

УДК 551.243.12(571.53+571.54)

ШЕРМАН С. И., ДНЕПРОВСКИЙ Ю. И.

## ПОЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

На основе массовых замеров тектонической трещиноватости геолого-структурными методами реконструированы локальные и региональные поля тектонических напряжений Байкальской рифтовой зоны.

Установлена зональная структура региональных полей напряжений. Выделяются последовательно сменяющие друг друга четыре типа напряженного состояния земной коры: сдвиговый, раздвиго-сдвиговый, сдвиго-раздвиговый и раздвиговый. Проведено сопоставление этих типов полей с полями напряжений, установленными по механизмам очагов сильных и слабых землетрясений. Из всей совокупности данных лучше соответствуют полям напряжений, восстановленным геолого-структурными методами, механизмы очагов сильных землетрясений, с магнитудой более 5,5. Отсюда перспективность применения геолого-структурных методов в выявлении напряженного состояния земной коры в асейсмических регионах.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Данные о напряженном состоянии земной коры в последнее десятилетие все больше привлекают внимание исследователей. Получить сведения о напряженном состоянии коры можно, используя три группы методов: инструментальные, сейсмологические и геологические. Первые применяются в горном деле и дают информацию для весьма ограниченных объемов коры. Так, по данным И. А. Турчанинова [18], метод разгрузки позволяет оценить напряжения на базе размерами в несколько сантиметров. Ультразвуковой метод позволяет получить данные о напряженном состоянии на дистанции, оцениваемой в несколько десятков сантиметров. Возможности ударно-сейсмического и сейсмического методов ограничены радиусом в десятки — сотни метров. Сейсмологические методы позволяют судить о напряжениях в объемах, измеряемых десятками и сотнями кубических километров. Получаемая при этом информация, как и в случае геологических методов, носит качественный характер.

В последнее время широкое применение находят геологические методы оценки напряженного состояния земной коры. Они позволяют исследовать огромные территории и получать представление о региональных и даже более высоких по иерархическому уровню полях тектонических напряжений.

Бесспорно, что эти методы обладают широкими возможностями, прежде всего по территориальному признаку, так как они не зависят от тектонической структуры региона. В то же время существует ряд дискуссионных вопросов, вызывающих неоднозначное отношение к геологическим методам исследования напряженного состояния. В частности, при восстановлении поля напряжений по анализу тектонической трещиноватости возникают сомнения в возрастной датировке трещин и, следовательно, реконструированного поля напряжений. Оценивать сильные и слабые стороны геологических методов изучения напряженного состояния земной коры можно при сравнении результатов, полученных этими и другими методами на примере хорошо изученной территории, одной из которых является Байкальская рифтовая зона (БРЗ).

В настоящее время поле тектонических напряжений БРЗ изучено как сейсмологическими [9 и др.], так и геологическими методами [4, 7, 16, 19, 21 и др.]. Среди последних известна публикация [20], в которой предложена схема полей напряжений БРЗ, составленная по комплексу

неоструктурных элементов. В ней уже отчетливо намечается сходство результатов частей с данными сейсмологических исследований и, следовательно, принципиальное единство состояния земной коры БРЗ, выявленное разными методами исследований.

Поставленная перед авторами статьи задача укрупнения масштабов работ потребовала сгущения сети наблюдений и совершенствования методики сбора и обработки геологических данных. Решение этой задачи стало возможным благодаря структурному подходу и обширному материалу по тектонической трещиноватости, собранному в результате многолетних полевых исследований в пределах БРЗ и смежных регионов.

Реконструкция полей тектонических напряжений по массовым замерам трещин проводилась нами на основе статистического метода П. Н. Николаева [12]. В ряде случаев, когда сопряженность трещин устанавливалась однозначно, реконструкция осей главных нормальных напряжений проводилась по методу М. В. Гзовского [1]. Отметим, что использование этих двух методов для одних и тех же групп наблюдений показало сходство полученных результатов [21]. Возраст реконструируемых полей напряжений контролировался путем дополнительного изучения тектонической трещиноватости в породах неогенового и четвертичного возрастов. Такой подход позволил в большинстве случаев однозначно решить вопрос о нижней возрастной границе реконструируемого поля напряжений и ограничить его новейшим этапом. При этом учитывались уровни иерархии полей тектонических напряжений [2, 8, 13, 14, 22], полученные на основе разработанных П. Н. Николаевым принципов статистического выделения их рангов [13, 14].

В БРЗ нами выделены локальные и региональные поля напряжений. Первые характеризуют поле напряжений в точке массовых замеров трещин и могут быть распространены на ближайший объем пород, не превышающий в поперечнике первые сотни метров. Однако каждое локальное поле напряжений несет информацию и о поле более высокого, регионального, уровня [14]. Для его выявления на отдельных диаграммах группировались сведения об ориентации главных векторов локальных полей напряжений. Наличие общности в ориентации одноименных векторов в сочетании с территориальной близостью точек наблюдений и принадлежностью их к одной или нескольким, но однотипным региональным структурам, являлось основанием для выделения регионального поля напряжений.

Реконструированное таким образом поле тектонических напряжений характеризует новое интегральное состояние земной коры, которое нельзя получить на основе простого суммирования отдельных его частей [14].

### ТИПЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Названными методическими приемами установлены региональные поля тектонических напряжений для различных участков БРЗ, выявлены особенности локальных полей напряжений, проанализированы направление и характер смещений различно ориентированных разрывов.

Результаты реконструкции локальных полей тектонических напряже-

---

Рис. 1. Карта локальных полей тектонических напряжений Байкальской рифтовой зоны по геолого-структурным данным. Составили С. И. Шерман, Ю. И. Днепровский, В. А. Саньков

1 — ориентация квадрантов сжатия и растяжения (соответственно белое и залитое поля); 2 — генеральные разломы: активные (а), неактивные (б); 3 — региональные разломы: активные (а), неактивные (б); морфокинематическая характеристика: 4 — сбросы (а) и сбросо-сдвиги (б); 5 — взбросы (а) и взбросо-сдвиги (б); 6 — надвиги; без бергштрихов — разломы невыясненного морфокинематического типа; 7 — кайнозойские впадины и депрессии

На врезке — схема региональных полей тектонических напряжений Байкальской рифтовой зоны (по геолого-структурным и сейсмологическим данным). Ориентация векторов растяжения и сжатия региональных полей напряжений: 1 — по геолого-структурным и 2 — сейсмологическим данным (для землетрясений с  $M > 4$ ): а — горизонтальная, б — наклонная, в — вертикальная; 3 — кайнозойские впадины и депрессии



ний показаны на рис. 1. Сферограммы на нем отражают положение в пространстве квадрантов сжатия и растяжения и характеризуют напряженное состояние площадей в первые квадратные километры или несколько больше. В целом в БРЗ отмечается большое разнообразие ориентации векторов главных нормальных напряжений локальных полей как по простиранию, так и по углу наклона к горизонту. Однако устанавливаются и определенные закономерности. Так, на северо-восточном и юго-западном флангах БРЗ преобладают поля напряжений с близгоризонтальным положением осей растяжения, ориентированных в северо-запад — юго-восточном направлении, и субгоризонтальным или наклонным положением осей сжатия, простирающихся в юго-запад — северо-восточном направлении. Субширотные разрывы, развитые на этих пространствах, в большинстве случаев представляют собой левосторонние сбросо-сдвиги [21]. Движения по взбросо- и сбросо-сдвигам меридионального и северо-западного простираний — правосторонние. В центральной части БРЗ локальным полям тектонических напряжений свойственно северо-запад — юго-восточное простирание осей растяжения, ориентированных субгоризонтально, и субвертикально или крутонаклонное положение осей сжатия.

Региональные поля тектонических напряжений БРЗ по геологическим и сейсмологическим данным показаны на врезке к рис. 1. Хорошо видно сходство в ориентировке осей напряжений, полученных разными методами.

Представляют интерес и детальные исследования локальных полей напряжений в зонах крупных разломов БРЗ и их пересечений. На сводной диаграмме (рис. 2, А) показана ориентация осей главных нормальных напряжений для локальных разрывов в зоне крупного Кадарского разлома, расположенного вдоль северо-западного борта Чарской впадины (северо-восточный фланг БРЗ). Она характеризуется значительным азимутальным разбросом. Оси алгебраически максимальных напряжений ( $\sigma_1$ ) образуют квадранты растяжения в секторах  $270—360^\circ$  и  $90—180^\circ$ . Векторы осей алгебраически минимальных напряжений ( $\sigma_3$  — сжатия) образуют соответствующие квадранты в секторах  $180—270$  и  $0—90^\circ$  ( $\sigma_2$  — промежуточная ось). Такая ориентация в пределах квадрантов осей главных нормальных напряжений свидетельствует об их значительной дисперсии, при которой, тем не менее, всегда сохраняется принципиальная направленность осей растяжения в северо-запад — юго-восточных румбах, а осей сжатия — в юго-запад — северо-восточных.

На рис. 2, Б показаны выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений, восстановленных для локальных разрывов, расположенных в области пересечения Южно-Муйского субширотного регионального разлома, контролирующего южный борт Муйской впадины, с Парамским разломом субмеридионального простирания. Исследованная область располагается в месте выхода р. Витим в Муйскую впадину. Как следует из диаграммы, здесь устанавливается два типа полей напряжений, имеющих существенно различную ориентацию векторов сжатия и растяжения. Первый тип характеризуется северо-восток — юго-западным направлением осей растяжения ( $\sigma_1$ ) и северо-запад — юго-восточным — сжатия ( $\sigma_3$ ). Второй тип поля напряжений, наоборот, образует квадранты сжатия  $\sigma_3$  в секторах  $0—90$  и  $180—270^\circ$  и квадранты растяжения  $\sigma_1$  в секторах  $270—360$  и  $90—180^\circ$ . Такое распределение осей главных нормальных напряжений свидетельствует о неоднородности картины локальных полей напряжений в узлах сочленения зон крупных разломов. Подобные исследования, проведенные в пределах зон разломов и областей их пересечений в других частях БРЗ, дали аналогичные результаты [21]. Можно констатировать, что проявление двух типов полей напряжений связано с существованием и развитием разломных узлов. Интересно, что ранее в публикациях сейсмологов [9, 10] в местах пересечения сейсмоактивных зон отмечалось наложение эпицентральных полей, отличающихся механизмами очагов, которое они связывали с приуроченностью отдельных групп землетрясений к разным глубинам.

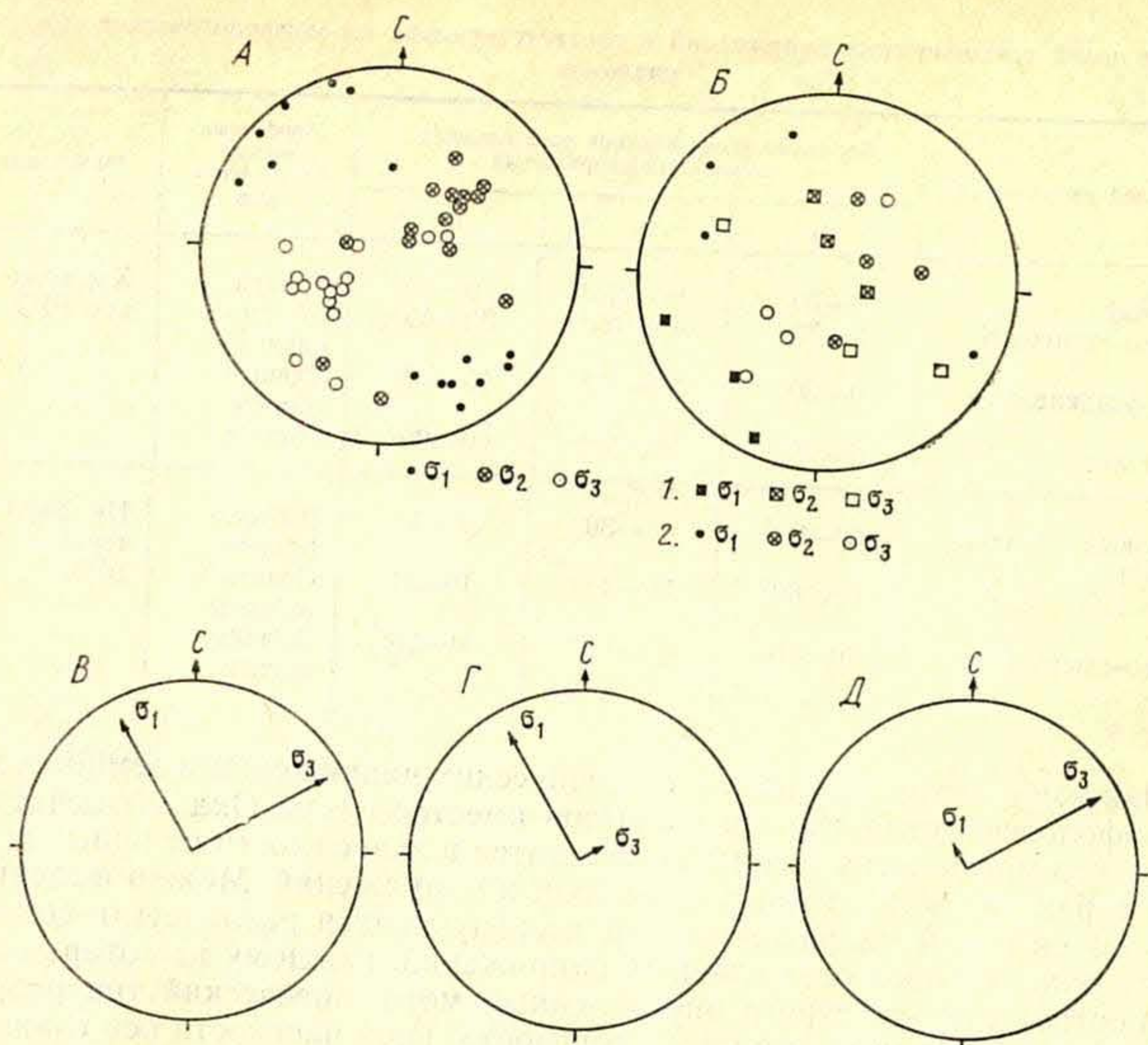


Рис. 2. Диаграммы ориентировки векторов главных нормальных напряжений в зонах крупных разломов и их пересечений: А — Кадарского разлома; Б — сочленения Парамского и Южно-Муйского разломов; В, Г, Д — объяснены в тексте. Кругами и квадратами обозначены выходы на верхнюю полусферу векторов главных нормальных напряжений, связанных с различными полями

Несмотря на влияние местных факторов на разнообразие локальных полей напряжений, необходимо использовать общее свойство последних — информацию о региональном поле напряжений, которое имеет наиболее важное значение в тектонических исследованиях.

Существует несколько вариантов построения карт региональных полей тектонических напряжений [1, 3, 16, 17, 23—25 и др.]. В их основу положен принцип отображения полей напряжений в траекториях главных осей или направлений действия максимальных касательных напряжений. Знание траекторий векторов главных напряжений позволяет судить о знаке смещения по различно ориентированным разломам и прогнозировать положение новых разрывов. Вместе с тем такое отображение полей тектонических напряжений не позволяет судить о наклоне других осей и, следовательно, о направленности действия тектонических сил и, главное, о типе напряженного состояния, на который существенно влияет угол наклона вектора к горизонту того или иного из главных напряжений, чего не учитывает ни один из упомянутых выше способов построения карт региональных полей напряжений. Поясним это на конкретном примере. На рис. 2, В—Д показаны три варианта ориентации векторов главных нормальных напряжений, имеющих одинаковую направленность по отношению к географическим координатам. В первом случае (см. рис. 2, В) поле тектонических напряжений сдвиговое и формирующиеся разломы будут сдвигами. Во втором случае (см. рис. 2, Г) в поле тектонических напряжений будут формироваться сбросы; в третьем случае (см. рис. 2, Д) образуются взбросы и надвиги ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  — то же, что и на рис. 2, А). Картина же в плане траекторий действия векторов главных напряжений всюду идентична. Эта неоднозначность возникает вследствие того, что при построении карт траекторий осей главных напряжений не учитываются углы их наклонов к горизонту.

Типы полей тектонических напряжений и соответствующие им морфологические типы разломов

Тип полей напряжений	Вариации углов наклона осей главных нормальных напряжений			Морфологические типы разломов	Примечание
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$		
Сдвиговый	0—30°	60—90°	0—30°	Сдвиги Сбросо-сдвиги Сдвиго-сбросы Сбросы	Характерны для БРЗ
Раздвиго-сдвиговый	0—30°	45—60°	30—45°		
Сдвиго-раздвиговый	0—30°	30—45°	45—60°		
Раздвиговый	0—30°	0—30°	60—90°		
Взбросовый (надвиговый)	60—90°	0—30°	0—30°	Взбросы (надвиги) Сдвиго-взбросы Взбросо-сдвиги	Не характерны для БРЗ
Сдвиго-взбросовый	45—60°	30—45°	0—30°		
Взбросо-сдвиговый	30—45°	45—60°	0—30°		

Известно, что между полем тектонических напряжений в земной коре и морфологическими типами разрывов имеется связь. Она заключается в том, что морфология разрывов находится в зависимости от ориентации в пространстве осей главных нормальных напряжений. Можно выделить семь типов полей напряжений, характеризующихся различными сочетаниями ориентировок осей главных напряжений, каждому из которых будет соответствовать строго определенный морфологический тип разрыва (таблица). По углу наклона к горизонтальной плоскости оси главных нормальных напряжений могут быть отнесены к одной из трех позиций: субгоризонтальной (от 0 до 30°), субвертикальной (от 60 до 90°) и наклонной (от 30 до 60°). Причем в последнем случае имеет смысл выделить два типа наклона: от 30 до 45° — пологий и от 45 до 60° — крутой. Целесообразность такого разделения будет показана ниже. В соответствии с наклоном трех главных векторов и их взаимным сочетанием выделены (см. табл. 1) следующие возможные типы полей тектонических напряжений: сдвиговый, раздвиго-сдвиговый (с преобладанием сдвиговой составляющей), сдвиго-раздвиговый (с преобладанием раздвиговой составляющей), раздвиговый, а также взбросовый, сдвиго-взбросовый и взбросо-сдвиговый. Причем первые четыре типа характерны для региональных полей БРЗ, а взбросовый, сдвиго-взбросовый и взбросо-сдвиговый типы полей напряжений проявлены в БРЗ лишь на локальном уровне и поэтому в дальнейшем рассматриваться не будут.

Результаты реконструкции положения осей главных нормальных напряжений регионального уровня с учетом их наклона к горизонту показаны на рис. 3. Из него видно, что ориентация осей главных напряжений регионального поля в пределах БРЗ характеризуется достаточной устойчивостью по своему положению в пространстве. Субгоризонтальная ориентация осей главных растягивающих и субгоризонтальное или пологое положение главных сжимающих напряжений — таковы характерные черты региональных полей тектонических напряжений в пределах северо-восточного и юго-западного флангов БРЗ. При этом векторам растягивающих напряжений свойственна северо-запад — юго-восточная направленность, а векторам сжимающих напряжений — северо-восток — юго-западная. В пределах центральной части БРЗ оси растягивающих напряжений регионального поля ориентированы в северо-запад — юго-восточном направлении — преимущественно перпендикулярно простиранию основных рифтовых структур и расположены в субгоризонтальной плоскости. Векторы главных сжимающих напряжений ориентированы наклонно (под углом 45—60°) или субвертикально.

В целом же для БРЗ типична зональная структура регионального поля напряжений. Она выражается в последовательной закономерной

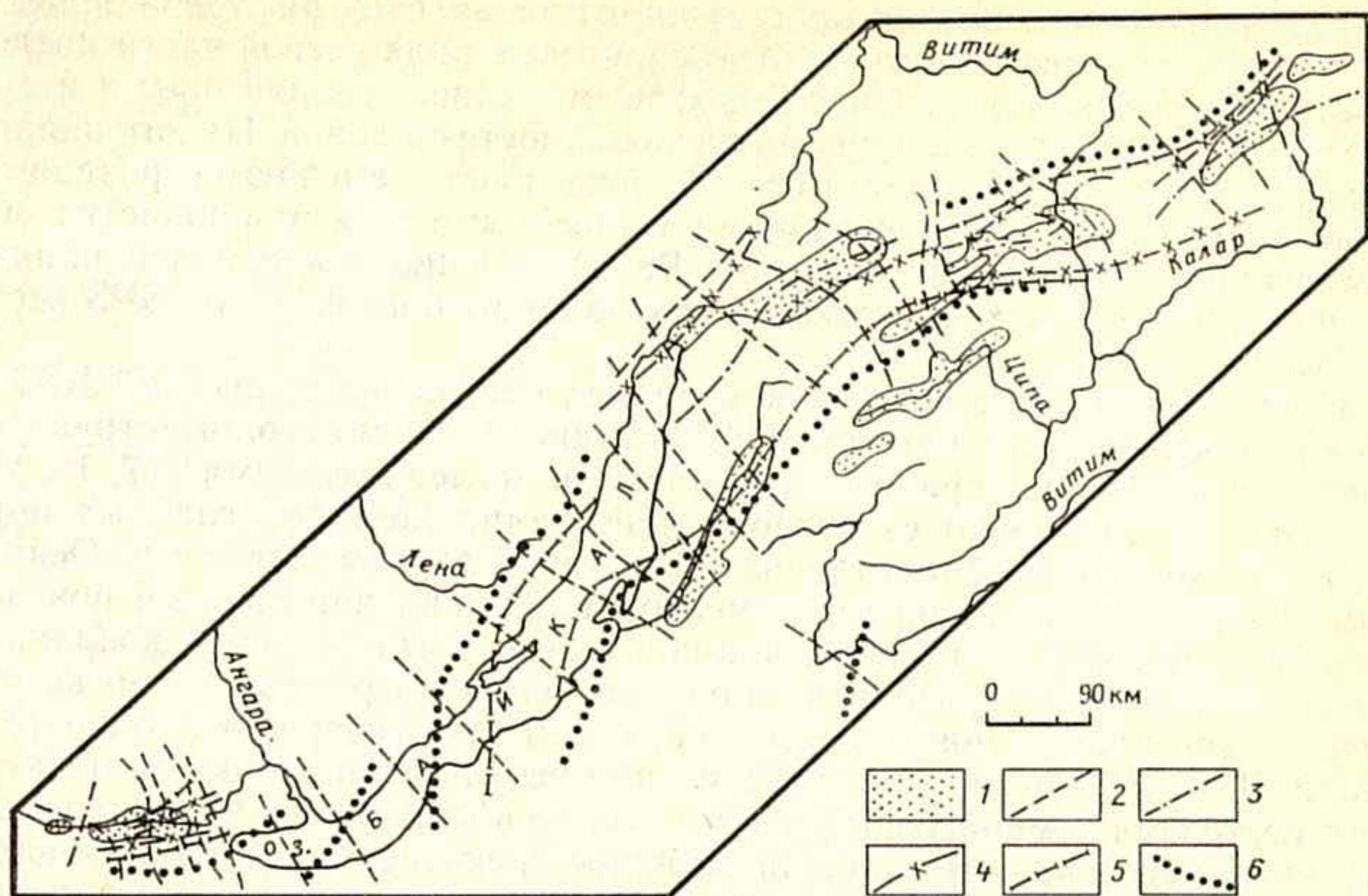


Рис. 3. Схема траекторий векторов сжатия и растяжения региональных полей напряжений Байкальской рифтовой зоны  
 1 — кайнозойские впадины и депрессии; 2—6 — траектории главных векторов: 2 — осей растяжения (субгоризонтальных —  $0-30^\circ$ ); 3—6 — осей сжатия: 3 — субгоризонтальных ( $0-30^\circ$ ), 4 — наклонных ( $30-45^\circ$ ), 5 — крутонаклонных ( $45-60^\circ$ ), 6 — субвертикальных ( $60-90^\circ$ )

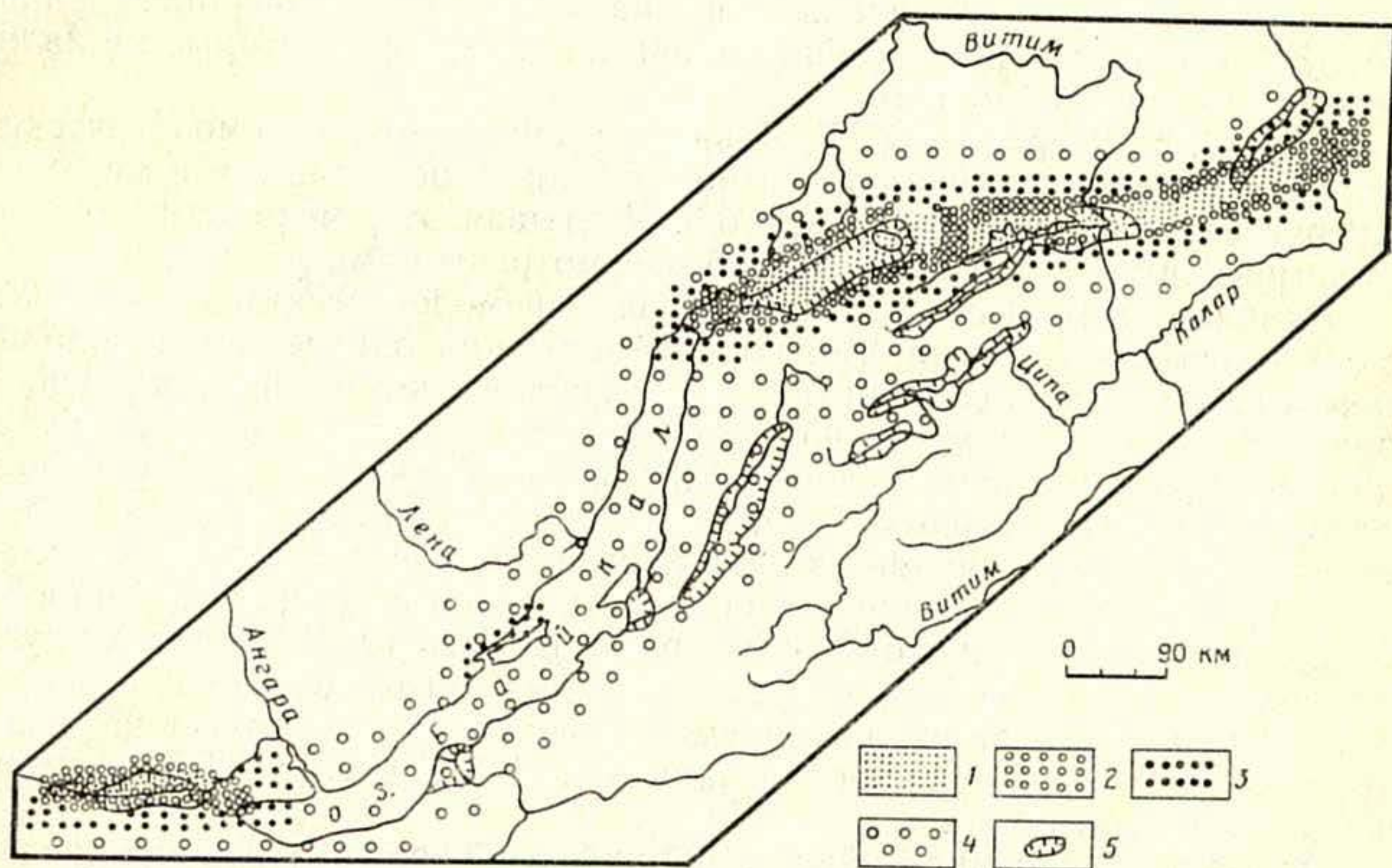


Рис. 4. Схема районирования региональных полей напряжений Байкальской рифтовой зоны  
 1—4 — типы полей напряжений: 1 — сдвиговый, 2 — раздвиго-сдвиговый, 3 — сдвиго-раздвиговый, 4 — раздвиговый; 5 — кайнозойские впадины и депрессии

смене типов полей напряжений как по простиранию рифтовой зоны, так и вкрест нее (рис. 4).

От центральной части Байкальского рифта по направлению к дистальным его окончаниям прослеживается ряд типов полей напряжений, закономерно сочетающихся и сменяющих друг друга. Для центральной части БРЗ характерны раздвиговые и сдвиго-раздвиговые поля тектонических напряжений, сменяющиеся раздвиго-сдвиговыми и сдвиговыми

полями на флангах. Вкрест простирания Байкальской рифтовой зоны, в пределах северо-восточного фланга, сдвиговые поля осевой части последовательно сменяются раздвиго-сдвиговыми, сдвиго-раздвиговыми и далее, за пределами рифта, другими разновидностями полей. На юго-западном фланге сдвиговые поля в осевой зоне рифта сменяются раздвиго-сдвиговыми, сдвиго-раздвиговыми и раздвиговыми полями в областях, обрамляющих рифтогенные впадины. Распределение типов полей напряжений в пределах юго-западного и северо-восточного флангов БРЗ весьма схоже.

Попытки увязать данные о механизмах очагов землетрясений БРЗ с полями тектонических напряжений, восстановленными геолого-структурными методами, предпринимались многими исследователями<sup>1</sup> [7, 16, 20, 21]. Было установлено сходство в ориентации векторов главных нормальных напряжений, восстановленных тем и другим методами. Основным, а подчас единственным элементом при сравнении являлся показатель ориентации осей главных напряжений в географических координатах, позволяющих определить знаки смещений по разрывам, но не судить о типе напряженного состояния, о чем уже говорилось выше (см. рис. 2, В, Г, Д). Нами при сопоставлении результатов оценки напряженного состояния земной коры, полученных разными методами, в качестве сравниваемых показателей были выбраны ориентация векторов главных нормальных напряжений в географических координатах и типы полей напряжений. Чтобы наиболее полно выявить сходство и различия в картинах напряженного состояния, полученных по разным методикам, сравнение целесообразно проводить отдельно для центральной части БРЗ и ее флангов и использовать результаты работ сейсмологов по индивидуальному и групповому способам определения механизмов очагов. Из анализа сейсмологических данных нами были исключены надвиговые механизмы, которые проявлены лишь на дистальных окончаниях флангов БРЗ в областях перестройки полей напряжений и которые не являются собственно рифтовыми.

Ранее С. И. Шерман и К. Г. Леви [20], анализируя сейсмологические данные, отметили тенденцию к выполаживанию осей сжатия в механизмах очагов землетрясений с  $M > 5,5$ . Учитывая это, механизмы очагов землетрясений с  $M > 5,5$  и с  $M < 5,5$  рассмотрены нами отдельно.

Поскольку в БРЗ ось растяжения, по сейсмологическим данным, повсюду близгоризонтальна, тип поля напряжений определяется положением в пространстве оси сжатия. В тех случаях, когда она наклонена к горизонту под углом менее  $45^\circ$ , поле тектонических напряжений будет сдвиговым или раздвиго-сдвиговым, а когда больше  $45^\circ$  — сдвиго-раздвиговым или раздвиговым. Границей между этими двумя положениями оси сжатия на сфере является след конуса вращения с телесным углом при вершине  $90^\circ$  и осью вращения, совпадающей с нормалью к плоскости большого круга, проходящего через центр сферы. В пределах круга, образованного основанием конуса вращения, углы наклона векторов сжатия больше  $45^\circ$ , за его пределами — меньше  $45^\circ$ . Базируясь на изложенном, рассмотрим типы полей напряжений в пределах БРЗ, полученные разными методами.

**Юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны.** Сравнение данных определений механизмов очагов индивидуальных землетрясений (рис. 5) с результатами реконструкции поля напряжений геолого-структурным методом показывает, что в обоих случаях оси растяжения ориентированы в северо-западном — юго-восточном, а оси сжатия — в северо-восточном — юго-западном направлениях. Аналогичная сходимость в ориен-

<sup>1</sup> Данные о напряженном состоянии коры, полученные по анализу механизмов очагов землетрясений по наблюдениям за последние 30 лет, отражают современное поле напряжений. Данные, полученные геолого-структурным методом, характеризуют напряженное состояние коры за более длительный интервал времени, как минимум за посленеогеновый период. Сравнение результатов, полученных двумя принципиально разными методами, дает возможность выявить особенности современного поля напряжений БРЗ по отношению к более древнему полю, существовавшему по крайней мере в течение второй половины кайнозоя.



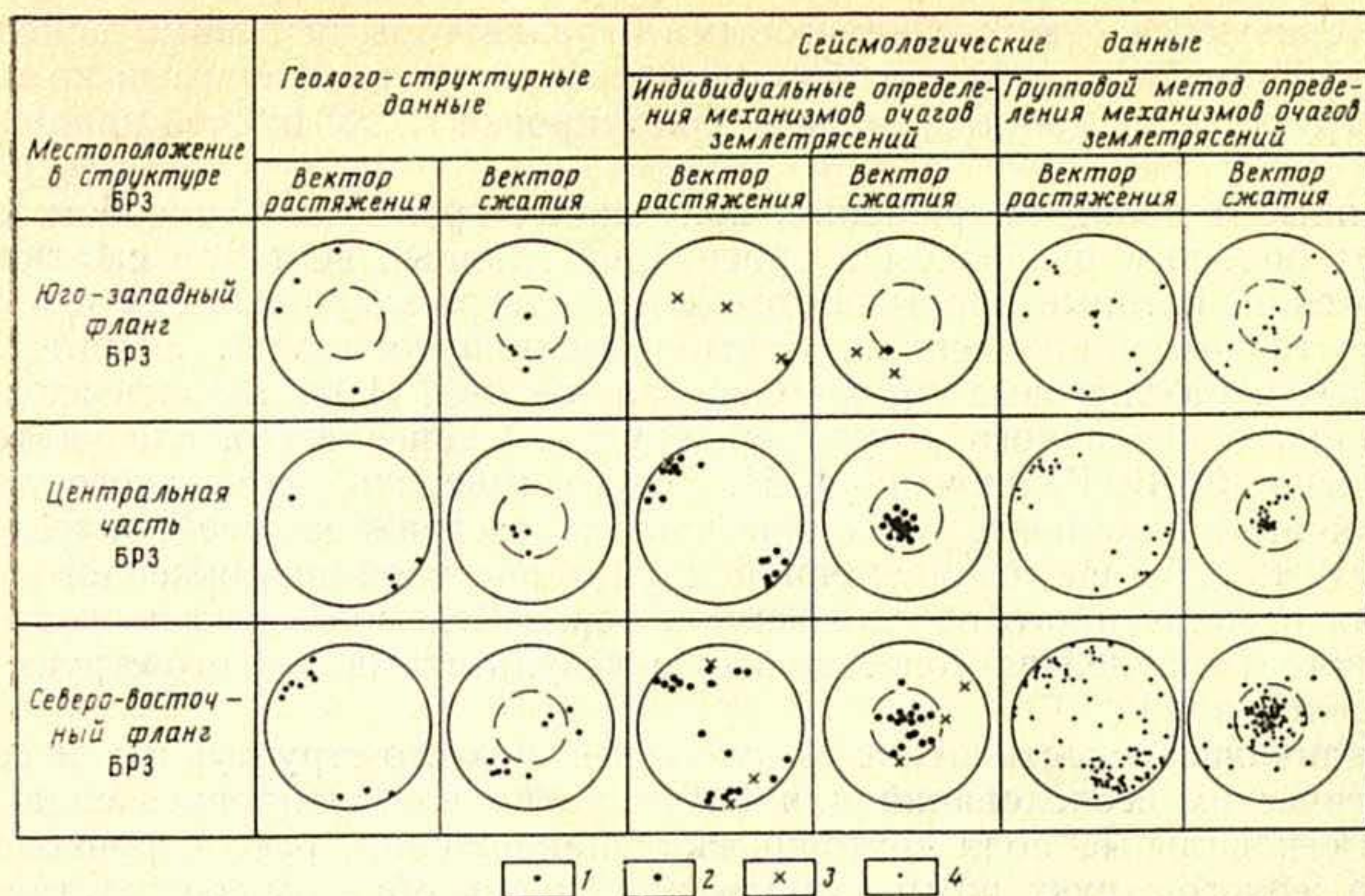


Рис. 5. Сопоставление полей тектонических напряжений, установленных по геолого-структурным и сейсмологическим данным для Байкальской рифтовой зоны  
1-4 — выходы на верхнюю полусферу главных векторов сжатия и растяжения: 1 — по геолого-структурным данным; 2-4 — по сейсмологическим данным: 2 — для землетрясений с  $M < 5,5$ , 3 — для землетрясений с  $M > 5,5$ , 4 — по определениям групповым способом

тации осей главных нормальных напряжений наблюдается при сравнении результатов геолого-структурного анализа и определений механизмов очагов землетрясений групповым методом. Типы полей напряжений по индивидуальным определениям механизмов очагов — сдвиговые и раздвиго-сдвиговые, восстановленные групповым способом — сдвиговые, раздвиго-сдвиговые, сдвиго-раздвиговые и раздвиговые. Поля напряжений, реконструированные геолого-структурным методом, преимущественно сдвиговые и раздвиго-сдвиговые. Раздвиговые поля по геолого-структурным данным проявлены в южной части рассматриваемой территории, на значительном удалении от оси фланга рифтовой зоны и главных разломов региона — Тункинского и Главного Саянского. Принимая это во внимание, можно констатировать, что поля тектонических напряжений, реконструированные геолого-структурным методом, как по типам, так и по ориентировке векторов напряжений лучше соответствуют механизмам очагов землетрясений, для которых были выполнены индивидуальные определения.

**Центральная часть Байкальской рифтовой зоны.** Сравнение результатов геолого-структурных построений (см. рис. 5) индивидуальных и групповых определений механизмов очагов землетрясений показывают полное сходство полученных полей напряжений как по ориентации главных векторов нормальных напряжений относительно географических координат, так и по типам напряженного состояния земной коры. Во всех трех случаях векторы растяжения оказались ориентированными практически горизонтально, в северо-запад — юго-восточном направлении, а векторы сжатия — близвертикально или наклонно на северо-восток. Тип поля напряжений раздвиговый.

**Северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны.** Региональные поля тектонических напряжений, восстановленные по анализу тектонической трещиноватости (см. рис. 5) как по типам, так и по ориентации осей главных напряжений наилучшим образом соответствуют механизмам очагов отдельных землетрясений с  $M > 5,5$ . Характерны сдвиговые и раздвиго-сдвиговые поля напряжений. Векторы растяжения ориентированы в северо-запад — юго-восточном, а сжатия — в северо-восточном направлениях. Механизмы очагов землетрясений с  $M < 5,5$

характеризуются сдвиго-раздвиговыми и раздвиговыми типами полей и обнаруживают сходство с полями напряжений, установленными по геолого-структурным данным, лишь в ориентировке главных осей напряжений.

Данные о полях напряжений, полученные групповым способом, обладают большим разбросом в ориентации главных векторов сжатия и растяжения, которые простираются как в северо-западном, так и в северо-восточном направлениях. Статистически преобладают сдвиго-раздвиговые и раздвиговые типы полей напряжений. Использовать их для получения однозначного результата трудно. Скорее всего, следуя терминологии Ю. В. Ризниченко [15], можно говорить, что такого типа неустойчивые локальные «сейсмические» поля отражают «сейсмическую погоду», т. е. являются временной характеристикой напряженного состояния ограниченного объема земной коры. Сейсмологические данные подобного рода нельзя сопоставлять с результатами геолого-структурных исследований.

Заканчивая сопоставление результатов геолого-структурных и сейсмологических исследований для БРЗ, можно констатировать следующее. Региональные поля тектонических напряжений, реконструированные по геолого-структурным данным, наилучшим образом соответствуют полям тектонических напряжений, определенным по механизмам очагов индивидуальных землетрясений с  $M > 5,5$ , в меньшей степени — по механизмам очагов землетрясений с  $M < 5,5$  (при которых наблюдается сходство в основном в ориентации главных осей напряжения). И наконец, нет однозначных результатов при сопоставлении геолого-структурных данных с механизмами очагов, определенными групповым способом, при которых наблюдается лишь частичное сходство в ориентации осей растяжения и сжатия.

Хорошее соответствие региональных полей тектонических напряжений, реконструированных геолого-структурным методом, полям напряжений, выявленных по механизмам очагов землетрясений с  $M > 5,5$ , связано с размерами областей подготовки сильных землетрясений. Сейсмологические наблюдения в сейсмически активных регионах Земли позволили установить взаимосвязь между размерами очагов коровых землетрясений (средним радиусом очага  $R$  величиной смещения по разрыву  $D$ , длиной очага  $L$ ) и такими их характеристиками, как магнитуда  $M$ , сейсмический момент  $M_0$ , количество выделившейся энергии  $E$  [15 и др.]. Связи между параметрами, характеризующими размеры очаговой области, и величинами  $M$ ,  $M_0$ ,  $E$  нелинейны. В интервале значений магнитуд от 5 до 6 происходит резкое увеличение параметров очагов землетрясений.

Таким образом, представляется, что хорошая сходимость результатов реконструкции региональных полей тектонических напряжений геолого-структурным и сейсмологическим методами в очагах сильных землетрясений с  $M > 5,5$  обусловлена тем, что в обоих случаях напряженное состояние оценивается для объемов земной коры, размеры которых позволяют избежать искажающего влияния мелких структурных неоднородностей. Здесь совпадают иерархические уровни (ранги) сравниваемых событий и структур. Механизмы же очагов землетрясений малых магнитуд характеризуют незначительные объемы земной коры, поэтому процессы, происходящие в них, в значительной степени зависят от местных структурных условий [15]. В генетической основе сходства результатов одноранговой реконструкции региональных полей тектонических напряжений по сейсмологическим и геолого-структурным данным лежит тесная связь между энергией разрывообразования и сейсмической энергией. Картируемые геологическими методами системы разрывов (длина которых, как правило, превышает первые километры) развиваются и повторно активизируются при землетрясениях, магнитуда которых превышает 5,5. Землетрясения меньшей силы не оставляют сколько-нибудь заметных следов в коренных горных породах, а только в рыхлых грунтах. Может быть, по этой причине геолого-структурный метод выявления

полей тектонических напряжений дает более однозначную, стабильную во времени картину, чем мгновенные вариации изменения напряженного состояния, которые вытекают из сейсмологического анализа? Вопрос этот требует дополнительного изучения и интересен в свете исследований и многочисленных данных, суммированных в работах П. Н. Кропоткина [5, 6] и др.

### ВЫВОДЫ

Итак, в пределах БРЗ на основе массовых замеров тектонической трещиноватости выделяются четыре главных типа региональных полей тектонических напряжений: сдвиговый, раздвиго-сдвиговый, сдвиго-раздвиговый и раздвиговый. Раздвиговый и сдвиго-раздвиговый типы полей напряжений проявлены в центральной части БРЗ. Для нее характерно субгоризонтальное положение осей растяжения, простирающихся с северо-запада на юго-восток, и субвертикальное или крутонаклонное положение осей сжатия, ориентированных в северо-восточном направлении. Сдвиговый и раздвиго-сдвиговый типы полей напряжений проявлены на флангах БРЗ. Общим для них являются горизонтальное положение осей растяжения, простирающихся в северо-запад — юго-восточном направлении, и субгоризонтальная или наклонная ориентация осей сжатия, направленных на северо-восток, т. е. наблюдается закономерное распределение типов региональных полей тектонических напряжений как вкрест, так и по простиранию БРЗ. От осевых частей флангов БРЗ сдвиговые поля тектонических напряжений вкрест структур сменяются раздвиго-сдвиговыми и раздвиговыми полями.

Из всей совокупности данных лучше всего соответствуют полям тектонических напряжений, полученным геолого-структурным методом, механизмы очагов землетрясений с  $M > 5,5$ . Это, на наш взгляд, следует учитывать при использовании сейсмологических данных о напряженном состоянии земной коры для анализа региональных геологических структур, выраженных на поверхности.

Наконец, из проведенных исследований по БРЗ следует более общий вывод о том, что в асейсмичных регионах можно изучать напряженное состояние земной коры по анализу тектонической трещиноватости, а также другими геологическими методами. Они расширяют наши возможности более глубокого изучения геодинамического развития Земли.

### Литература

1. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 533 с.
2. *Гущенко О. И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений//Поля напряжений и деформации в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7—25.
3. *Гущенко О. И., Сим Л. А.* Поле современных мегарегиональных напряжений сейсмоактивных областей юга Евразии//Изв. вузов. Геология и разведка. 1977. № 12. С. 17—25.
4. *Имаев В. С.* Сдвиговые поля Чарской впадины//Тектоника восточной части Сибирской платформы. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1979. С. 109—115.
5. *Кропоткин П. Н.* Тектонические напряжения в земной коре по данным непосредственных измерений//Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. С. 21—31.
6. *Кропоткин П. Н.* Новая геодинамическая модель//Докл. АН СССР. 1983. Т. 272. № 3. С. 575—578.
7. *Лобацкая Р. М.* Разрывные нарушения верхней части земной коры Байкальской рифтовой зоны//Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука, 1981. С. 112—128.
8. *Марков Г. А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.
9. *Мишарина Л. А.* Напряженное состояние земной коры в районах БАМ по данным о механизме очагов землетрясений//Геологические и сейсмические условия района БАМ. Новосибирск: Наука, 1978. С. 150—181.
10. *Мишарина Л. А., Солоненко Н. В., Хренов П. М.* О приуроченности землетрясений рифтовой зоны к системам разломов фундамента//Геология и геофизика. 1973. № 2. С. 103—108.
11. Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973. 185 с.
12. *Николаев П. Н.* Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений//Изв. вузов. Геология и разведка. 1977. № 12. С. 103—115.

13. Николаев П. Н. Системный анализ тектонических напряжений и деформаций//Изв. вузов. Геология и разведка. 1979. № 5. С. 106—116.
14. Николаев П. Н. Системный подход в анализе и картировании полей тектонических напряжений//Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры: Матер. Всес. школы-семинара в Апатитах 20—22 мая 1980 г. Апатиты, 1982. С. 18—34.
15. Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент//Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9—26.
16. Рязанов Г. В. Поле напряжений и условия формирования структур юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны//Докл. АН СССР. 1978. Т. 243. № 1. С. 183—186.
17. Сим Л. А. Тектонические напряжения зоны сочленения Среднего Тимана и Мезенской синеклизы//Изв. вузов. Геология и разведка. 1978. № 5. С. 117—125.
18. Турчанинов И. А. Состояние и основные направления исследований полей напряжений в скальных породах//Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры: Матер. Всес. школы-семинара в Апатитах 20—22 мая 1980. Апатиты, 1982. С. 5—9.
19. Шерман С. И., Днепровский Ю. И. Новая карта полей напряжений Байкальской рифтовой зоны по геолого-структурным данным//Докл. АН СССР. 1986. Т. 287. № 4. С. 943—947.
20. Шерман С. И., Леви К. Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны и сейсмичность ее флангов//Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М.: Наука, 1978. С. 7—18.
21. Шерман С. И., Леви К. Г., Ружич В. В. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск: Наука, 1984. 206 с.
22. Angelier J. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population//Tectonophysics. 1979. V. 56. № 3—4. P. 17—31.
23. Ahorner L. Present-day stress field and seismotectonic block movements along major fault zones in Central Europe//Tectonophysics. 1975. V. 29. № 1—4. P. 233—249.
24. Tectonic stresses in the Alpine-Mediterranean Region//Proceeding of the Symposium held in Vienna, Austria, September. 1979. N. Y., 1980. 255 p.
25. Zoback M. L., Zoback M. State of stress in the Conterminous United States//J. Geophys. Res. 1980. V. 85. № B11. P. 6113—6156.

Институт земной коры  
СО АН СССР, Иркутск, 664033

Поступила в редакцию  
15.IX.1986