при реконструкции истории геодинамического развития.

В настоящее время методически завершен и успешно находит практическое применение метод спецкартирования разломных зон, базирующийся на структурно-парагенетическом анализе трещинных сетей [Семинский, 2014, 2015], позволяющем определить элементы строения разломной зоны скалывания и восстановить поле напряжений, в котором формировалась изучаемая трещинная сеть. Исходным фактическим материалом являются статистические массовые замеры ориентировок «немых» (без видимых смещений) тектонических трещин. В данной статье впервые поставлена задача — применить данную методику совместно с одним из видов кинематического анализа полевых геолого-структурных данных. В качестве второго способа обработки данных по трещиноватости применялась методика Ж. Анжелье [Angelier, 1989] в версии алгоритма программы TENSOR, разработанной Д. Дельво [Delvaux, 1993; Delvaux, Sperner, 2003], которая дает возможность проводить реконструкцию палеонапряженного состояния, инициировавшего смещения блоков горных пород, путем анализа векторов тектонических перемещений на зеркалах скольжения.

Цель работы — на примере конкретного участка в Прибайкалье провести комплексное исследование тектонических напряжений по данным о трещиноватости двумя методами, включая детальную сравнительную оценку полученных решений на локальном и региональном уровнях, а также рассмотреть возможности, ограничения и рекомендации в использовании каждого метода. Для исследования выбран участок в тектонически-активной области, неоднократно подвергавшейся активизации, — центральной части Байкальской рифтовой зоны. В таких районах происхождение трещин в горных породах преимущественно тектоническое (либо под значительным и определяющим влиянием тектонических напряжений), что является необходимым условием для применения парагенетического метода. Участок расположен в зоне регионального Морского (Ольхонского) разлома вблизи магистрального сместителя, где имеется большая вероятность наличия необходимого для кинематического анализа количества следов смещений на трещинах.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследования расположен в центральной части Байкальского рифта вблизи его северо-западного борта (рис. 1). Следуя истории тектонического развития района, предполагается, что на данной территории в раннем палеозое происходит столкновение террейнов Саяно-Байкальского складчатого пояса, в частности Ольхонского блока (террейна), с Сибирской платформой в режиме «косой» коллизии. Это сопровождается развитием глубинных вязких сдвигов, преобразовавших в обстановке регрессии метаморфизма все ранее возникшие структуры, а также внедрением многочисленных интрузий (габбро, сиениты, граниты), а на границе с мощной Сибирской плитой — формированием краевого шва [Федоровский, 1997; Федоровский и др., 2010]. Главные разрывные элементы протяженностью более 200 км в разломной структуре района исследований — относительно прямолинейный Приморский разлом, наследующий положение краевого шва, и ответвляющийся от него к югу Морской разлом. Местоположение и форма Морского разлома обусловлены, вероятно, неоднородным строением Ольхонского террейна, состоящего из многочисленных микротеррейнов, а также активизацией в разное время фрагментов разлома. В настоящее время Морской разлом ограничивает северо-западный борт северной части самой древней (палеоцен) Южно-Байкальской впадины рифта [Логачев, 2003]. Он представляет собой сброс с углом падения в верхней части $60\text{--}70^\circ$ и варьирующим простиранием изогнуто-ломаной линии сместителя на поверхности (см. рис. 1, Б). Суммарная мощность отложений его висячего крыла составляет не менее 7.5 км [Hutchinson et al., 1992].

Зонам региональных разломов свойственно наличие вертикальной зональности, определяющей характер разломообразования в зависимости от термодинамических условий [Шерман, 1977; Метаморфизм..., 2001]. Трещинообразование возможно на верхних уровнях примерно до 7—10 км, поэтому применяемые в работе методы позволяют реконструировать напряженное состояние, действовавшее в разное время на глубинах не более указанных. При изучении внутреннего строения разломов Прибайкалья необходимо учитывать многократную активизацию разрывных структур в разных полях напряжений, в результате чего осуществляется последовательное наложение более молодых разломных структурных форм на древние, образованные в других условиях [Плешанов, Ромазина, 1981]. В литературных источниках, по установленным и предполагаемым данным о полях напряжений, в течение длительного периода дорифтового развития (палеозой, мезозой) в районе исследования действовали СЗ-ЮВ, субмеридиональное и субширотное сжатие, местами с небольшой сдвиговой составляющей, в начальной стадии зарождения проторифта (кайнозой, поздний олигоцен—ранний плиоцен) — субмеридиональное и СВ-ЮЗ сжатие, левый сдвиг по СВ и субширотному направлению, субширотное и СЗ-ЮВ растяжение, а в стадии активного рифтообразования (поздний плиоцен—голоцен) — преимущественно СЗ-ЮВ растяжение [Шерман, Днепровский, 1989; Александров, 1990; Леви и др., 1995; Delvaux et al., 1995, 1997; San'kov et al., 1997; Мац и др., 2001; Парфеев и др., 2002; Логачев, 2003]. В зоне Морского разлома определение геолого-структурными методами времени действия и типа обстановок более ранних этапов, чем современное байкальское растяжение, осложняется тем, что его сместитель и висячее крыло находятся под водой, а в прямом доступе имеется постоянно разрушающийся вследствие эндо- и экзогенных процессов борт лежащего крыла. Учитывая длину регионального разлома и его фрагментов, участок детальных исследований входит в зону его динамического влияния, что позволяет применять предложенные методы исследования.

На уровне денудационного среза площадь Ольхонского блока занята метаморфическими породами, как правило, имеющими крутопадающее залегание, и в меньшей степени интрузивными массивами, сложенными в основном диоритами и габбро-диоритами (см. рис. 1, В). Объектом детальных исследований в работе является фрагмент лежащего крыла зоны Морского разлома (см. рис. 1, Б, В), расположенный на участке, к которому приурочен сиенитовый интрузивный массив. Он сложен палеозойскими сиенитами, нефелиновыми сиенитами, габбро, метаморфизованными вулканическими основными породами, карбонатами, подчиненное значение имеют граниты, пегматиты, сиенитогнейсы, кварциты

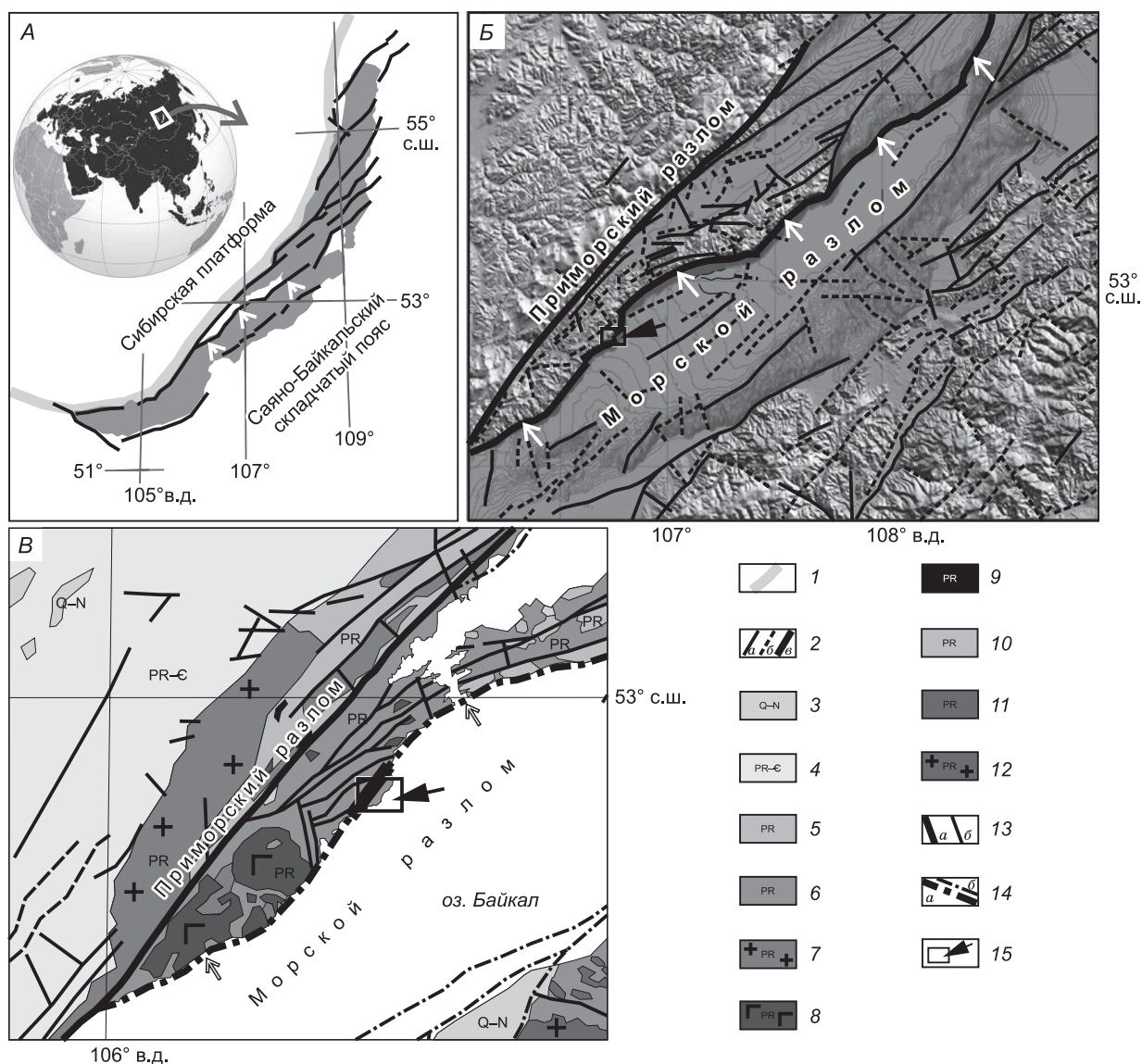


Рис. 1. Геологическое строение района исследований.

А — главные активные разломы Байкала [Levi et al., 1997]; *Б* — карта активных разломов для центральной части Байкала на основе цифровой модели рельефа SRTM и батиметрической карты [Лунина и др., 2010]; *В* — геологическая карта района работ [Государственная..., 1986]. Белыми стрелками указан Морской разлом.

1 — граница Сибирской платформы (*А*); 2 — разломы достоверные (*а*), предполагаемые (*б*), региональные (*в*) (*Б*); 3–14 — условные обозначения для рис. 1 (*В*): 3 — аллювиально-озерные отложения; 4 — песчаники, алевролиты, доломиты, глинистые и углистые сланцы, мергели; 5 — кварциты, кристаллические сланцы, амфиболиты; 6 — гнейсы, кристаллические сланцы, мраморы, кварциты; 7 — граниты; 8 — диориты, габбро-диориты; 9 — дуниты, перидотиты, пироксениты, серпентиниты; 10 — гнейсовидные плагиограниты, гранодиориты; 11 — порфировидные граносиениты, щелочные граниты и сиениты; 12 — граниты, плагиограниты, гранодиориты; 13, 14 — разломы достоверные (13) и скрытые (14), крупные (*а*) и мелкие (*б*); 15 — участок детальных исследований (*В, В*).

[Федоровский и др., 2009]. Для массива характерно сложное строение в виде совокупности разновозрастных интрузий неправильной формы, что не имеет значительного влияния на результаты парагенетического анализа [Бурзунова, 2017].

УЧАСТОК ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Геолого-структурные наблюдения проведены на участке исследований (рис. 2, *А, Б*) в соответствии с рекомендациями [Delvaux, 2003; Бурзунова, 2017] для применения двух методов реконструкции напряженного состояния.

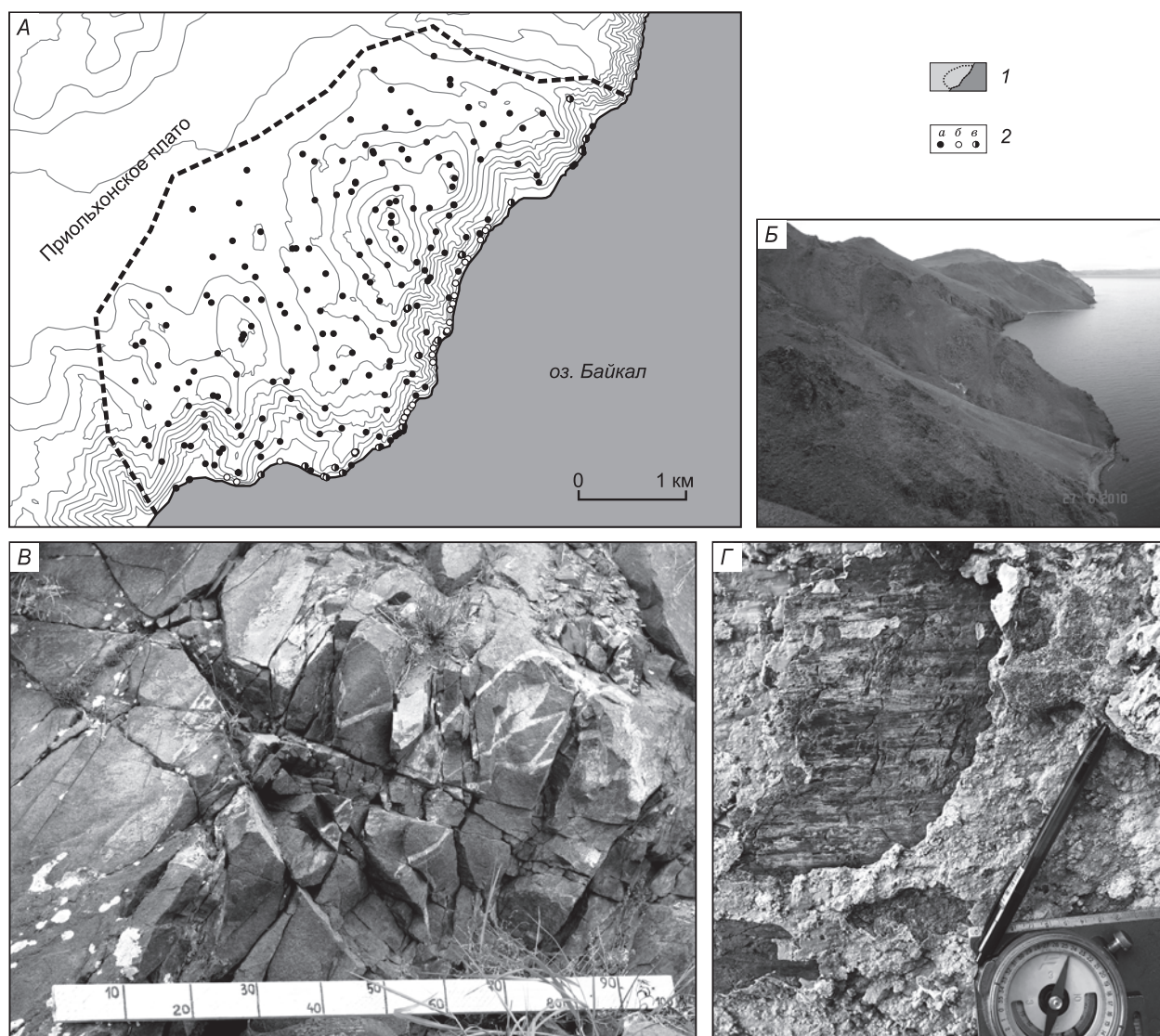


Рис. 2. Участок исследований и фактический материал.

А — схема расположения пунктов наблюдения на карте рельефа (изогипсы через 25 м); *Б* — характер обнаженности коренных пород участка, *В* — трещинная сеть; *Г* — штрихи скольжения на поверхности трещины.

l — граница участка; 2 — пункты наблюдений, в которых произведен массовый замер трещин (*а*), зафиксированы следы смещений (*б*), одновременно имеются массовый замер и данные о следах смещений (*в*).

Для парагенетического метода исходными данными являются статистические массовые замеры элементов залегания трещин. Вначале проводится предварительная оценка трещинной сети коренного выхода (см. рис. 2, *В*) на наличие трещин тектонического происхождения как основного условия для применения метода. При этом анализируется ряд признаков, свидетельствующих о полном или существенном влиянии тектонических напряжений на формирование трещин: прежде всего это системная или хаотическая (многосистемная) структура сети (не менее трех систем трещин) и сколовый тип трещин, а также их протяженность, прямолинейность, пересечение структурно-вещественных границ, закономерная ориентировка в разломной зоне, следы смещений. В ходе проведения массовых измерений трещин рекомендуется отдельно производить замеры на участках, значительно различающихся по степени нарушенности пород трещинами, типу горных пород, геологическому строению. Для массового замера следует использовать по возможности три экспозиции коренного выхода, выбирая интервал, включающий в большей степени сохранившиеся в процессе выветривания отдельности. Трещины необходимо измерять подряд, не выбирая «удобные» для исполнителя поверхности, при этом значения элементов залегания не округляются, также указывается тип трещин (скол или отрыв). Размер площад-

ки для одного замера при оптимальном количестве трещин (100 штук) зависит от плотности трещин и, как правило, не превышает 10 м². Всего на участке исследования в 90 пунктах наблюдения (см. рис. 2, А) проведено 108 массовых замеров (около 9300 трещин).

Для метода кинематического анализа Анжелье—Дельво исходными данными являются индикаторы перемещений блоков горных пород, такие как зеркала скольжения со штрихами и бороздами (см. рис. 2, Г), зоны тектонитов (глинка трения, тектоническая брекчия и проч.), смещения маркеров. Кроме залегания вышеназванных элементов, рекомендуется отмечать степень достоверности визуально определяемого кинематического типа смещений, интенсивность штриховки, а также (как при массовых замерах) наличие сопряженных сколов, морфологию поверхности разрыва, заполнение трещины. Всего на участке в 36 пунктах наблюдения (см. рис. 2, А) задокументировано 407 зеркал скольжения. Необходимо отметить, что следы смещений были обнаружены только в береговой зоне (см. рис. 2, А, Б).

Увеличение числа пунктов наблюдения повышает достоверность результатов, особенно это касается парагенетического метода. Кроме массовых замеров ориентировок трещин и следов смещений выполнена стандартная документация структурных и геологических особенностей коренного выхода, которые учитываются при интерпретации результатов анализа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применяемые в работе методические приемы позволяют восстановить поля тектонических напряжений, действовавших при разрушении горных пород трещинами (парагенетический метод) и при смещении блоков пород относительно друг друга (метод кинематического анализа Анжелье—Дельво).

Парагенетический метод. Парагенетический подход к анализу приразломной трещиноватости в рамках метода спецкартирования [Семинский, 2014, 2015] заключается в сравнении природных сетей трещин с эталонными, другими словами — природных структурных парагенезисов разрывов с эталонными парагенезисами. Эталонные сети (эталонные) — это модели разломно-трещинных сетей в зонах скалывания разломного типа, составленные для трех основных типов динамических обстановок: горизонтального сжатия, горизонтального сдвига в вертикальной плоскости и горизонтального растяжения. Каждый эталон включает главный разломный сместитель первого порядка (Y) и семь направлений опережающих разломов второго порядка (R-, t-, n-, T-типа), а также соответствующие каждому из них более мелкие разрывы третьего порядка в виде троек взаимно перпендикулярных систем опережающих трещин. Условия выделения разрывов разного порядка описаны в методике [Семинский, 2014, 2015]. Форма используемого эталона (плоскости или полюсы разрывов) зависит от типа исходных данных. Реконструкция динамических обстановок формирования разломной сети с помощью парагенетического метода проводится на основе разрывов, выявленных в ходе полевых геолого-структурных наблюдений в обнажениях горных пород, а также в процессе морфотектонических исследований. Используются любые структуры, способные отражать положение тектонических разломов верхней части земной коры. В данной работе исходным материалом для анализа служат массовые замеры элементов залегания широко распространенных «немых» трещин в горных породах, представленные в виде круговых диаграмм (стереограмм) (рис. 3, А). Для сравнения и сопоставления с диаграммами природных трещинных сетей каждый эталон представлен в виде кругового трафарета в равноугольной проекции, на котором значками показаны полюсы плоскостей магистрального сместителя, второстепенных разломов и троек систем трещин. Наиболее подходящий для диаграммы эталон (см. рис. 3, А) по совокупности совпадающих систем определяет решение: локальное напряженное состояние (стресс-тензор), в котором сформировалась трещинная сеть, а также ориентировку и морфогенетический тип зоны скалывания (разломной зоны) и структур второго порядка (см. рис. 3, Б).

Для одной диаграммы может быть получено 1—3 и более решений (см. рис. 3, А, Б), что характерно для тектонически-активных районов. Это свидетельствует о разновозрастных напряженных состояниях, имевших место в процессе тектонического развития исследуемого участка [Семинский, 2015]. Специальные критерии оценки диаграмм [Бурзунова, 2017] обеспечивают надежность полученных решений, а также определяют уровень достоверности каждого решения: специфический структурный рисунок эталонной диаграммы, количественные и качественные характеристики сети трещин, задокументированные геолого-структурные особенности коренного выхода, повторяемость трещинного парагенезиса в соседних пунктах наблюдения.

Таким образом, парагенетический метод помогает восстановить напряженное состояние локального объема горных пород для одного коренного выхода и установить его принадлежность к зоне локального разлома. Кроме того, метод позволяет в ходе порангового анализа [Семинский, 2015], используя сеть пунктов наблюдения и принципы генетической соподчиненности, пошагово перейти на региональный уровень с выделением местоположения и границ региональной разломной зоны, а также типа и ориентировки соответствующего поля напряжений.

Метод кинематического анализа Анжелье—Дельво. Метод реконструкции векторов главных нормальных осей напряжений основан на анализе направлений тектонических перемещений, возникающих под действием единого поля напряжений как по вновь образованным разрывам, так и по существующим более древним различно ориентированным разрывным нарушениям [Гущенко, 1973, 1979; Angelier,

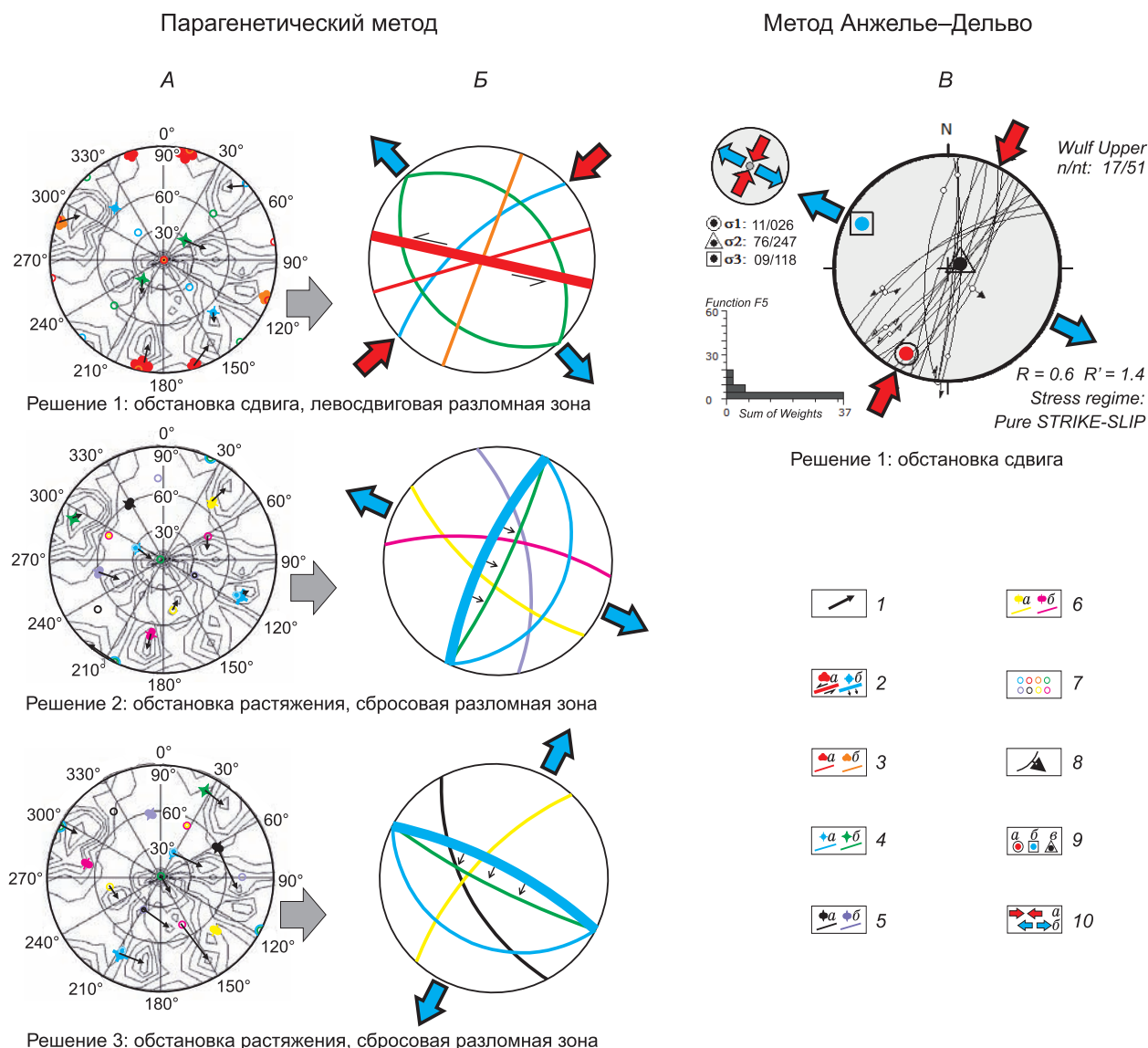


Рис. 3. Локальные стресс-тензоры, восстановленные парагенетическим методом и методом кинематического анализа Анжелье—Дельво на примере итоговых решений о динамических обстановках сдвига и растяжения в пункте наблюдения b1020.

A — стереограмма трещинной сети (в изолиниях относительной плотности полюсов трещин, количество трещин — 100 шт., величина окна осреднения — 10°, шаг между уровнями изолиний — 1 %) и совмещенный с ней эталон в виде полюсов разрывов; *B* — эталон в виде плоскостей разрывов, соответствующий полученному решению (*A*) о поле напряжений и разломной зоне, в которой сформирована трещинная сеть; *B* — стресс-тензор, полученный с помощью программы TENSOR (количество штрихов скольжения — 17 шт.). Стереограммы (*A*, *B*, *B*) построены в равноугольной проекции Вульфа, верхняя полусфера.

1 — стрелкой указаны центры максимумов плотности трещин, которые соответствуют разрывам эталонного парагенезиса (*A*); 2—6 — полюсы и плоскости разрывов в эталонах и решениях (*A*, *B*): 2 — левосдвиговый (*a*) и сбросовый (*b*) магистральный (1-го порядка) сместитель, в зоне которого формировалась часть систем трещин, представленных на стереограмме; 3—6 — сместители 2-го порядка: 3 — лево-(*a*) и право-(*b*) сдвиговый, 4 — сбросовый (*a*) и взбросовый (*b*); 5 — взбрососдвиговый лево- (*a*) и правосторонний (*b*); 6 — сдвигосбросовый лево- (*a*) и правосторонний (*b*); 7 — полюсы второстепенной и дополнительной систем тройственного парагенезиса трещин, относящиеся к разным тройкам систем трещин; 8 — трещина на стереограмме (*B*) и направление кинематики штрихов скольжения на ней (стрелкой показано смещение лежащего крыла); 9 — полюсы осей главных нормальных напряжений сжатия (*a*), промежуточной оси (*b*) и растяжения (*c*); 10 — направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (*a*) и растяжения (*b*).

1989]. В основу метода положена зависимость между направлением смещения по трещине и ориентировкой главных осей напряжений, вызвавших это смещение. В данной работе реконструкция стресс-тензора и его параметров проводилась с помощью программы TENSOR, разработанной Д. Дельво [Delvaux, 2003] на основе метода инверсии Right Dihedra Ж. Анжелье [Angelier, 1989] с добавлением метода оптимизации вращением Д. Дельво [Delvaux, 1993].

Исходными данными для анализа являются в первую очередь элементы залегания зеркал скольжения в горных породах. По возможности они дополняются информацией о зонах тектонитов, смещениях маркеров, зеркалах скольжения без видимой штриховки, трещинах отрыва, что позволяет повысить качество решений. В программе TENSOR имеется возможность использовать также фокальные механизмы очагов землетрясений, возраст восстановленных стресс-тензоров в этом случае ограничивается инструментальным периодом наблюдений за сейсмичностью, но в данной работе дистанционные способы получения исходных данных не используются.

В процессе анализа вначале определяется предварительный тензор напряжений с использованием процедур PBT (определение средней ориентировки кинематических осей сжатия, растяжения и промежуточной для данных по штрихам скольжения) и усовершенствованного метода Right Dihedra (определение по взаимному положению частных квадрантов сжатия и растяжения наиболее подходящего для выборки положения осей с минимальной суммой отклонений частных решений от рассчитанного общего стресс-тензора). Затем результаты уточняются с помощью процедуры оптимизации вращения [Delvaux, 1993]. Программа TENSOR позволяет разделить массив трещин на несколько генераций трещин, активных в разные тектонические этапы. В среднем для одного пункта наблюдения выделяются 1—2 итоговых решения, каждое из которых представлено в виде тензора осей главных нормальных напряжений ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) с выборкой соответствующих геолого-структурных данных (см. рис. 3, В). В соответствии с пространственным положением осей и значением коэффициента формы эллипсоида напряжений полученный стресс-тензор относится к одному из режимов деформирования — радиальное растяжение, чистое растяжение, трансенсия, чистый сдвиг, транспрессия, чистое сжатие, радиальное сжатие. Тип стресс-режима определяется рассчитанным стресс-индексом R' (от 0 до 3) [Delvaux et al., 1997].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ: ЛОКАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ

На первом этапе работы проведен сравнительный анализ результатов применения двух методов на локальном уровне в масштабе коренного выхода горных пород (отдельно по пунктам наблюдения), а также в целом получена статистика по количеству и сходству решений [Бурзунова, 2018]. Анализ взаимосвязи множества локальных тензоров напряжений относительно друг друга и распределения их по площади участка (региональный уровень) проведен в последующем разделе.

Локальные стресс-тензоры — парагенетический метод и метод кинематического анализа Анжелье—Дельво. Для восстановления локального напряженного состояния двумя методами выбраны данные по тем пунктам наблюдения в пределах участка исследования (см. рис. 2, А), в которых имелись исходные данные для обеих методик. В этих пунктах (16 шт.), расположенных преимущественно в береговой полосе, проведены 22 массовых замера ориентировок трещин (по 50—100 шт. в каждом замере), зарегистрированы штрихи и зеркала скольжения (158 шт.), зоны дробления и зеркала скольжения без видимых штрихов (23 шт.) и отрывные трещины (227 шт. — взяты из массовых замеров трещин).

В ходе парагенетического анализа трещинных сетей восстановлено 70 локальных стресс-тензоров разного морфогенетического типа и различной ориентировки. Кроме того, метод позволяет определить в полученных решениях тензоры напряжений второго порядка. В процессе кинематического анализа получено 26 разнотипных локальных стресс-тензоров, из которых два решения имеют смешанный тип (угол падения трех осей главных нормальных напряжений варьирует в диапазоне от 26 до 47°). По любой из двух методик в одном обнажении или близкорасположенных соседних могли быть выделены несколько стресс-состояний разной степени достоверности. Это свидетельствует об их принадлежности к различным этапам развития регионального масштаба, либо к одному этапу — в качестве второстепенных обстановок вследствие переиндексации осей напряжений в едином поле или обусловленных локальными неоднородностями напряженного состояния [Ребецкий и др., 2019].

В процессе парагенетического анализа трещиноватости получено значительно больше решений, чем по итогам анализа по методу Анжелье—Дельво. Снятие напряжений большей части восстановленных стресс-состояний происходило только за счет формирования сети трещин при превышении предела прочности горных пород в условиях всестороннего сжатия, но без значительных смещений породных блоков, необходимых для образования макроскопически определяемых штрихов скольжения. В процессе эволюции разломной зоны это, как правило, характерно для ранней стадии [Семинский, 2003], когда вдоль будущего сместителя формируется широкая зона относительно равномерно расположенных в массиве мелких разрывов. Если внешнее поле напряжений на первой стадии ослабевает или пе-

рестает действовать, развитие разломной зоны прекращается (зона скрытого разлома). Но в случае дальнейшего развития происходит объединение мелких разрывов в более крупные, по которым осуществляются перемещения блоков (поздняя стадия и стадия полного разрушения [Семинский, 2003]). При этом на поверхности разрывов под давлением крыльев образуются зеркала скольжения, штрихи и борозды, которые сконцентрированы обычно в узких зонах крупных дизъюнктивов или в сложнодеформированных участках. В случае расположения пункта наблюдения вблизи такой зоны тип напряженного состояния можно восстановить по парагенезису трещин и по следам смещений. Кроме того, штрихи скольжения могут образоваться в поле напряжений другого типа или ориентировки, когда сформированные ранее трещины используются в качестве путей перемещения материала.

Сравнение результатов. При сравнении результатов разных методов в каждом отдельном пункте наблюдения (таблица) проводилось сопоставление погружения осей главных нормальных напряжений (сжатия, растяжения и промежуточной) в полученных локальных решениях, включая напряженное состояние второго порядка в парагенетических решениях. Выяснилось, что большинство решений кинематического анализа Анжелье—Дельво (22 из 26) в 14 (из 16) пунктах наблюдения (см. таблицу) имеют аналогичное по типу и ориентировке решение среди парагенетических решений о стресс-тензоре первого или второго порядка, полученных вблизи или в этом же коренном выходе. Например, для пункта наблюдения b1020 имеется кинематическое решение для поля сдвига с СЗ-ЮВ простираемостью оси растяжения и СВ-ЮЗ простираемостью оси сжатия (см. рис. 3, В), подобное одному из трех парагенетических решений (см. рис. 3, А, Б, решение 1), а в пункте наблюдения b1062 одному и тому же парагенетическому решению (сдвиг) подходят два кинематических решения (сжатие и растяжение) как второстепенные поля напряжений. Предполагается, что идентичные решения («общие», см. таблицу) двух методов о напряженном состоянии относятся к одному этапу. При этом угловое расстояние между выходами на верхнюю полусферу одной и той же оси в решениях разных методов составляет, как правило, 5—15° (реже до 40°). Это может быть обусловлено изменчивостью ориентировки локального стресс-тензора в процессе длительного трещинообразования, а также возможными вариациями изменения ориентировок трещин при последующих деформациях и, как следствие, различной точностью восстановления направления осей главных напряжений.

Кроме «общих» идентичных (45 % от общего количества решений по результатам применения двух методических подходов) имеются также «новые» решения о тензоре напряжений — полученные

Локальные стресс-тензоры, восстановленные двумя методами

№ п/п	Пункт наблюдения	Парагенетический метод			Метод кинематического анализа Анжелье—Дельво					Количество «об- щих» (идентичных) решений для обоих методов
		Исходные данные: коли- чество массо- вых замеров трещин (по 50—100 шт.)	Количество решений		Исходные данные (шт.)			Количество решений		
			всего	в том числе «но- вые»	штрихи сколь- жения	зоны дро- бления, зеркала	отрывы	всего	в том числе «новые»	
1	b1020	1	3	2	9	1	41	1	—	1
2	b1028	1	3	1	8	1	25	2	—	2
3	b1031	1	3	1	8	1	16	2	—	2
4	b1041	1	4	3	11	1	4	1	—	1
5	b1047	1	3	2	7	—	17	1	—	1
6	b1048	4	10	9	7	6	12	1	—	1
7	b1056	1	4	3	3	1	13	1	—	1
8	b1058	1	4	3	13	1	2	1	—	1
9	b1059	1	5	3	5	1	18	2	—	2
10	b1062	2	5	2	43	2	23	5	1	3—4
11	s1071	1	2	2	6	—	17	1	1	—
12	b1097	2	7	5	5	5	8	2	—	2
13	b1034	1	4	2	13	—	31	2	—	2
14	b1033	1	4	3	4	—	—	1	—	1
15	s1061	1	3	3	11	1	—	2	2	—
16	s10167	2	6	5	5	2	—	1	—	1
Итого		—	70	49	—	—	—	26	4	—

только по одной методике (см. таблицу). Во время действия «новых» стресс-состояний, восстановленных в зонах скалывания парагенетическим методом (51 % решений), физико-механические условия по глубине, давлению, напряженному состоянию, скорости и амплитуде перемещения крыльев зоны в каждом изучаемом локальном массиве, по-видимому, не отвечали необходимым условиям для формирования видимых зеркал скольжения. Вероятнее всего, развитие соответствующих разломных зон прекратилось на ранней стадии. Кроме того, не исключен вариант, когда пункт наблюдения расположен в отдалении от частных или магистральных сместителей зоны в случае их наличия. «Новые» стресс-тензоры метода Анжелье—Дельво (4 % решений), не связанные с трещинными парагенезисами, обусловлены тем, что смещения происходили по имеющимся разрывам благоприятной ориентировки из более древней трещинной сети.

Итак, сопоставление результатов двух методов на локальном уровне показало частичное сходство решений, при этом решения парагенетического анализа являются более многочисленными и разнотипными. Далее необходимо сравнить результаты двух методов на региональном уровне.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ: РЕГИОНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ

Локальные решения о напряженном состоянии разного типа связаны общим региональным полем более низкого порядка. Это обусловлено известными закономерностями разрывообразования [Hancock, 1985; и др.], согласно которым внутренняя структура разломной зоны в земной коре формируется в разнотипных полях напряжений второго порядка, которые сменяют друг друга при переиндексации осей напряжений в одном и том же объеме горных пород. Переход на региональный уровень при изучении напряженного состояния производится при соблюдении принципов генетической соподчиненности путем порангового анализа локальных решений [Семинский, 2015]. Следующим шагом в работе является сравнение региональных полей напряжений, полученных двумя методами с привлечением значительно большего объема исходных полевых данных.

Региональные поля напряжений — парагенетический метод. Парагенетический анализ трещинных сетей ранее [Бурзунова, 2014] был проведен для всей площади участка. Восстановлено 314 локальных стресс-тензоров и соответствующих разломных зон локального ранга на базе 108 массовых замеров (около 9300 трещин в 90 пунктах наблюдений, см. рис. 2, А). Следуя отработанной методике порангового анализа [Семинский, 2015], локальные решения сгруппированы по подобию типа и пространственной ориентировки — так получены системы локальных разломов. Далее среди них выявляются пары сопряженных систем локальных разломов с одной и той же ориентировкой осей напряжений (обстановка более низкого ранга), действующих в серии смежных коренных выходов, что дает возможность перейти на трансрегиональный уровень (12 решений) в системе рангов дизъюнктивных структур и полей напряжений [Семинский, 2015]. Затем полученные обстановки с парами сопряженных систем разломов вновь сортируются по принадлежности к разломным зонам второго порядка для более крупной региональной зоны первого порядка. Таким образом, для окрестности сместителя Морского разлома в его лежащем крыле восстановлено 5 региональных динамических обстановок (5 решений о поле напряжений и разломной зоне) (I—V на рис. 4, А). Они не могут существовать в одно время и соответствуют разным этапам разломообразования в районе изучаемого участка. Поранговый анализ проведен также с помощью объемных эталонов в виде совокупности дуг на проекции верхней полусферы (см. рис. 4, Б), тогда как в первом случае — в виде совокупности линий простираения систем разрывов на плоскости без учета углов их падения (см. рис. 4, А), что в принципе допускается на региональном уровне. Оценка применения двух типов эталонов (объемные и плоские) показала незначительную разницу в результатах, кроме количества локальных решений в полях сдвига (III) и сжатия (IV).

Для более корректного сопоставления с результатами кинематического анализа, исходные данные для которого зарегистрированы только в прибрежной зоне, парагенетический поранговый анализ в настоящей работе дополнительно проведен для узкой береговой полосы шириной в плане около 500 м (крутопадающая часть склона). В этой части участка имеются 43 массовых замера (более 3800 трещин в 33 пунктах наблюдений), на основе которых получено 129 локальных стресс-тензоров и в результате порангового анализа — 6 трансрегиональных решений, а затем 5 региональных решений о напряженном состоянии (см. рис. 4, Б). Они подобны региональным обстановкам для всей площади участка, однако идентичные поля напряжений различаются интенсивностью проявления, которая оценивается по суммарному количеству принадлежащих им локальных решений, особенно соответствующих магистральному сместителю (Y) и второстепенным разрывам 1-й серии (R и R') (см. рис. 4). Так, на всем участке (см. рис. 4, А, Б) преобладают поля горизонтального растяжения (I) и горизонтального сжатия (V), а в береговой его части (см. рис. 4, Б) — приоритет имеет поле горизонтального сдвига в вертикальной плоскости (III). Следует отметить, что эти наиболее интенсивно проявленные региональные поля растяжения, сдвига и сжатия, которые тем самым претендуют на принадлежность к еще более крупному

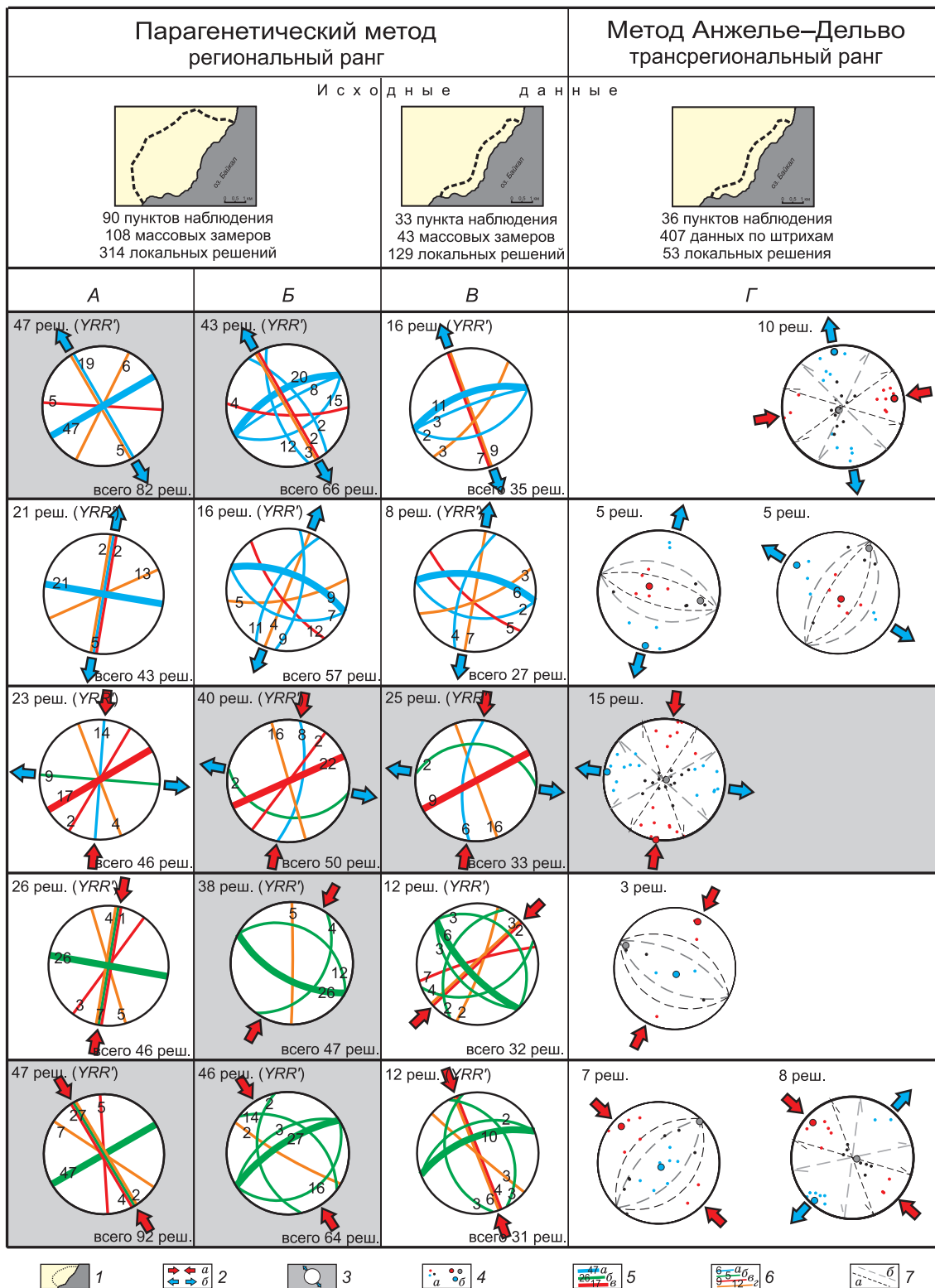


Рис. 4. Региональные поля напряжений (I—V), восстановленные с помощью парагенетического анализа (А — использованы плоские эталоны, Б, В — объемные эталоны) и кинематического анализа по методу Анжелъе–Дельво (Г).

I — участок сбора фактического материала (А, Б — весь участок, В, Г — береговая зона участка); 2 — направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 3 — интенсивно проявленные поля напряжений относительно других решений на этом же участке; 4 — выход на верхнюю полусферу (сетка Вульфа) осей сжатия, растяжения и промежуточной оси — локальных (а) и трансрегиональных (б); 5, 6 — разломные зоны 1-го (5) и 2-го (6) порядка, цифра указывает количество локальных решений: сброса (а), взброса (б), левого (в) и правого (г) сдвига; 7 — предполагаемые разломные зоны 2-го (а) (R- и R'-типа) и 1-го (б) (Y-типа) порядка — сдвигового (штриховая линия со стрелкой), сбросового и взбросового (без стрелки) типа.

рангу, характеризуются зоной скалывания северо-восточного простирания, близкого к ориентировке фрагмента сместителя Морского разлома в районе участка исследований, что свидетельствует об активизации разлома в этих обстановках.

Оценка косвенных признаков относительного возраста разрывных парагенезисов с помощью количественных параметров (величина угла скалывания, достоверность, сохранность, интенсивность проявления опережающих разрывов *R*-серии, взаимное расположение на площади) позволила распределить реконструированные региональные обстановки последовательно от более молодых (I, II, III) к древним (IV, V). Поскольку реконструкция проведена по следам хрупких деформаций, возраст полей не превышает времени формирования первых постметаморфических трещин в породах (ранний палеозой [Delvaux et al., 1995]). Выявленная последовательность относительного возраста региональных полей не противоречит литературным данным об этапности формирования структуры земной коры Центрального Прибайкалья.

Региональные поля напряжений — метод кинематического анализа Анжелье—Дельво. Кинематический анализ штрихов скольжения проведен для береговой полосы участка с помощью программы TENSOR. Последующий поранговый анализ локальных кинематических решений с целью перейти на региональный уровень осуществлен с использованием принципов порангового анализа в парагенетическом методе, поскольку подобная функция в программе отсутствует. Основой послужили данные по зеркалам и штрихам скольжения (407 шт.), а также вспомогательные данные, включая зоны тектонитов и отрывные трещины (254 шт.) в 36 пунктах наблюдений (см. рис. 2, А).

Вначале восстановлено 53 решения о локальном напряженном состоянии в масштабе коренного выхода, в каждом из которых можно предположить наличие локальной разломной зоны. Далее в ходе порангового анализа локальные решения рассортированы по типам (по значению стресс-индекса) — горизонтальное растяжение (10 шт.), горизонтальное сжатие (10 шт.), горизонтальный сдвиг в вертикальной плоскости (33 шт.) и по подобию ориентировки (погружение осей главных нормальных напряжений — σ_1 , σ_2 , σ_3) так, чтобы полученные группы нельзя было более объединить без перекрещивания областей распределения разных осей на сферограмме. При этом в одной группе допускался разброс частных осей (до 60°) из-за возможного локального искажения общего поля в различных пунктах наблюдений вследствие неоднородности условий деформации [Ребецкий и др., 2019].

В итоге получено 7 групп локальных решений (см. рис. 4, Г). Каждая группа представляет динамическую обстановку в серии соседних коренных выходов горных пород, в которой теоретически могут существовать две сопряженные системы локальных разломов 2-го порядка (*R* и *R'*-типа) и сместитель 1-го порядка (*Y*-типа), составляющих структуру зоны мелкого регионального разлома. Таким образом, по аналогии с парагенетическим методом эти обстановки можно отнести к трансрегиональному рангу. Предполагаемые плоскости сопряженных разрывных зон *R* и *R'*, а также две равновероятные плоскости для развития главного сместителя *Y* (в зоне скалывания может развиваться только одна из них) указаны (штриховые линии на рис. 4, Г) с соблюдением среднестатистических угловых соотношений между системами разрывов и реконструированными осями главных нормальных напряжений [Hancock, 1985; Семинский, 2003].

По преобладанию локальных решений и площадному распределению наиболее интенсивно выражено поле сдвига (III-Г, см. рис. 4), затем идут решения сдвиговых полей (I-Г и V-Г справа) и поле СЗ сжатия (V-Г слева). Остальные обстановки ССВ и СЗ растяжения и СВ сжатия (II-Г и IV-Г) проявлены на участке значительно слабее. В целом можно отметить преобладание сдвиговых обстановок как среди трансрегиональных (3 из 7), так и локальных (33 из 53) решений.

Переход на региональный уровень в парагенетическом методе осуществляется путем сортировки пар систем трансрегиональных решений по принадлежности к зонам 2-го порядка для разломной зоны 1-го порядка. Он предполагает в том числе наличие переиндексации осей напряжений, которая обуславливает разнотипные напряженные состояния 2-го порядка (для разрывов *t*- и *n*-типов) в одной разломной зоне. В случае с кинематическими решениями только часть трансрегиональных обстановок объединяются в качестве второстепенных для одной региональной — это два поля растяжения (см. рис. 4, II-Г) и сдвиговое поле с полем сжатия (см. рис. 4, V-Г). Однако в каждой из этих пар обстановок сложно выделить главную — региональную, так как они равноценно представлены частными решениями. С большей уверенностью к региональному рангу можно отнести самое распространенное по количеству стресс-тензоров на площади участка поле сдвига с субмеридиональной осью сжатия и субширотной осью растяжения (см. рис. 4, III-Г), несмотря на отсутствие второстепенных полей.

Сравнение результатов. Сравнительная оценка результатов применения двух методов на региональном уровне (см. рис. 4, В, Г) показала как сходство, так и различия результатов исследования напряженного состояния прибрежной части участка в зоне сместителя Морского разлома.

Парагенетический подход (см. рис. 4, В) позволил выйти на региональный уровень и получить пять разновозрастных динамических обстановок, в отличие от кинематического анализа (см. рис. 4, Г),

в процессе которого удалось достоверно восстановить обстановки только трансрегионального уровня. Причина этого видится, во-первых, в количестве и разнообразии локальных стресс-тензоров, являющихся основой для выделения обстановок более крупного ранга. В береговой части участка парагенетическим методом получено в 2 раза больше локальных решений (129 и 54) при равноценном количестве пунктов наблюдений (33 и 36). Как выявлено ранее (см. таблицу), только половина локальных напряженных состояний, реконструированных в коренном выходе, инициировала формирование одновременно и трещинной сети, и штрихов скольжения. По-видимому, большая часть восстановленных локальных обстановок сжатия, сдвига и растяжения действовала на ранних стадиях развития мелких разломных зон разного возраста до формирования фрагментов разломного сместителя и проявилась в образовании трещинных парагенезисов без смещений по трещинам. Что касается случаев подвижек породных блоков, они реализованы на более поздних стадиях развития разломов и не повсеместно. Вторая причина кроется в разнице разброса ориентировок частных решений при их группировке из-за меньшей степени привязки ориентировки штрихов скольжения (т. е. большей вариативности, в отличие от сколовых трещин) к положению осей напряжений.

При комплексной оценке результатов в береговой части изучаемого участка за основу взяты решения более крупного ранга — региональные обстановки парагенетического метода. Каждое из трансрегиональных кинематических решений соответствует какому-либо парагенетическому решению 1-го (региональный ранг) или 2-го (трансрегиональный ранг) порядка (см. рис. 4, *B*, *Г*) по ориентировке осей главных нормальных напряжений, а также разломов — восстановленных (*B*) и предполагаемых (*Г*). Необходимо отметить практически полное совпадение наиболее интенсивно проявленной для обоих методов динамической обстановки — поля сдвига (см. рис. 4, III-*B*, III-*Г*), при этом парагенетический анализ позволил определить ориентировку региональной зоны скалывания, которая имеет северо-восточное простирание и левосдвиговую кинематику.

В целом на всей территории участка по результатам двух методов (см. рис. 4, *A—Г*) самое широкое развитие получили поле горизонтального растяжения, поле горизонтального сдвига в вертикальной плоскости и поле горизонтального сжатия (отмечены серой заливкой на рис. 4, I, III, V). Древнее поле СЗ-ЮВ сжатия (см. рис. 4, V) соответствует этапу палеозойского сжатия в районе Центрального Байкала [Delvaux et al., 1995; и др.] и реконструируется по всей площади участка, кроме того форма Морского разлома местами напоминает чешуи надвиговзбросов (см. рис. 1, *Б*). Поле сдвига (см. рис. 4, III) также имеет широкое распространение на участке, но статистически сдвиговые решения сконцентрированы у береговой линии, т. е. ближе к сместителю Морского разлома. Этот факт, наряду с собственно наличием множества сдвиговых штрихов и зеркал скольжения, говорит о том, что на участке исследования сдвиговая разломная зона находилась, по крайней мере, на поздней дизъюнктивной стадии. Режим смены напряженного состояния от сжатия к сдвигу произошел на раннеорогенном этапе рифтообразования [Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; Семинский, 2009]. Поле растяжения (см. рис. 4, I) восстановлено на всей площади участка, при этом сбросовая разломная зона в настоящее время находится в стадии полного [Семинский, 2014] разрушения, с амплитудой смещения в несколько километров. На данном отрезке лежачего крыла Морского разлома практически не наблюдается сбросовых штрихов скольжения, однако проявлены сдвиговые штрихи, соответствующие второстепенному полю (см. рис. 4, I-*Г*). Менее интенсивное поле ССВ-ЮЮЗ растяжения (см. рис. 4, II) могло действовать в конце стадии проторифта (поздний миоцен—ранний плиоцен) в Приольхонье, исходя из ориентировки предполагаемых векторов смещений блоков [Delvaux et al., 1997]. Подобное наименее выраженному на участке сжатию (см. рис. 4, IV) поле ССВ-ЮЮЗ сжимающего напряжения действовало для Центрального Байкала в палеозое (поздний кембрий—ранний ордовик, по [Delvaux et al., 1995]). Возможно, данное решение является следствием ослабленного воздействия мезозойского сжатия на Южном Байкале или в Забайкалье в районе Посольского надвига и впадин Удинской и Гусиноозерской [Александров, 1990; Delvaux et al., 1995].

Итак, сопоставление региональных решений двух методов показало их сходство и различие по масштабному рангу и количеству решений. Для береговой части основную роль в разрывообразовании играют сдвиговые напряжения, по результатам обоих методов получено интенсивно выраженное поле сдвига с субмеридиональной осью сжатия и субширотной осью растяжения.

ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХ МЕТОДОВ

При реконструкции напряженного состояния горных пород с помощью парагенетического и кинематического анализов необходимо учитывать особенности проведения полевых и камеральных работ по сбору и первичной обработке исходного геолого-структурного материала в соответствии с методическими требованиями.

Массовые измерения элементов залегания трещин для парагенетического анализа трудоемки и, соответственно, требуют больших затрат времени при детальной сети наблюдений. Упростить процесс

можно с помощью современных технологий в виде электронных компасов-клинометров с сохранением данных в цифровом виде, при этом экономия полевого времени будет незначительная. С другой стороны, повсеместная распространенность трещиноватости позволяет строить и детализировать сравнительно равномерную сеть пунктов наблюдений согласно поставленным задачам исследования и в рамках уровня обнаженности пород участка. Достоверность метода повышается с увеличением числа пунктов наблюдений. Процедура сравнения стереограмм трещиноватости с эталонами для детальной сети также трудоемка, однако это позволяет получить большее разнообразие локальных решений и реконструировать более полную картину поэтапной деформации исследуемого участка.

Для метода Анжелье—Дельво наблюдается обратная ситуация: сбор данных в конкретных пунктах менее трудозатратен, при этом имеет место неравномерность пространственного местоположения признаков смещений, что наблюдается на участке исследования — зеркала и штрихи скольжения в пунктах площадной сети обнаружены только на склоне береговой зоны. Встречаемость следов смещений в обнажениях горных пород зависит по большей части от близости расположения к разломному сместителю, полевые маршруты при целенаправленном сборе кинематических данных проходят, как правило, вдоль разломов. Кроме того, слабо выраженные штрихи скольжения с течением времени вследствие экзогенных процессов имеют меньшую сохранность, чем собственно плоскость трещины для качественного измерения элементов залегания в массовом замере для парагенетического анализа. Стоит учитывать также сложности с достоверным определением направления смещения по штрихам при отсутствии маркеров, нередко спорные ситуации, которые в целом снижают качество исходных данных. Частичная автоматизация кинематического анализа при помощи программы TENSOR не исключает участие специалиста в процессе для получения корректного результата [Delvaux, 2003], чему предшествует грамотная группировка данных в поле и их сопоставление с геологическими структурами.

Кроме того, парагенетический анализ дает возможность установить не только ориентировку осей напряжений, но и элементы залегания разломной зоны, что определяет в сдвиговом поле лево- или правостороннее направление смещения крыльев, а в поле сжатия или растяжения — азимут падения осевой плоскости разломной зоны. Это, в свою очередь, позволило при детальной и равномерной сети исследования построить карту разломных зон участка, принадлежащих разным стадиям тектонического

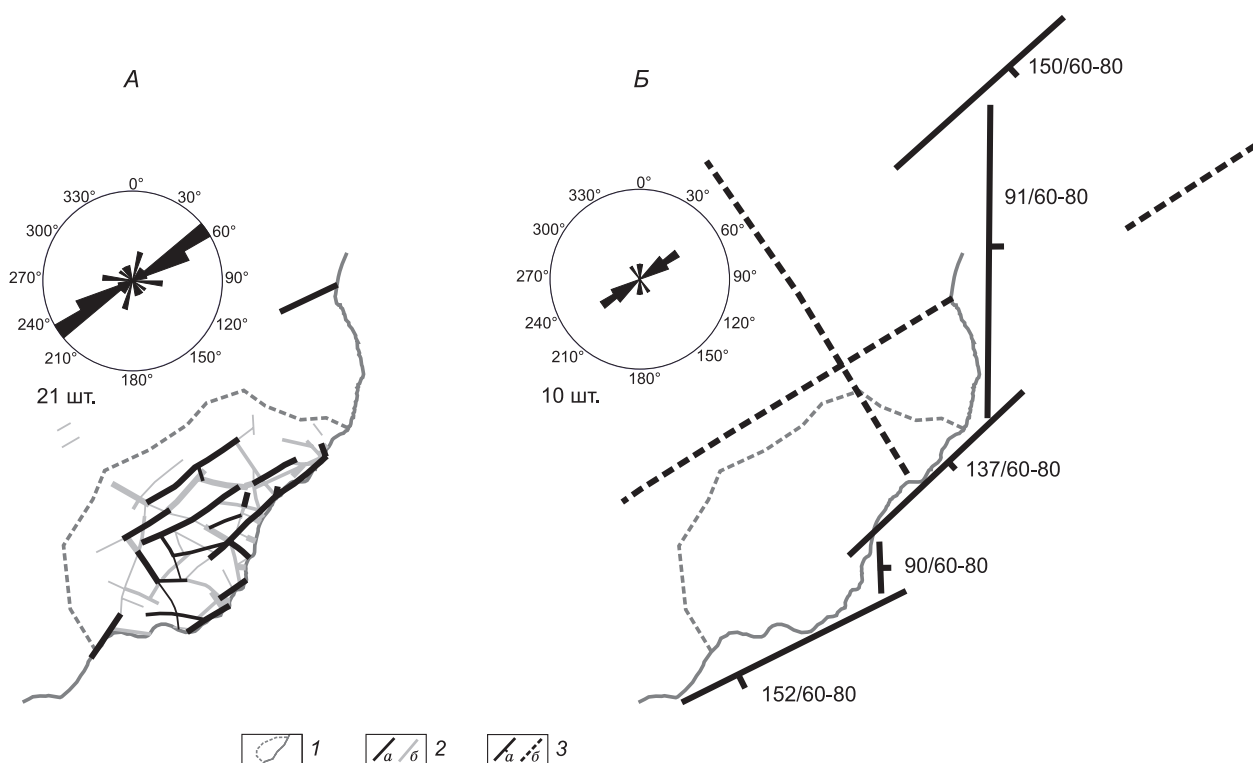


Рис. 5. Схема разломных зон участка исследований (А) [Бурзунова, 2015] и фрагмент карты активных разломов юга Восточной Сибири (Б) [Лунина и др., 2010].

1 — участок исследования; 2 — реконструированные разломы (парагенетический метод) (А): современного этапа растяжения (а), более ранних этапов (б); 3 — активные в плиоцен-четвертичное время разломы (Б): достоверные с элементами залегания (а), предполагаемые (б).

развития [Бурзунова, 2015]. Схема активизированных на последнем этапе СЗ-ЮВ растяжения реконструированных разломных зон, включая скрытые разломы в виде зон трещиноватости, продемонстрировала сходство направлений их преимущественного простирания с ориентировкой плиоцен-четвертичных разломов (рис. 5).

Учитывая возможность каждого метода и ограничения в их применении, в зависимости от поставленных задач и типа имеющихся в наличии исходных данных, можно выбрать одну из методик. По возможности рекомендуется использовать их в комплексе, поскольку принципы реконструкции не идентичны, и каждый метод дает уникальную информацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере фрагмента зоны Морского разлома в Прибайкалье проведена сравнительная оценка результатов применения двух методик по реконструкции тектонических палеонапряжений для геоструктурных и геодинамических построений — нового подхода к структурно-парагенетическому анализу в рамках метода спецкартирования К.Ж. Семинского и метода кинематического анализа Ж. Анжелье—Д. Дельво. Парагенетический анализ выявил, в каких обстановках формировались трещинные сети, а кинематический — при каких условиях происходили смещения по трещинам. Получены решения о напряженном состоянии в разломных зонах локального и регионального рангов, разного морфогенетического типа и ориентировки. Сформулированы следующие выводы.

Парагенетический метод позволяет восстановить напряженное состояние с ранней стадии развития разломной зоны, когда в ее широкой полосе начинают формироваться трещинные сети, а по разрывам еще не имеется значительных подвижек. При равном количестве пунктов наблюдений получено значительно больше стресс-тензоров, чем при использовании кинематического анализа, результаты которого приурочены в основном к более поздним стадиям развития разлома, либо активизации смещений по трещинам более ранних этапов. Что касается исходного материала для исследования, в отличие от зеркал скольжения, трещинные сети развиты повсеместно.

На локальном уровне большинство решений метода Анжелье—Дельво о напряженном состоянии имеет идентичное среди парагенетических решений в этом же коренном выходе. Сходные решения двух методов о напряженном состоянии предположительно относятся к одному этапу. «Новых» (не повторяющихся в другом методе) парагенетических решений на порядок больше, чем кинематических.

На региональном уровне в ходе порангового анализа парагенетическим методом получены поля напряжений регионального ранга (5 решений), а кинематическим — только трансрегионального ранга (7 решений) ввиду разницы в количестве локальных решений и методических особенностей поранговой реконструкции напряженного состояния. По результатам обеих методик в береговой части наиболее интенсивно проявлено поле сдвига с субмеридиональным простиранием оси сжатия и субширотным простиранием оси растяжения, а по результатам парагенетического метода в пределах всего участка широкое развитие получили поле СЗ-ЮВ сжатия и поле растяжения в том же направлении. Ориентировка реконструированной разломной зоны в региональном поле сдвига, сжатия и растяжения совпадает с простиранием Морского разлома, что свидетельствует о его разновозрастной активизации в этих обстановках в роли разрыва 1-го порядка. Положение осей напряжений в решениях сдвигового поля на береговом склоне свидетельствует о наличии магистрального левосдвигового сместителя в зоне Морского разлома.

Сравнительная оценка результатов показала, что оба метода при комплексном подходе дают положительные результаты в отношении сходства решений для получения сведений об этапах напряженного состояния в процессе хрупкого деформирования горного массива, при этом каждый из методов привнес свои особенности. Парагенетический метод за счет своей специфики в плане большего количества исходных данных и локальных решений на участке исследования позволил пройти все ступени порангового анализа. Следуя его принципам, в работе показана возможность проведения порангового анализа для решений метода Анжелье—Дельво. При детальной сети исследования парагенетический метод позволяет также построить карту разломных зон участка. Полученные двумя способами региональные поля тектонических напряжений для района исследований обладают удовлетворительным сходством, таким образом, заверяя друг друга и повышая собственную достоверность.

Принимая во внимание различные условия формирования трещинных сетей и зеркал скольжения на разных стадиях развития разломной зоны и их пространственную неравномерность, а также различные принципы реконструкции поля напряжений и особенности практического применения каждого метода, рекомендуется комплексное применение рассматриваемых методик при исследованиях напряженного состояния и разломной структуры верхней части земной коры.

Автор благодарен к.г.-м.н. А.В. Черемных, А.А. Каримовой, А.С. Черемных, принимавшим активное участие в сборе полевых геолого-структурных данных.

Работа выполнена в рамках базового проекта № 0346-2019-0007 «Тектонофизика современных геодинамических процессов в литосфере Центральной Азии как основа прогноза чрезвычайных ситуаций природного характера».

ЛИТЕРАТУРА

Александров В.К. Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. Новосибирск, Наука, 1990, 103 с.

Бурзунова Ю.П. Структурно-парагенетический анализ сложных трещинных сетей на примере участка Тажеран (Прибайкалье) // Изв. ИГУ, 2014, т. 9, с. 28—41.

Бурзунова Ю.П. Разломные зоны Тажеранского массива сиенитов (Западное Прибайкалье) по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости // Изв. Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2015, № 1 (50), с. 58—67.

Бурзунова Ю.П. Трещины горных пород вблизи разломов: особенности применения структурно-парагенетического анализа // Геодинамика и тектонофизика, 2017, т. 8, № 3, с. 673—693.

Бурзунова Ю.П. Применение различных методов анализа трещиноватости для реконструкции полей тектонических напряжений (на примере интрузивного массива Тажеран в Прибайкалье) // Изв. Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых, 2018, т. 41, № 3, с. 35—49.

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

Государственная геологическая карта России. Лист N (47) 48. М-б 1: 1 000 000 / Ред. А.Л. Додин. Л., ВСЕГЕИ, 1986.

Гущенко О.И. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // Докл. АН СССР, 1973, т. 210, № 2, с. 331—334.

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

Леви К.Г., Бабушкин С.М., Бадардинов А.А., Буддо В.Ю., Ларкин Г.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Ружич В.В., Вонг Х.К., Дельво Д., Колман С. Активная тектоника Байкала // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 154—163.

Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кирилов 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.

Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (5), с. 391—406.

Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // ДАН, 2010, т. 433, № 5, с. 662—667.

Маринин А.В., Сим Л.А. Новейшее напряженное состояние и деформации на западном погружении Большого Кавказа // Геотектоника, 2015, № 5, с. 62—77.

Мац Г.Ф., Уфимцев М.М., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 252 с.

Метаморфизм и тектоника / Ред. Е.В. Складов. М., Интернет Инжиниринг, 2001, 216 с.

Парфеев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология, 2002, т. 21, № 1, с. 14—28.

Плешанов С.П., Ромазина А.А. Некоторые вопросы кинематики развития разломов центральной части Байкальского рифта // Проблемы разломной тектоники. Новосибирск, Наука, 1981, с. 129—141.

Ребецкий Ю.Л. Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сейсмостектонических деформаций // Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского). М., ОИФЗ РАН, 2002, с. 227—243.

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

Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В., Сим Л.А. Проблема интерпретации результатов тектонофизической реконструкции палеонапряжений и возможные пути ее решения // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (6), с. 860—880.

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

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 243 с.

Семинский К.Ж. Главные факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: тектонофизический анализ // Геотектоника, 2009, № 6, с. 52—69.

Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, № 2, с. 445—467.

Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, № 1, с. 1—43.

Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А. Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // Геодинамика и тектонофизика, 2018, т. 9, № 3, с. 771—800.

Федоровский В.С. Купольный тектогенез в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геотектоника, 1997, № 6, с. 56—71.

Федоровский В.С., Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Старикова А.Е. Геологическая карта массива Тажеран. М-б 1:10 000. М., Группа компаний А1 ТИС, 2009.

Федоровский В.С., Скляров Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М. Сдвиговой тектогенез и щелочно-базитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (5), с. 682—700.

Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск, Наука, 1977, 102 с.

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

Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data // J. Struct. Geol., 1989, v. 11, p. 37—50.

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

Delvaux D., Sperner B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program // New insights into structural interpretation and modelling / Ed. D. Nieuwland. Geol. Soc. London Spec. Publ., 2003, v. 212, p. 75—100.

Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Melnikov A., Ermikov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics, 1995, v. 252, p. 61—101.

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

Hancock P.L. Brittle microtectonics principles and practice // J. Struct. Geol., 1985, v. 7 (3—4), p. 437—457.

Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholtz C.A., Klitgord K.D. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data // Geology, 1992, v. 20, p. 589—592.

Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D. Active faults of the Baikal depression // Bul. Centre Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine, 1997, v. 21 (2), p. 399—434.

Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A. Geometry of the fault zone of the 2003 $M_s = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // Tectonophysics, 2008, v. 453, p. 276—294.

San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // Bull. Centre Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine, 1997, v. 21 (2), p. 435—455.

*Поступила в редакцию 18 декабря 2020 г.,
принята в печать 30 сентября 2021 г.*