

ТРЕЩИННЫЕ СЕТИ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАЙНОЗОЙСКИХ ОСАДКОВ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТРУКТУРНО- ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

К.Ж. Семинский, А.В. Черемных

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

Проведены массовые исследования трещиноватости в основных разновидностях кайнозойских отложений Байкальского рифта. Статистический характер полученного материала позволил использовать при его обработке новый структурно-парагенетический подход, который в процессе анализа данных получил полную методическую завершенность за счет разработки формализованных приемов перехода от реконструкции локальных стресс-тензоров к восстановлению напряженного состояния регионального уровня. В итоге установлено, что трещинные сети слабосцементированных отложений Прибайкалья в своей основе имеют тектоническое происхождение, а их внешняя хаотичность определяется временной, пространственной и иерархической изменчивостью условий структурообразования, имевших место при рифтогенезе. Временная нестабильность контролируется известной стадийностью развития Байкальского рифта и динамикой процесса разрывообразования, пространственная — влиянием древней структуры, а иерархическая — наличием шести масштабных уровней тектонических напряжений, непрерывный ряд которых установлен для земной коры Прибайкалья впервые.

Тектоническая трещиноватость, кайнозойские отложения, структурно-парагенетический анализ, напряженное состояние, Байкальский рифт.

JOINTING PATTERNS AND STRESS TENSORS IN CENOZOIC SEDIMENTS OF THE BAIKAL RIFT: DEVELOPMENT OF THE STRUCTURAL-GENETIC APPROACH

K.Zh. Seminsky and A.V. Cheremnykh

Mass measurements of joints in Cenozoic sediments from the Baikal rift have yielded statistical data suitable for processing with a new structural-genetic approach. In the course of processing, the new approach has been methodologically completed with formalized techniques for proceeding from local stress tensor reconstructions to regional-scale stress patterns. The jointing patterns in soft sediments of the area have been recognized to be basically of tectonic origin, and their seeming fuzziness to result from spatial and hierarchic variations during rifting-related stress and strain changes. The patterns vary in time, space, and hierarchy, the three kinds of variability being associated, respectively, with stages of rifting and failure dynamics, with control from the perift tectonics, and with the existence of six hierarchic levels of stress tensors. For the latter, the complete hierarchy of six stress levels has been recognized for the first time in the Pribaikalian crust.

Tectonic joints, Cenozoic sediments, structural-genetic analysis, stress tensor, Baikal rift

ВВЕДЕНИЕ

Исследование разрывных структур тектонического происхождения в породах кайнозоя позволяет получить наиболее важную в практическом отношении информацию о напряженно-деформированном состоянии изучаемого участка земной коры, так как она соответствует последнему этапу тектогенеза. Существенным ограничением доступа к этой информации является несовершенство методик анализа трещиноватости, которая по сравнению с другими структурными элементами наиболее широко распространена в кайнозойских отложениях тектонически-активных регионов. Как было показано в последние годы, применение отработанных на скальных породах кинематического [Гущенко, 1979] и парагенетического [Николаева, 1992] методов, а также их аналогов к анализу кайнозойских осадков дает в целом положительные результаты [Гладков и др., 2000; Копп, 2004; Семинский и др., 2005; Лунина, Гладков, 2007]. Однако известные ограничения их использования (недостаток разрывов со смещениями; трудности выбора сопряженных систем трещин при небольшой статистике измерений) многократно увеличиваются при изучении пород кайнозоя. Обычно исследователь сталкивается лишь с «немой» трещинова-

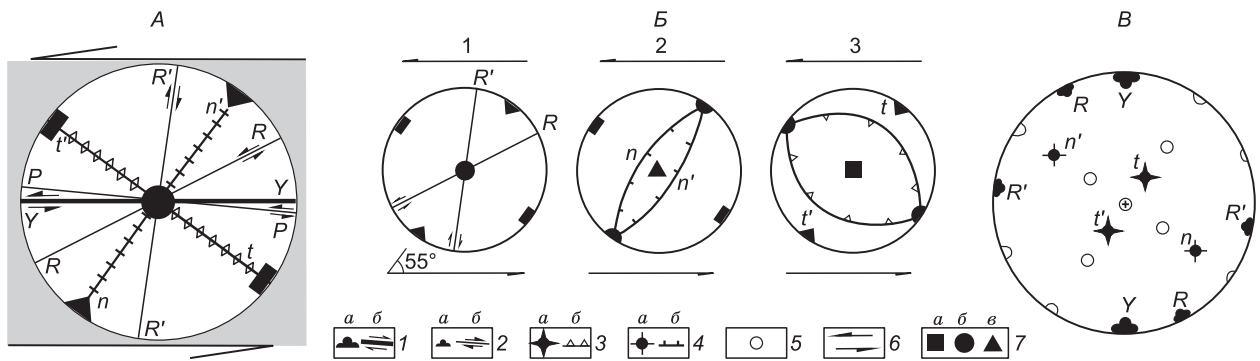


Рис. 1. Главные элементы внутреннего строения левосдвиговой зоны действия скальвающих напряжений.

A — вводная диаграмма разновидностей разрывов, образующихся в зоне скальвания разломного ранга; *B* — положение на круговых диаграммах систем сопряженных сколов 1-й (R и R'), 2-й (n и n') и 3-й (t и t') серий, которые могут развиваться за счет переиндексации осей главных нормальных напряжений в ходе разрывообразования; *B* — круговая диаграмма (верхняя полусфера, сетка Вульфа), в полюсах показано эталонное сочетание троек взаимно-перпендикулярных систем трещин, соответствующих парагенезису сколов 2-го порядка, образующемуся в левосдвиговой зоне скальвания при наиболее распространенных в природе условиях деформации (угол между сместителем разлома и осью сжатия — 55° ; двугранный угол при оси $\sigma_{сж.}$ между системами сопряженных разрывов 2-го порядка в зоне скальвания — 60° ; двугранный угол при оси $\sigma_{сж.}$ между главной и второстепенной системами трещин в тройственном парагенезисе — 85°).

1 — полюса (*a*) и плоскости (*b*) главного сдвигового сместителя 1-го порядка (Y), а также близких по ориентации и типу P -сколов; 2 — полюса (*a*) и плоскости (*b*) сдвигов 2-го порядка; 3 — полюса (*a*) и плоскости (*b*) надвигов (взбросов) 2-го порядка; 4 — полюса (*a*) и плоскости (*b*) сбросов 2-го порядка; 5 — положение полюса второстепенной и (или) дополнительной систем трещинного парагенезиса; 6 — направление перемещения крыльев зоны скальвания; 7 — выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений $\sigma_{раст.}$ (*a*), σ_2 (*b*) и $\sigma_{сж.}$ (*в*), представленных для стресс-тензора 1-го порядка (часть *A*) и случаев возникновения сколовых разрывов 1-, 2- и 3-й серий (часть *B*) в левосдвиговой зоне.

тостью и, как следствие этого, необходимостью применения парагенетических методов ее анализа. Многолетний опыт проведения массовых замеров трещин [Семинский и др., 2005] показывает, что их сети в кайнозойских породах тектонически-активных регионов едва ли уступают по сложности нарушенности скальных массивов. Зачастую они представлены множеством разрывных направлений, из которых трудно выявить истинно сопряженные системы, пояса вращения, конусы и пирамиды скальвания для применения известных способов реконструкции напряженного состояния.

Определенные перспективы повышения эффективности интерпретации внешне хаотических сетей трещин мы связываем с подходом, основы которого [Семинский, 2003] и детали применения [Семинский и др., 2005; Семинский, Бурзунова, 2007] рассмотрены в цитированных публикациях. Новый подход позволяет сделать вывод о напряженном состоянии горного массива (рис. 1, *A*), в котором происходило формирование трещинной сети конкретного коренного выхода, на основе ее совпадения с эталонным парагенезисом трещин (см. рис. 1, *B*), типичным для зоны действия скальвающих напряжений со смещением крыльев по простиранию (рис. 1) или падению. Это может быть зона левого или правого сдвигов, взброса или сброса, находящаяся на ранней (зона трещиноватости) или поздней (разломная зона) стадиях развития. Характерно, что решения, полученные для близких коренных выходов, зачастую отличаются друг от друга. Это свидетельствует либо о случайном совпадении изучаемой сети трещин с эталоном, либо о локальных вариациях напряженного состояния в пределах структуры 1-го порядка. Таким образом, целью исследований было развитие структурно-парагенетического анализа данного типа за счет накопления опыта его реализации на разных участках земной коры и, главное, посредством отработки путей перехода от локальных структур и соответствующих им стресс-тензоров к напряженному состоянию более низких (регионального и т.д.) уровней иерархии.

Переходя к сути проведенного исследования, необходимо сделать некоторые пояснения относительно употребляющихся в статье терминов, поскольку в различных публикациях в этом отношении существуют некоторые расхождения. Основанием сформулированных ниже положений послужила понятийная база, она обычно применяется в тектонофизике и структурной геологии [Anderson, 1951; Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Чернышев, 1983; Шерман и др., 1983; Hancock, 1985; Расцветаев, 1987; Mandl, 1988; Лукьянов, 1991; The Encyclopedia..., 1993; Ружич, 1997; Park, 1997; Sibson, 1998; Семинский и др., 2005; Ребецкий, 2007].

Использованный в работе методический подход основан на закономерностях формирования разломных зон в их широкой трактовке: объект включает не только тектониты главного (магистрального) сместителя, но и существенно большие по размерам объемы горных пород, где имеют место генетически связанные с его формированием пластические и разрывные деформации. В этом плане сместитель (разлом в узком понимании данного термина), как и вся разломная зона, является структурой 1-го порядка. Разрывные нарушения, в возникновении и развитии которых определяющее значение играет структурный элемент более низкого порядка, называются разрывами 2-го порядка.

Термины «ранг» и «уровень», в противоположность несущему генетическую окраску понятию «порядок», являются масштабными характеристиками разрывов (трещин, разломов) и тектонических напряжений, обуславливающих их формирование. Сместитель и разрывы 2-го порядка относятся к соседним рангам, причем их пространственно-временные взаимоотношения в тектонофизике рассматриваются особо, так как они в принципе аналогичны тем, которые возникают в разломной зоне между разрывами двух любых смежных порядков. Складки и разрывы 2-го порядка, образовавшиеся в разломной зоне, представляют структурный парагенезис, состав которого определяется характером перемещения ее крыльев, причем эти движения происходят в соответствии с типом напряженного состояния 1-го порядка.

Методика (см. ниже), на основе применения которой получены описанные в статье результаты, состоит в анализе фактического материала на предмет выявления известных парагенезисов разрывов 2-го порядка с последующим выводом о характере напряженного состояния и типе разлома 1-го порядка, где были проведены полевые наблюдения. Можно предположить, что это позволит осуществить последовательный переход от парагенезиса трещин к характеристике мелкого разлома, затем от определенной совокупности мелких разломов к более крупному тектоническому нарушению и т.д. При этом, учитывая соответствие иерархических уровней разрывных структур и реконструированных при их анализе стресс-тензоров, открывается возможность описать напряженное состояние какого-либо региона на разных уровнях иерархии, что и было сделано в данной статье.

Высший из определяемых в ходе подобного анализа уровней напряженного состояния соответствует по рангу разрывам, наименьшим из использованных для его реконструкции, т.е. в данном случае трещинам. Низший уровень ограничивается рангом наиболее крупного из разломов, пересекающих данный участок земной коры и, таким образом, в известной степени определяется размерами площади распространения точек наблюдения (т.н.). В этом плане имеет смысл отличать уровни стресс-тензоров, полученных по результатам исследования только одного коренного выхода, от тех, которые реконструируются при анализе данных со всех изученных в регионе точек наблюдения. В статье первые из них названы локальными, а вторые — региональными, тогда как более дробные уровни индексированы номерами. Например, 1-й локальный по мере привлечения к анализу более крупных рангов разрывных структур переходит в 3-й региональный и т.д. вплоть до 1-го регионального уровня, которому в рамках проведенного исследования в качестве структурного элемента соответствует Байкальский рифт в целом.

Основу статьи составляют результаты применения структурно-парагенетического анализа для трещиноватости кайнозойских осадков Байкальского рифта (рис. 2, А), отождествляющегося здесь с одноименной впадиной — ключевым структурным элементом Байкальской рифтовой системы (БРС). Отметим, что исследователи, занимавшиеся реконструкцией локальных стресс-тензоров на базе геолого-структурного анализа разрывов главным образом в скальных породах, выделили несколько наиболее значимых (по частоте встречаемости) динамических обстановок деструкции земной коры Прибайкалья. Поле сжатия с ориентировкой одноименной оси в направлении СЗ—ЮВ связывалось с докайнозойскими этапами тектогенеза [Мазукабзов, Сизых, 1987; Александров, 1990]. Для кайнозойской эпохи были выделены раздвиговой и сдвигораздвиговой типы напряженного состояния с поперечным к рифту положением оси растяжения [Шерман, Днепровский, 1989]. Результаты анализа 11 детальных структурно-геологических пересечений прибрежного склона Приморского хребта в Западном Прибайкалье [Семинский, Гладков, 1991; Разломообразование..., 1994; Семинский, 2003] свидетельствуют, что в трещиноватости северо-западного плеча рифта отчетливо фиксируются древнее сжатие и современное растяжение в направлении СЗ—ЮВ, а также обстановка сдвига. Вследствие существования последней в зонах влияния северо-восточных разломов (в т.ч. Приморского) происходили смещения по простиранию. Кроме того, картирование разрывов Приольхонья [Семинский, 1994; Семинский, 2003] позволило предположить доминирование продольного (СВ—ЮЗ) растяжения при образовании трещиноватости в породах центральной части Байкальского рифта.

Сопоставление геолого-структурных реконструкций стресс-тензоров с механизмами очагов землетрясений [Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997] показало, что развитие рифта на раннеорогенной стадии происходило в сдвиговом режиме, который лишь в верхнем плиоцене сменился растяжением (позднеорогенная стадия). Этим представлениям не противоречат результаты физического моделирования формирования БРС [Семинский, 2009], причем главные системы активных разломов

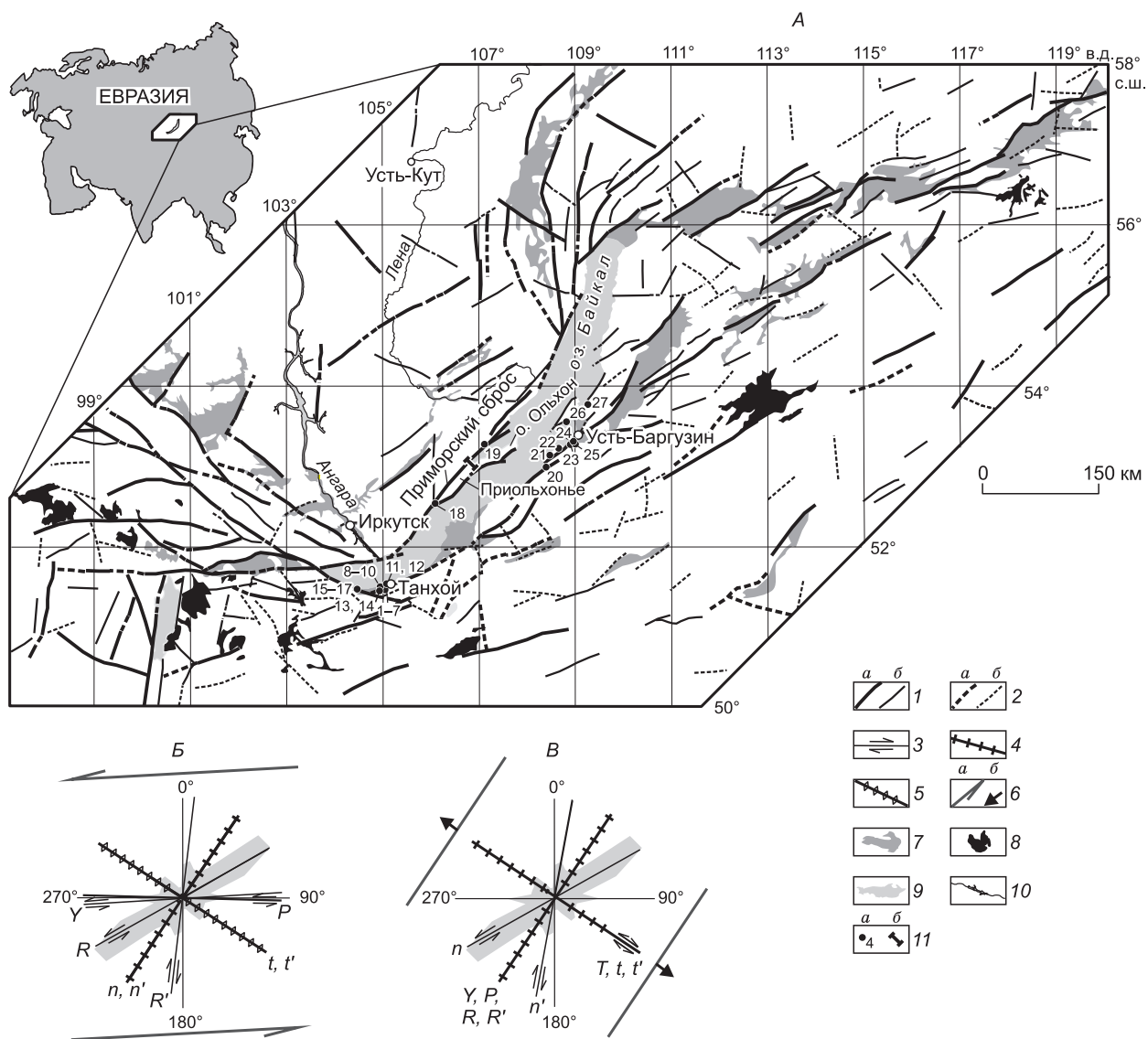


Рис. 2. Новейшая структура Байкальской рифтовой системы и смежных территорий.

A — главные структурные элементы БРС и прилегающей территории; *B, B'* — парагенезисы разломных систем, представляющих главные лучи розы-диаграммы (серый цвет) тектонических нарушений БРС (индексы разрывных систем — *Y, R, R', P, T, n, n', t, t'* — даны по [Семинский, 2003]) и развивающихся в обстановках сдвига (*B*) и растяжения (*B'*).

1, 2 — генеральные ($L > 80$ км) (*a*) и региональные ($34 < L < 80$ км) (*б*) разломы, отчетливо (*1*) и менее отчетливо (*2*) проявленные в рельефе (пределы длины L даны по [Шерман, 1977]); *3* — сдвиги; *4* — сбросы; *5* — взбросы; *6* — направления относительных перемещений блоков, создающих сдвиговую (*a*) и раздвиговую (*б*) обстановки разломообразования в БРС; *7* — главные кайнозойские впадины; *8* — крупные базальтовые поля; *9* — озера; *10* — гидросеть; *11* — точки исследования кайнозойских отложений (*a*) и профиль, состоящий из серии участков изучения трещиноватости в скальных выходах Приольхонья (*б*).

региона совпадают с парагенезисами разрывов 2-го порядка (см. рис. 2, *B, B'*), обобщенными по экспериментальным и натурным данным для зон левостороннего сдвига и растяжения [Семинский, 2003].

Вследствие определенности главных обстановок формирования структуры Байкальский рифт является удобным объектом для изучения. В то же время трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков не подвергались углубленному поранговому анализу, так как были изучены лишь в отдельных точках береговой зоны. Их большая часть располагается в районе пос. Усть-Баргузин, что позволило сравнить полученные нами результаты с данными предшественников [Лунина, Гладков, 2007], для которых главным объектом исследований являлся Баргузинский рифт.

Основными задачами работ были следующие: 1) создать сеть точек массового замера трещин в отложениях кайнозоя, типичных для береговой зоны оз. Байкал; 2) провести структурно-парагенетичес-

кий анализ трещиноватости и отработать основные шаги последовательного перехода от локальных разрывных структур и стресс-тензоров к напряженному состоянию более низких уровней иерархии вплоть до соответствующих рангу главных рифтообразующих разломов; 3) выявить специфику разрывообразования и основные масштабные уровни тектонических напряжений, свойственные кайнозойским осадкам центрального сегмента БРС.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ЕГО ОБРАБОТКИ

Ввиду незначительной распространенности кайнозойских отложений в пределах западного берега оз. Байкал практически все точки геолого-структурных наблюдений располагались на восточном и южном побережьях (см. рис. 2, А). Были охарактеризованы трещинные сети в основных разновидностях осадков, сформировавшихся на разных стадиях развития рифта и в его сегментах, отличающихся пространственной ориентировкой.

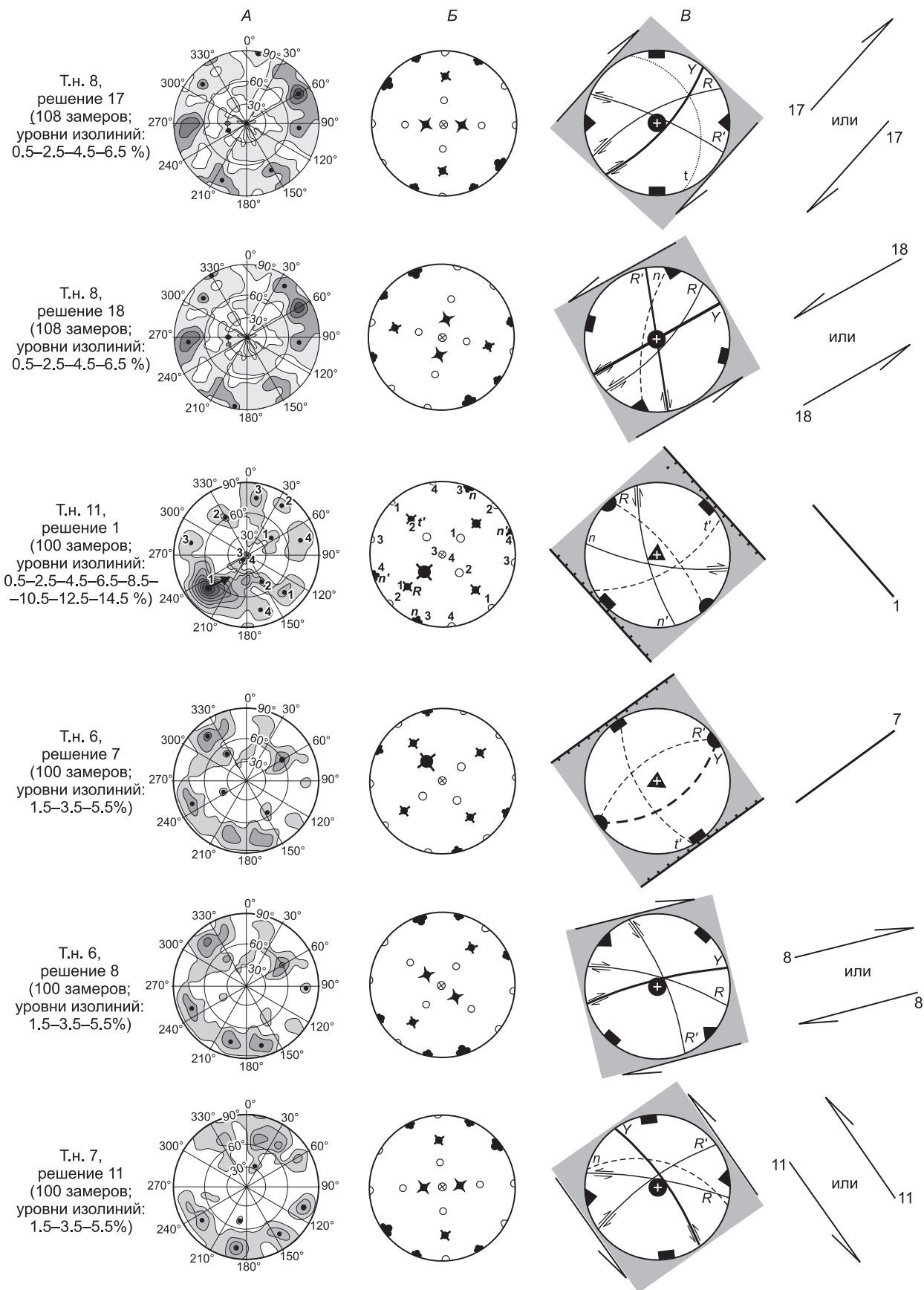
Так, трещиноватость верхнеплиоцен-эоплейстоценовых и верхнеплейстоцен-голоценовых отложений низких террас оз. Байкал изучена на Танхойском (т.н. 15—17) и Усть-Баргузинском (т.н. 20—27) участках, первый — представляет субширотный, а второй — северо-восточный сегменты рифта (см. рис. 2, А). Наблюдения на Танхойской площади проведены во всех обнажающихся на суше и отличающихся по возрасту разновидностях кайнозойских отложений. Это галечники и пески верхнего плиоцена и эоплейстоцена (т.н. 8—12) шанхаихинской свиты, а также самые древние (верхний олигоцен—нижний плиоцен) отложения Южного Байкала (т.н. 1—7), образующие танхойскую и осиновскую свиты, представленные алевритами, глинами (аргиллитами), песчаниками (песками), прослоями углей и конгломератами [Мац и др., 2001]. На Усть-Баргузинском участке все точки наблюдений располагались на низких верхнеплейстоценовых террасах оз. Байкал. Две точки в позднекайнозойских песчано-галечных отложениях (т.н. 18, 19) дополняют набор структурных ситуаций формирования кайнозойских осадков обстановкой, характеризующей зону влияния Приморского сброса, как одного из наиболее крупных разломов северо-западного борта. Для сравнительного анализа была собрана и аналогичным образом обработана информация о трещинных сетях в докайнозойских породах, располагающихся в непосредственной близости от изученных отложений кайнозоя. С аналогичной целью исследованы скальные выходы в центральной части рифта, располагающиеся вблизи разноранговых северо-восточных сместителей (см. рис. 2, А). Эти небольшие участки (Сарминский, Улирбинский, Онтхойский, Куркутский и Тутайский) составляют профиль, пересекающий Приольхонье субпараллельно проливу, отделяющему от него о. Ольхон.

Кайнозойским отложениям в исследованных точках свойственно горизонтальное и слабонаклонное залегание. Основной информацией об их структуре являлся массовый замер элементов залегания «немых» трещин. Они отчетливо выражены в наиболее древних породах кайнозоя и менее явно — в позднеплейстоцен-голоценовых отложениях, где набор достаточного количества измерений обеспечивался детальным изучением протяженных обнажений. В редких случаях фиксировались небольшие смещения слоев и другие кинематические признаки, позволяющие установить тип той или иной системы трещин. По данным массовых замеров строились круговые диаграммы трещиноватости, служившие основой для дальнейшей обработки.

Визуальный анализ диаграмм свидетельствует, что трещинные сети кайнозойских отложений в своих главных чертах (положение наиболее интенсивных максимумов) подобны таковым для изученных рядом скальных пород. Более того, здесь данная закономерность проявляется в большей степени, чем для смежной территории Иркутского амфитеатра, где подобие трещинных сетей в кайнозойских и мезозойских породах подтверждено результатами кластерного анализа массовых замеров [Семинский и др., 2005]. Причины существования выявленной закономерности могут быть различны: пассивное отражение трещиноватости фундамента в чехле рыхлых отложений, формирование первичных трещин в поле «тектонической рамы», существенно хрупкая реакция среды в период промерзания осадков, то же самое в результате землетрясений, часто происходящих в регионе, и др. Важным является сама возможность изучения трещиноватости кайнозойских осадков, применяя тот вид парагенетического анализа, который был предложен ранее на базе исследования трещинных сетей в скальных массивах.

В рамках нового подхода, подробно описанного в работах [Семинский и др., 2005; Семинский, Бурзунова, 2007], трещинная сеть коренного выхода анализируется на предмет принадлежности к зоне действия скальвающих напряжений. Независимо от того, является она разломной или это зона повышенной трещиноватости, отражающая раннюю стадию развития тектонического нарушения, основу ее трещинной структуры составляет парагенезис из нескольких закономерно ориентированных систем (см. рис. 1, В). Эти направления трещин появляются в результате наложения напряженных состояний 2-го порядка (см. рис. 1, В), последовательно возникающих при формировании зоны скальвания как струк-

Рис. 3. Начало.



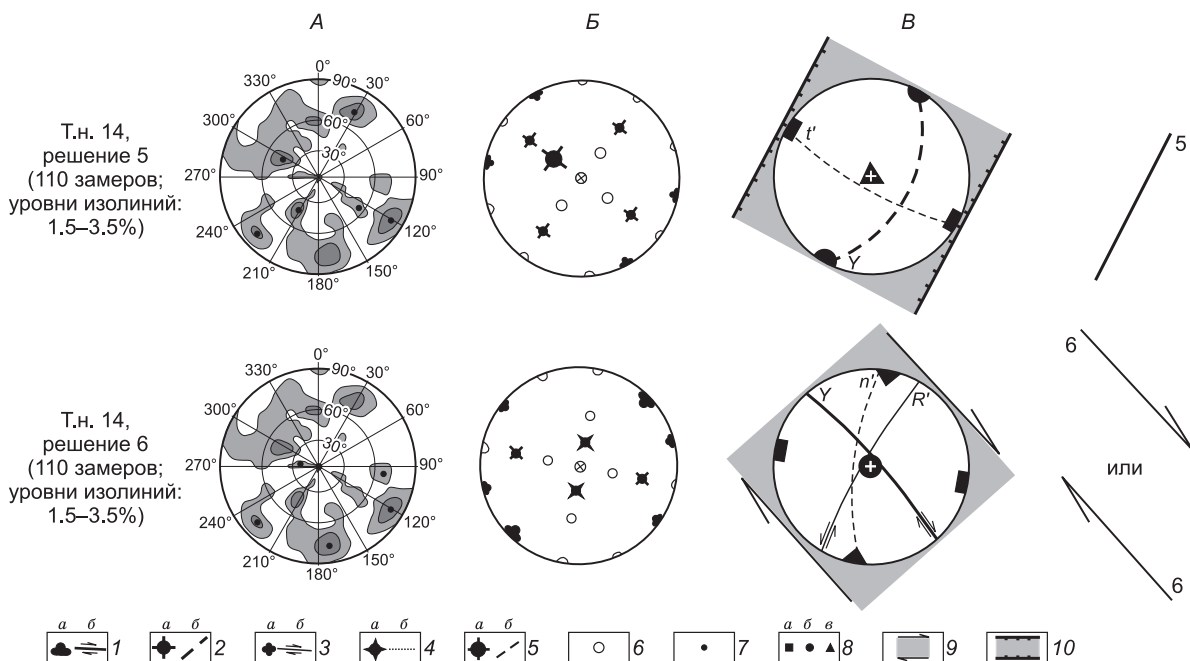


Рис. 3. Примеры интерпретации трещинных сетей Танхойского участка в рамках структурно-парагенетического анализа (локальный уровень).

A — диаграммы трещиноватости, соответствующие отдельным выходам кайнозойских отложений (верхняя полусфера, сетка Вульфа); *B* — эталонные парагенезисы [Семинский, Бурзунова, 2007], представляющие сочетания троек-систем трещин, которые формируются вблизи разрывов 2-го порядка в зонах скалывания с различным характером перемещения крыльев (ориентированы, исходя из наибольшего совпадения с положением максимумов на реальных диаграммах, часть *A*); *B* — решение о напряженном состоянии 1-го порядка, положении и типе зоны скалывания, наборе составляющих ее разрывов 2-го порядка, отражающихся, согласно результатам структурно-парагенетического анализа, в трещинной сети конкретного коренного выхода.

1, 2 — полюса (*a*) и плоскости (*b*) главного сместителя 1-го порядка: сдвига (1) или сброса (2); 3—5 — полюса (*a*) и плоскости (*b*) разрыва 2-го порядка: сдвига (3), взброса (4) или сброса (5); 6 — положение полюсов второстепенной и дополнительной систем, которые вместе с главной (1—5) составляют тройственный парагенезис трещин; 7 — максимум полюсов трещин (часть *A*), положение которого соответствует одной из систем эталонного парагенезиса (часть *B*); 8 — выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений $\sigma_{\text{раст.}}$ (*a*), σ_2 (*b*) и $\sigma_{\text{сж.}}$ (*в*), представляющих для анализируемого коренного выхода стресс-тензор 1-го порядка; 9, 10 — положение сдвиговой (9) или сбросовой (10) зоны скалывания 1-го порядка, формирование которой предопределило строение трещинной сети рассматриваемого коренного выхода (справа показаны используемые на других рисунках статьи упрощенные обозначения полученных решений).

На природной и эталонной круговых диаграммах, соответствующих решению 1, двусторонней стрелкой показано направление разброса у наиболее интенсивно проявленной системы трещин, а одинаковыми арабскими цифрами отмечены максимумы, представляющие системы каждого из четырех тройственных парагенезисов, выделенных для т.н. 11.

туры 1-го порядка. Каждому из таких состояний соответствуют две классические сопряженные системы трещин скалывания, к ним обычно добавляется третья, субперпендикулярная как к первому, так и ко второму направлениям мелких разрывов [Семинский, 2003].

Проявление во 2-м порядке разнотипных напряженных состояний связано с переиндексацией осей главных нормальных напряжений, имеющей место в ходе формирования зон скалывания, деформация субстрата которых в реальных условиях отличается от простого сдвига. При воздействии дополнительного бокового растяжения или сжатия напряженное состояние в зоне приближается к осесимметрическому, характеризующемуся примерным равенством абсолютных значений двух главных нормальных напряжений ($\sigma_{\text{сж}}$ и σ_2 или $\sigma_{\text{раст}}$ и σ_2), что и определяет специфику парагенезиса разрывов 2-го порядка. После возникновения сопряженных сколов 1-й серии (R' и R , см. рис. 1, Б-1) может происходить переиндексация осей главных нормальных напряжений (т.е. изменение их величин при сохранении направлений действия) с последующим образованием сколов 2-й (n' и n , см. рис. 1, Б-2) или 3-й (t' и t , см. рис. 1, Б-3) серий. Наиболее благоприятные условия складываются для образования последней пары, так как при доминирующем сжатии горных пород земной коры структура зон скалывания формируется под воздействием трансверсивного эффекта [Sibson, 1998]. Вследствие этого на обобщенных схемах структур 2-го порядка, полученных из опыта натуральных исследований и физического

моделирования [Reading, 1980; Wrench... 1984; Park, 1997], ось сжатия ориентирована под большим, а ось растяжения — меньшим чем 45° , углом к простиранию зоны. Кроме того, известные исследователи полей напряжений [Осокина, Цветкова, 1979] считали напряженное состояние, близкое к осевому сжатию, характерным для условий разрывообразования в верхних частях земной коры.

Таким образом, системы сколов 1-, 2- и 3-й серий, а также формирующиеся в ходе их эволюции сколы магистрального сместителя (*Y*-тип) вместе с близкими к ним по типу и ориентировке *P*-сколами являются теми разрывными нарушениями 2-го порядка, которые составляют структуру полностью разрывшихся зон скальвания (см. рис. 1, *A*). Каждому из направлений разрывов 2-го порядка на уровне трещин соответствует свой парагенезис из трех примерно перпендикулярных систем, что позволило при создании методики составить эталонные диаграммы, представляющие полный набор трещинных систем для основных типов зон скальвания (право- и левосдвиговых; сбросовых и взбросовых с крутыми и пологими углами падения) [Семинский, Бурзунова, 2007]. Все они в механическом смысле являются аналогами того, который в качестве примера приведен на рис. 1, *B* для зоны левого сдвига.

Эталоны, разработанные для преобладающих в земной коре условий разрывообразования [Wrench..., 1984; Mandl, 1988; Семинский, 2003], сравнивались с распределением максимумов полюсов трещин на конкретных круговых диаграммах. Методика анализа отдельных диаграмм представлена в предыдущей публикации [Семинский, Бурзунова, 2007], где детально рассмотрены все особенности построений, в т. ч. и для коренного выхода в слабосцементированных кайнозойских отложениях. Здесь в качестве примера приведены ключевые решения для Танхойского участка (см. рис. 3), причем на первом из них (решение 1) кратко проиллюстрированы основные шаги сравнительного анализа.

Наклонное положение систем трещин, наиболее проявленных в т.н. 11, свидетельствует о необходимости использовать для сравнения эталонные трафареты, соответствующие разрывным зонам со смещением крыльев по падению. Положение трафаретов выбирается так (см. рис. 3, *B*), чтобы *Y*-, *R*- и *R'*-сколы были ориентированы в северо-западном направлении, поскольку, судя по диаграмме (см. рис. 3, *A*), такое простирание имеет самая интенсивная (аз. пад. $230^\circ \angle 65^\circ$) и серия других систем трещин. Перебор эталонов для надвига, взброса, крутого и пологого сбросов показал, что наиболее точно рисунок максимумов на диаграмме удовлетворяет последнему из них (см. рис. 3, *A*, *B*). При этом кроме соответствующих угловых взаимоотношений между системами разрывов обстановка растяжения в северо-восточном направлении подтверждается явно выраженным разбросом трещин (стрелка, см. рис. 3, *A*) у наиболее интенсивно развитой системы. Она представляет *R*-сколы, кроме которых выделяются тройственные парагенезисы, соответствующие *t'*-, *n'*- и *n*-сколам (см. рис. 3, *B*, *B*). Отсутствие на круговой диаграмме троек-систем трещин, сопровождающих формирование *Y*-сколов главного сместителя, свидетельствует о сравнительно ранней стадии развития разлома, что характерно для условий разрывообразования в кайнозойских осадках. Развитием внутренней структуры пологой зоны трещиноватости сбросового типа объясняется происхождение практически всех основных направлений трещин изученного коренного выхода. Поскольку одна из двух оставшихся систем мелких разрывов соответствует залеганию осадков, нет необходимости в продолжении анализа на основе применения других эталонных трафаретов.

Сравнительный анализ, проведенный аналогичным образом для остальных точек наблюдения в породах Танхойского участка, свидетельствует (см. рис. 3), что основу характерных для него трещинных сетей составляют системы, сформировавшиеся в результате развития одной (т.н. 7, 11) или двух (т.н. 6, 8, 14) разнотипных и разновозрастных зон скальвания. Существование каждой из них подтверждается наличием нескольких систем сколовых разрывов (см. рис. 3, *B*), относящихся к 1-, 2- или 3-й сериям и сформировавшихся под влиянием двух или трех разновидностей напряженного состояния 2-го порядка (см. рис. 1, *B*). Наложение парагенезисов из трех (реже только двух сколовых) примерно перпендикулярных систем трещин, соответствующих каждому из направлений сколов разных серий, и образует зачастую хаотичное распределение максимумов полюсов трещин на конкретной круговой диаграмме.

Главным достоинством данного подхода при анализе сложных трещинных сетей по сравнению с традиционным выделением множества пар сопряженных сколов и соответствующими частными решениями о стресс-тензорах является существенное снижение фактора случайности в интерпретации происхождения разрывной сети. На стадии выделения сопряженных систем это обеспечивается фиксированием третьего направления трещин в парагенезисе, возникшем в одной с ними динамической обстановке, а на более низком уровне иерархии — формализованной увязкой частных решений в рамках напряженного состояния 1-го порядка. При этом кинематические маркеры, разнонаправленные разбросы трещин в системах и другие иногда встречающиеся особенности разрывообразования дополнительно используются при анализе коренного выхода, усиливая достоверность результата.

Еще одним преимуществом является то, что, кроме набора частных стресс-тензоров, в итоге структурно-парагенетического анализа рассматриваемого вида реконструируется напряженное состояние 1-го порядка, а также ориентировка и тип соответствующей ему зоны скальвания, которая относится к разломному рангу. Она может формироваться при лево- (см. рис. 3, *B*, решения 11, 18) или право-

стороннем (см. рис. 3, В, решения 6, 8, 17) сдвигах, растяжении (см. рис. 3, В, сбросовые зоны, решения 1, 5, 7) или сжатии (взбросовая, надвиговая), но в любом случае играет определяющую роль в развитии разрывной сети анализируемого и, по-видимому, смежных коренных выходов. Поскольку в результате полевых исследований в нашем распоряжении оказался фактический материал по трещиноватости смежных коренных выходов в пределах серии участков распространения кайнозойских отложений Байкальского рифта, открылась возможность проведения порангового анализа разрывных структур и соответствующих им масштабных уровней напряженного состояния.

На следующем после описанных выше операций шаге в качестве разрывов 2-го порядка анализируются все те разнотипные разломные зоны участка исследований, которые были установлены в качестве решений по отдельным диаграммам трещиноватости. Реконструкция напряженного состояния и типа соответствующей ему структуры 1-го порядка осуществляется на основе парагенетических соотношений (см. рис. 1, А). Зона скалывания, выявленная по наличию определенного парагенезиса разрывов 2-го порядка, будет отражать существование более крупного ранга разломов. Этот уровень иерархии может быть самым низким для изучаемого участка, если все полученные для отдельных коренных выходов решения являются составляющими соответствующего парагенезиса. В противном случае оставшиеся решения являются основанием для реконструкции еще одной, двух и т.д. одноранговых зон скалывания, их существование подразумевает необходимость осуществления следующего шага порангового анализа с выходом на еще более низкий уровень иерархии.

Таким образом, использование парагенетических взаимоотношений между разрывами 1-го и 2-го порядков позволяет перейти от определения стресс-тензоров на уровне трещин к реконструкции напряженного состояния для одного или нескольких смежных уровней развития разломов. В то же время представленный подход отражает лишь принципиальную возможность получения подобного результата, тогда как его конкретное воплощение сопряжено с решением серии сложных вопросов, обусловленных спецификой разрывообразования в конкретной природной ситуации. Уменьшение неоднозначности этих решений связано, во-первых, с освидетельствованием, возможно, большего числа обнажений горных пород на каждом участке исследований и, во-вторых, с приобретением опыта применения нового подхода к выявлению уровней структурообразования в различных природных обстановках. В качестве первого такого опыта ниже рассмотрены результаты, полученные в ходе исследования кайнозойских отложений Байкальского рифта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТРЕЩИННЫХ СЕТЕЙ НА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАЙНОЗойСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

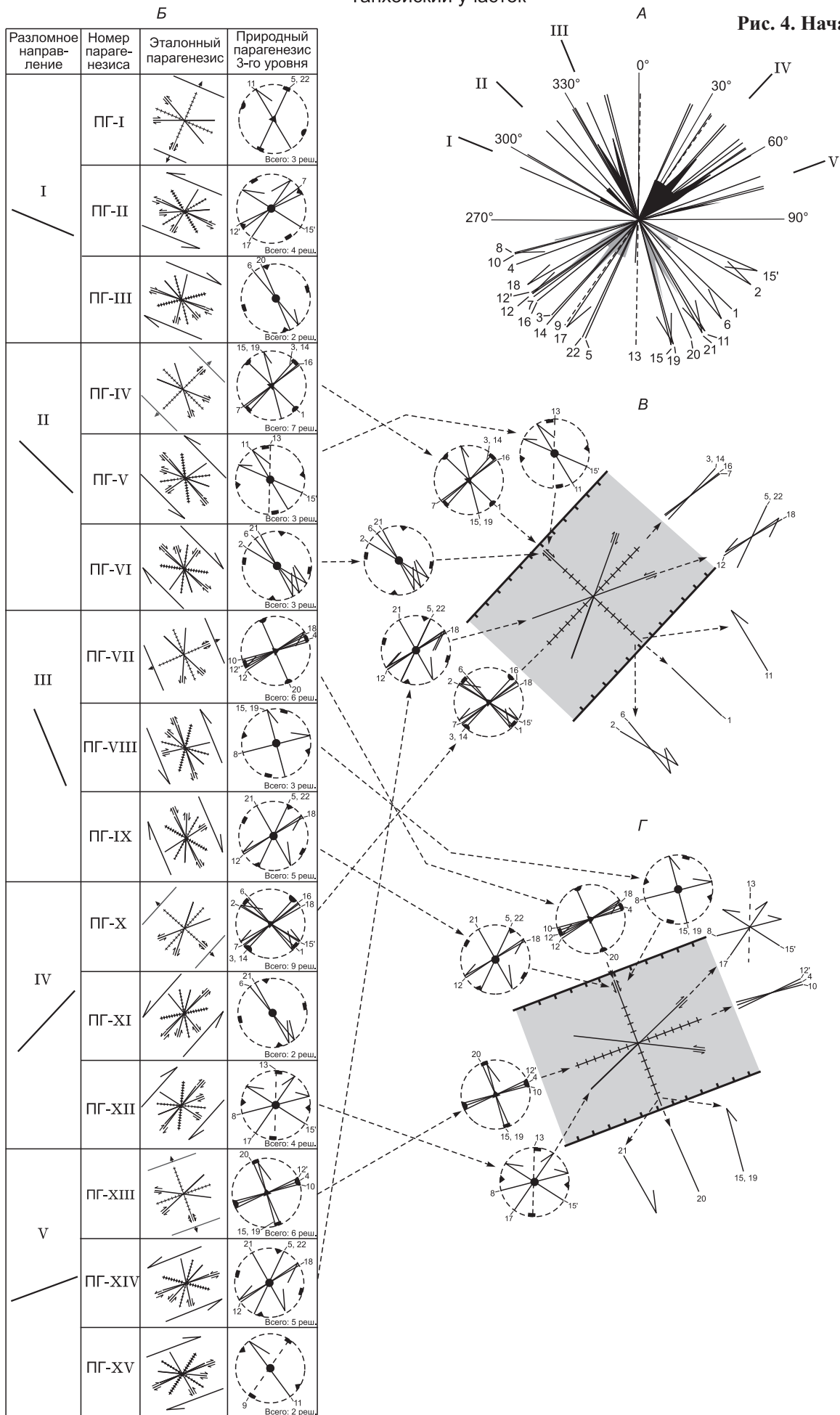
Танхойский участок включает 17 точек наблюдения, их структурно-парагенетический анализ на базе сопоставления эталонов с круговыми диаграммами трещиноватости послужил основанием для 24 решений локального уровня о формировании разрывной сети отдельно взятого коренного выхода в зоне скалывания определенного типа и пространственной ориентировки. Далее осуществлялась серия последовательных операций, позволяющих перейти к решениям более низкого (регионального) уровня путем анализа данных, полученных в результате обработки материалов по всем точкам наблюдения.

Вначале каждое из решений локального уровня в виде линии (см. рис. 3, В), разновидность которой отражает тип зоны скалывания, использовалось для построения розы-диаграммы (рис. 4, А). Ее анализ свидетельствует о существовании на Танхойском участке пяти направлений (I—V) зон разломного ранга, в пределах которых дислоцировались осадки. Затем каждому из них были поставлены в соответствие полные парагенезисы разрывов 2-го порядка, аналогичные в механическом смысле показанному на рис. 1, А, а в структурно-геологическом отношении представляющие зоны сброса, правого и левого сдвигов (см. рис. 4, Б, столбец 3). Взбросовые эталоны в этом ранговом анализе не участвовали, так как из 24 решений лишь две зоны скалывания (решения 9 и 13) формировались при сжатии. Далее осуществлялась сортировка всех локальных решений участка на предмет их принадлежности по ориентировке и типу к одному из пятнадцати возможных парагенезисов (ПГ- I... ПГ- XV). Эти парагенезисы мы относим к высшему (3-му), но уже региональному уровню, поскольку, в отличие от локальных, они были получены по серии точек наблюдения.

Как видно (см. рис. 4, Б, столбец 4), все пятнадцать парагенезисов 3-го регионального уровня после сортировки оказались представлены локальными решениями, но в разной степени. Кроме того, многие из решений фигурируют в 2, 3 и даже 4 парагенезисах, что свидетельствует о явной случайности некоторых совпадений. Это в совокупности с большим количеством и значительным разнообразием (вплоть до противоположности) динамических обстановок формирования региональных парагенезисов в молодых по возрасту отложениях является показателем существования еще одного, более низкого масштабного уровня тектонических напряжений и соответствующего ему крупного ранга зон скалывания. Для его реконструкции были осуществлены дальнейшие шаги порангового анализа, причем на данном

Танхойский участок

Рис. 4. Начало



Усть-Баргузинский участок

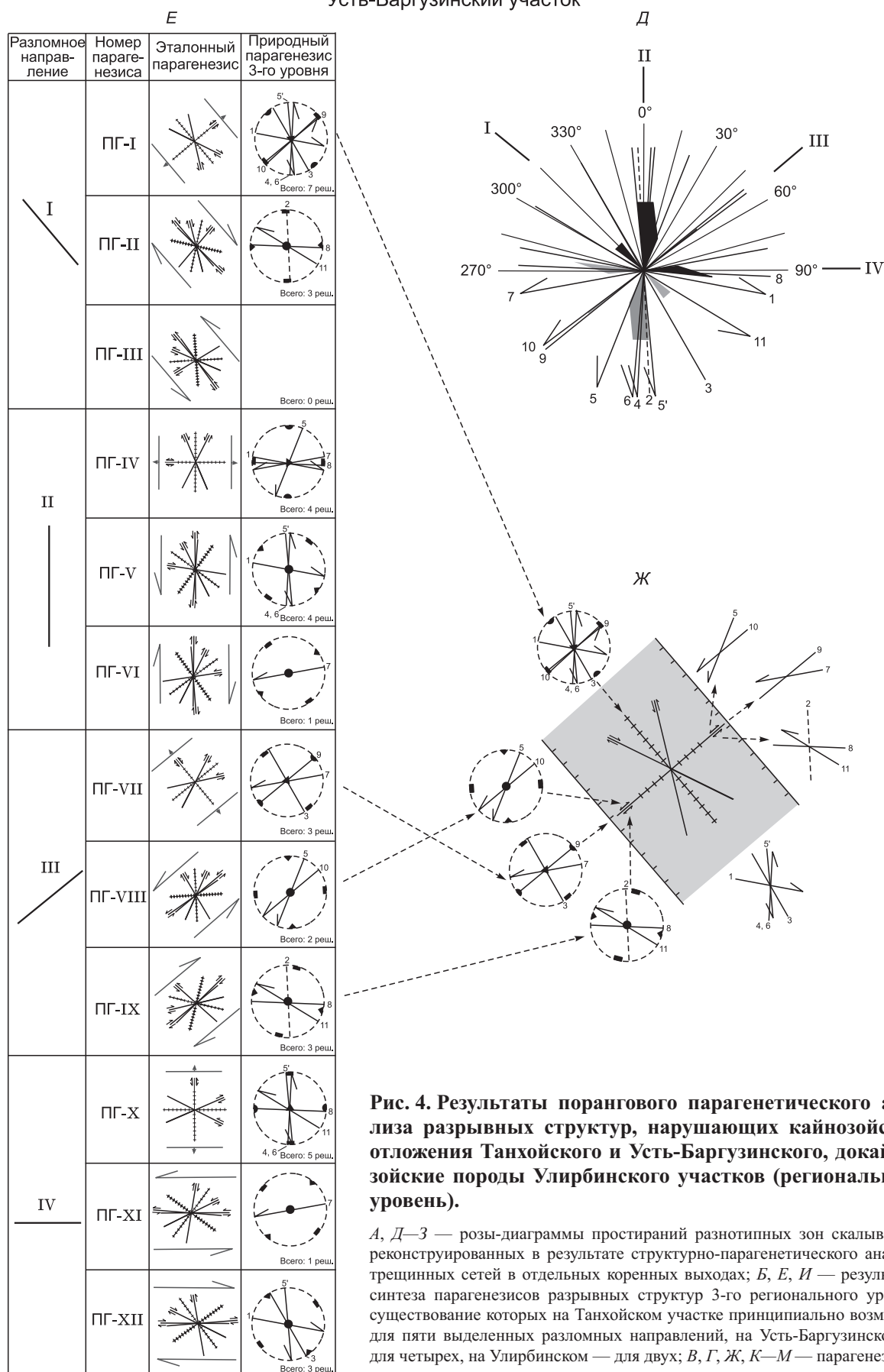
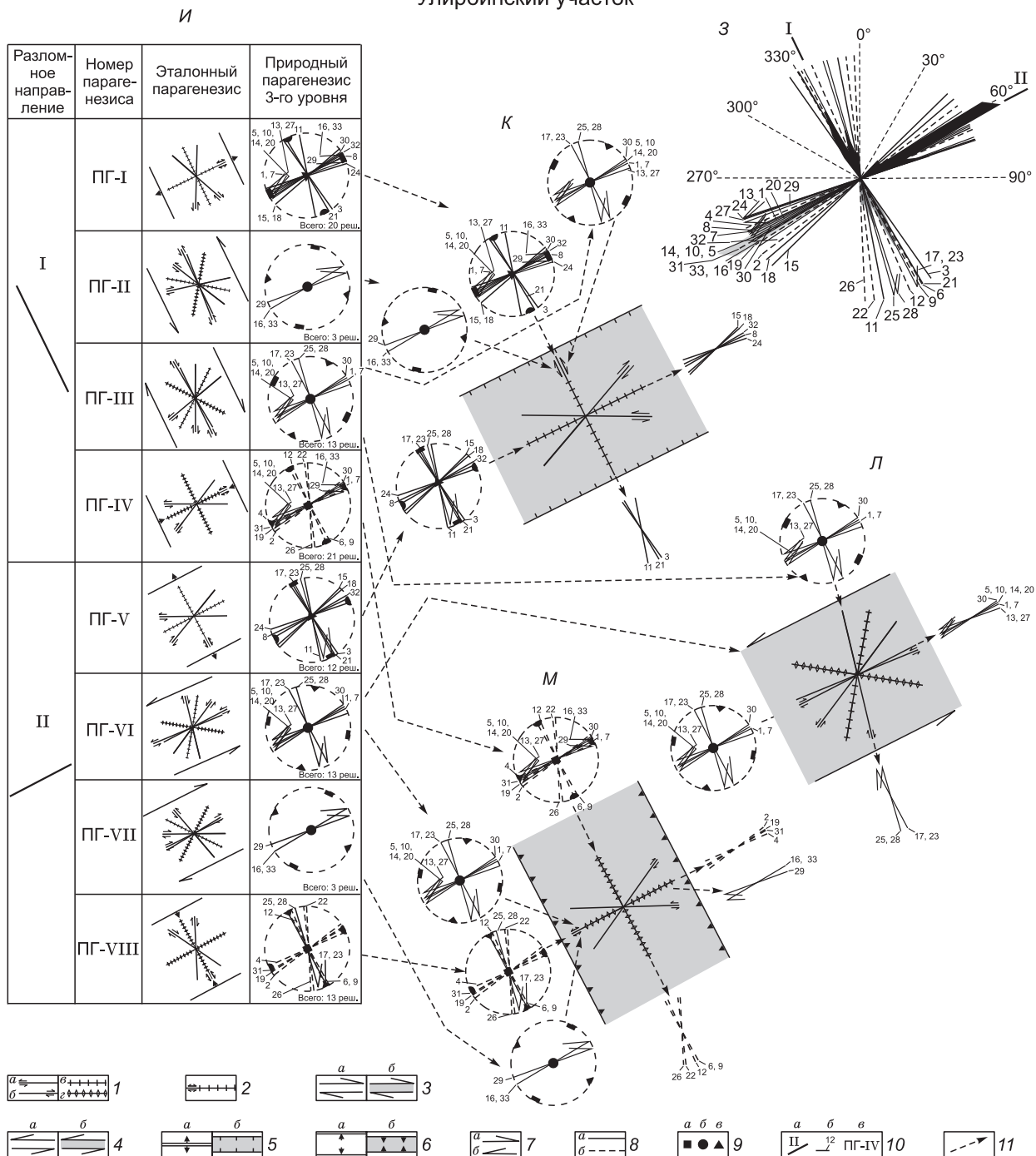


Рис. 4. Результаты порангового парагенетического анализа разрывных структур, нарушающих кайнозойские отложения Танхойского и Усть-Баргузинского, докайнозойские породы Улирбинского участков (региональный уровень).

А, Д-З — розы-диаграммы простираний разнотипных зон скальвания, реконструированных в результате структурно-парагенетического анализа трещинных сетей в отдельных коренных выходах; Б, Е, И — результаты синтеза парагенезисов разрывных структур 3-го регионального уровня, существование которых на Танхойском участке принципиально возможно для пяти выделенных разломных направлений, на Усть-Баргузинском — для четырех, на Улирбинском — для двух; В, Г, Ж, К-М — парагенезисы

Улирбинский участок



разрывных структур 2-го регионального уровня, отражающие существование на Танхойском участке обстановок растяжения земной коры в направлениях СЗ—ЮВ (*В*) и ССЗ—ЮЮВ (*Г*), на Усть-Баргузинском — в направлении СВ—ЮЗ (*Ж*), на Улирбинском — в направлении СЗ—ЮВ (*К*), сжатия в направлении СВ—ЮЗ (*М*) и левостороннего сдвига для структур северо-восточного простирания (*Л*).

I — система разрывных структур 2-го порядка с левосдвиговым (*a*), правосдвиговым (*б*), сбросовым (*в*) или взбросовым (*г*) характером перемещения крыльев; 2 — система разрывных структур 2-го порядка, характеризующихся одинаковой пространственной ориентировкой, но отличающихся характером перемещения крыльев (сброс; левый или правый сдвиги); 3—6 — зона скальвания 1-го порядка, развитие которой на 3-м (*a*) или 2-м (*б*) региональных уровнях структурообразования приводит к правому сдвигу (3), левому сдвигу (4), растяжению (5) или сжатию (6) земной коры; 7, 8 — ориентировка и тип (7 — право- (*a*) или левосдвиговая (*б*); 8 — сбросовая (*a*) или взбросовая (*б*) зоны скальвания, реконструированные в результате структурно-парагенетического анализа трещинной сети отдельного коренного выхода; 9 — выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений $\sigma_{\text{раст.}}$ (*a*), σ_2 (*б*) и $\sigma_{\text{сж.}}$ (*в*); 10 — нумерация разломных направлений (*a*), решений о зоне скальвания 1-го порядка на локальном уровне (*б*) и парагенезиса разрывных структур 3-го регионального уровня; 11 — стрелки, позволяющие проследить отдельные шаги порангового анализа (пояснение см. в тексте).

этапе исходным фактическим материалом являлся набор решений 3-го регионального уровня (см. рис. 4, Б). Это 15 разновидностей напряженного состояния, с которыми генетически связаны три типа разломов (сбросы, правые и левые сдвиги) запад-северо-западной (I), северо-западной (II), север-северо-западной (III), северо-восточной (IV) и восток-северо-восточной (V) ориентировок.

Для перехода на следующий уровень необходимо из имеющихся разломных зон скальвания 2-го порядка выделить представителя, наиболее проявленного в породах изучаемого участка. Именно он по типу может с наибольшей вероятностью соответствовать главному сместителю, т.е. разлому 1-го порядка. В связи с этим сопоставление 15 парагенезисов 3-го регионального уровня проводилось, во-первых, по общему количеству представляющих каждый из них локальных решений и, во-вторых, наличию среди последних того, который соответствует Y -сколам главного сместителя. Поскольку ПГ-Х представлен наибольшим (9 решений) количеством частных решений (см. рис. 4, Б), четыре из которых отвечают за сколы главного сместителя (3, 7, 14, 16), он был рассмотрен в первую очередь в качестве ответственного за 2-й региональный уровень структурообразования на Танхойском участке (см. рис. 4, Б). Справедливость данного выбора не вызывает сомнений, так как соответствующие ему по ориентировке (ЮЗ—СВ) и типу (сброс) разломные зоны образуются при растяжении в направлении СЗ—ЮВ, т.е. в обстановке, господствующей на современном этапе формирования Байкальского рифта. Практически все разломные направления эталонного парагенезиса зоны растяжения северо-восточной ориентировки (см. рис. 4, Б) проявлены на исследуемой площади, так как они выражены в виде выделенных ранее парагенезисов 3-го уровня (см. рис. 4, Б). Это продольные сбросы (ПГ-Х), поперечные северо-западные сбросы (ПГ-IV), левосторонние восток-северо-восточные сдвиги (ПГ-XIV), а также поперечные правые (ПГ-VI) и левые (ПГ-V) сдвиги трансформационного типа, обеспечивающие кинематическую согласованность перемещений по крупным продольным сбросам [Семинский, 2003]. Для примера нами приведено по одному решению, представляющему каждое из этих направлений на локальном уровне отдельных коренных выходов (см. рис. 3).

Байкальское растяжение в направлении СЗ—ЮВ не является единственной динамической обстановкой 2-го регионального уровня, наложившей отпечаток на дислоцированность кайнозойских осадков Танхойского участка, поскольку многие парагенезисы 3-го уровня и участвующие в них локальные решения не нашли в ее рамках своего отражения. Согласно использованным выше правилам, в качестве ключевого представителя еще одной обстановки 2-го регионального уровня следует выбрать ПГ-XIII (6 решений), так как больший по количеству локальных решений ПГ-IV (7 решений) уже участвовал в реализации регионального байкальского растяжения, а в равном по количеству решений ПГ-VII (6 решений) направление главного сместителя представлено только одним решением. Кроме того, сбросовые зоны, составляющие ПГ-XIII, отражают танхойское направление разрывов (в том числе разлом Черского), предопределивших прямолинейность береговой линии оз. Байкал на участке исследований. Данная динамическая обстановка (см. рис. 4, Г) подобна предыдущей не только по типу (растяжение), но и по набору парагенезисов 3-го регионального уровня, представляющих продольные восток-северо-восточные сбросы (ПГ-XIII), поперечные север-северо-западные сбросы (ПГ-VII), правосторонние северо-восточные сдвиги (ПГ-XII), а также поперечные правые (ПГ-IX) и левые (ПГ-VIII) сдвиги трансформационного типа.

Две выявленные в результате парагенетического анализа обстановки 2-го регионального уровня охватывают 23 из 24 локальных решений. Пять парагенезисов 3-го уровня (I—III, XI, XV), оставшихся не охваченными поранговым анализом, как правило, представлены небольшим количеством уже использованных решений локального уровня и, таким образом, могут далее не рассматриваться. То же относится и к не участвовавшему в анализе решению 9 (см. рис. 4, А), так как для интерпретации происхождения кайнозойской взбросовой зоны северо-восточной ориентировки фактического материала недостаточно.

Обстановки 2-го регионального уровня включают различные парагенезисы 3-го уровня (см. рис. 4), но локальные решения зачастую повторяются в разных комбинациях. Это связано с их механическим подбором по принадлежности к тому или иному члену парагенезиса регионального уровня и вряд ли полностью соответствует реальности. Поэтому после получения главного результата структурно-парагенетического анализа о существовании на Танхойском участке двух обстановок 2-го регионального уровня все парагенезисы 3-го уровня были скорректированы так, чтобы каждое локальное решение участвовало в них только один раз. Причиной, по которой конкретное решение оставалось в составе парагенезиса, была его принадлежность вначале к Y -сколам главного сместителя, затем к сколам 1-й серии (если в другом парагенезисе оно не фигурировало как Y -скол) и т.д., поскольку именно эта последовательность отражает частоту встречаемости разрывов 2-го порядка в строении зоны скальвания. Полученные «усеченные» парагенезисы (см. рис. 4, Б, Г, справа), как показал анализ спрямленных элементов рельефа и известных разломов в окрестностях изученных коренных выходов, в существенной степени отражают структурную ситуацию на местности. При этом возможность активизации одних и

тех же зон скалывания в разных типах напряженного состояния остается реальной, что подтверждается и изложенными ниже данными анализа еще одной характеристики трещинной сети, которая, как и ориентировки отдельных систем, может быть изучена по данным массового замера.

Этой характеристикой являются угловые соотношения между классической парой сопряженных сколов, определяющиеся условиями разрывообразования и длительностью однонаправленного внешнего воздействия [Николаев, 1992; Семинский, 2003]. Поскольку условия деформирования, влияющие на реологическое поведение байкальских осадков, вряд ли существенно менялись в кайнозое, различия углов скалывания следует объяснять вторым фактором, т.е. близкий к 90° и тем более тупой угол (при оси сжатия) между сопряженными системами связан с их разворотом под длительным однонаправленным воздействием, что особенно типично для слабосцементированных отложений.

На Танхойском участке подавляющее большинство решений с тупым углом при оси сжатия (3, 11, 12, 18, 21) относится к первому из выявленных парагенезисов 2-го регионального уровня (собственно байкальскому), и лишь один случай (10) практически перпендикулярного взаимоотношения характерен для второго (танхойского) парагенезиса (см. рис. 4, В, Г). Так как обстановки формирования обоих парагенезисов по типу, рангу и возрасту аналогичны, наличие «аномальных» углов почти у половины решений байкальского парагенезиса связано с его унаследованным развитием. При этом, учитывая, что 4 из 5 случаев относятся к сдвигам, и 2 из них (решения 12 и 18) представляют левосторонние восток-северо-восточные сдвиги, именно эта динамическая обстановка могла быть ключевой на ранних этапах деформации кайнозойских отложений Танхойского участка.

Данный вывод согласуется с представлениями о доминировании сдвига на раннеорогенной стадии развития Байкальского рифта [Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997]. Это был левосторонний сдвиг по субширотному направлению, что подтверждается расположением Танхойского участка на восточном продолжении юго-западного сегмента Байкальской рифтовой системы (см. рис. 2, А). Кроме того, 4 из 5 систем разломов 2-го порядка у парагенезисов субширотной левосдвиговой зоны (см. рис. 2, Б) и северо-восточной зоны растяжения (см. рис. 2, В) аналогичны по пространственной ориентировке при совпадении трех из них и по морфогенетическому типу. Среди последних наибольшей распространенностью (см. рис. 2, Б, В) характеризуются восток-северо-восточные левосторонние сдвиги (танхойское направление), которые в более древнем парагенезисе были R-сколами, а при растяжении выполняли функции *n*-сколов. Именно поэтому данная система зон скалывания представлена наибольшим количеством полученных посредством структурно-парагенетического анализа решений, для них ввиду длительного развития в условиях однотипного напряженного состояния характерно образование аномально больших ($\geq 90^\circ$) углов между сопряженными системами в парагенезисах трещинного уровня.

В целом поранговый структурно-парагенетический анализ позволил установить, что иерархию поля напряжений Танхойского участка представляют шесть уровней, рассмотренных ниже по мере перехода от низшего к высшим. Наибольший след в дислоцированности кайнозойских отложений оставила обстановка растяжения 1-го регионального уровня, отражающая современное раскрытие всего Байкальского рифта в генерализованном направлении СЗ—ЮВ. По-видимому, она унаследовала и усложнила разломную сеть, сформировавшуюся на ранней стадии развития БРС в аналогичной по иерархическому уровню обстановке субширотного левостороннего сдвига. Отличия в ориентации отдельных сегментов рифта обусловили существование в позднем кайнозое двух обстановок 2-го регионального уровня, для них растяжение происходит в несколько отличающихся направлениях. Это установленное на Танхойском участке и характерное для Южно-Байкальской и Центральной впадин расширение соответственно в север-северо-западном и северо-западном направлениях, а также запад-северо-западное растяжение, появление которого следует ожидать в окрестностях Северо-Байкальской котловины. Среди парагенезисов 3-го регионального уровня высокую значимость, наряду с продольными сбросами, имеют поперечные зоны, по которым происходят сдвиги трансформационного характера и/или растяжение в северо-восточном направлении.

Эти же типы структурных элементов доминируют среди зон скалывания локального уровня, что подчеркивается в современном рельефе в виде восток-северо-восточных и северо-восточных уступов, а также поперечных к ним спрямленных при впадении в озеро долин рек Переемная, Осиновка, Селенгуша, Аносовка и других. Одна или две локальные обстановки 1-го уровня контролируют формирование сети трещин конкретного выхода кайнозойских отложений, причем сложность ее строения определяется образованием в соответствии с каждым типом напряженного состояния от 2 до 4 разрывных направлений 2-го порядка. Внутреннюю структуру каждого из них представляет парагенезис из, как правило, трех систем трещин (2-й уровень). Более мелкие разрывы не анализировались в ходе наших исследований, хотя следует предположить, что возникновению каждой трещины предшествовало развитие определенным образом ориентированных микротрещин в соответствии с напряженным состоянием 3-го

уровня. Таким образом, насчитывается 3 региональных и 3 локальных уровня тектонических напряжений, на каждом из них происходило формирование разрывных структур изученного региона от Байкальского рифта в целом до трещин конкретного выхода кайнозойских отложений на Танхойском участке.

Усть-Баргузинский и Приморский участки представлены точками наблюдений в позднекайнозойских отложениях, сформировавшихся на позднеорогенной стадии развития рифта. Как следствие этого, ось сжатия в стресс-тензорах, реконструированных на основе структурно-парагенетического анализа, расположена в остром угле между сопряженными системами трещин.

Согласно представленной выше методике, для Усть-Баргузинского участка было получено 12 локальных решений, выделено 4 главных разломных направления (см. рис. 4, *Д*), для них составлены все возможные парагенезисы сбросовых, лево- и правосторонних зон 3-го регионального уровня (см. рис. 4, *Е*, столбец 4), из которых четыре (ПГ-I, VII, VIII и IX) образовали главный для данной территории парагенезис 2-го уровня, связанный с растяжением в направлении СВ—ЮЗ (см. рис. 4, *Ж*). Очевидно, что она в качестве составляющей входит в обстановку растяжения 1-го регионального уровня (СЗ—ЮВ), контролирующую развитие Байкальского рифта и, в частности, северо-восточных сбросов Усть-Баргузинского участка (см. рис. 2, *А*). Для Приморского участка было получено 4 решения локального уровня (зоны северо-восточного сброса, северо-западного сдвига, а также диагональных к ним правых и левых сдвигов), соответствующих растяжению земной коры в направлении СЗ—ЮВ.

Результаты изучения кайнозойских отложений в главном подтверждают выводы, сделанные ранее для Усть-Баргузинского [Черемных, 2006; Лунина, Гладков, 2007] и Приморского [Семинский, Гладков, 1991; Разломообразование..., 1994; [Лунина и др., 2002]; Семинский, 2003; Черемных, Марковцева, 2007] участков: наличие четырех главных систем разломов; существенная роль в позднем кайнозое напряженных состояний сдвигового типа; их вторичность по отношению к обстановкам формирования сбросов; двойственный (сбросовый и сдвиговый) характер перемещений по поперечным северо-западным разломам и другие. Принципиально новым является определение положения каждого локального решения в единой для центральной части рифта иерархии позднекайнозойских обстановок структурообразования, которая, как и на Танхойском участке, характеризуется наличием шести уровней.

Кроме того, учитывая результаты изучения напряженного состояния докайнозойских пород Приольхонья [Семинский, 1994, 2003], можно считать однозначно установленным доминирование продольного растяжения над поперечным в активном образовании трещиноватости и мелких разломов центральной части рифта. Это, по-видимому, связано с тем, что интенсивное на поздних этапах рифтинга сводообразование и удлинение в горизонтальном направлении могло беспрепятственно реализоваться путем сбросовых движений по уже имевшимся у границы Сибирского кратона крупным продольным разломам, в отличие от поперечных сместителей, ранг и количество которых не соответствовали необходимости в продольном растяжении [Ламакин, 1968]. Как следствие этого, происходит интенсивное формирование северо-западных сбросов, подчеркнутых различными элементами береговой полосы оз. Байкал. Обычно это долины водотоков, а на участках резкого преобладания продольного растяжения над поперечным — структуры, подобные перешейку п-ова Святой Нос, относительно которого Чивыркуйский и Баргузинский блоки оказались опущены.

Улирбинский участок удобен для рассмотрения, так как полученные при его изучении результаты в полной мере отражают закономерности, установленные для формирования трещиноватости в докайнозойских породах профиля, пересекающего Приольхонье субпараллельно прол. Ольхонские Ворота (см. рис. 2, *А*). Как видно (см. рис. 4, *З*), разломные направления, выявленные в результате сравнения диаграмм трещиноватости Улирбинского участка с эталонами, образуют две взаимно-перпендикулярные системы. Одна из них (II) объединяет наибольшее количество решений и представлена в обнажениях разноранговыми разломными сместителями. Другая система (I) проявляется в скальных породах участка лишь зонами повышенной трещиноватости.

В итоге применения приемов порангового анализа, отработанных на участках распространения кайнозойских отложений, для рассматриваемой территории выделено три региональных обстановки 2-го уровня, приводящих к формированию северо-восточных сбросов, северо-восточных левых сдвигов и северо-западных взбросов (см. рис. 4, *К—М*) соответственно. Вместе с этими преобладающими по распространенности ключевыми структурными элементами во всех парагенезисах участвуют поперечные зоны скалывания, характер перемещений в пределах которых отвечает в первом случае — сбросу, во втором — правому сдвигу, а в третьем — взбросу и правостороннему сдвигу (см. рис. 4, *К—М*, справа). Напряженные состояния трех представленных выше типов имеют место для всех изученных в Приольхонье участков земной коры, но в зависимости от интенсивности проявления использованных для их реконструкции двух субперпендикулярных направлений разрывов, решения об ориентировке зоны скалывания 1-го порядка различны. По совокупности данных можно сделать вывод, что при развитии трещиноватости в скальных породах центральной части рифта доминировали напряжения, под влиянием

которых формировались сбросовые зоны северо-западного простирания, северо-восточные левосторонние сдвиги, а также зоны взбросов (надвигов) как северо-западной, так и северо-восточной ориентировки.

Угловые соотношения между сопряженными системами трещин в частных решениях достаточно определенно отличают парагенезисы 2-го регионального уровня по особенностям формирования. Для менее проявленной в докайнозойских породах улирбинского участка обстановки растяжения угол, в котором располагается ось сжатия, острый. Для двух других обстановок он тупой, за исключением нескольких решений с левосторонним сдвигом в непосредственной близости от зон тектонитов, что можно объяснить их вспарыванием на последней стадии развития рифта.

Сопоставление результатов структурно-парагенетического анализа по кайнозойским и скальным породам позволяет сделать вывод, что установленные обстановки формирования трещиноватости соответствуют разным временным этапам. В докайнозойское время это было сжатие в направлении СЗ—ЮВ, под воздействием которого в Западном Прибайкалье образовался крупный складчато-надвиговый пояс. В кайнозойе имела место сдвиговая обстановка с левосторонними перемещениями по зонам северо-восточной ориентировки. Сформировавшиеся при этом разломы претерпели активизацию, как сбросы на последнем собственно рифтовом этапе, что практически не сопровождалось возникновением в докайнозойских породах новых систем трещин, так как их сеть в своей основе уже была создана.

МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

Исследование «немой» трещиноватости Прибайкалья подтвердило наличие главных типов напряженного состояния, выявленных ранее на основе применения традиционных методов анализа структурно-геологической информации [Мазукабзов, Сизых, 1987; Шерман, Днепровский, 1989; Александров, 1990; Семинский, Гладков, 1991; Разломообразование..., 1994; Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; Лунина и др., 2002; Семинский, 2003; Черемных, 2006; Лунина, Гладков, 2007]. Они возникли в результате докайнозойского сжатия, а также сдвига и растяжения, имевших место, соответственно на ранне- и позднеорогенной стадиях развития БРС. Это свидетельствует о достоверности результатов, получаемых на основе применения структурно-парагенетического анализа к обработке массовых замеров повсеместно распространенной трещиноватости. Кроме того, новый подход обогатил существующие представления серией особенностей структурообразования на кайнозойском этапе рифтогенеза за счет возможностей реконструкции в наиболее молодых отложениях побережья оз. Байкал напряженных состояний разного масштабного уровня. Ниже эти особенности иллюстрируются на примере иерархического ряда структур от Байкальского рифта в целом до системы трещин в одном из коренных выходов долины р. Переемная (рис. 5), по правому борту которой проходит разлом северо-западной ориентировки.

Как показал поранговый структурно-парагенетический анализ, в условиях рифтогенеза на 1-м региональном уровне (растяжение в направлении СЗ—ЮВ) могут формироваться разломные и неразломные зоны скалывания различных ориентировок и практически любых типов. Это связано с формированием разноранговых разрывных структур под влиянием тектонических напряжений шести главных иерархических уровней: трех региональных и трех локальных (см. рис. 5). Кроме того, важным фактором является наличие древних структурно-вещественных неоднородностей. Так, на 2-м региональном уровне при доминировании растяжения в направлении СЗ—ЮВ (аналог 1-го уровня) имеют место обстановки, обусловленные растяжением по азимутам ССЗ—ЮЮВ (см. рис. 4, Г, рис. 5, Д) и СВ—ЮЗ (см. рис. 4, Ж). Происхождение первой из них связано с коррекцией позднекайнозойского растяжения положением на Танхойской площади сравнительно древних разломов восток-северо-восточной ориентации, сформировавшихся как левосторонние сдвиги на раннеорогенной стадии развития БРС (см. рис. 2, Б). Вторая обстановка закономерно возникает во 2-м порядке и имеет исключительное значение для рифта, поскольку поперечное растяжение в его пределах существенно усиливается за счет сводообразования в течение последних 3.5 млн лет. Это отражается в механизмах очагов землетрясений [Сейсмотектоника..., 1968; Мишарина и др., 1977], а также в том, что напряженное состояние данного типа является определяющим для возникновения мелких разломов и трещиноватости в центральной части рифта.

На 3-м региональном уровне кроме продольного и поперечного (см. рис. 5, Г) растяжений всегда имеют место обстановки, где происходят подвижки правого или левого знака по поперечным сдвигам. Они компенсируют различия скоростей перемещений на главных продольных сбросах. Менее развиты косоориентированные сопряженные сдвиги: при растяжении в направлениях СЗ—ЮВ и ССЗ—ЮЮВ присутствует лишь одна из систем (см. рис. 4, В, Г), а в условиях поперечного растяжения они не зафиксированы (см. рис. 4, Ж). Эти результаты не только подтверждают материалы предшественников о существенной роли поперечных разломов в развитии структуры Байкальского рифта [Ламакин, 1968; Карбанов, Фиалков, 1987; Соловьев и др., 1989; Разломообразование..., 1994], но и однозначно свидетельствуют об их двойственном (сдвигораздвиговом) характере.

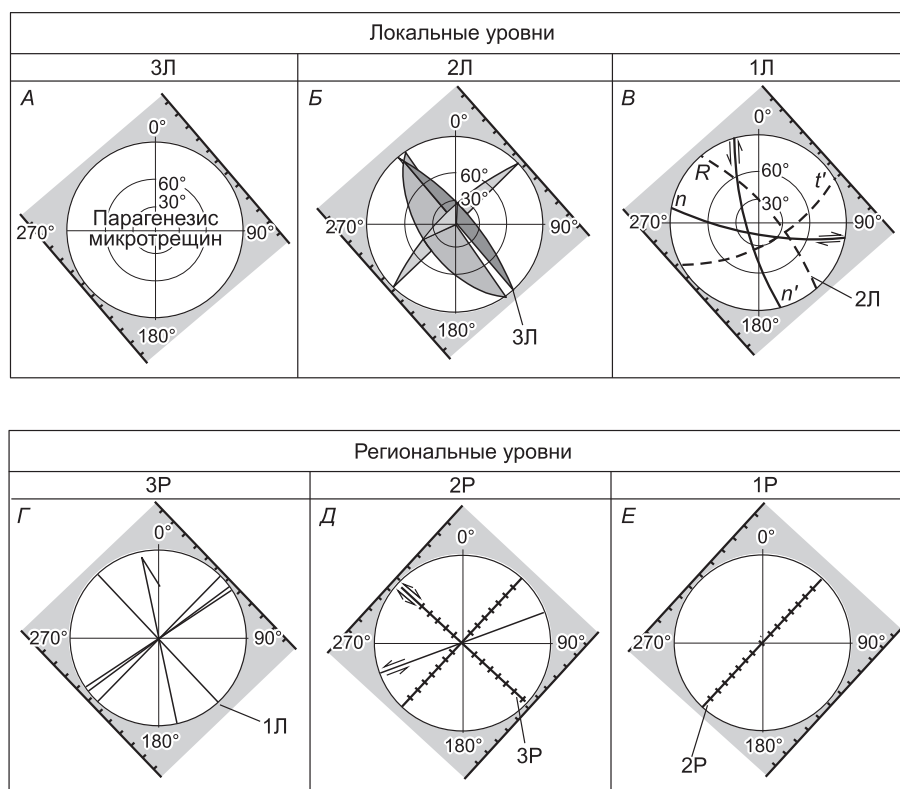


Рис. 5. Иерархический ряд разрывных структур от Байкальского рифта в целом (Е) до системы трещин (А) в одном из коренных выходов кайнозойских отложений на Танхойском участке (т.н. 11).

Структуры региональных уровней (1Р—3Р) представлены в соответствии с их простираниями (усл. обозн. см. на рис. 4), а структуры локальных уровней (1Л—3Л) — с их простираниями и падениями (усл. обозн. см. на рис. 3).

Ориентировки осей главных нормальных напряжений локального уровня реконструируются на основе анализа массового замера трещин в отдельно взятой точке наблюдения, что иллюстрируется на примере диаграммы, соответствующей т.н. 11 в долине р. Переемная (см. рис. 3). Несмотря на внешнюю хаотичность и кажущееся несоответствие полученных по сопряженным парам частных решений обстановкам регионального уровня, они укладываются в рамки строгой иерархии. Одна система наиболее мелких разрывов (3-й уровень) в совокупности с еще одной или чаще двумя другими направлениями трещин представляют парагенезис зоны трещиноватости 2-го уровня (см. рис. 5, А, Б). Структурные элементы данного типа, ориентируясь в соответствии с положением R -, n -, n' - и t' -сколов, принимают участие в строении зоны 1-го локального уровня (см. рис. 5, В). Как правило, происхождение наиболее значимых систем трещин в горном массиве связано с его деформацией в пределах одной или двух разновозрастных зон данного уровня иерархии (см. рис. 3). При этом в отложениях кайнозоя зоны обычно не представлены крупным сместителем; закономерно ориентированная трещиноватость в их пределах — результат перемещений блоков докайнозойского фундамента.

Между крайними членами представленного на рис. 5 иерархического ряда (система трещин—рифт в целом) каждому из уровней соответствуют разномасштабные зоны скалывания, начиная от ранга мелких разломов (см. рис. 5, Б) и заканчивая рифтообразующими тектоническими нарушениями (см. рис. 5, Д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Массовые структурно-геологические исследования кайнозойских отложений в нескольких участках береговой зоны оз. Байкал позволили установить особенности формирования трещинных сетей в пределах центрального сегмента Байкальской рифтовой системы. Несмотря на относительную молодость, их строение в большинстве изученных обнажений характеризуется существенной сложностью, проявляющейся в наличии многочисленных систем трещин. Детальное исследование их происхождения

посредством структурно-парагенетического анализа позволило установить, что определяющую роль в формировании трещиноватости кайнозойских отложений играли тектонические напряжения, непосредственно связанные с развитием БРС.

Многообразие типов напряженного состояния, послужившее причиной внешней хаотичности трещинных сетей в кайнозойских отложениях, связано с временной, пространственной и иерархической изменчивостью условий структурообразования, имевших место при рифтогенезе. *Временная нестациональность* приводит к наложению для одного и того же участка разнотипных напряженных состояний, свойственных развитию всего Байкальского рифта (например, условия сдвига на раннеорогенной и растяжения на позднеорогенной стадиях), и его отдельных тектонических элементов (вариации напряженного состояния при формировании в разломных зонах сколов разных серий). *Пространственная изменчивость* связана с влиянием древних структурных неоднородностей, когда крупные восток-северо-восточные разломы, сформировавшиеся на раннеорогенной стадии, послужили причиной проявления на позднеорогенной стадии север-северо-западного растяжения в Южно-Байкальской впадине при господстве в центральной части рифта растяжения в направлении СЗ—ЮВ. *Иерархическая изменчивость* тектонических напряжений проявляется в одновременном существовании на разных уровнях деформации кайнозойских осадков всех главных типов напряженного состояния с доминированием тех, в которых формируются сбросы и сдвиги. Впервые установлено наличие трех локальных и трех региональных уровней тектонических напряжений, в соответствии с которыми образовались структурные элементы от ранга Байкальского рифта в целом до уровня единичных трещин.

Перечисленные особенности тектонических напряжений и разрывных сетей в кайнозойских осадках Прибайкалья были установлены на основе применения структурно-парагенетического анализа нового типа. В данном случае он получил окончательную завершенность за счет разработки формализованных приемов реконструкции напряженных состояний разного масштабного уровня, что ранее осуществлялось либо по частоте встречаемости частных стресс-тензоров определенного типа, либо посредством анализа структур соответствующего ранга длины. В рамках данной методики посредством обработки массовых замеров повсеместно распространенной трещиноватости на предмет выделения определенных разрывных парагенезисов делается вывод о деформации изучаемого коренного выхода в зоне скалывания разломного ранга, а объединение подобных реконструкций по серии смежных обнажений — об их принадлежности к еще более крупным структурам. Эти разноранговые зоны скалывания могут быть разломными или представлять зоны повышенной трещиноватости, но в любом случае установление их типа и пространственной ориентировки имеет принципиальное значение для целей геодинамического анализа.

Таким образом, открываются новые возможности структурно-геологических исследований в недостаточно обнаженных регионах или на участках распространения слабосцементированных отложений, где, как правило, отсутствуют сместители разломного типа и кинематические маркеры у малых структурных форм. Степень достоверности и информативность результатов представленного парагенетического анализа определяются плотностью сети изученных коренных выходов. В этой связи создание дополнительных точек наблюдений и их обработка в рамках новой методики могут быть началом нового этапа углубления знаний о масштабных уровнях тектонических напряжений и в конечном итоге — механизмах формирования Байкальского рифта.

Авторы благодарны Ю.П. Бурзуновой за помощь в обработке полевого материала, а также другим сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН (к.г.-м.н. О.В. Луниной, А.А. Боброву, И.А. Потехиной), принимавшим активное участие в его сборе.

Работы проводились при поддержке СО РАН (проекты № 6, 7 программы ОНЗ-7), ФЦП (госконтракт 02.740.11.0446) и РФФИ (грант 08-05-98062).

ЛИТЕРАТУРА

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

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 536 с.

Гладков А.С., Черемных А.В., Лунина О.В. Деформации юрских отложений южной окраины Иркутского амфитеатра // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (2), с. 220—226.

Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М., Наука, 1979, с. 7—35.

Карабанов Е.Б., Фиалков В.А. Подводные каньоны Байкала. Новосибирск, Наука, 1987, 103 с.

Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М., Наука, 2004, 340 с.

Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М., Наука, 1968, 247 с.

Леви 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.

Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М., Наука, 1991, 144 с.

Лунина О.В., Гладков А.С. Разломно-блоковое строение и поля напряжений земной коры Баргузинского рифта в позднем кайнозое (Байкальский регион) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 775—789.

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.

Мазукабов А.М., Сизых В.И. О покровно-чешуйчатом строении Западного Прибайкалья // Геотектоника, 1987, № 3, с. 87—90.

Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 252 с.

Мишарина Л.А., Солоненко Н.В., Вертлиб М.Б. Некоторые особенности эпицентрального поля Байкальской рифтовой зоны в сопоставлении с механизмами очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмогеология Восточной Сибири. М., Наука, 1977, с. 43—61.

Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М., Недра, 1992, 295 с.

Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Изучение локального поля напряжений и прогноз вторичных нарушений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений с учетом третьего главного напряжения // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М., Наука, 1979, с. 163—184.

Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков, А.Н. Адамович, В.Ю. Буддо. Новосибирск, Наука, 1994, 263 с.

Расцветаев Л.М. Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений и деформаций земной коры // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., Наука, 1987, с. 171—181.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М., ИКЦ «Академкнига», 2007, 406 с.

Ружич В.В. Сеймотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1997, 63 с.

Сеймотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / Под ред. В.П. Солоненко. М., Наука, 1968, 252 с.

Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (9), с. 112—130.

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 244 с.

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

Семинский К.Ж., Гладков А.С. Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах // Геология и геофизика, 1991 (5), с. 130—140.

Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (3), с. 330—343.

Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005, 293 с.

Соловьев С.Л., Ковочев С.А., Мишарина Л.А., Уфимцев Г.Ф. Сейсмоактивность поперечных нарушений в Ольхон-Святоносской зоне оз. Байкал // Докл. АН СССР, 1989, т. 309, № 1, с. 61—64.

Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М., Недра, 1977, 144 с.

Черемных А.В. Разломно-блоковое строение земной коры и напряженное состояние в зонах региональных разломов восточного побережья озера Байкал // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (2), с. 250—258.

Черемных А.В., Марковцева О.В. Трещиноватость и напряженное состояние в зоне Приморского сброса (Западное Прибайкалье) // Изв. СО РАЕН секции наук о Земле. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2007, № 4 (30), с. 70—76.

Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М., Наука, 1983, 240 с.

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.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск, Наука, 1983, 112 с.

Anderson E.M. The dynamics of faulting. Edinburg, 1951, 206 p.

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

Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. Struct. Geol., 1985, v. 7. № 3/4, p. 437—457.

Mandl G. Mechanics of tectonic faulting. Models and basic concepts. Elsevier, 1988, 407 p.

Reading H.G. Characteristics and recognition of strike-slip fault systems // Spec. Publ. of the Internat. Ass. of Sedimentologists., 1980, v. 4, p. 7—26.

Park R.G. Foundations of structural geology. London, Chapman & Hall, 1997, 202 p.

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. Elf Explor. Prod., 1997, v. 21, № 2, p. 435—455.

Sibson R.H. Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes // J. Struct. Geol., 1998, v. 20, № 5, p. 655—660.

The encyclopedia of the solid Earth sciences / Ed. P. Kearey. Oxford, Backwell Sci. Pub., 1993, 713 p.

Wrench fault tectonics / Ed. A.G. Sylvester. Tulsa, Oklahoma USA, 1984, 313 p.

Рекомендована к печати 31 августа 2010 г.

А.Д. Дучковым

Поступила в редакцию 20 августа 2009 г.,

после доработки — 21 мая 2010 г.