

УДК 551.243(571.54)

ВАРИАЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ТУНКИНСКОГО РИФТА (ЮГО-ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© 2007 г. О. В. Лунина, А. С. Гладков, С. И. Шерман

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

Поступила в редакцию 30.05.2005 г.

На основании детального изучения трещиноватости реконструированы поля напряжений и проанализированы особенности их распределения в пределах Тункинского рифта, расположенного на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны. Показано, что вариации полей напряжений закономерны и обусловлены сложным морфоструктурным и разломно-блоковым строением изученной территории. Формирование рифта происходило в условиях косоугольного, по отношению к его оси, СЗ-ЮВ регионального растяжения на фоне существования трех разнонаправленных тектонических границ древнего заложения (Саянской, Байкальской и Тувино-Монгольской). Это привело к развитию нескольких эшелонированных локальных бассейнов и приподнятых межвпадинных перемычек, наличию сдвиговой компоненты движений по разломам, мозаичному распределению полей напряжений разных типов, определяемых вариациями ориентировок их главных векторов. Раскрытию впадин способствовали поля напряжений более низкого иерархического ранга с субмеридиональной ориентировкой оси растяжения. Существенное усложнение поля напряжений происходит в западной части Тункинского рифта в районе Туранского и Мондинского бассейнов, где по мере приближения к озеру Хубсугул имеют место трансформирующие движения, играющие значительную роль в раскрытии серии рифтогенных впадин меридионального простирания на территории Монголии. Сделан вывод, что на протяжении всего развития с олигоцена Тункинский рифт не испытывал многоэтапных изменений напряженного состояния, за исключением фазы сжатия в позднем миоцен-раннем плиоцене, которая может быть связана с эффектом континентальной коллизии Евразийской и Индостанской плит. После этого Тункинский рифт продолжил тектоническое развитие в режиме растяжения со сдвигом.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию полей напряжений в последние годы придается большое значение. Они играют определяющую роль в контроле многих геолого-геофизических процессов. Установлено [23, 35], что пять основных типов напряженного состояния верхней части литосферы Земли (сжатие, растяжение, сдвиг, растяжение со сдвигом и сжатие со сдвигом) определяют геодинамические режимы регионов, характер тектонических движений коры, условия формирования разрывов различных рангов, индивидуальные соотношения их параметров и особенности проявления сейсмичности. Проведенные в последние десятилетия исследования [5, 25, 32, 33, 35 и др.] показали, что для относительно "однородных" по типу напряженного состояния регионов характерны вариации полей напряжений более низкого иерархического уровня. Это связано с существенным различием в длительности развития разломных структур и действия разных по масштабу напряжений. В формах геологического летоисчисления наиболее "короткоживущими" и изменчивыми являются локальные поля напряжений. Знания об их вариациях важны при тектонических и прогностических построениях, особенно для ре-

гионов, развивающихся в сложных геодинамических обстановках.

Тункинский рифт (рис. 1), расположенный на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны, является одной из проблемных площадей. Здесь устанавливаются поля напряжений всех типов с разными ориентировками их главных осей как по геолого-структурным данным [7, 15, 22], так и по механизмам очагов землетрясений [3, 11]. Интерпретация таких разнотипных решений неоднозначная. Появление новых данных каждый раз способствует определению пересмотру взглядов на происхождение и эволюцию Тункинского рифта. Его рассматривали как структуру, стабильно развивающуюся в условиях растяжения со сдвигом при доминирующей роли СЗ-ЮВ растяжения [22, 24], или как зону континентального трансформного разлома [34], обеспечивающего раскрытие Байкальского и Хубсугульского рифтов. В последние годы наличие разнотипных полей напряжений в регионе объясняют многоэтапной эволюцией напряженного состояния юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны от трансензионного и сдвигового режимов до транспрессионного [15]. В частности, для Тункинского рифта авторами упомянутой работы выделяется шесть типов полей напряжений,

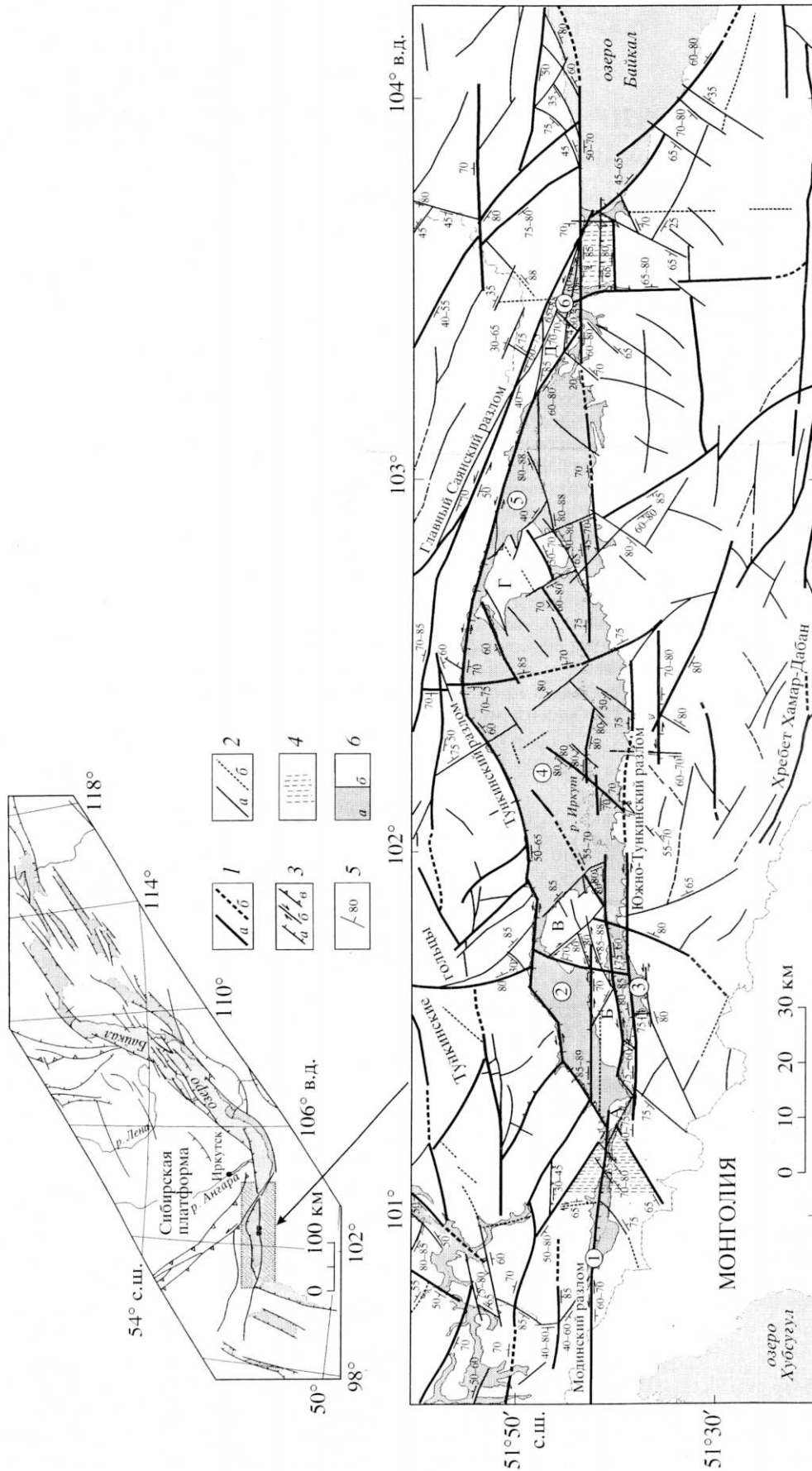


Рис. 1. Разломно-блоковое строение Тункинского рифта и его расположение в общей структуре Байкальской рифтовой зоны (карта составлена О.В. Луниной и А.С. Гладковым [8] с использованием полевых структурно-геологических наблюдений, данных морфотектонического анализа, карты государственной геологической съемки 1 : 200000, а также работ [4, 24])

1 – достоверные (а) и предполагаемые (б) региональные разломы; 2 – достоверные (а) и предполагаемые (б) локальные разломы; 3 – сбросы (а), сдвиги (б), взбросы (а); 4 – зоны повышенной дислоцированности пород; 5 – направление и угол падения разлома; 6 – впадины, заполненные кайнозойскими отложениями (а); выходы кристаллического фундамента (б).

Цифрами в кружках и буквами на карте обозначены: изолированные локальные впадины: 1 – Молинская, 2 – Хойтогорльская, 3 – Туранская, 4 – Тункинская, 5 – Торская, 6 – Быстринская; межвпадинные перемычки: А – Харандабанская, Б – Туранская, В – Ниловская, Г – Еловская, Д – Зуркузунская

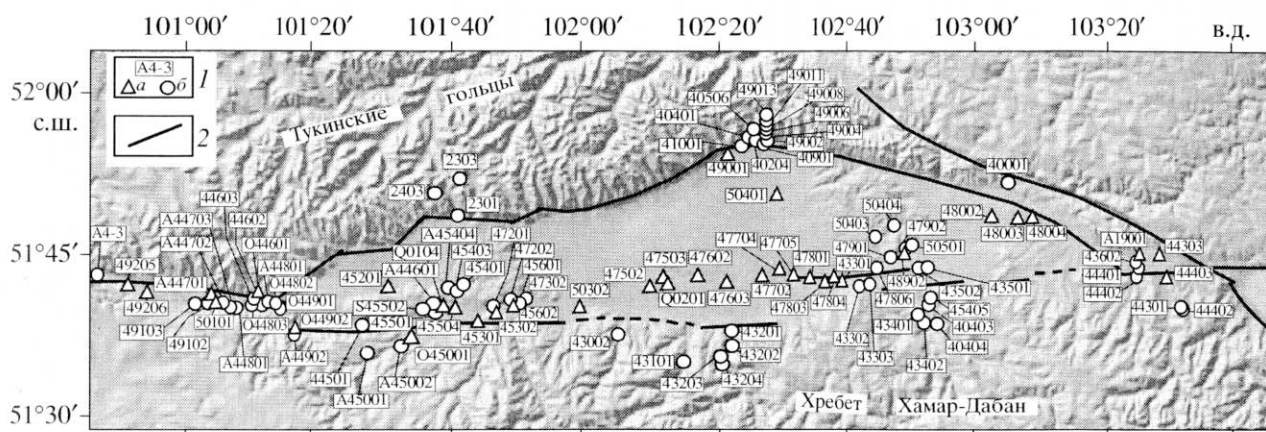


Рис. 2. Схема расположения точек наблюдения и их номера

1 – точки наблюдения в рыхлых неоген-четвертичных отложениях (а) и докайнозойских коренных породах (б); 2 – основные региональные разломы

которые сменяли один другой с олигоцена до современного этапа.

Нами предпринята попытка провести анализ распределения полей напряжений относительно различных структурных элементов Тункинского рифта, особенностей его разломно-блокового строения и расположения в общей структуре Байкальской рифтовой зоны. Под структурными элементами рифта понимаются различные его составные части, такие, как локальные впадины, заполненные кайнозойскими осадками, приподнятые межвпадинные перемычки (отроги) и плечи рифта, которые представляют собой хребты, обрамляющие рифтовые бассейны. Главная цель анализа – выявить такие закономерности в пространственном распределении полей напряжений разных типов и изменениях ориентировки их осей, которые позволят ответить на вопрос, действительно ли с олигоцена напряженное состояние в Тункинском рифте менялось несколько раз или его вариации являются локальными и определяются структурными факторами. В настоящей работе для изучения полей напряжений использовалась тектоническая трещиноватость, встречающаяся повсеместно в выходах скальных пород и рыхлых отложениях.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ОБСТАНОВКА

Тункинский рифт простирается в субширотном направлении более чем на 200 км от оз. Байкал до оз. Хубсугул (см. рис. 1). Он наложен на высокометаморфизованные консолидированные структурно-вещественные комплексы верхнего архея и протерозоя, а его впадины заполнены олигоцен-четвертичными осадочными отложениями [31]. Местами обнажаются щелочные базальты неогенового и четвертичного возраста [16]. Ложе рифта на севере сочленяется с подня-

тием Тункинских гольцов, достигающих абсолютных высот 3000–3200 м, а на юге сравнительно плавно переходит в склон хребта Хамар-Дабан с отметками до 2400–2600 м. Рифтовую долину составляют локальные впадины (Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская, Хойтогорская, Мондинская) и межвпадинные перемычки (Зуркузунская, Еловская, Ниловская, Туранская, Харадабанская), разделяющие их. Последние занимают промежуточный относительно поднятия плечей и днища впадин ярус с абсолютными отметками 1400–1600 м.

Разломно-блоковое строение Тункинского рифта и прилегающей территории определяется разрывными нарушениями четырех направлений: субширотного, северо-восточного, северо-западного и субмеридионального (см. рис. 1). Среди крупнейшими дизъюнктивами являются Тункинский и Южно-Тункинский разломы, ограничивающие северный и южный борта рифта. Первый, имеющий в плане дугообразную форму, ярко выражен в рельефе и представляет собой левосторонний сдвиг-сброс [24]. На восточном окончании он сближается с зоной Главного Саянского взбросо-сдвига. Южно-Тункинский разлом морфологически проявлен значительно хуже, но прослеживается по геолого-структурным наблюдениями в виде эшелонированных широтных сегментов. Наши данные свидетельствуют о преимущественно сбросовых, сдвиговых и комбинированных (сдвиго-сбросовых, сбросо-сдвиговых) смещениях по Южно-Тункинскому разлому [7, 24]. Вместе с тем, существует мнение, что Мондинский сегмент разлома на современном этапе развития представляет собой взбросо-сдвиг [1].

Внутри рифтовой долины главную роль играют северо-восточные и субширотные разрывные нарушения. В межвпадинных перемычках наряду с ними хорошо проявлены разломы северо-запад-

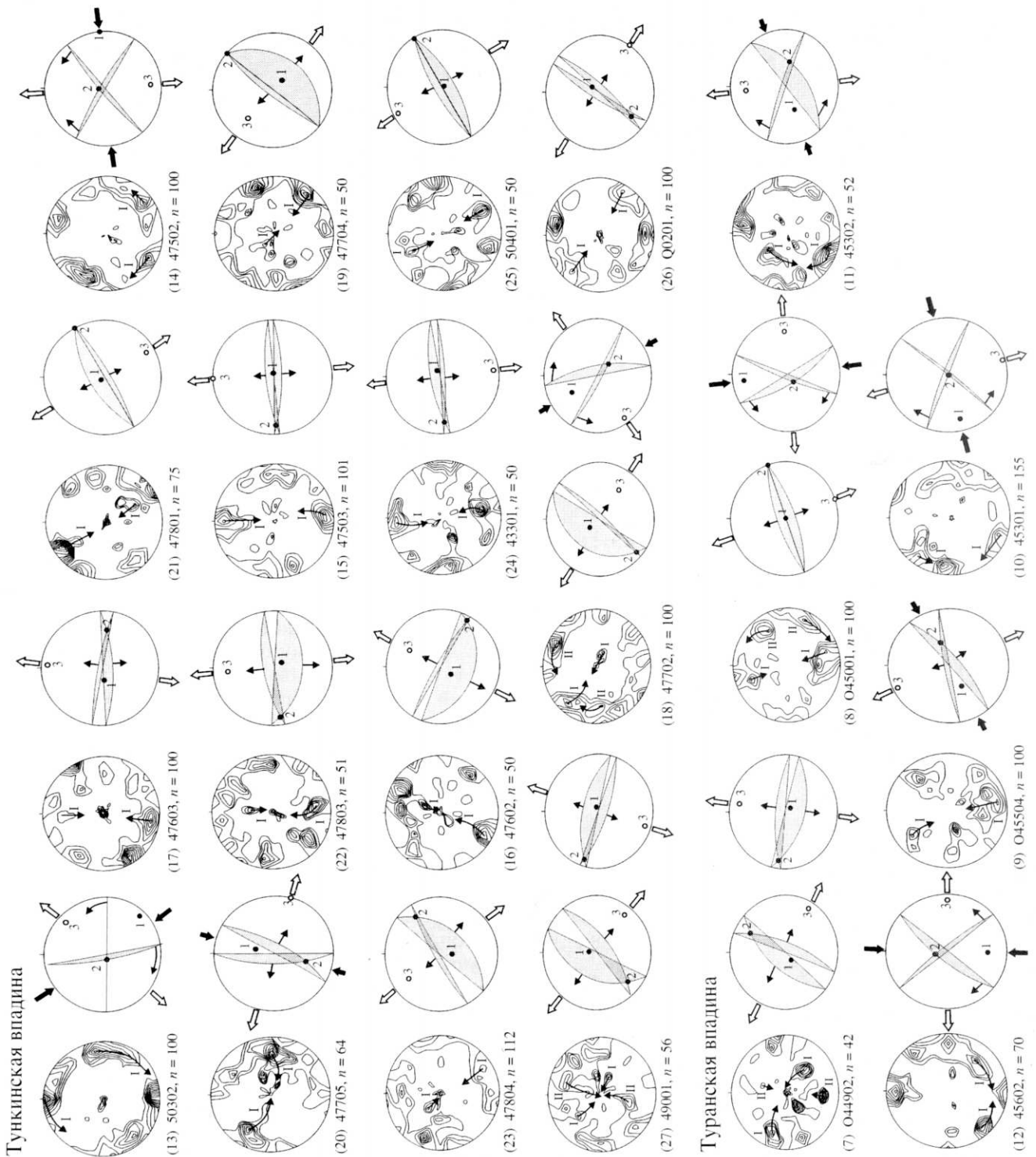


Рис. 3. Диаграммы трещиноватости и ориентировок векторов главных нормальных напряжений для локальных впадин Тункинского рифта

Используется проекция верхней полусферы, размер окна – 10. Изолинии плотности максимумов проведены с 1.5% с шагом 1%. Стрелками внутри диаграмм показаны направления преимущественных разбросов в максимумах трещиноватости, указывающие на сопряженность систем трещин по методике П.Н. Николаева [13]. Пары сопряженных систем трещин обозначены римскими цифрами. Под каждой диаграммой в соответствии с таблицей 1 приведены номер по порядку (в скобках), номер точки наблюдения и количество замеров (n). На диаграммах ориентировок векторов главных нормальных напряжений: 1 – ось сжатия, 2 – промежуточная ось, 3 – ось растяжения

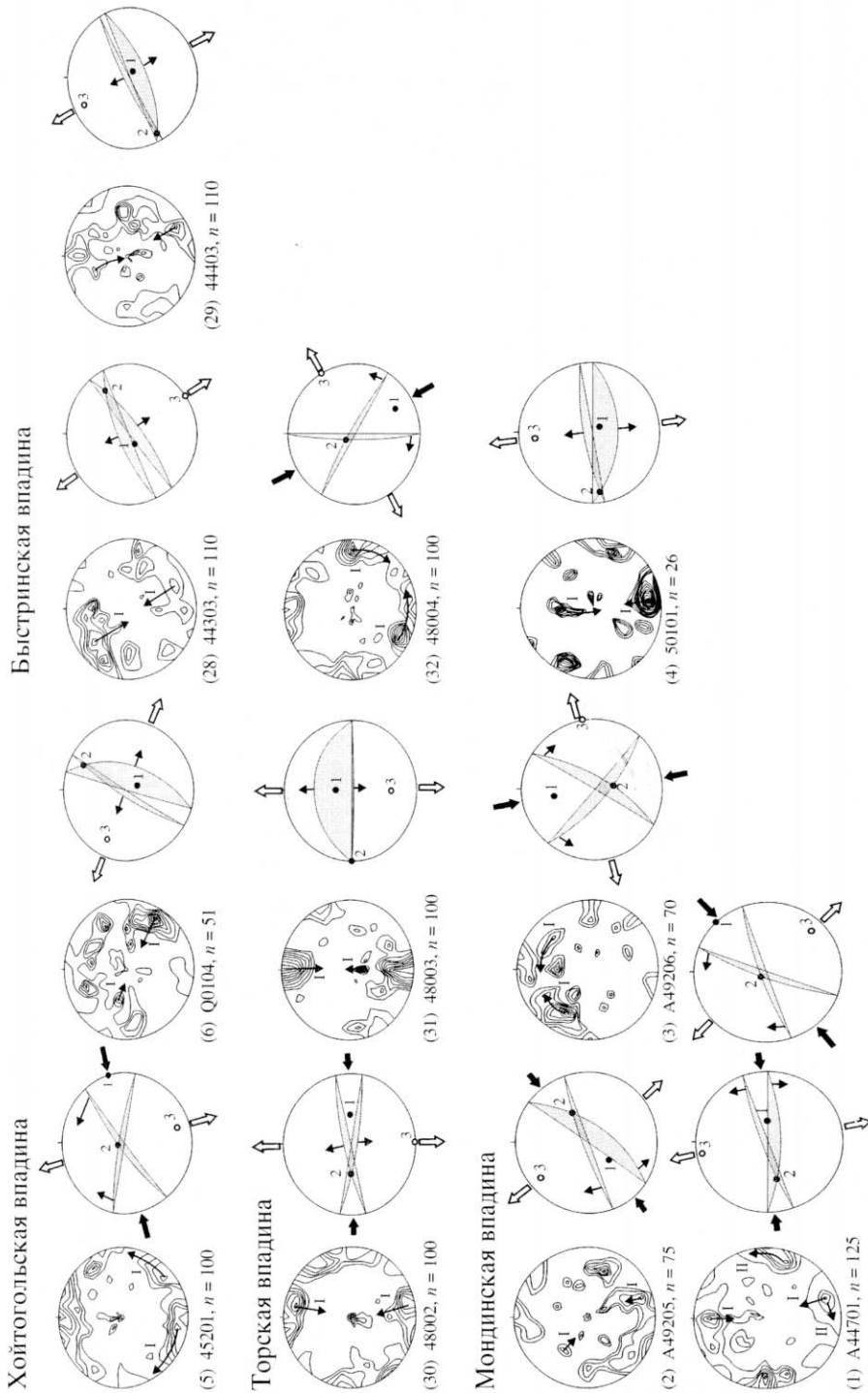
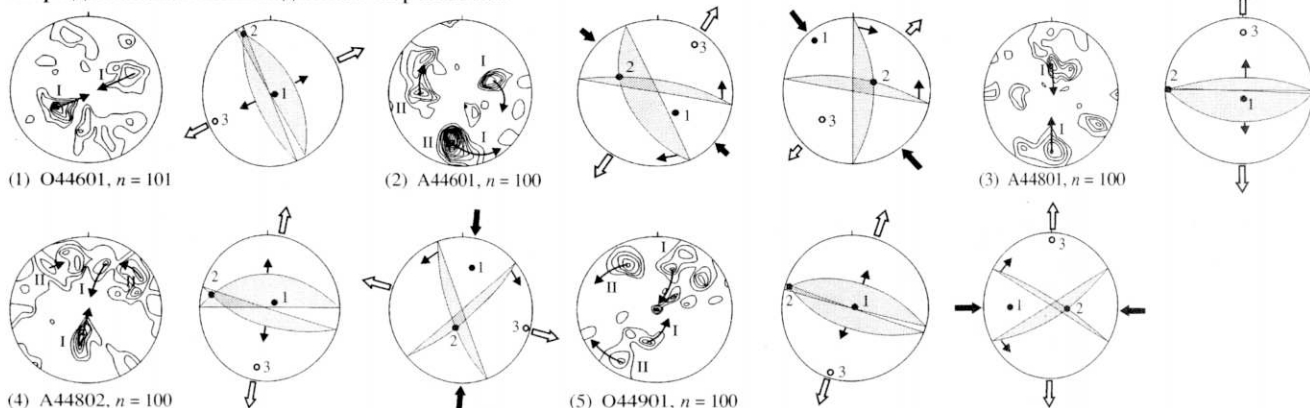


Рис. 3. Окончание

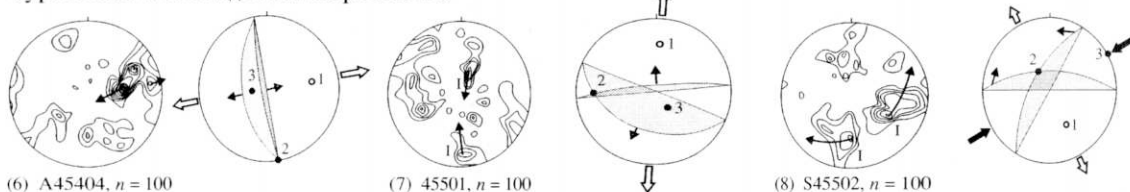
ного простираения, а в горном обрамлении они доминируют. Субширотные разрывы имеют широкое распространение на всей территории, в то время как меридиональные по сравнению со всеми остальными наименее развиты. Поскольку все эти дизъюнктивы (см. рис. 1) отчетливо проявля-

ны в рельефе и/или в тектонических деформациях отложений плейстоцен-голоценового возраста [7, 8], их можно считать активными на позднекайнозойском этапе. Кроме того, в Тункинских гольцах зафиксированы надвиги постсреднемиоценового возраста [24]. В целом в разломно-блоковом

Харадабанская межвпадинная перемычка



Туранская межвпадинная перемычка



Ниловская межвпадинная перемычка

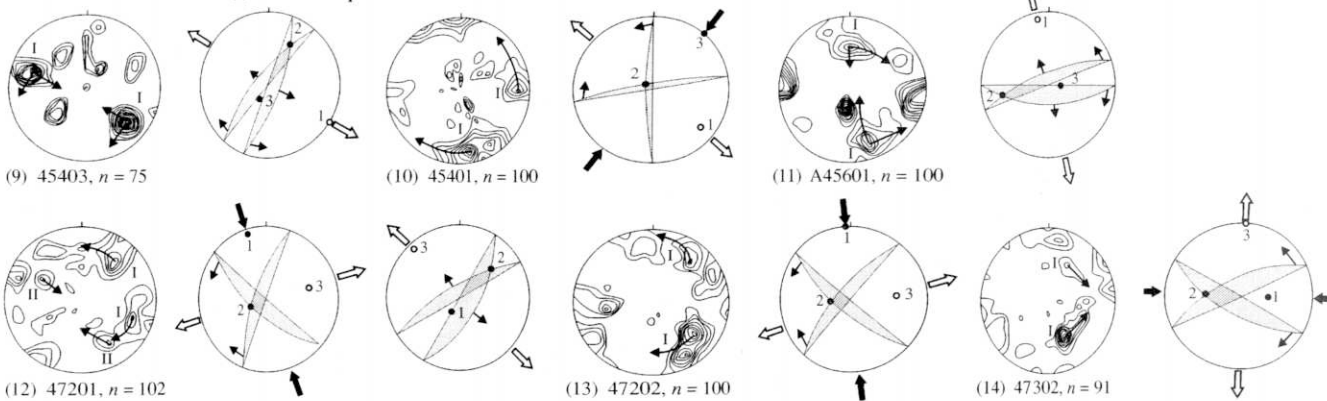


Рис. 4. Диаграммы трещиноватости и ориентировок векторов главных нормальных напряжений для межвпадинных перемычек Тункинского рифта

Номер по порядку (в скобках) под каждой диаграммой соответствует номеру в таблице 2. Остальные пояснения см. в подписи к рис. 3

строении территории отчетливо проявлена унаследованность Тункинским рифтом элементов древней структуры Саяно-Байкальского складчатого пояса, в частности, разломов, простирающие которых совпадает с Саянским тектоническим швом рифейского возраста [10], обрамляющим Сибирскую платформу с юго-запада. Таким образом, при развитии рифта формировались, главным образом, дизъюнктивы субширотного и северо-восточного направлений, а северо-западные разрывы вовлекались в активизацию [8].

Из приведенного краткого обзора можно видеть, что Тункинский рифт имеет сложное внутреннее строение, которое необходимо учитывать

при анализе разнородных полей напряжений и соответствующих геодинамических построениях.

ПЕРВИЧНЫЕ ДАННЫЕ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

Для изучения полей тектонических напряжений в пределах Тункинского рифта была создана сеть точек наблюдений, в которых проведено детальное изучение трещиноватости и зон разрывных нарушений (рис. 2). Сбор и обработка информации проводились с помощью методов и подходов, применяемых в тектонофизике при изучении разрывов разного масштаба [18, 22] и использо-

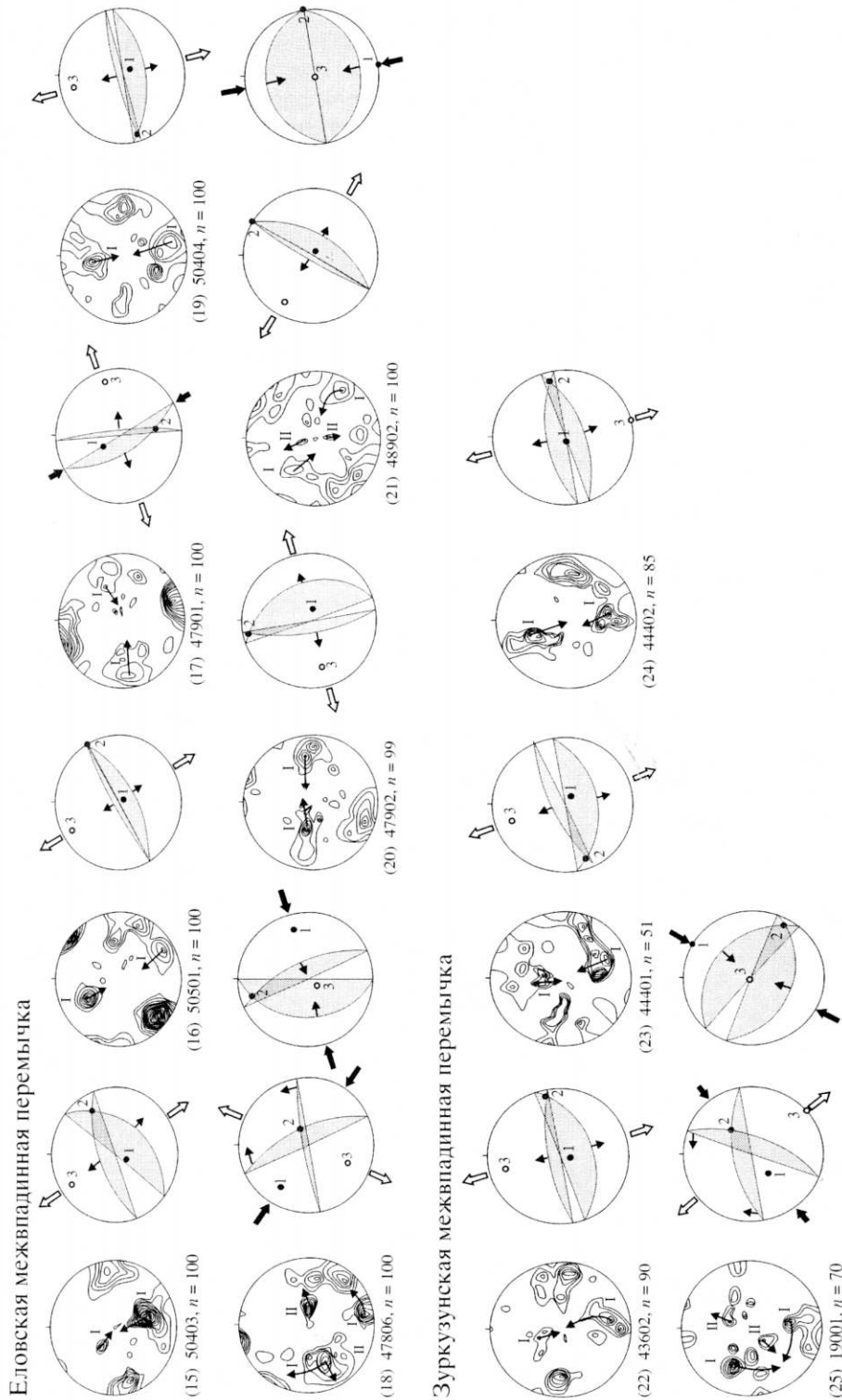


Рис. 4. Окончание

ванных нами ранее [7–9]. Основой для реконструкции осей главных нормальных напряжений служили массовые замеры трещин, сделанные в породах разного возраста и состава. Каждый из них включал, как правило, 100 измерений, кото-

рые в дальнейшем использовались для построения диаграмм трещиноватости. При этом в древних кристаллических породах изучались только “свежие” на вид сколы, не залеченные минеральным веществом, нередко несущие следы подви-

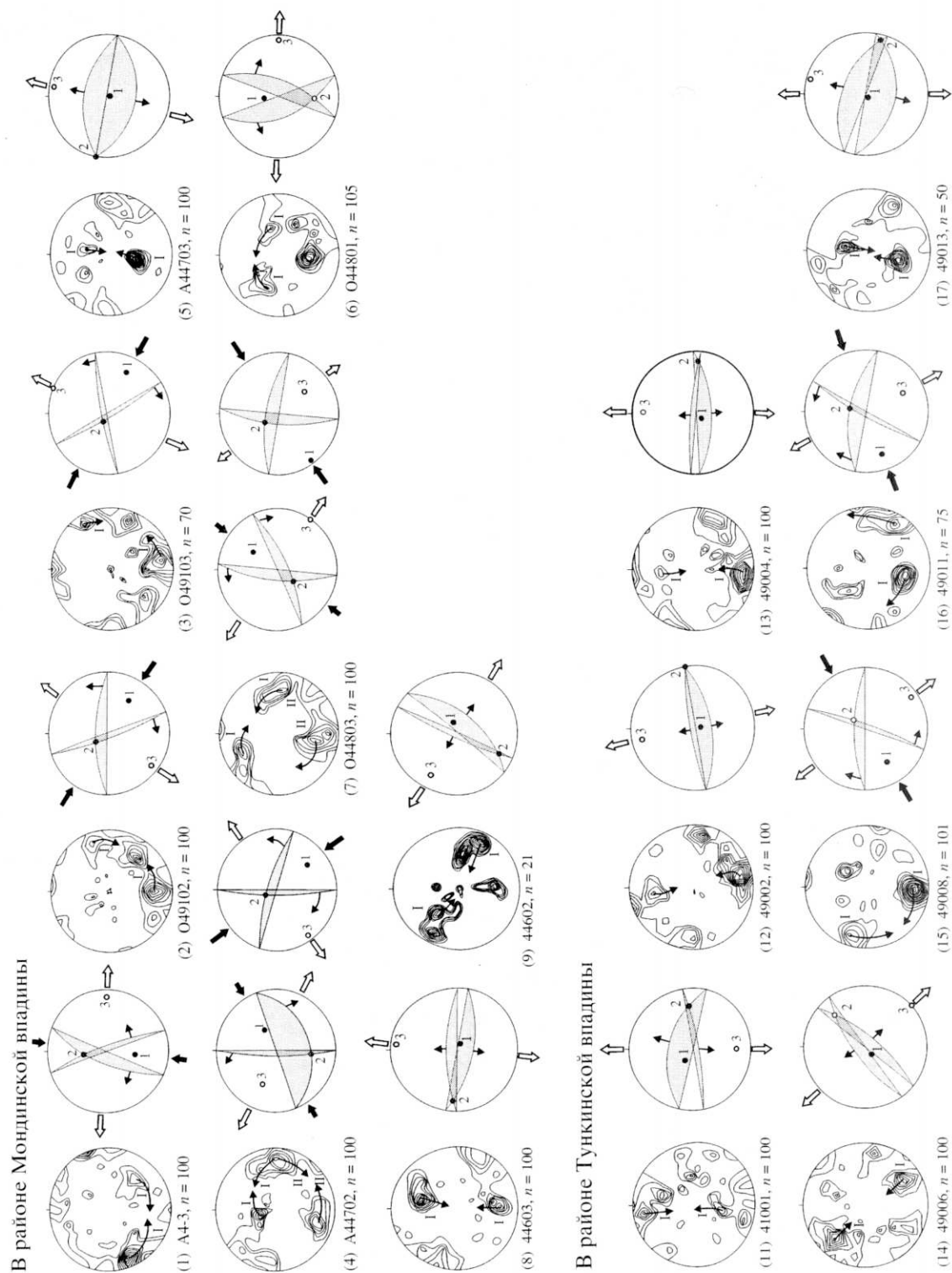


Рис. 5. Диаграммы трещиноватости и ориентировок векторов главных нормальных напряжений для северного плеча Тункинского рифта

Номер по порядку (в скобках) под каждой диаграммой соответствует номеру в таблице 3. Остальные пояснения см. в подписи к рис. 3

жек в виде зеркал скольжения (часто со штрихами и бороздами), а также смещений маркеров. В рыхлых позднекайнозойских отложениях во вни-

вание принимались только те трещины, чье тектоническое происхождение не вызывало сомнений. Их главные особенности – системность, пря-

молинейность и закономерное расположение в пространстве относительно друг друга [21]. Таким образом, при полевых исследованиях мы старались собрать информацию о наиболее молодых разрывных деформациях, связанных с развитием Тункинского рифта, хотя нельзя полностью исключать возможность попадания в массовые замеры более древних трещин.

Реконструкция полей напряжений основана на исходном положении о взаимосвязи между формирующимися сопряженными тектоническими разрывами и направлениями главных нормальных напряжений [2]. Для установления сопряженности систем сколов проводился анализ диаграмм массовых замеров трещин (рис. 3, 4, 5, 6) методом П.Н. Николаева [13], который основан на существовании закономерных (направленных в противоположные стороны) разбросов у максимумов трещиноватости, возникающих в результате действия однородного поля напряжений. Нами использовались только те пары сопряженных систем трещин, которые образовывались в условиях хрупкой деформации, т.е. когда разброс у сопряженных максимумов на диаграммах трещиноватости согласно методу П.Н. Николаева направлен из острого угла в тупой. В случае наличия нескольких таких сопряженных пар в одной точке наблюдения в дальнейшем анализе участвовали две, имеющие наибольшую интенсивность. Аналогичный методологический подход был применен в предыдущей работе [9]. Следует отметить, что в ряде случаев сопряженные системы трещин устанавливались при прямых геологических наблюдениях, исходя из известных критериев [2], а затем заверялись статистическим методом П.Н. Николаева [13].

Дальнейшие построения заключались в том, что линия пересечения двух сопряженных плоскостей скальвания совпадает с направлением действия промежуточного вектора напряжений (σ_2), ось главного сжимающего напряжения (σ_1) – с направлением биссектрисы острого угла между трещинами, ось главного растягивающего напряжения (σ_3) – с направлением биссектрисы тупого угла [2]. Тип поля напряжений определялся, исходя из соотношений углов наклона главных нормальных осей напряжений относительно горизонта [22]:

растяжение:	$\sigma_1 = 61-90^\circ$	$\sigma_2 = 0-30^\circ$	$\sigma_3 = 0-30^\circ$
растяжение со сдвигом:	$\sigma_1 = 31-60^\circ$	$\sigma_2 = 31-60^\circ$	$\sigma_3 = 0-30^\circ$
сдвиг:	$\sigma_1 = 0-30^\circ$	$\sigma_2 = 61-90^\circ$	$\sigma_3 = 0-30^\circ$
сжатие со сдвигом:	$\sigma_1 = 0-30^\circ$	$\sigma_2 = 31-60^\circ$	$\sigma_3 = 31-60^\circ$
сжатие:	$\sigma_1 = 0-30^\circ$	$\sigma_2 = 0-30^\circ$	$\sigma_3 = 61-90^\circ$

Таким образом, в результате реконструкций для 102 точек наблюдений получено 124 решения о поле напряжений.

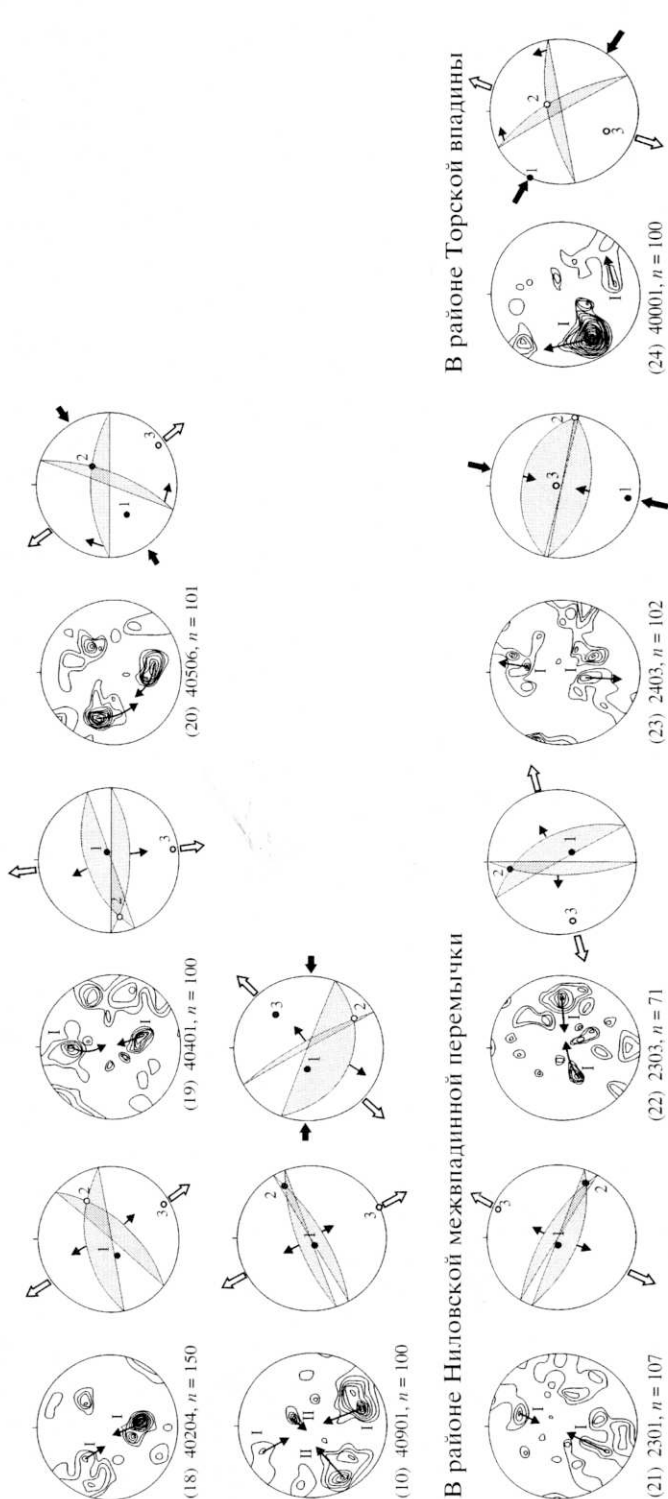


Рис. 5. Окончание

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Все фактические данные и результаты реконструкций представлены на рис. 3–6 и в таблицах 1–3. Точки наблюдений по местоположению были от-

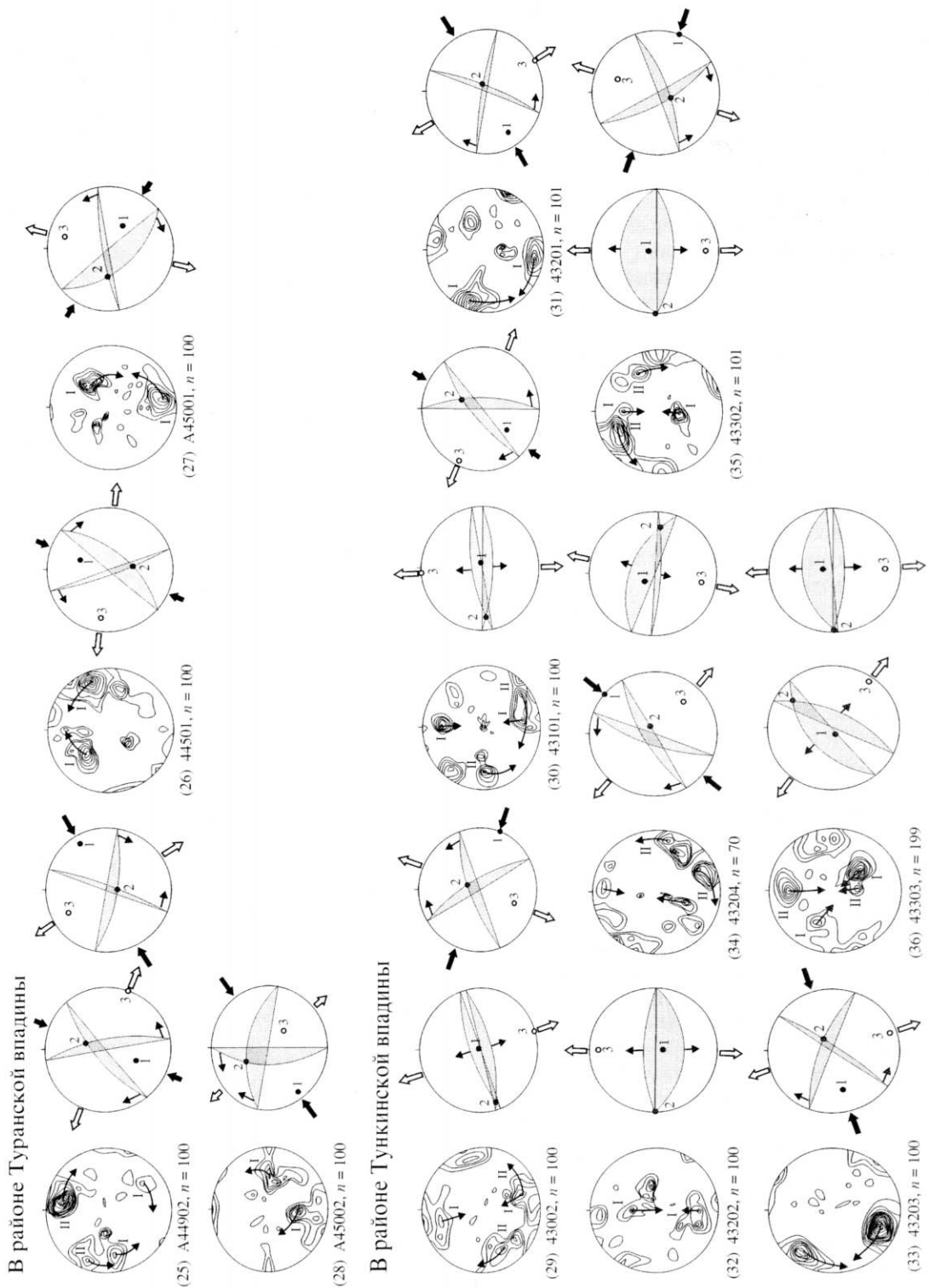


Рис. 6. Диаграммы трещиноватости и ориентировок векторов главных нормальных напряжений для южного плеча Тункинского рифта

Номер по порядку (в скобках) под каждой диаграммой соответствует номеру в таблице 3. Остальные пояснения см. в подписи к рис. 3

несены к тому или иному структурному элементу рифта. При этом для впадин оставлены только те решения, которые были получены по трещинам,

измеренным в кайнозойских осадках и вулканических породах. Решения, восстановленные по замерам разрывов в коренных породах, обнажающихся

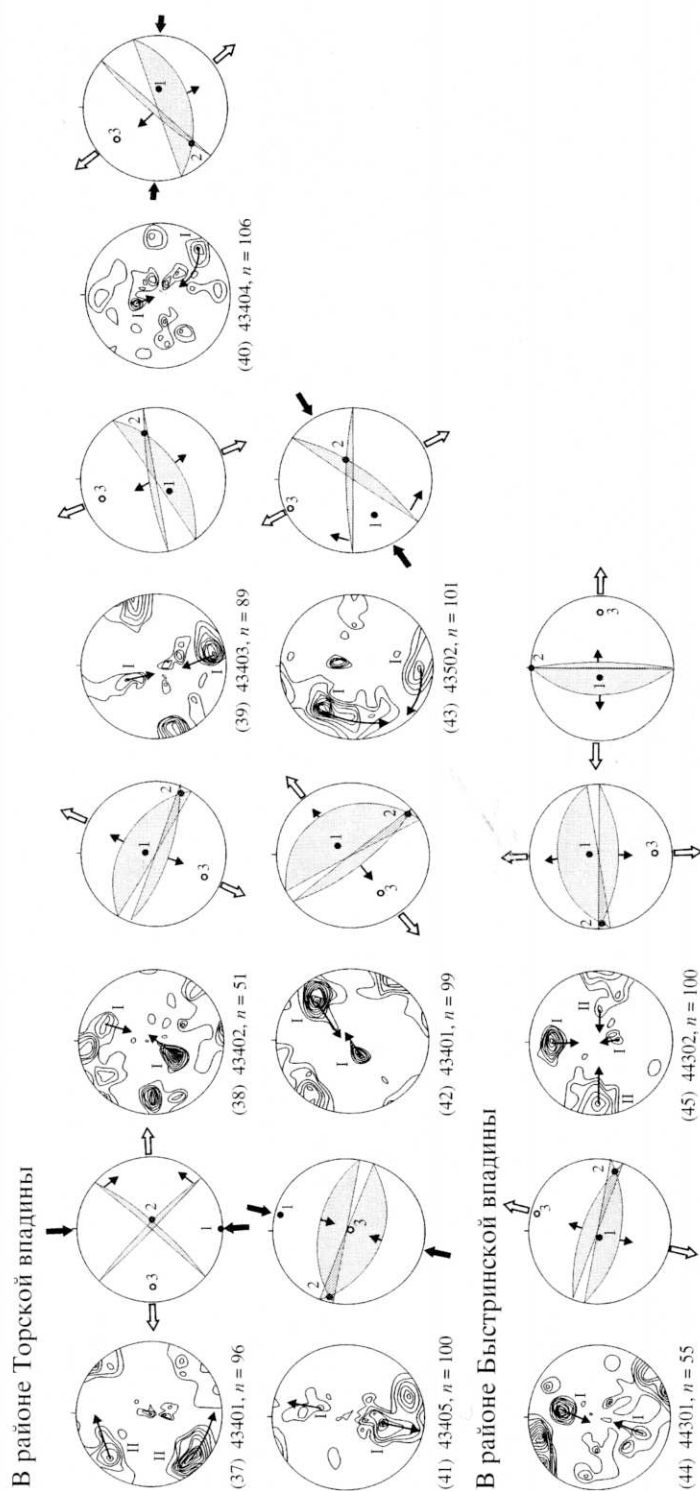


Рис. 6. Окончание

на границе впадины и хребта или впадины и отрога, были отнесены соответственно к хребту или отрогу. Далее мы попытались провести всесторонний анализ распределения полей напряжений в зависимости от их типов и ориентировок осей с углами наклона 0–30° относительно горизонта.

Особенности распределения полей напряжений разных типов в структурных элементах рифта

Для сопоставления частоты встречаемости полей напряжений разных типов в Тункинском рифте были рассчитаны их процентные соотноше-

Таблица 1. Фактические данные и результаты реконструкций полей напряжений для впадин Тункинского рифта

№ п/п	№ т.н.	Широта, °	Долгота, °	Тип пород/осадков	Возраст пород/осадков	Сопряженные системы			Угол, °	σ ₃	σ ₂	σ ₁	Тип поля напряжений					
						аз., °	угол, °	угол, °										
Мондинская впадина																		
1	A44701	51.683	101.065	Валунно-галечные отложения	Плейстоцен-голоцен	0	70	160	80	36	170	5	76	33	268	57	Растяжение со сдвигом	
2	49205	51.699	100.863	Пески	Поздний плейстоцен-голоцен, < 40000 лет	160	80	110	80	11	49	315	11	135	79	225	0	Сдвиг
3	49206	51.688	100.909	Песчано-валунно-галечные	Поздний плейстоцен-голоцен, < 40000 лет	160	80	305	60	8	52	144	10	242	38	41	50	Растяжение со сдвигом
4	50101	51.675	101.076	Валунно-галечные отложения	Плейстоцен-голоцен	0	50	170	75	35	56	174	13	82	9	318	75	Растяжение
Хойтогольская впадина																		
5	45201	51.698	101.525	Пески, супеси, суглинки	Голоцен, 1900 лет	140	80	190	80	11	49	345	11	165	79	255	0	Сдвиг
6	Q0104	51.667	101.646	Галечные отложения	Поздний плейстоцен, 29300 лет	120	80	285	50	14	52	113	15	207	14	339	69	Растяжение
Туранская впадина																		
7	O44902	51.633	101.289	Галечные и обломочные отложения	Плейстоцен-голоцен	130	55	290	70	14	58	299	8	207	18	51	70	Растяжение
8	O45001	51.619	101.571	Базальты	Поздний кайнозой	15	50	185	70	9	61	189	10	98	8	329	77	Растяжение
9	45504	51.665	101.674	Валунники базальтового состава, галечные отложения	Поздний плиоцен, 7.87 млн. лет, плейстоцен-голоцен	160	70	340	70	11	40	340	0	250	0	70	90	Растяжение
10	45301	51.645	101.731	Галечники, пески, суглинки	Плейстоцен, 58000 лет	200	80	310	85	10	71	345	3	242	77	75	13	Сдвиг
11	45302	51.657	101.777	Валунно-галечные отложения	Плейстоцен-голоцен	200	80	320	50	16	75	174	17	201	43	60	42	Растяжение со сдвигом
12	45602	51.667	101.824	Песчано-валунно-галечные отложения, суглинки	Плейстоцен-голоцен	130	70	230	80	13	84	269	7	164	66	2	23	Сдвиг
Тункинская впадина																		
13	50302	51.667	102.00	Суглинки	Голоцен, 9800-9300 лет	0	90	80	80	21	80	220	7	90	80	311	8	Сдвиг
14	47502	51.697	102.174	Суглинки, супеси	Поздний плейстоцен-голоцен, < 40000 лет	140	80	210	80	14	69	355	12	175	78	265	0	Сдвиг
15	47503	51.714	102.200	Супеси, суглинки	Поздний плейстоцен-голоцен, < 40000 лет	0	75	175	75	14	30	178	0	88	9	267	81	Растяжение
16	47602	51.714	102.282	Пески, суглинки, супеси	Поздний плейстоцен-голоцен, < 40000 лет	20	30	210	80	14	70	207	25	299	5	40	64	Растяжение

Таблица 1. Окончание

№ п/п	№ т.н.	Широта, °	Долгота, °	Тип пород/осадков	Возраст пород/осадков	Сопряженные системы				Угол, °	σ ₃	σ ₂	σ ₁	Тип поля напряжений				
						аз., °	угол, °	аз., °	угол, °									
17	47603	51.704	102.348	Суглинки, супеси, пески	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	357	70	190	80	9	33	184	5	276	23	82	67	Растяжение
18	47702	51.715	102.438	Супеси, суглинки, пески	Голоцен, 920–1415 лет	120	30	310	80	10	70	307	25	39	5	140	64	Растяжение
19	47704	51.724	102.484	Суглинки	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	30	80	260	70	13	58	54	6	316	57	148	32	Растяжение со сдвигом
20	47705	51.717	102.521	Суглинки, супеси	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет со сдвигом	130	80	310	30	14	70	130	25	220	0	310	65	Растяжение
21	47801	51.710	102.566	Пески, суглинки	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	399	70	90	70	19	50	285	0	15	35	195	55	Растяжение
22	47803	51.705	102.611	Пески	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	150	60	330	80	16	40	330	10	240	0	150	80	Растяжение
23	47804	51.714	102.633	Лёсы, пески	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	3	40	170	70	12	71	175	15	83	8	325	73	Растяжение
24	43301	51.706	102.655	Суглинки	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	150	80	310	40	8	62	142	20	237	14	0	65	Растяжение
25	50401	51.840	102.478	Базальты	Поздний плиоцен-плейстоцен, 2,4–0,8 млн.лет	170	70	357	80	16	31	354	5	85	13	243	76	Растяжение
26	Q0201	51.70	102.212	Суглинки	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	150	75	330	65	10	40	150	5	240	0	330	85	Растяжение
27	49001	51.901	102.358	Валунные отложения	Голоцен, <3000 лет	120	75	310	75	10	32	305	0	35	18	215	72	Растяжение
28	44303	51.747	103.479	Конгломераты	Поздний плиоцен	115	40	320	60	8	83	309	10	42	14	184	73	Растяжение
29	44403	51.714	103.497	Конгломераты	Поздний плиоцен	20	70	193	57	8	53	17	7	107	7	244	81	Растяжение
Быстринская впадина																		
30	48002	51.805	103.046	Суглинки	Поздний плиоцен	155	70	320	70	9	43	327	0	237	20	57	70	Растяжение
31	48003	51.805	103.103	Суглинки-песчаные отложения	Поздний плиоцен	150	80	335	60	8	40	152	10	61	7	298	78	Растяжение
Торская впадина																		
32	48004	51.805	103.139	Суглинки-песчаные отложения	Поздний плейстоцен-голоцен, <40000 лет	10	80	167	78	13	32	359	1	90	46	268	44	Растяжение со сдвигом

Примечание: сведения о возрасте отложений для т.н. 1–4, 6, 13–17, 19–24, 26–32 получены из работы [20]; для т.н. 9, 25 – из работы [16]; для т.н. 10 – из работы [19]; для т.н. 5, 18 – по результатам радиоуглеродного датирования, выполненных Л.А. Орловой (лаборатория геологии и палеоклиматологии кайнозоя, Институт Геологии СО РАН); I – относительная интенсивность поля напряжений, соответствующая сумме интенсивностей максимумов сопряженных систем трещин, т.н. – точка наблюдения.

ния, представленные в виде круговых диаграмм (рис. 7). Эти диаграммы отображают вклад поля напряжений определенного типа в общую сумму полученных решений для каждого структурного элемента или его части. Результаты их анализа показывают следующее.

Во впадинах, в целом, превалирует растяжение (57%), менее проявлены растяжение со сдвигом (19%) и сдвиг (24%). Вклады этих типов напряженного состояния закономерно изменяются в отдельных бассейнах. Так, в собственно Тункинской впадине, которая находится в центре рифта (см. рис. 7, А) и является наибольшей по ширине и площади, процентное соотношение растяжения, растяжения со сдвигом и сдвига составляет 76/12/12, соответственно. В Быстринской впадине, расположенной наиболее близко к Байкальской котловине, это соотношение равно 100/0/0. В Торской впадине вклад сдвига заметно возрастает (34/33/33). Особенность расположения этой впадины заключается в том, что ее северный борт ограничивается запад-северо-западным сегментом Тункинского разлома, который в данном месте сближается с Главным Саянским сдвигом и трассируется параллельно ему (см. рис. 7, А). Сопоставимыми по вкладам растягивающих и сдвиговых напряжений являются также Туранский (37.5/25/37.5) и Хойтогольский (50/0/50) бассейны. В Мондинской впадине, замыкающей западную часть рифта, соотношения растяжения, растяжения со сдвигом и сдвига меняются кардинально (20/40/40) и сдвиговый тип поля напряжений превалирует.

В межвпадинных перемычках встречаются все известные типы полей напряжений: растяжение (53%), растяжение со сдвигом (13%), сдвиг (19%), сжатие со сдвигом (6%), сжатие (9%). Однако чистое сжатие по имеющимся геолого-структурным данным устанавливается только для Еловской (56/11/11/0/22) и Зуркузунской (60/20/0/0/20) межвпадинных перемычек. Для остальных отрогов эти же соотношения выглядят следующим образом: Харадабанский – 50/12.5/25/12.5/0, Туранский – 67/0/0/33/0, Ниловский – 43/14/43/0/0.

В северном и южном рифтовых плечах соотношения растяжения, растяжения со сдвигом, сдвига, сжатия со сдвигом и сжатия примерно одинаковые. В хребте Хамар-Дабан (46/21/25/4/4) по сравнению с Тункинским хребтом (55/15/22/4/4) отмечается чуть больше сдвиговой составляющей. В горном обрамлении по простиранию рифта также наблюдаются закономерные вариации напряженного состояния. Так, между Тункинским и Главным Саянским разломами поле напряжений представлено только сдвиговым типом (см. рис. 7, А). В районе Тункинской локальной впадины в одноименном хребте превалирует растяжение (67/16/17/0/0). На продолжении Нилов-

ского отрога наряду с растяжением существенный вклад в общее количество решений вносит сжатие (67/0/0/0/33). Севернее Мондинской впадины в предгорьях Тункинского хребта резко возрастает вклад сдвиговой составляющей (36/28/27/9/0).

В хребте Хамар-Дабан, на западном окончании рифта, поля напряжений представлены только сдвиговыми и переходными типами (0/60/20/20/0). Далее, в центральной части изучаемой структуры появляется чистое растяжение (54/8/38/0/0). Вблизи Еловского отрога и Торской впадины в южном горном обрамлении отмечается сжатие (43/14/29/0/14). Южнее Быстринской впадины поле напряжений представлено только растяжением.

Приведенные данные показывают, что в распределении локальных полей напряжений разного типа в Тункинском рифте наблюдаются определенные закономерности, обусловленные его сложной внутренней структурой. Во-первых, на фоне преобладания растяжения и сдвига редкие решения, соответствующие сжатию и сжатию со сдвигом встречаются только в межвпадинных перемычках и плечах рифта. Во-вторых, по сравнению со смежными бассейнами в межвпадинных перемычках поле напряжений имеет более мозаичный характер. Такие различия в распределении полей напряжений в разных структурных элементах отчасти могут быть связаны с разным возрастом трещиноватости в молодых осадках впадин и в древнем фундаменте. Однако, как показывает анализ ориентировок главных осей напряжений и механизмы очагов землетрясений, приведенные ниже, эти различия скорее обязаны большей неоднородности строения кристаллических массивов, которая вызывает значительные вариации напряженного состояния в их пределах. В-третьих, растяжение доминирует вблизи Байкальской котловины и в центральной, наиболее широкой, части Тункинского рифта, причем как во впадинах, так и в горном обрамлении. В четвертых, существенное усложнение поля напряжений и увеличение сдвиговой составляющей происходит в западной части изученной площади в районе Туранского и Мондинского бассейнов (см. рис. 7), которые значительно вытянуты в широтном направлении. По-видимому, вдоль этого сегмента рифта и далее на запад, по мере приближения к оз. Хубсугул, имеют место трансформирующие движения, приводящие к раскрытию серии рифтогенных впадин меридионального простирания на территории Монголии.

Итоговое соотношение вкладов растяжения, растяжения со сдвигом, сдвига, сжатия со сдвигом и сжатия в формирование разрывной сети Тункинского рифта составляет 53/17/23/3/4, соответственно (см. рис. 7, Б). Сопоставление этих результатов с исследованиями, проведенными для крупных раз-

Таблица 2. Фактические данные и результаты реконструкций полей напряжений для межпластинных перемычек Тункинского рифта

№ п/п	№ т.н.	Широта, °	Долгота, °	Тип пород/осадков	Сопряженные системы		Угол, °	σ ₃ аз., °	σ ₂ аз., °	σ ₁ аз., °	σ ₁ угол, °	Тип поля напряжений					
					аз., °	угол, °											
Харадабанская межпластинная перемычка																	
1	О44601	51.671	101.201	Кварциты	240	50	67	63	12	67	64	7	154	7	283	82	Растяжение
2	А44601	51.672	101.625	Кварциты	190	70	67	47	19	82	215	13	115	36	321	51	Растяжение со сдвигом
3	А44801	51.676	101.214	Сланцы	180	70	270	60	19	72	48	31	245	58	143	8	Сжатие со сдвигом
4	А44802	51.674	101.238	Известняки	17	63	180	40	10	66	181	13	91	1	354	77	Растяжение
5	О44901	51.667	101.25	Мраморы	55	80	320	75	9	88	97	3	357	71	188	18	Растяжение
					20	60	195	50	9	70	18	15	108	4	233	84	Сдвиг
					330	70	210	80	10	66	181	6	281	61	88	28	Сдвиг
Туранская межпластинная перемычка																	
6	А45404	51.696	101.664	Гнейсы, сланцы	80	80	80	50	17	30	260	25	350	0	80	65	Растяжение
7	45501	51.661	101.631	Граниты	23	33	175	80	9	71	185	24	88	15	328	61	Растяжение
8	А45502	51.665	101.604	Граниты	120	80	180	60	12	51	330	34	150	56	240	0	Сжатие со сдвигом
Ниловая межпластинная перемычка																	
9	45403	51.693	101.679	Граниты, гранодиориты	130	70	290	70	26	45	300	0	210	26	30	64	Растяжение
10	45401	51.70	101.693	Габбро-диабазы, диабазы	90	80	170	80	16	79	310	13	130	77	220	0	Сдвиг
11	45601	51.671	101.831	Гнейсы	0	60	160	70	13	54	170	5	78	20	273	69	Растяжение
12	47201	51.669	101.771	Гранито-гнейсы	40	65	110	70	11	64	256	27	65	63	164	4	Сдвиг
13	47202	51.677	101.820	Гнейсы	300	60	150	70	8	58	136	5	228	29	36	61	Растяжение
					40	70	130	70	14	83	265	27	85	63	175	0	Сдвиг
14	47302	51.680	101.856	Гнейсы	30	60	155	60	12	80	182	0	93	39	273	51	Растяжение со сдвигом
Еловская межпластинная перемычка																	
15	50403	51.777	102.755	Сланцы	160	60	307	37	20	88	147	12	240	17	22	69	Растяжение
16	50501	51.765	102.845	Гнейсы	150	80	330	60	16	40	150	10	240	0	330	80	Растяжение
17	47901	51.745	102.794	Гранодиориты	60	60	265	80	7	47	253	10	349	30	146	58	Растяжение со сдвигом
18	47806	51.73	102.755	Гнейсы	170	80	245	60	16	72	25	25	242	60	122	16	Сдвиг
19	50404	51.794	102.802	Сланцы	90	30	245	60	15	88	38	71	161	11	254	15	Сжатие
					163	77	350	50	12	53	166	14	75	7	319	75	Растяжение
20	47902	51.759	102.834	Сланцы	80	70	250	30	10	80	77	20	168	5	271	69	Растяжение
21	48902	51.7534	102.826	Базальты	120	80	300	55	7	45	120	12	210	0	300	78	Растяжение
					170	20	350	20	6	40	80	90	260	0	350	0	Сжатие
Зуркузунская межпластинная перемычка																	
22	43602	51.736	103.418	Гнейсы	170	70	340	40	9	71	166	15	258	6	10	74	Растяжение
23	44401	51.726	103.420	Граниты	155	70	350	40	12	71	161	15	68	10	307	72	Растяжение
24	44402	51.717	103.418	Гнейсы	170	60	340	60	14	61	345	0	255	9	75	81	Растяжение
25	А19001	51.744	103.417	Конгломераты	170	60	290	60	15	83	320	0	230	41	50	49	Растяжение со сдвигом
					20	30	220	30	8	59	120	84	300	6	210	0	Сжатие

Примечание: сведения о возрасте отложений для т.н. 21 получены из работы [30]; 1 – относительная интенсивность поля напряжений, соответствующая сумме интенсивностей максимумов сопряженных систем трещин; т.н. – точка наблюдения. Возраст пород/осадков для №№ 1–20 докайнозой; для № 21 – миоцен, 15–16 млн. лет; для № 25 плиоцен.

Таблица 3. Фактические данные и результаты реконструкций полей напряжений для плечей Тункинского рифта

№ п/п	№ т.н.	Широта, °	Долгота, °	Тип пород/осадков	Сопряженные системы		Угол, °	σ ₃ аз., °	σ ₂ аз., °	σ ₁ аз., °	σ ₁ угло., °	Тип поля напряжений					
					аз., °	угло., °											
Тункинский хребет – Мондинская впадина																	
1	A4-3	51.717	100.79	Мраморы	250	80	113	67	15	53	271	7	172	50	6	39	Растяжение со сдвигом
2	49102	51.672	101.056	Сланцы	70	80	180	70	13	75	36	6	139	64	303	25	Сдвиг
3	49103	51.672	101.025	Кварциты и сланцы	60	80	170	80	15	72	205	0	115	73	295	17	Сдвиг
4	A44702	51.673	101.091	Диориты с жилами пегматита	90	80	197	73	13	77	54	4	155	68	322	22	Сдвиг
5	A44703	51.668	101.118	Кварциты	90	80	340	30	14	89	112	29	5	28	240	48	Растяжение со сдвигом
6	O44801	51.667	101.127	Кварциты	190	50	20	30	23	90	190	5	100	0	10	85	Растяжение
7	O44803	51.674	101.172	Мраморы	70	50	290	60	10	79	271	5	4	26	170	64	Растяжение
8	44603	51.68	101.178	Кварциты	95	70	190	65	13	86	321	32	149	58	53	3	Сжатие со сдвигом
9	44602	51.68	101.183	Сутлинки с обломками	95	70	335	70	12	71	305	0	35	54	215	36	Растяжение со сдвигом
					10	60	180	70	17	51	185	5	94	10	300	78	Растяжение
					115	80	310	55	20	47	122	13	28	17	247	69	Растяжение
Тункинский хребет – Тункинская впадина																	
10	40901	51.923	102.439	Мраморы	160	70	330	70	13	41	335	0	245	13	65	77	Растяжение
11	41001	51.919	102.391	Мраморы	20	30	240	80	12	77	227	26	327	19	88	57	Растяжение со сдвигом
12	49002	51.923	102.450	Мраморы	193	47	350	80	12	57	0	17	264	20	127	64	Растяжение
13	49004	51.925	102.449	Мраморы	170	80	350	60	16	40	170	10	260	0	350	80	Растяжение
14	49006	51.927	102.449	Мраморы	185	80	357	60	13	41	181	10	273	10	48	75	Растяжение
15	49008	51.928	102.449	Мраморы	145	70	310	70	15	43	317	0	227	20	47	70	Растяжение
16	49011	51.932	102.449	Гнейсы	180	70	290	80	24	75	324	6	221	64	57	25	Сдвиг
17	49013	51.934	102.449	Гнейсы	120	80	190	60	35	68	332	24	192	60	70	17	Сдвиг
18	40204	51.927	102.424	Мраморы	10	40	200	50	34	90	195	5	286	5	60	83	Растяжение
19	40401	51.931	102.407	Гнейсы	310	60	170	50	20	79	329	5	236	26	70	64	Растяжение
20	40506	51.943	102.420	Мраморы	0	60	160	50	14	72	351	5	82	14	241	75	Растяжение
					180	60	290	70	20	84	323	6	226	50	58	39	Растяжение со сдвигом
Тункинский хребет – Илловская межвпадинная перемычка																	
21	2301	51.809	101.683	Диориты	20	60	210	70	9	51	205	5	296	10	90	78	Растяжение
22	2303	51.867	101.688	Гнейсы	90	70	240	50	16	66	77	10	171	23	324	64	Растяжение
23	2403	51.844	101.631	Мраморы, Гнейсы	10	50	193	33	9	83	183	81	281	1	11	9	Сжатие
Тункинский хребет – Торская впадина																	
24	40001	51.861	103.082	Гнейсы и пегматиты	240	70	170	70	23	65	25	24	205	66	115	0	Сдвиг

Таблица 3. Окончание

№ п/п	№ т.н.	Широта, °	Долгота, °	Тип пород/осадков	Сопряженные системы			Угол, °	σ ₃ аз., °	σ ₃ угол, °	σ ₂ аз., °	σ ₂ угол, °	σ ₁ аз., °	σ ₁ угол, °	Тип поля напряжений		
					аз., °	угол, °	угол, °										
Хребет Хамар-Дабан – Туранская впадина																	
25	A44902	51.63	101.288	Гнейсы	140	70	260	70	8	71	290	0	200	54	20	36	Растяжение со сдвигом
26	44501	51.641	101.465	Мраморы	10	70	290	80	18	77	149	19	352	69	242	8	Сдвиг
27	A45001	–	–	Гнейсы, гнейсо-граниты	70	80	310	55	17	72	97	14	351	47	199	39	Растяжение со сдвигом
28	A45002	51.608	101.554	Гнейсы, гранито-Гнейсы	50	50	170	80	17	75	196	17	89	43	302	42	Растяжение со сдвигом
					90	60	190	50	14	78	316	47	149	42	53	7	Сжатие со сдвигом
Хребет Хамар-Дабан – Тункинская впадина																	
29	43002	51.626	102.093	Граниты	160	70	345	70	10	40	342	0	72	7	252	83	Растяжение
30	43101	51.583	102.25	Гранито-гнейсы	160	70	240	70	12	74	20	25	200	65	290	0	Сдвиг
31	43201	51.63	102.363	Диориты	0	70	170	70	13	41	175	0	85	13	265	77	Растяжение
32	43202	51.608	102.363	Граниты	140	80	270	70	12	58	116	6	214	56	22	32	Растяжение со сдвигом
33	43203	51.589	102.338	Гнейсы	290	80	190	80	17	82	330	0	240	75	60	15	Сдвиг
34	43204	51.579	102.341	Пегматонидные	0	40	180	70	10	70	180	15	90	0	360	75	Растяжение
35	43302	51.701	102.708	Гнейсы	200	70	305	80	25	80	341	6	238	65	74	24	Сдвиг
36	43303	51.704	102.736	Граниты	3	80	200	50	9	52	10	15	276	16	141	68	Растяжение граниты
37	43401	51.657	102.863	Граниты	110	70	150	70	16	37	310	21	130	69	220	0	Сдвиг
38	43402	51.645	102.878	Гранито-гнейсы	180	33	0	60	12	87	0	13	90	0	180	77	Растяжение
39	43403	51.674	102.892	Гранито-гнейсы	60	70	340	70	14	74	200	25	20	65	290	0	Сдвиг
40	43404	51.643	102.913	Гнейсы	140	50	295	60	15	74	307	15	215	17	53	72	Растяжение
41	43405	51.682	102.894	Гранито-гнейсы	0	70	175	40	12	70	358	15	89	3	191	75	Растяжение
42	43501	51.73	102.887	Гнейсы	225	80	310	80	16	83	87	13	267	77	357	0	Сдвиг
43	43502	51.729	102.864	Гнейсы	20	70	210	40	24	71	24	15	292	6	180	74	Растяжение
44	44301	51.666	103.536	Пегматиты	170	80	325	50	13	55	159	15	256	23	38	62	Растяжение
45	44302	51.664	103.541	Диопсидовые метасоматиты	130	80	340	40	11	65	142	21	44	20	273	60	Растяжение со сдвигом
					20	40	190	50	11	90	330	83	104	5	195	5	Сжатие
					50	70	240	22	31	88	53	24	321	4	223	66	Растяжение
					180	80	305	70	16	62	153	6	253	59	60	30	Сдвиг
Хребет Хамар-Дабан – Быстринская впадина																	
44	44301	51.666	103.536	Пегматиты	10	55	200	65	15	61	195	5	286	8	75	80	Растяжение
45	44302	51.664	103.541	Диопсидовые метасоматиты	0	60	170	32	31	88	356	15	88	4	193	74	Растяжение
					90	50	270	80	10	50	270	15	180	0	90	75	Растяжение

Примечание: обозначение / и т.н. см. в таблице 1. Возраст пород/осадков для №№ 1–8, 10–45 докайнозой; для № 9 – плейстоцен-голоцен. Проверк – нет данных.

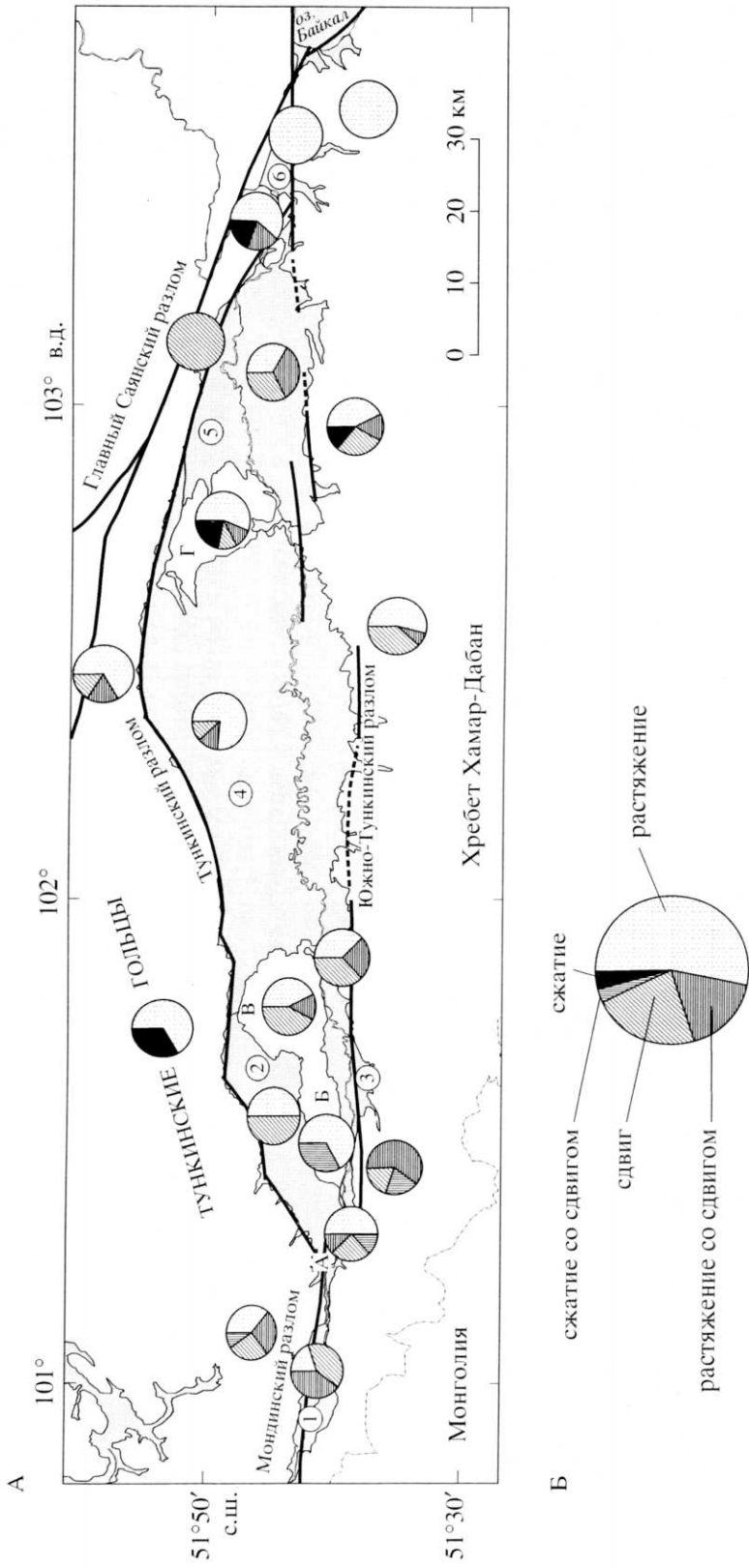


Рис. 7. Круговые диаграммы, показывающие вклад поля напряжений определенного типа в общую сумму полученных решений: А – для разных структурных элементов рифта; Б – для всего Тункинского рифта
Условные обозначения см. на рис. 1

ломных зон Центральной Азии [17], позволяет отнести Тункинский рифт к структуре, развивающейся в обстановке растяжения со сдвигом.

Ориентировка осей главных нормальных напряжений

Большое значение при изучении напряженного состояния имеет пространственная ориентировка осей главных нормальных напряжений. В Тункинском рифте на фоне превалирования СЗ-ЮВ растяжения их направление весьма разнообразно [3, 7, 11, 15, 22]. Мы провели детальный анализ полученных нами ориентировок осей главных нормальных напряжений, расположенных в плоскости горизонта. Основой явились розы-диаграммы, построенные отдельно для впадин, межвпадинных перемычек, горных поднятий и всего рифта в зависимости от типа поля напряжений (рис. 8).

Рассматривая в целом весь рифт, в решениях, соответствующих чистому растяжению, можно увидеть преобладание субмеридионального и СЗ-ЮВ направлений σ_3 (оси растяжения), причем первое доминирует (см. рис. 8). Розы-диаграммы простираний σ_3 для этого типа поля напряжений отчасти подобны для всех структурных элементов. Примечательно почти идеальное сходство роз-диаграмм, построенных для северного и южного плечей Тункинского рифта, где оси растяжения направлены преимущественно субмеридианально. Во впадинах, где измерения трещин проводились, главным образом, в отложениях позднего плейстоцена и голоцена, наряду с субмеридиональной отмечается СЗ-ЮВ ориентировка σ_3 , меняющаяся в пределах $290-340^\circ$. В межвпадинных перемычках с некоторыми вариациями проявляются оба упомянутых тренда.

В решениях, отвечающих растяжению в сочетании со сдвигом, в целом превалирует СЗ-ЮВ направление σ_3 , хотя очевидны вариации осей в разных структурных элементах (см. рис. 8). Главной особенностью является доминирование субмеридиональной ориентировки σ_3 во впадинах и отрогах, СЗ-ЮВ – в плечах рифта. Кроме того, в этом типе поля напряжений отмечаются решения с субширотным простиранием σ_3 .

В сдвиговых полях напряжений оси растяжения и сжатия весьма нестабильны в ориентировках. СЗ-ЮВ направление σ_3 прослеживается во всех структурных элементах и согласуется с общим региональным полем напряжений. В межвпадинных перемычках или вблизи них, а также в районе Туранской и Мондинской впадин отмечается субширотное, продольное Тункинскому рифту, простирание σ_3 (рис. 9, В и см. рис. 8). В таком сдвиговом поле напряжений формируются и активизируются северо-восточные и северо-западные разрывы. Очевидный вопрос вызывают ре-

шения с СВ-ЮЗ направлением σ_3 , которые изредка встречаются и в других типах напряженного состояния. Определенно можно полагать, что такие поля напряжений не группируются в отдельный этап, который мог бы отражать какой-то длительный временной отрезок развития Тункинского рифта. Об этом свидетельствует их проявление как в древних породах (см. рис. 4–6), так и в отложениях верхнего плейстоцена и голоцена (см. рис. 3).

Среди всех реконструированных решений четыре относятся к сжатию в сочетании со сдвигом и пять – к чистому сжатию. В первом типе поля напряжений оси сжатия имеют преимущественно СВ-ЮЗ ориентацию, во втором – ССВ-ЮЮЗ (см. рис. 8). В межвпадинных перемычках вариации в направлениях σ_1 существенны, но каждый из лучей на розах-диаграммах представляет только одно решение. Два решения, отвечающие сжатию, с $\sigma_1 = 350^\circ$ и 210° (см. рис. 4, табл. 2, № 21 и 25), были получены в миоценовых базальтах (Еловский отрог) и плиоценовых конгломератах (Зуркузунская перемычка). Скорее всего, оба отражают фазу сжатия, которая имела место в позднем миоцене–плиоцене и разделяла две стадии развития Байкальской рифтовой зоны [6]. Остальные немногочисленные решения сжатия и сжатия со сдвигом, полученные по замерам в древних коренных породах, могут относиться как к эпизоду сжатия на границе миоцена и плиоцена, так и к древнему дорифтовому этапу развития территории. Кроме того, они могут отражать и локальные флуктуации действующего в позднем кайнозое регионального поля напряжений.

Проведенный анализ позволяет выделить две главные особенности. Во-первых, разноориентированные оси напряжений устанавливаются по замерам трещиноватости в рыхлых отложениях, возраст которых в большинстве точек наблюдений во впадинах позднеплейстоцен-голоценовый (см. решения, полученные для впадин на рис. 3, 8 и табл. 1). Следовательно, решения с подобным пространственным положением векторов главных нормальных напряжений в древних кристаллических породах могут быть также отнесены к данному возрастному интервалу. Во-вторых, отмечается некоторая зависимость ориентировки оси растяжения от типа поля напряжений и его проявления в том или ином структурном элементе рифта. Так, например, в решениях растяжения субмеридиональная ориентировка σ_3 несколько превалирует над СЗ-ЮВ, а в решениях растяжения со сдвигом – наоборот (см. рис. 8). Субширотное простирание σ_3 наиболее часто встречается в решениях сдвига и растяжения со сдвигом и, главным образом, вблизи межвпадинных перемычек.

В целом, обобщенная роза-диаграмма ориентировок горизонтальных осей растяжения пока-

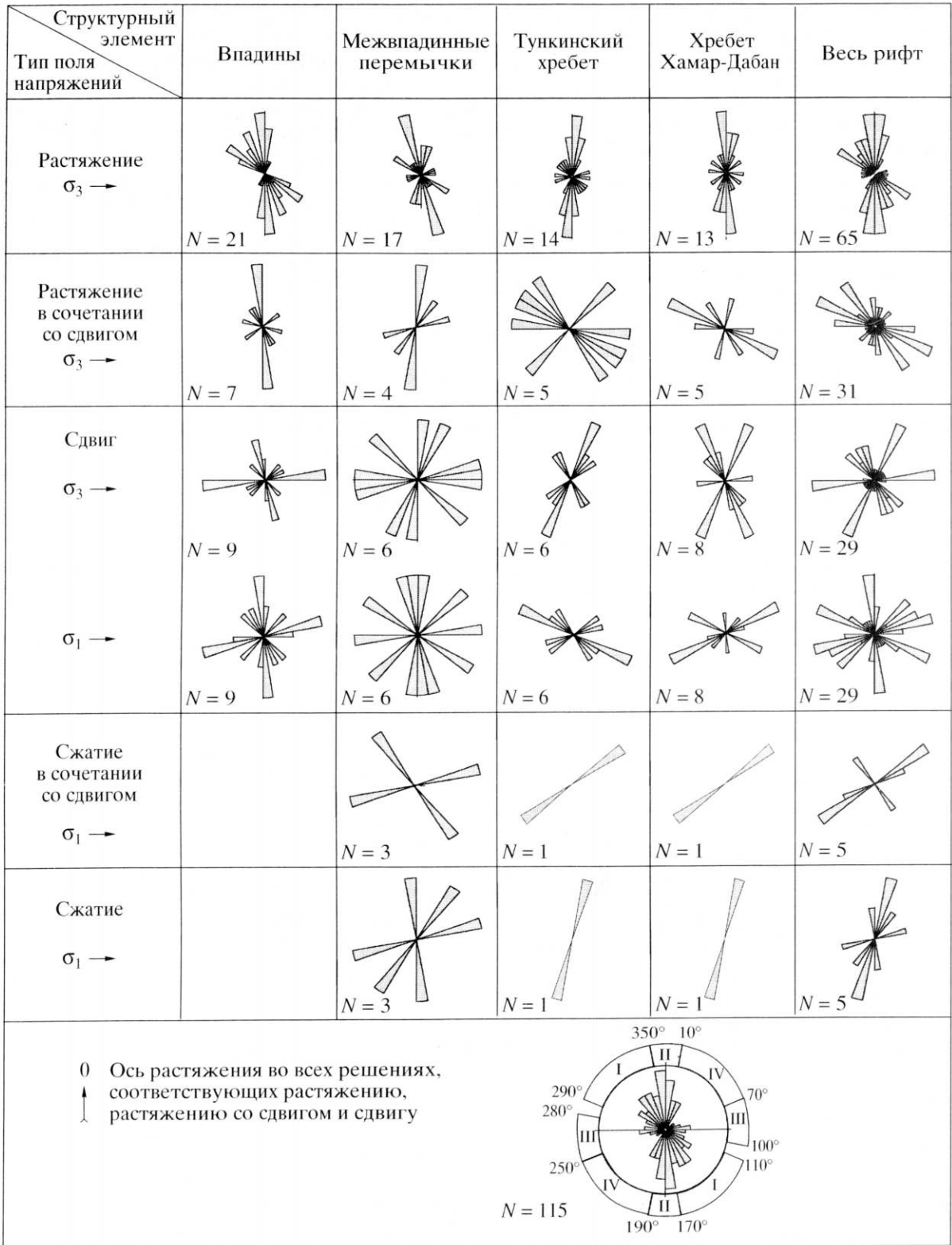


Рис. 8. Розы-диаграммы ориентировок осей главных нормальных напряжений в структурных элементах Тункинского рифта

зывает значительное преобладание решений с субмеридиональным и СЗ-ЮВ направлением (см. рис. 8). В соответствии с ней все реконструи-

рованные поля напряжений были разделены на четыре группы в зависимости от ориентировки σ_3 (см. рис. 9) и подверглись дальнейшему анализу.

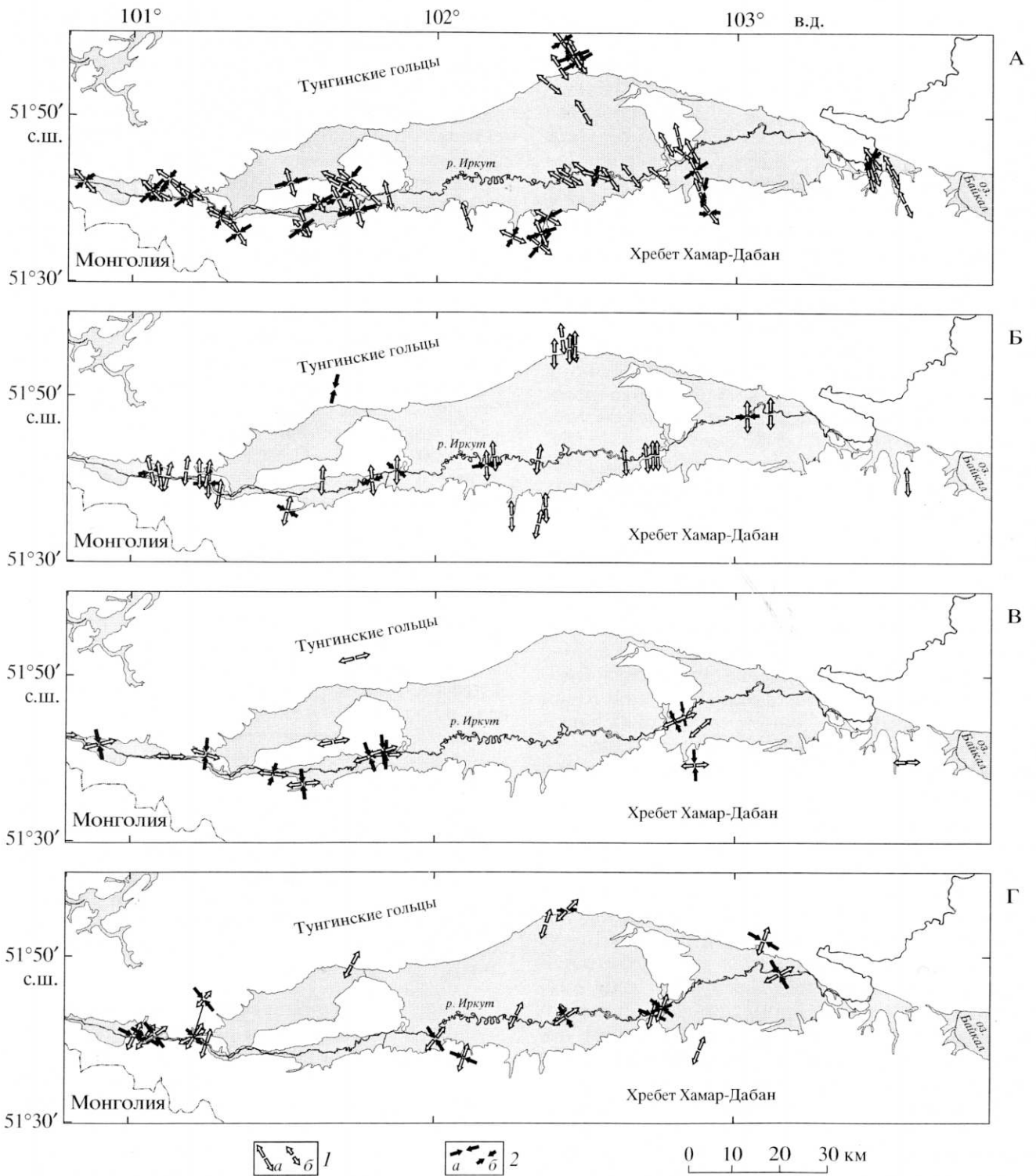


Рис. 9. Схемы распределения полей напряжений с различными ориентировками осей растяжения в точках наблюдения: А – северо-западными, Б – субмеридиональными, В – субширотными, Г – северо-восточными
 1 – оси растяжения с углами наклона 0–30° (а) и 31–60° (б); 2 – оси сжатия с углами наклона 0–30° (а) и 31–60° (б)

Относительная интенсивность полей напряжений с разной ориентировкой оси растяжения

Оценка величин действующего поля напряжений геолого-структурными методами в силу ряда

общеизвестных причин сталкивается с большими трудностями. В данной работе с определенной долей условности используется понятие “относительная интенсивность” поля напряжений, кото-

рое позволяет нам приблизиться к количественной оценке величин напряжений, реконструированных по трещиноватости. Основываясь на известной связи между приложенными нагрузками, возникающими напряжениями и деформациями, нами рассчитывался показатель относительной интенсивности (I) поля напряжений, определяемый по степени деформированности пород трещинами сопряженных систем (табл. 1–3). В качестве такого показателя использовалась сумма плотностей максимумов этих систем, снимаемых с диаграмм трещиноватости (см. рис. 3–6). При этом поскольку плотность каждого сопряженного максимума выражена в процентах от общего количества замеренных в обнажении трещин, влияние механических свойств и структуры пород на используемый показатель минимально и не сопоставимо с воздействием напряженного состояния, которое приводит к формированию сопряженных систем трещин определенных направлений. Это можно видеть и из таблиц 1–3, в которых приводятся сведения о типе пород в точках наблюдения и значение I . Полученные таким образом данные позволили построить схемы распределения относительной интенсивности поля напряжений (рис. 10) с различными ориентировками осей растяжения согласно выделенным на обобщенной розе-диаграмме секторам (см. рис. 8). В основе схем лежит численное значение относительной интенсивности поля, рассчитанное для каждой точки наблюдения, что позволило представить их в изолиниях. В случае отсутствия решения с определенной ориентировкой оси растяжения точке придавалось значение 0.

Построенные схемы, в отличие от рис. 9, на котором представлены фактические данные в точках наблюдения, дают возможность наглядно представить области распространения полей напряжений с СЗ-ЮВ ($290\text{--}350^\circ$), субмеридиональной ($351\text{--}10^\circ$), субширотной ($71\text{--}100^\circ$) и СВ-ЮЗ ($11\text{--}70^\circ$) ориентировками σ_3 , а также их относительную интенсивность. Обращает на себя внимание, что выделенные области, лишь незначительно перекрывая одна другую, заполняют почти весь Тункинский рифт, вследствие чего получается определенная мозаика поля напряжений. Области распространения полей напряжений с СЗ-ЮВ ориентировкой оси растяжения занимают наибольшую площадь и в той или иной степени захватывают все структурные элементы рифта (см. рис. 10, А). Для них же характерны наибольшее максимальное и среднеарифметическое значения интенсивности поля напряжений. В западной половине Тункинского локального бассейна поля напряжений с СЗ-ЮВ ориентировкой σ_3 перекрываются полями напряжений с субмеридиональным и СВ-ЮЗ направлениями σ_3 , которые в данном конкретном месте характеризуются большей интенсивностью (см. рис. 10, Б и 10, Г).

На этом участке указанные направления в точках наблюдения отличаются одно от другого не более чем на 10° . Они, хотя и были отнесены к разным секторам на розе-диаграмме (рис. 8), оказались сближенными в пространстве. Это позволяет отнести два облака на рис. 10, Б и 10, Г к одной области распространения полей напряжений с субмеридиональным направлением оси растяжения. Характерно, что локальная смена ориентировки σ_3 с СЗ-ЮВ на субмеридиональную происходит на границе крупного регионального разлома ССЗ простирания (см. рис. 1 и 10).

Другое белое “пятно” на рис. 10, А наблюдается в Торской впадине. Частично оно перекрывается областью распространения более интенсивного поля напряжений с СВ-ЮЗ направлением σ_3 . Учитывая, что Торскую впадину с севера ограничивает запад-северо-западный сегмент Тункинского разлома (см. рис. 1), можно с большой долей вероятности предполагать, что подобное локальное изменение ориентации главных нормальных напряжений обусловлено “приспособлением” векторов напряжений к ранее существующей крупной тектонической границе. При действии только однородного СЗ-ЮВ растяжения в такой структурной ситуации вряд ли было возможно образование довольно широкого, практически изометричного, Торского бассейна, который мы видим сегодня. Отчасти раскрытие бассейна обеспечивали и поля напряжений растяжения и растяжения со сдвигом с субмеридиональной ориентировкой σ_3 , которые образуют область повышенной интенсивности в северо-западной части Торской впадины (см. рис. 10, Б). В пользу “структурной зависимости” вариаций напряженного состояния свидетельствует и то, что на южной границе этого бассейна и в предгорьях хребта Хамар-Дабан области распространения полей напряжений с СЗ-ЮВ ориентировкой приобретают основное значение и характеризуются наибольшими величинами.

На рис. 10, В хорошо видно, что решения с субширотным направлением σ_3 имеют узколокальное проявление вблизи Еловской, Туранской и Ниловской межвпадинных перемычек. Для этих полей напряжений отмечается невысокая интенсивность. Возможно, они возникают периодически на границе локального бассейна и приподнятого отрога с более сложным разломно-блоковым строением. В то же время действие продольного к Тункинскому рифту горизонтального растяжения (в решениях сдвига и растяжения со сдвигом) усиливается при приближении к озеру Хубсугул, приуроченного к меридиональной границе Тувино-Монгольского микроконтинента. На западном замыкании рифта существенное усложнение напряженного состояния выражается не только в разнообразии полей напряжений разных типов,

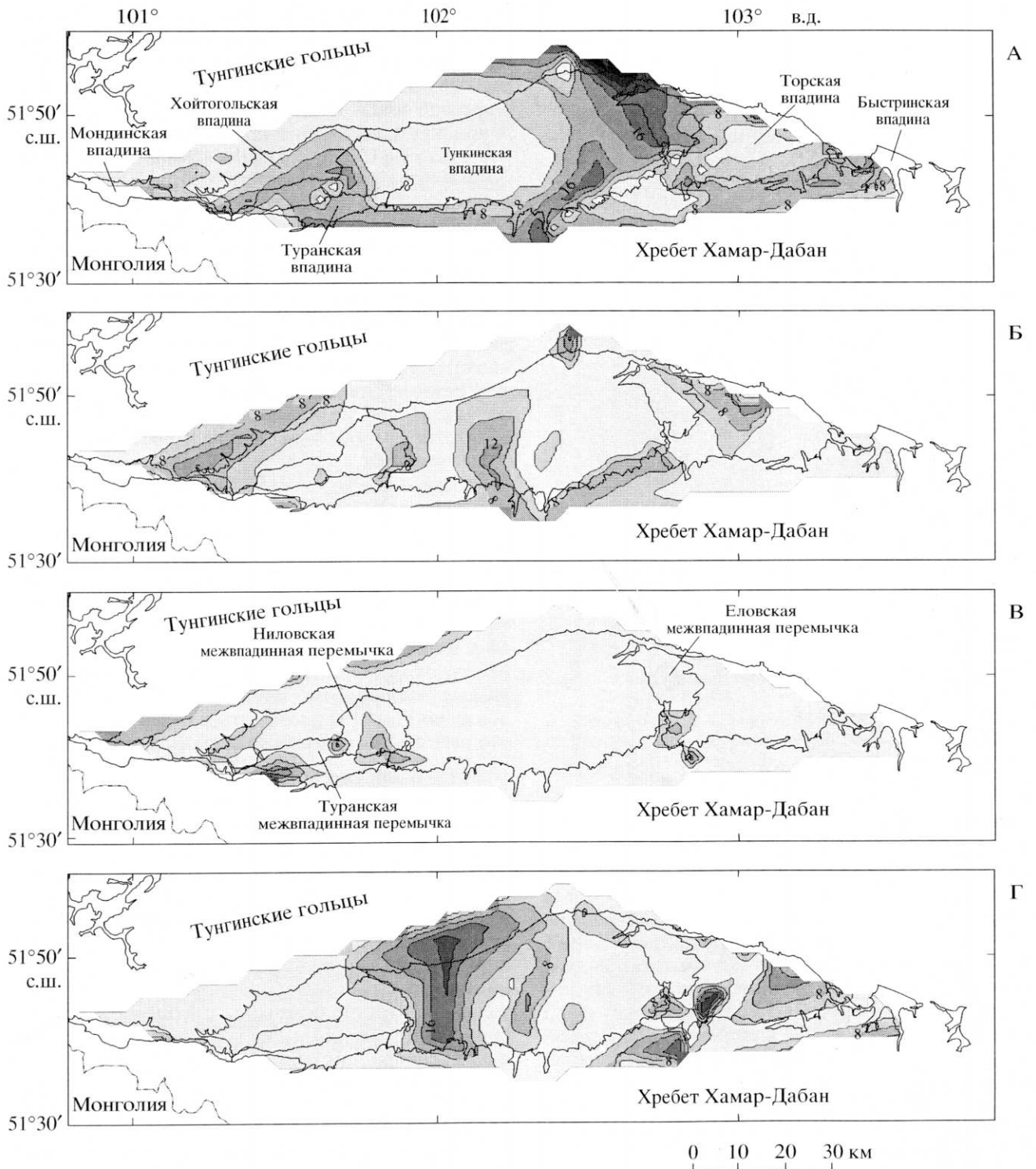


Рис. 10. Схемы распределения относительной интенсивности полей напряжений с различными ориентировками осей растяжения: А – северо-западными, Б – субмеридиональными, В – субширотными, Г – северо-восточными

но и в направлениях их главных горизонтальных осей. Только там, на относительно небольшом по площади участке в районе Мондинской впадины, реализовались поля напряжений со всеми возможными ориентировками σ_3 (см. рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты наших исследований показывают, что значительные вариации в ориентировках осей главных нормальных напряжений и разно-

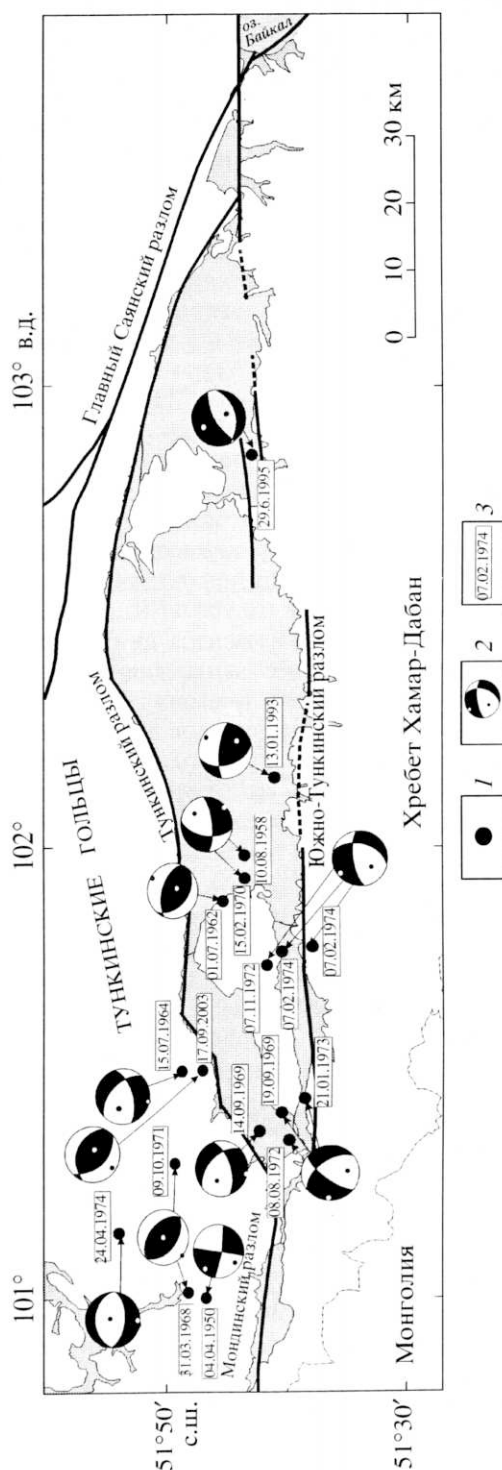


Рис. 11. Известные индивидуальные и групповые определения механизмов очагов землетрясений Тункинского рифта. Схема составлена по материалам, опубликованным в работах [3, 7, 11, 12, 28]. Для землетрясений 29.06.1995 г. и 04.04.1950 г., для которых известны два и более решений, приведены механизмы из работ [3] и [28], соответственно
1 – эпицентры землетрясений; 2 – фокальные механизмы очагов землетрясений (проекции нижней полушеры, закрашены квадранты сжатия); 3 – дата сейсмического события

образии типов напряженного состояния в Тункинском рифте являются закономерными и обусловлены, главным образом, его внутренним строением и расположением в общей структуре Байкальской рифтовой зоны. Еще в 80-х годах было установлено [22], что на фоне преобладающего СЗ-ЮВ растяжения и СВ-ЮЗ сжатия локальные поля напряжений на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны характеризуются большим разбросом в направлениях σ_3 и σ_1 . Это явление объяснялось влиянием местных факторов. Более поздние исследования в Тункинской системе впадин также показали большое разнообразие типов деформирования земной коры [15], однако авторы цитированной работы отмечают, что большинство полученных стресс-тензоров характеризует режимы сдвига и транспрессии. Ими выделено шесть этапов эволюции напряженного состояния земной коры в Тункинском рифте, которые сменяли друг друга с конца олигоцена до настоящего времени [15]. В настоящей работе, основанной на 124 решениях, 35 из которых реконструированы по замерам трещин в отложениях возрастом от 7.87 млн. до 3000 лет, показано, что большинство полей напряжений относится к типам растяжения, сдвига и растяжения со сдвигом. Следует отметить, что этот вывод согласуется с данными, представленными в работе [29]. Многочисленные находки сбросовых смещений разных амплитуд в плейстоцен-голоценовых отложениях [7, 19] также подтверждают преобладание растяжения в позднем кайнозое, а не сжатия.

Ранее были сделаны общие замечания о влиянии крупных разломов на напряженное состояние юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны [22, 24]. В настоящей работе мы провели детальный анализ особенностей распределения полей напряжений, который стал возможен благодаря большому количеству фактических данных в разновозрастных отложениях, собранных в различных структурных элементах рифта. Полученные результаты свидетельствуют, что приблизительно со второй половины плиоцена в Тункинском рифте не было кардинальных изменений напряженного состояния, которые охватывали бы временные интервалы, длительность которых сопоставима с плейстоценом и/или голоценом. Более убедительным кажется существование фазы сжатия ССВ направления в позднем миоцен-раннем плиоцене со смятием части отложений в пологие складки во многих впадинах Байкальской рифтовой зоны [6] и образованием надвигов в Тункинских гольцах [24]. Пожалуй, только эту фазу можно рассматривать как значимый этап изменения поля напряжений регионального уровня для юго-западного фланга, который охватил достаточно продолжительный временной интервал и обширную территорию. В этот же этап укладываются некоторые из реконструирован-

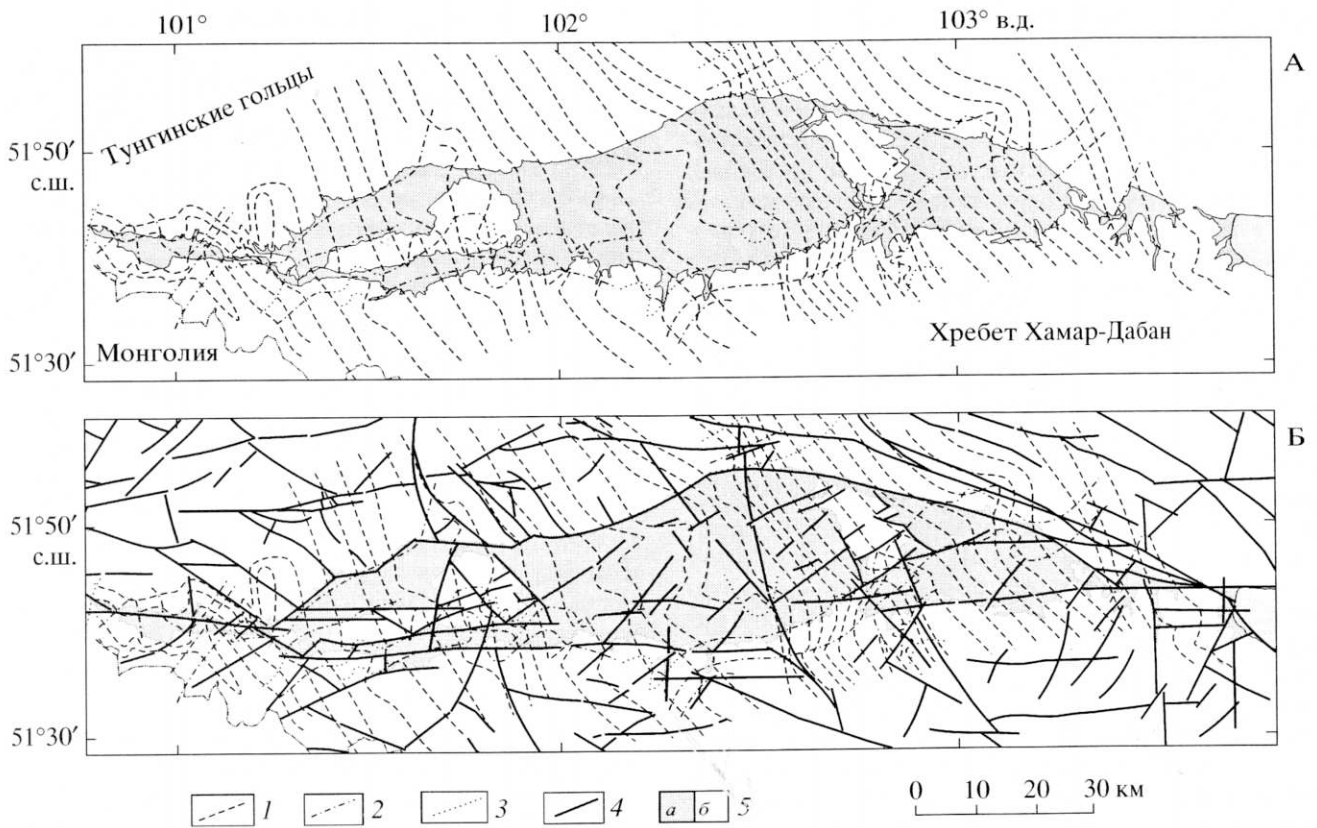


Рис. 12. Итоговая схема траекторий главных нормальных напряжений растяжения и сжатия (А), сопоставленная с картой разломно-блокового строения Тункинского рифта (Б)

1–3 – траектории главных векторов: 1 – растяжения с углами наклона 0–30°; 2 – сжатия с углами наклона 0–30°; 3 – сжатия с углами наклона 31–60°; 4 – разломы; 5 – впадины, заполненные осадочными отложениями (а), выступы кристаллического фундамента (б)

ных решений. Проявление регионального сжатия может быть связано с эффектом континентальной коллизии Евразийской и Индостанской плит, начало которой относят к рубежу 50–55 млн. лет [26, 27]. Учитывая временные оценки начала деформаций в северном Тянь-Шане (11 млн. лет) [26] и в зонах основных разломов Азии, таких, как Алтын-Таг и Кунь-Лунь (20–25 млн. лет) [27], которые расположены значительно южнее, можно полагать, что влияние коллизии на Байкальскую рифтовую зону могло отразиться значительно позднее. По расчетам К.Г. Леви [4], этот эффект мог проявиться не ранее, чем 10–12 млн. лет назад, а данные, обобщенные Н.А. Логачевым [6], свидетельствуют, что сжатие в Байкальской рифтовой зоне, отделявшее медленную и быструю стадии рифтинга, было 5–7 млн. лет назад. В остальном изменения напряженного состояния в Тункинском рифте имеют кратковременный, импульсный и локальный характер. Об этом свидетельствуют и механизмы очагов землетрясений, известные для рассматриваемой территории [3, 7, 11, 12, 28] (рис. 11). Большинство из них отвечает растяжению со сдвигом с СЗ-ЮВ направлением σ_3 ,

хотя имеют место и другие решения, в которых субгоризонтальная σ_3 имеет субмеридиональное или субширотное направление. Следует отметить землетрясения с взбросовым механизмом очага, эпицентры которых находятся в западной части Тункинского рифта. Они связаны, главным образом, с разломами СЗ направления, которые доминируют в определенных структурных элементах. Судя по механизмам очагов землетрясений, напряженное состояние в отдельных частях Тункинского рифта изменяется в пределах нескольких лет или даже года. Возникает вопрос: почему в Тункинском рифте наблюдаются такие значительные флуктуации поля напряжений, ведь в центральной части Байкальской рифтовой зоны оно считается более стабильным [11]?

Наиболее очевидной причиной может быть то, что формирование Тункинского рифта происходило в неблагоприятных условиях для реализации СЗ-ЮВ регионального растяжения. Его восточное окончание приурочено к рифейскому узлу тройного сочленения, находившемуся у южного клиновидного выступа Сибирского палеоконтинента (рис. 3.10 на с. 36 в работе [10]), ветвями ко-

того были северо-западный Саянский, северо-восточный Байкальский (в районе начала Тункинского рифта он имеет широтное простираание) и субмеридиональный Тувино-Монгольский древние швы. Вероятно, позднее был сформирован субширотный Тункинский разлом, время образования которого относят к раннему палеозою [24]. Предшествующая кайнозойскому рифтообразованию структура на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны еще более усложнилась последующими тектоническими движениями вплоть до мелового периода. Таким образом, даже после пенеппенизации, перед началом формирования морфоструктурного комплекса Байкальской рифтовой зоны, на месте будущего Тункинского рифта в земной коре сохранились три крупнейшие тектонические границы. Ни одна из них не удовлетворяла беспрепятственной реализации регионального СЗ-ЮВ растяжения в такой мере, чтобы образовался нормальный почти ортогональный рифт, подобный Байкальскому. Такие условия привели к формированию сложной морфоструктуры Тункинского рифта с множеством различных бассейнов и приподнятых отрогов и мозаичному (по типам и ориентировкам) распределению локальных полей напряжений. Наибольшее усложнение поля напряжений происходит на западном замыкании Тункинского рифта, где осевая линия Байкальской рифтовой зоны резко разворачивается к меридиональному направлению, приспособившись к ранее существующей тектонической границе.

Проведенный анализ и имеющиеся данные позволили построить итоговую схему траекторий действия главных нормальных напряжений растяжения и сжатия (рис. 12, А), которая была сопоставлена с картой разломно-блокового строения Тункинского рифта (см. рис. 12, Б). Устанавливается, что изменение ориентировки осей исходного СЗ-ЮВ поля напряжений происходит в узлах пересечения разломов и на участках сложного строения разрывной сети, которые отмечаются, главным образом, в межвпадинных перемычках вблизи границ с локальными впадинами рифта. Зачастую можно видеть поворот траекторий вблизи окончаний закартированных разломов. В местах разряженной разрывной сети векторы напряжений сохраняют свое исходное направление. Подобные изменения первоначально однородного поля напряжений, связанные с наличием или возникновением нового разрыва, доказаны экспериментальными работами [14]. Закономерные вариации поля напряжений в пространстве и независимость построения схем разломно-блокового строения и траекторий действия главных нормальных напряжений являются еще одним подтверждением того, что изменения напряженного состояния в Тункинском рифте предопределены структурными факторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты реконструкций напряженного состояния Тункинского рифта и их анализ позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Распределение полей напряжений разных типов и изменения ориентировок их главных векторов имеют закономерный характер и обусловлены сложным морфоструктурным и разломно-блоковым строением Тункинского рифта.

2. Развитию рифта и в особенности раскрытию впадин способствовали локальные поля напряжений с субмеридиональной ориентировкой σ_3 . Для южных и северных границ межвпадинных перемычек характерно возникновение локальных полей напряжений с субширотным направлением σ_3 .

3. Растяжение и сдвиг превалируют в Тункинском рифте, хотя соотношения полей напряжений разных типов могут изменяться в различных структурных элементах. Сжатие и сжатие со сдвигом отмечаются только в межвпадинных перемычках и горном обрамлении рифта.

4. По сравнению с соседствующими локальными бассейнами поле напряжений в приподнятых отрогах имеет более мозаичный характер. Его существенное усложнение происходит в западной части изученной площади в районе Туранского и Мондинского бассейнов, где по мере приближения к озеру Хубсугул имеют место трансформирующие движения, определяющие раскрытие серии рифтогенных впадин субмеридионального простираания на территории Монголии.

5. В целом, формирование структуры рифта происходило в условиях косоугольного по отношению к оси рифта СЗ-ЮВ регионального растяжения на фоне существования трех разнонаправленных тектонических границ древнего заложения (Саянской, Байкальской и Тувино-Монгольской). Это привело к развитию нескольких эшелонированных бассейнов и приподнятых межвпадинных перемычек, наличию сдвиговой компоненты движения по разломам (иногда значительной), мозаичному распределению полей напряжений разных типов и локальному изменению ориентировки их главных осей.

6. На протяжении всего развития с олигоцена Тункинский рифт не испытывал многоэтапных изменений напряженного состояния, за исключением фазы сжатия в позднем миоцене – раннем плиоцене (5–7 млн. лет назад), которая охватила и другие впадины Байкальской рифтовой зоны [6]. Ее проявление может быть связано с эффектом континентальной коллизии Евразийской и Индостанской плит, который мог проявиться не ранее, чем 10–12 млн. лет назад [4]. После этой фазы сжатия Тункинский рифт продолжил тектоническое развитие в режиме растяжения со сдвигом.

Представленный взгляд на проблему приближает нас к пониманию особенностей не всегда однозначного проявления современного напряженного состояния, сведения о котором поступают в основном от определений фокальных механизмов очагов землетрясений. Новые данные о региональном и локальных полях напряжений и ориентировках их главных векторов дают основания полагать, что в кайнозойской истории Тункинского рифта не было существенных изменений тектонического режима, за исключением фазы сжатия в постсреднемиоценовое время.

Авторы искренне благодарны д-ру геол.-мин. наук М.Г. Леонову и д-ру геол.-мин. наук В.Г. Трифонову за плодотворное обсуждение рукописи.

Работы проведены при частичной финансовой поддержке СО РАН (комплексный интеграционный проект СО РАН-2006-6.13), РФФИ (проекты 04-05-64348, 04-05-64148), а также фондов Президента РФ (грант МК-1645.2005.5) и INTAS (грант 05-109-4383).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанникова А.В., Ларрок К., Аржанников С.Г. К вопросу о голоценовом режиме деформаций в районе западного окончания системы Тункинских впадин (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 4. С. 373–379.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975. 536 с.
3. Голенецкий С.И. Сейсмичность района Тункинских впадин на юго-западном фланге Байкальского рифта в свете инструментальных наблюдений второй половины XX века // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 260–270.
4. Леви К.Г., Язев С.А., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Куснер Ю.С. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2002. 182 с.
5. Леонов Ю.Г. Напряжения в литосфере и внутрилитная тектоника // Геотектоника. 1995. № 6. С. 3–21.
6. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.
7. Лунина О.В., Гладков А.С. Разломная структура и поля напряжений западной части Тункинского рифта // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 10. С. 1235–1247.
8. Лунина О.В., Гладков А.С. Разломная структура Тункинского рифта – отражение процесса косога растяжения // Докл. АН. 2004. Т. 398. № 4. С. 516–518.
9. Лунина О.В. Разрывные системы и поля напряжений южной части рифта Мертвого моря // Геотектоника. 2005. № 2. С. 52–65.
10. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакишин 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.
11. Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991–1996 годы // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 11. С. 1598–1607.
12. Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Очаговые параметры землетрясений Байкальского региона в 2003 г. // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск: ИЗК СО РАН–ИРГТУ, 2004. С. 197–201.
13. Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа / Под ред. Н.И. Николаева. М.: Недра, 1992. 295 с.
14. 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.
15. Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.А. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 1. С. 14–28.
16. Расказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя: (Южная Сибирь–Южная и Восточная Азия). Новосибирск: Наука, 2000. 288 с.
17. Семинский К.Ж. Тектонофизические закономерности деструкции литосферы на примере Гималайской зоны сжатия // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 6. С. 17–30.
18. 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. С. 293.
19. Уфимцев Г.Ф., Перевалов А.В., Резанова В.П., Кулагина Н.В., Мащук И.М., Шетников А.А., Резанов И.Н., Шибанова И.В. Радиотермолюминесцентное датирование четвертичных отложений Тункинского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 3. С. 226–232.
20. Уфимцев Г.Ф., Шибанова И.В., Кулагина Н.В., Мащук И.М., Перевалов А.В., Резанова В.П., Фогт Т., Игнатова Н.В., Мишарина В.А. Верхнеплейстоценовые и голоценовые отложения Тункинского рифта (Южное Прибайкалье) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2002. Т. 10. № 3. С. 90–99.
21. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.
22. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.
23. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. АН. 2001. Т. 378. № 5. С. 672–674.
24. Шерман С.И., Медведев М.Е., Ружич В.В., Киселев А.И., Шмотов А.П. Тектоника и вулканизм

