

А.В. ЧЕРЕМНЫХ

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАЗЛОМЫ, БЛОКИ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ УСТЬ-БАРГУЗИНСКОГО РАЗЛОМНОГО УЗЛА (БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ СИСТЕМА)

Проведено картирование разломно-блокового строения и анализ напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры на восточном побережье оз. Байкал. Для полигона исследований построена карта разломно-блокового строения, которая детализирует представления о неоднородности верхней части земной коры. На карте отражены основные особенности блокового строения геологической среды. Выделены зоны региональных разломов, в пределах которых тектонофизическими методами изучены поля напряжений. Восстановление ориентировок векторов главных нормальных напряжений на этом участке, показало их значительные вариации в зависимости от расположения конкретного деформированного объема горных пород (обнажения) по отношению к активной на неотектоническом этапе развития территории разломно-блоковой структуры.

Для исследования закономерностей геодинамики необходимо детальное картирование строения земной коры. Важные неоднородности, оказывающие несомненное влияние на современную геодинамику верхней части земной коры, — дизъюнктивные образования: разломы и разломно-блоковые структуры, составляющие основу деструктивных зон литосферы [14]. Одно из проявлений дизъюнктивной тектоники, наряду с разноранговыми разломами и вычленимыми ими блоками, — зоны сочленения разломов или разломные узлы. По определению С.И. Шермана с соавторами [12], зоны сочленения разломов — места пересечения разрывов и окружающее его пространство, на котором проявляются геолого-геофизические процессы (структурные, метаморфические, гидрогеологические, геотемпературные и др.) и (или) изменения напряженного состояния, вызванные пересечением или сочленением различно ориентированных дислокаций.

Автором проведено изучение разломно-блокового строения и напряженного состояния верхней части земной коры в районе Усть-Баргузинского разломного узла, который образован сочленением региональных разломов, ограничивающих впадину оз. Байкал и долину р. Баргузин (рис. 1). Район исследования характеризуется хорошо выраженным в новейшей структуре разломно-блоковым строением. Контрастное проявление типично для разломов северо-западных бортов рифтовых впадин, а разломы юго-восточных бортов рифтов относительно слабо отражены в рельефе земной поверхности. Этим обстоятельством были определены комплексный характер исследования разломов, блоков, зон сочленения разломов и напряженного состояния верхней части земной коры, а также набор методических приемов для картирования разноранговых дизъюнктивных дислокаций.

### Методы исследования и фактический материал

Работы проведены в два этапа: 1) составление карты разломно-блокового строения района исследований с использованием топографических и геологических карт; 2) изучение тектонической трещиноватости в пределах обнажений горных пород и восстановление ориентировки осей напряжений по геолого-структурным данным.

#### *Картирование разломно-блокового строения.*

Блок — относительно монолитный объем горных пород, ограниченный разломами определенного иерархического уровня [14]. Относительно соседних активный блок перемещается по зонам разломов, как единое целое. Деформации верхней части земной коры отражены в рельефе. В связи с чем при картировании разломно-блокового строения за основу принята методика морфоструктурного районирования [5].

Вначале на топографических картах масштаба 1:200 000 отмечены линейные элементы рельефа — линеаменты — как продольные по отношению к хребтам, так и поперечные. Линеаменты в основном проводились по уступам склонов хребтов, а иногда по спрямленным участкам речных долин и местам смещения русел рек. Продольные линеаменты, как правило, следуют вдоль крупных элементов рельефа и отделяют горные хребты от впадин, т. е. разграничивают блоки, которым свойственны устойчивые поднятия и относительные опускания. Поперечные линеаменты чаще всего выражены прорывающими хребет долинами. Кроме того, иногда выделяют линеаменты внутри горных хребтов и впадин, которые отражают ступенчатое строение таких морфоструктур. Подобные линеаменты считались границами более низкого ранга. Далее на основе количественных характеристик горных хребтов, проверялась активность каждого конкретного линеамента. Согласно методике [5], при морфоструктурном районировании использо-

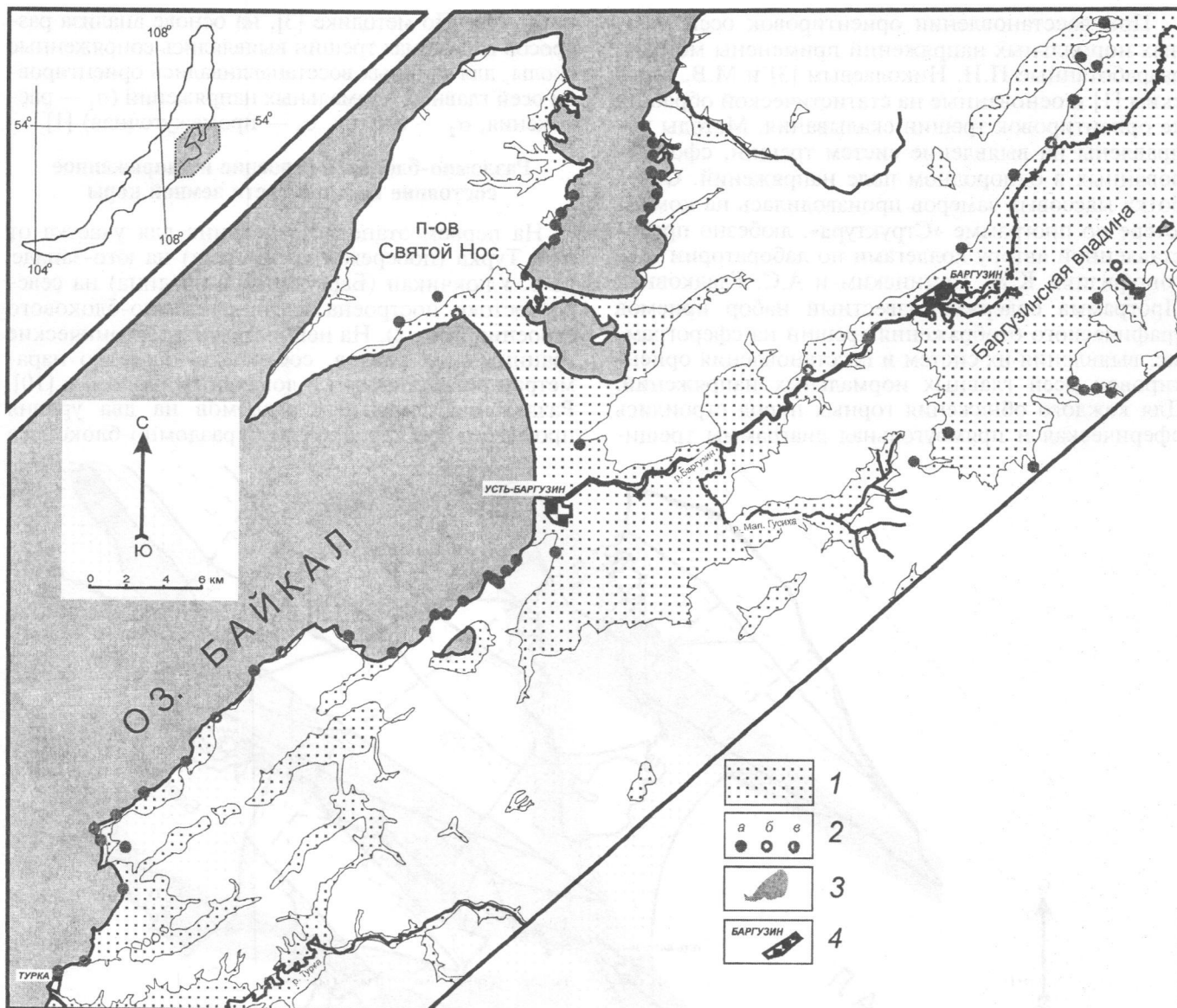


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения: 1 – кайнозойские отложения; 2 – точки наблюдения, в которых произведен массовый замер трещиноватости: а – коренные метаморфические и магматические породы, б – кайнозойские, в – породы докембрия, палеозоя и кайнозоя; 3 – озера; 4 – крупные населенные пункты

вались такие количественные показатели, как максимальная и средняя высоты осевой части хребта и простираение его оси. Скачкообразные изменения высоты хребта (на 0,1 от средней), сохраняющиеся на значительной его части по обе стороны от места скачка, и значительные ( $> 20^\circ$ ) отклонения простираения хребта считались обусловленными активными тектоническими движениями по разломам. Это позволило разграничить территорию на области с однородной структурой рельефа.

Для уточнения разломно-блокового строения, установленного геоморфологическими методами, сопоставлены результаты морфоструктурного районирования с данными на государственных геологических картах масштаба 1:200 000. Это позволило уточнить положение некоторых из установленных при морфоструктурном районировании границ блоков и выявить внутриблоковые разломы, не проявленные в рельефе и, по-видимому, неактив-

ные или слабо активные в неотектонический этап развития территории.

**Геолого-структурные наблюдения и методика изучения напряжений.** Геолого-структурные наблюдения проведены для картирования разломов и сбора материала по тектонической трещиноватости, необходимого для восстановления ориентировки осей главных нормальных напряжений. В коренных выходах горных пород фиксировались зоны дробления, скалывания и милонитизации. Изучение специфических структурных форм (сместители разломов, системы трещин, мелкие складки, будины) сопровождалось массовым замером элементов залегания трещин. В пределах изученной площади неминерализованные трещины изучены как в метаморфических и магматических породах докембрия и палеозоя, так и в осадочных верхнеплейстоценовых и голоценовых (рис. 1).

При восстановлении ориентировок осей главных нормальных напряжений применены методы, разработанные П.Н. Николаевым [3] и М.В. Гзовским [1] и основанные на статистической обработке ориентировок трещин скалывания. Методы направлены на выявление систем трещин, сформированных в однородном поле напряжений. Обработка массовых замеров производилась на компьютере по программе «Структура», любезно предоставленной автору коллегами по лаборатории тектонофизики К.Ж. Семинским и А.С. Гладковым. Программа содержит известный набор приемов графического отображения трещин на сферограмме, выявления их систем и восстановления ориентировок осей главных нормальных напряжений. Для каждого обнажения горных пород строились сферическая и прямоугольная диаграммы трещи-

новатости. По методике [3], на основе анализа разбросов в системах трещин выявлялись сопряженные сколы, для которых восстанавливались ориентировки осей главных нормальных напряжений ( $\sigma_1$  — растяжения,  $\sigma_2$  — сжатия,  $\sigma_3$  — промежуточная) [1].

### Разломно-блоковое строение и напряженное состояние верхней части земной коры

На первом этапе исследования для участка от пос. Турка (побережье оз. Байкал) на юго-западе до с. Улюкчикан (Баргузинская впадина) на северо-востоке построена карта разломно-блокового строения (рис. 2). На ней выделены тектонические границы трех рангов, соответствующие по параметрам региональным и локальным разломам [10]. Разделение локальных разломов на два уровня проведено при картировании разломно-блокового

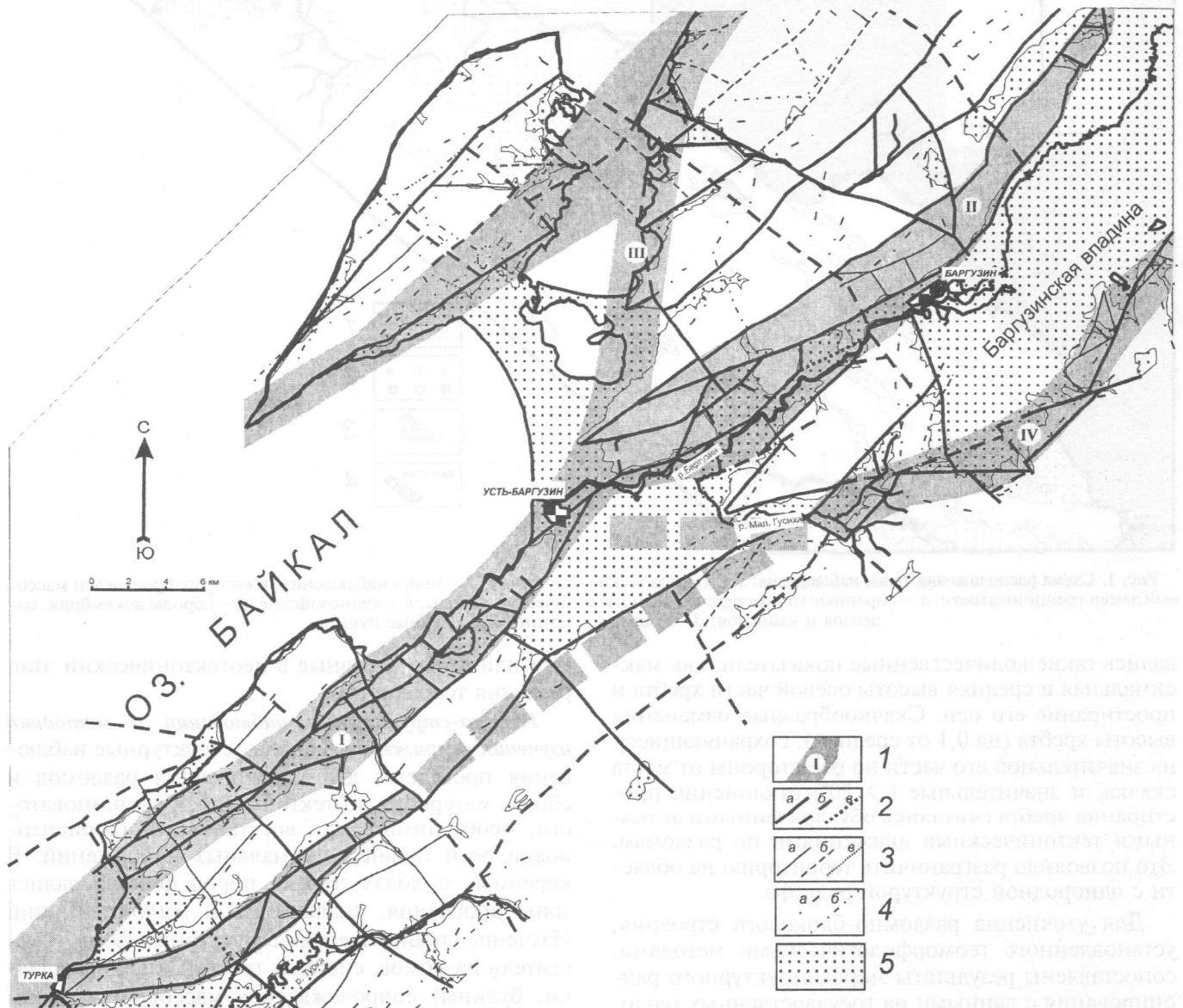


Рис. 2. Карта разломно-блокового строения верхней части земной коры в районе Усть-Баргузинского разломного узла: 1 — зоны региональных разломов: I — Турка-Усть-Баргузинский, II — южная кулиса Баргузинского разлома, III — Чивыркуйский, IV — Суво-Усть-Баргузинский; 2 — активные границы локальных блоков 1-го уровня (а — хорошо, б — слабо выраженные в рельефе, в — зафиксированные при геолого-структурных исследованиях); 3 — активные границы локальных блоков 2-го уровня (а — хорошо выраженные в рельефе, б — слабо, в — зафиксированные при геолого-структурных исследованиях); 4 — внутриблоковые разрывные нарушения (а — установленные; б — предполагаемые); 5 — кайнозойские отложения



строения. На выделении зон региональных разломов остановимся подробнее.

Разломы — объемные тела [2, 8, 10], характеризующиеся неравномерностью разрушения геологической среды как вкрест, так и вдоль простирания. Соседние блоки взаимодействуют в некотором объеме геологической среды, и лишь на участках, где имеется магистральный сместитель, основные перемещения могут быть сосредоточены в узкой линейной зоне. Для выявления зоны разлома, у которого не выражен магистральный сместитель, часто применяют показатель плотности мелких разрывов. На территориях с блоковым строением земной коры для этой цели возможен анализ размеров блоков, подобно выделению зон дробления [9]. Так, одна из закономерностей блокового строения земной коры — наличие преобладающих размеров неоднородностей [6]. Для локальных блоков восточного побережья оз. Байкал вычислены по методике [6] и проанализированы их размеры (рис. 3). Распределение блоков с поперечными размерами, меньшими 5 и 8 км в районе исследования, позволило установить зоны региональных разломов. Усть-Баргузинский разломный узел образуют зоны: 1) Турка-Усть-Баргузинского разлома, 2) южной кулисы Баргузинского разлома, 3) разлома юго-восточного обрамления Баргузинской впадины (далее Суво-Усть-Баргузинский), 4) Чивыркуйского разлома (рис. 2).

Для района исследований, как и для всей Байкальской рифтовой системы (БРС), характерно широкое распространение разломов северо-восточного и северо-западного простираний при подчиненном значении субмеридиональных и субширотных разрывов (рис. 4). В связи с чем при описании напряженно-деформированного состояния в зонах региональных разломов будем придерживаться следующей систематизации. Во-первых, напряженное состояние рассмотрим для каждого регионального разлома, как для обособленного объекта. Во-вторых, результаты восстановления напряжений изучим в зависимости от ориентировки локальных разрывов, вблизи которых произведены наблюдения, а также в местах сочленения разрывов.

Для Турка-Усть-Баргузинской разломной зоны восстановлено напряженное состояние в 23 точках наблюдения, из которых шесть располагались в озерных отложениях плейстоцена и голоцена. Полученные решения свидетельствуют о широком развитии сдвиговых деформаций в этой зоне, а условия растяжения проявлены в меньшей степени (рис. 5, I). Из 26 решений, касающихся ориентировки осей главных нормальных напряжений, только семь соответствуют обстановкам растяжения и растяжения со сдвигом, а остальные — сдвиговым. Сдвиговое напряженное состояние преобладает и в плейстоцен-голоценовых отложениях.

Все решения в зависимости от простираний локальных разрывов, вблизи которых произведены наблюдения, систематизированы. Так, для разрывов северо-восточного простирания наиболее типичны обстановки сдвига и растяжения со сдвигом с северо-западной ориентировкой оси растяжения

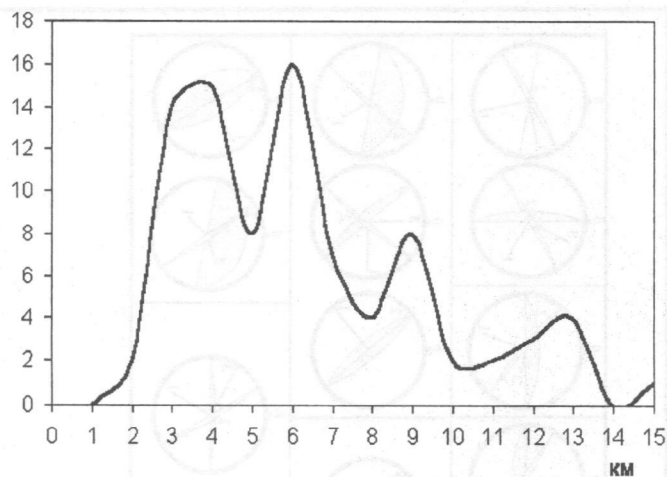


Рис. 3. Сглаженная гистограмма размеров локальных блоков 1-го уровня

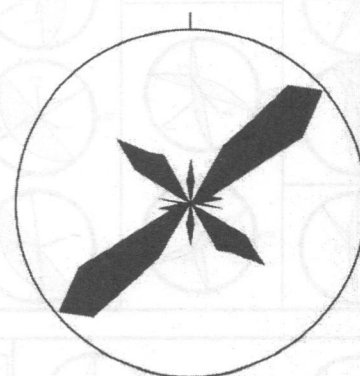


Рис. 4. Роза-диаграмма простирания активных границ локальных блоков 1-го уровня

и северо-восточной оси сжатия (рис. 5, I, А). Наоборот, в зонах влияния северо-западных разрывов оси растяжения ориентированы в северо-восточном и субширотном направлениях, а оси сжатия — в северо-западном и субмеридиональном (рис. 5, I, Б). Интересно, что узлам сочленения разрывов свойственно наличие нескольких решений об ориентировке осей напряжений (рис. 5, I, В). В разломных узлах фиксируются обстановки растяжения, растяжения со сдвигом и сдвига.

Для южной кулисы Баргузинского разлома в девяти точках наблюдения получены 10 решений об ориентировке осей напряжений, три решения из которых в кайнозойских образованиях. Из 10 решений восемь соответствуют сдвиговому полю напряжений, одно — растяжению, одно — растяжению со сдвигом (рис. 5, II). Сдвиговое напряженное состояние характерно для зоны основного сместителя южной кулисы Баргузинского разлома, которая обладает северо-восточным простиранием. Оси растяжения здесь имеют северо-западное и субмеридиональное направления, а оси сжатия северо-восточное и субширотное (рис. 5, II, А). В зонах локальных разломов северо-западного простирания фиксируются обстановки сдвига и растяже-

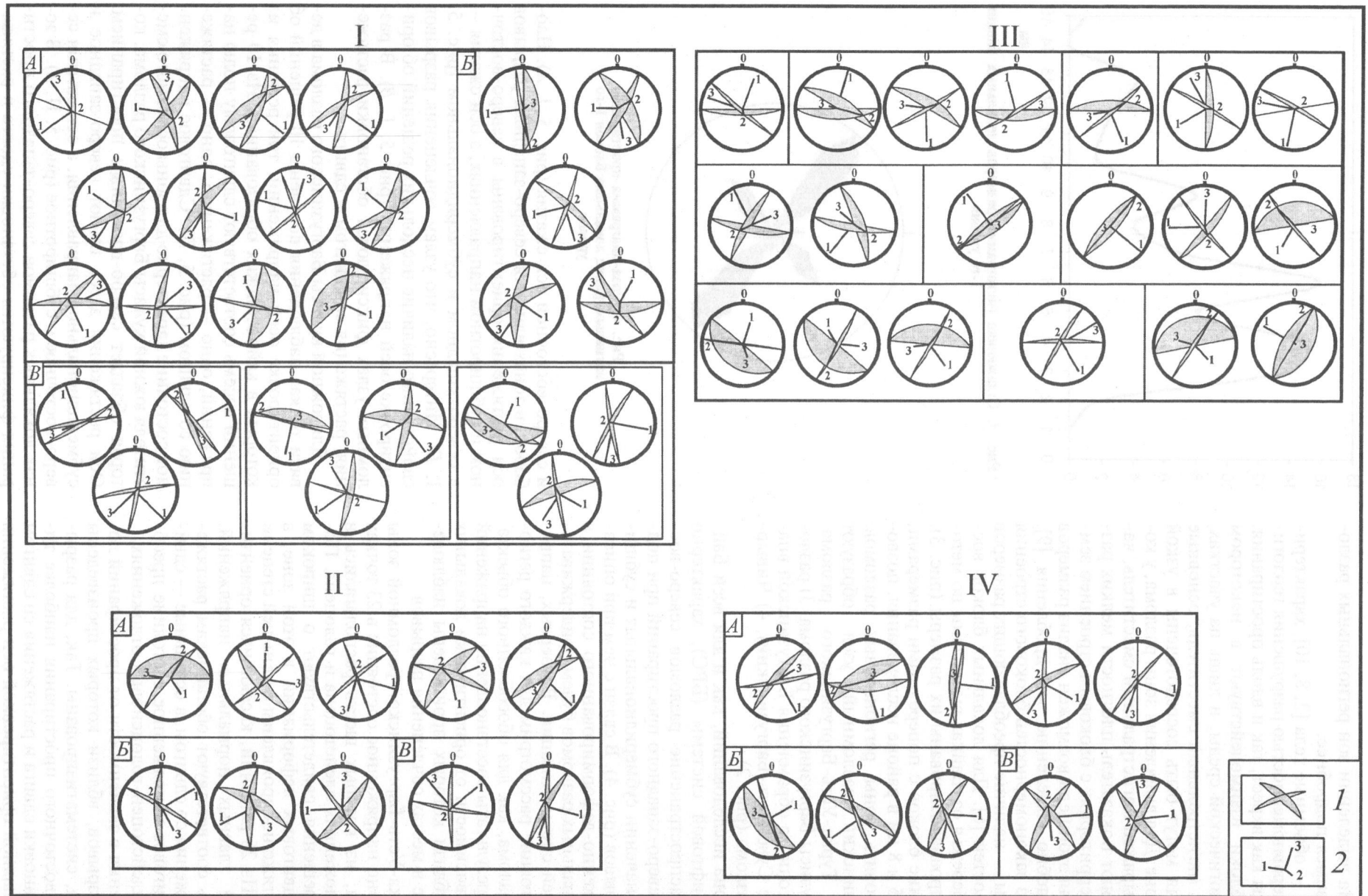


Рис. 5. Диаграммы ориентировки векторов главных нормальных напряжений в зонах региональных разломов: I – IV – региональные разломы (соответствуют рис. 2). А – в пределах локальных разрывов северо-восточного простирания; Б – локальных разрывов северо-западного простирания; В – в узлах сочленения локальных разрывов; диаграммы представлены в проекции верхней полусферы: 1 – сопряженные сколы; 2 – оси главных нормальных напряжений: 1 – растяжения, 2 – промежуточная, 3 – сжатия

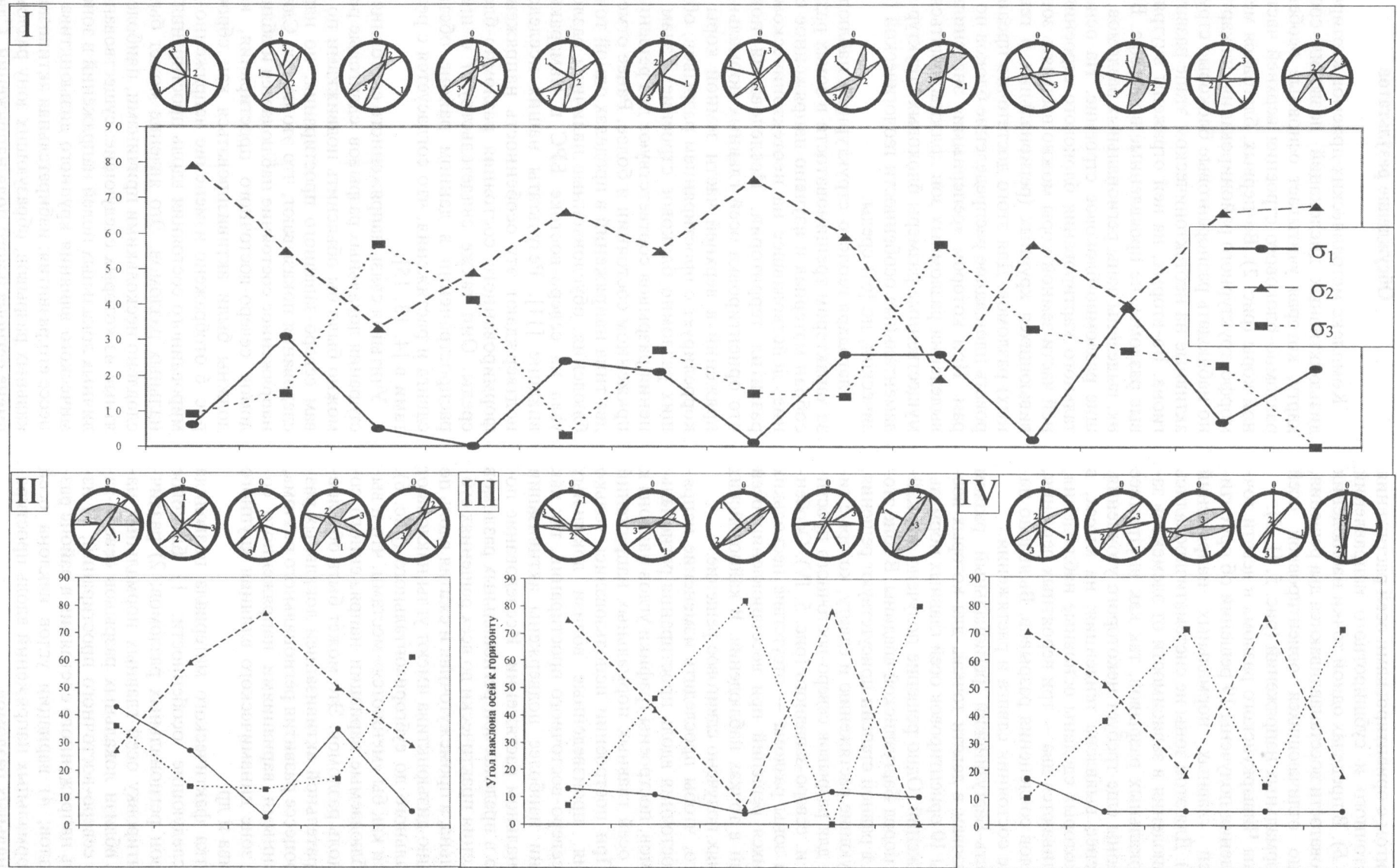


Рис. 6. Графики изменения вдоль простирания региональных разломов углов наклона к горизонту осей главных нормальных напряжений: I – IV – региональные разломы; оси:  $\sigma_1$  - растяжения,  $\sigma_2$  - промежуточная,  $\sigma_3$  - сжатия



ния со сдвигом с ориентировками осей растяжения северо-восточного и субширотного направлений (рис. 5, II, B). В пределах одной точки наблюдения по трещиноватости восстанавливаются два решения, существенно отличающихся ориентировкой осей главных нормальных напряжений (рис. 5, II, B).

Для зоны Чивыркуйского разлома в девяти точках наблюдения получены 19 решений об ориентировке осей главных нормальных напряжений (рис. 5, III). Для этой зоны не систематизировались точки наблюдения в зависимости от элементов залегания локальных разрывов, так как внутреннее строение зоны еще требует некоторого уточнения. Тем не менее выявлена тенденция: на мысах, в пределах которых сделаны основные наблюдения, восстанавливаются два — три вероятных решения, как для узлов сочленения разрывов. Выявлено напряженные состояния сдвига и растяжения.

Суво-Усть-Баргузинский региональный разлом охарактеризован в девяти точках, для которых восстановлены 10 ориентировок осей главных нормальных напряжений. Одно решение получено для кайнозойских пород Баргузинской впадины. В зоне этого разлома в равной степени присутствуют решения, соответствующие растяжению и сдвигу, которые типичны как для разрывов северо-восточного простирания, так и северо-западного (рис. 5, IV). Особенность этой зоны разлома — отсутствие нескольких отличающихся решений при восстановлении осей напряжений в точках наблюдения. В кайнозойских образованиях получено сдвиговое решение.

Для того, чтобы проследить изменение напряженного состояния вдоль простирания региональных разломов, построены графики углов наклона к горизонту осей главных нормальных напряжений (рис. 6). При построении использовались только наблюдения, произведенные вблизи локальных разрывов северо-восточного простирания, так как именно они наиболее подвержены активизации при региональном растяжении. Исследование показало, что в пределах зон региональных разломов ось растяжения практически во всех решениях субгоризонтальна, а промежуточная и сжатия вдоль простирания дизъюнктива имеют углы наклона от субвертикального до субгоризонтального (рис. 6). Причем оси как бы «меняются» местами, что и вызывает наблюдаемые вариации напряженного состояния вдоль разломов. Это может быть обусловлено избирательной активизацией локальных разрывов в процессе развития регионального разлома, одновременными вариациями напряженного состояния в зоне динамического влияния крупного дизъюнктива и др.

Обработка фактического материала позволила выявить следующие особенности: 1) блоковое строение зон региональных разломов; 2) различную ориентировку осей главных нормальных напряжений вблизи локальных разрывов северо-западного и северо-восточного простираний; 3) изменчивость напряженного состояния в районе разломных узлов; 4) вариации углов наклона осей главных нормальных напряжений вдоль простирания региональных разломов.

Комплекс методических приемов картирования дизъюнктивных дислокаций позволил составить карту, которая учитывает основные особенности разломно-блокового строения верхней части земной коры (рис. 2). Во-первых, благодаря методике морфоструктурного районирования, на карте можно наблюдать разноранговые блоковые структуры, активные на неотектоническом этапе развития региона. Во-вторых, на ней отражены внутривблоковые разломы, не проявленные в рельефе. В-третьих, выделены зоны региональных разломов, имеющие разломно-блоковое строение. На основе детального картирования блокового строения верхней части земной коры можно выявлять зоны развивающихся крупных (региональных и генеральных) разломов. Для этого достаточно проанализировать площадное распределение блоков по размерам. При котором «реперными» значениями для выделения разломных зон должны являться преимущественные размеры блоковых структур — фундаментальные особенности геологической (геофизической, по [6]) среды.

Благодаря геолого-структурным наблюдениям за характером трещиноватости в зонах разломов, собран материал и изучено напряженное состояние, действовавшее на неотектоническом этапе развития территории. Исследования показали, что ориентировка осей главных нормальных напряжений в верхней части земной коры прямо коррелирует с простиранием разрывов, образующих разломно-блоковое строение. Узлам сочленения разрывов соответствуют два решения о напряженном состоянии и более. Ранее отмечались два типа напряжений в пределах одной точки наблюдения, обусловленные наличием разломного узла на северо-востоке БРС в Намаракинской впадине [11]. Результаты наших исследований подтверждают эту особенность напряженно-деформированного состояния разломно-блоковой среды. Они также свидетельствуют о широком распространении в данном районе обстановок сдвига и растяжения, что согласуется с результатами в [4, 13, 15].

Учитывая связь напряженного состояния и простирания локальных разрывов сдвиговые решения можно было бы объяснить подвижками по разрывам северо-западного простирания, но наши исследования показывают, что это не так. Сдвиговое напряженное состояние наблюдается и вблизи разломов северо-восточного простирания, которые должны были активизироваться как сбросы. На рис. 6 отобразено изменение напряженно-деформированного состояния вдоль простирания региональных разломов. Это явление может быть обусловлено несколькими причинами, наиболее вероятные из которых следующие: существование различных локальных полей напряжений в зоне динамического влияния крупного дизъюнктива в процессе его развития; избирательная активизация локальных разрывов, образующих зону разлома, при смене регионального поля напряжений. Сдвиговое

поле напряжений, по представлениям некоторых исследователей [4, 15], существовало на ранне- (до середины плиоцена), а поле растяжения — на позднеорогенном (поздний плиоцен, плейстоцен и голоцен) этапах развития БРС. Тогда сдвиговые поля в зонах региональных разломов могут быть связаны с избирательной активизацией локальных разрывов северо-восточного простирания. Нельзя исключать и возможность того, что одновременно существовали различные локальные поля напряжений в зоне динамического влияния крупного дизъюнктива в результате структурно-вещественных неоднородностей строения зоны или переиндексации осей главных нормальных напряжений. Последняя может быть связана с особенностью самого поля напряжений, когда  $\sigma_3$  и  $\sigma_2$  имеют близкие значения, а в результате подвижек по разломам величины  $\sigma_3$  и  $\sigma_2$  меняются. Такой механизм детально освещен в [7, 8]. Однако явление изменения напряженного состояния вдоль простирания региональных разломов требует дальнейшего исследования.

В целом Усть-Баргузинскому разломному узлу присуще сдвиговое поле напряжений. Так, намечается тенденция увеличения числа обстановок сдвига по мере приближения к разломному узлу. А непосредственно в зоне Усть-Баргузинского сочленения региональных разломов напряженное состояние значительно меняется, приобретая ориентировку, не характерную для БРС.

Зоны сочленения разломов или разломные узлы являются важными объектами тектонического строения верхней части земной коры. В пределах Усть-Баргузинского разломного узла отмечены разломно-блоковое строение и значительные вариации напряженного состояния геологической среды. Установлена связь ориентировки осей главных нормальных напряжений и простирания локальных разрывов, образующих блоковое строение. При формировании разломно-блокового строения типы локальных полей напряжений зависят от характера неоднородности геологической среды. В результате активизации существовавших и образования новых разрывов возникает иерархическое блоковое строение. Крупные зоны региональных разломов в процессе развития обладают блоковым строением. Картирование таких разломов возможно на основе данных по особенностям разломно-блоковой делимости геологической среды. Комплексное изучение закономерностей разломно-блокового строения и напряженного состояния позволяет получить более обоснованное представление о динамике верхней части земной коры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 04-05-64348, 05-05-64327, и программы РАН — СО РАН «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г з о в с к и й М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
2. Л о б а ц к а я Р.М. Структурная зональность разломов. М.:Недра, 1987. 128 с.
3. Н и к о л а е в П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.:Недра, 1992. 295 с.
4. П а р ф е е в е ц А.В., С а н ь к о в В.А., М и р о ш н и ч е н к о А.И. и др. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21, № 1. С. 14—28.
5. Р а н ц м а н Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.:Наука, 1979. 171 с.
6. С а д о в с к и й М.А., Б о л х о в и т и н о в Л.Г., П и с а р е н к о В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
7. Сейсмоструктура и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / Под ред. В.П. Солоненко. М.: Наука, 1968. 252 с.
8. С е м и н с к и й К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2003. 244 с.
9. С м е т а н и н А.В., Ч е р е м н ы х А.В. Анализ гравитационных аномалий с целью изучения фундамента юга Сибирской платформы // Геофизика. 2000. № 5. С. 35—39.
10. Ш е р м а н С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. 102 с.
11. Ш е р м а н С.И., Л е в и К.Г., Р у ж и ч В.В. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 208 с.
12. Ш е р м а н С.И., А д а м о в и ч А.Н., М и р о ш н и ч е н к о А.И. Условия активизации зон сочленения разломов // Геология и геофизика. 1986. № 3. С. 10—18.
13. Ш е р м а н С.И., Д н е п р о в с к и й Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, Сиб.отд-ние, 1989. 158 с.
14. Ш е р м а н С.И., С е м и н с к и й К.Ж., Ч е р е м н ы х А.В. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18, № 2. С. 41—53.
15. S a n ' k o v V.A., M i r o s h n i c h e n k o A.I., L e v i K.G. et al. Cenozoic stress field evolution in the Baikal Rift Zone // Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod. 1997. 21, 2. P. 435—455.

Институт земной коры СО РАН  
Рецензент — Н.Ю. Васильев