

ПРОБЛЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОНАПРЯЖЕНИЙ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Ю.Л. Ребецкий, А.В. Маринин, Л.А. Сим

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

Обсуждаются вопросы интерпретации результатов палеостресс реконструкции, когда для совокупности пунктов наблюдения (геологических обнажений) получают данные о нескольких существенно различающихся фаз локальных палеонапряженных состояний. Показано, что попытка представления регионального напряженного состояния путем отбора близких по ориентации осей главных напряжений локальных стресс-состояний и выделения на этой основе этапов сжатия, растяжения или сдвига не является обоснованной. Каждая радикальная смена напряженного состояния (например, фаза растяжения на сжатие), сопровождающаяся накоплением больших необратимых (разрывных) деформаций, требует изменения горизонтальных напряжений в средней коре до 5—6 кбар и не менее 50 млн лет выдержанности однотипного воздействия. Данные тектонофизических реконструкций напряженного состояния коры современных активных внутриконтинентальных орогенов показывают, что в них не наблюдается единого режима напряженного состояния.

Геодинамический тип напряженного состояния коры поднятий в виде хребтов отличается от состояния крупных межгорных и даже внутригорных впадин. Напряженные состояния соседствующих друг с другом поднятий в виде плато и хребтов кардинально различны. При интерпретации палеострессов важно их сопоставление с современным напряженным состоянием. Необходимо при анализе регионального напряженного состояния использовать подход Л.А. Сима по поиску общего поля напряжений. Также следует, привязываясь к конкретным структурам, например к крупным складкам и другим геологическим формам, отслеживать смены их напряженного состояния в процессе их развития. При этом сегодняшние наши знания показывают взаимосвязи и дипольность напряженных состояний крупных впадин и поднятий, что также надо использовать при интерпретации палеонапряжений.

Зеркала скольжения, напряжения, тектонофизика, разрывы, складки, фазы деформирования, палеостресс.

TECTONOPHYSICAL PALEOSTRESS RECONSTRUCTIONS: INTERPRETATION CHALLENGES AND POSSIBLE SOLUTIONS

Yu.L. Rebetsky, A.V. Marinin, and L.A. Sim

Paleostress inversion may be ambiguous when several markedly different local stress states are inferred for a group of outcrops. Attempts of reconstructing regional stress regimes (compressional, extensional, or strike-slip) by selecting local principal stresses of proximal directions turn out to have poor grounds. Each stress permutation (e.g., extension to compression) attendant with buildup of large irreversible strain (fault slip) requires a 5–6 kbar change in middle-crust horizontal stress and at least 50 Myr stable and uniform loading. Tectonophysical stress reconstructions for present active intracontinental orogens show heterogeneous patterns: Stress directions in uplifts are different from those in large intermontane basins and even in relatively subsided parts of mountain ranges or in adjacent uplifted zones (e.g., a plateau and a range). Paleostresses should be interpreted with reference to present stress fields in the respective areas. It is suggested to reconstruct regional stresses using the approach of L. Sim implying search for “common stress fields”. Another important technique is to trace stress changes in specific structures (large folds etc.) in the course of their evolution. The available data indicate correlation and bipolarity of stress states in large basins and uplifts.

Slickensides, stress, tectonophysics, shear, fold, deformation phase, paleostress

ВВЕДЕНИЕ

В обзорно-аналитической статье [Добрецов и др., 2013] с позиции тектоники литосферных плит и плюмовой тектоники были рассмотрены механизмы деформирования важнейших структур литосферы: зоны субдукции, коллизии, рифтообразования. Основное различие геодинамических обстановок этих структур определяется действующим в литосфере региональным напряженным состоянием: горизон-

тальное сжатие или растяжение. В работе оценивается баланс внешних и внутренних сил, определяющих формирование регионального напряженного состояния. Подобного рода исследования важны для понимания глобального механизма деформирования, захватывающего всю планету в целом.

С другой стороны, для решения не менее важной проблемы — распознавания регионального механизма деформирования геологических объектов — требуется исследование напряжений в масштабах нескольких сотен и даже тысяч километров. Здесь крайне важно правильно выделить всю площадь объекта исследования, в которой проявляется действие регионального механизма деформирования. Так, достаточно часто можно встретить исследования отдельно горных поднятий и межгорных впадин, и передовых прогибов. В то же время изучение природного напряженного состояния [Ребецкий и др., 2013, 2016; Ребецкий, 2015] показало, что эти две структуры образуют своеобразную динамопару, разделение которой приведет к неправильному пониманию характера деформирующих сил. В свое время А.П. Карпинский [1919] сформулировал правило, что рядом с активно растущим и эродирующим горным поднятием всегда существует впадина, испытывающая прогиб и аккумулирующая осадки. В рамках такого понимания проблемы внутриконтинентальных орогенов горные поднятия и межгорные впадины соответствуют зонам конвергенции и спрединга.

В тектонофизике при изучении напряженного состояния используют данные сейсмологических и геологических индикаторов разрывных деформаций. Если напряжения, получаемые из сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений, дают нам информацию о сегодняшнем состоянии участков земной коры, то данные о палеонапряжениях, восстанавливаемые по совокупностям зеркал скольжения и другим геологическим стресс-индикаторам, позволяют «заглянуть» в прошлое геологического объекта.

Однако исследование палеострессов имеет существенную специфику, связанную с удаленностью во времени от сегодняшнего дня актов хрупкого разрушения и длительностью этапов деформирования, развивавшихся после акта разрушения. Цель нашей работы состоит в рассмотрении возможных вариантов интерпретации результатов палеостресс-реконструкции в тех случаях, когда в различных участках исследуемого региона или даже в одном обнажении получены данные об ориентации главных осей напряжений, различающиеся по ориентации или по геодинамическому типу напряженного состояния. В таких случаях необходимо решить проблему неоднородности напряженно-деформированного состояния коры в пространстве и/или времени. От корректности ее решения зависят наши представления на эволюцию геодинамики региона.

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПАЛЕОСТРЕСС-АНАЛИЗА

После работ М.В. Гзовского [1954] и Е. Андерсона [Anderson, 1951] геологические данные о тектонических разрывах и трещинах использовались для определения параметров напряженного состояния, ответственного за формирование этих трещин и/или за кинематику и направление относительного смещения их бортов, выявляемый по наблюдаемым на поверхности этих дизъюнктивов структурам скольжения. Эти два типа данных о морфологии сколовых трещин зафиксированы в деформациях геологического прошлого и реализованы в двух способах тектонофизической реконструкции палеонапряжений.

В нашей статье мы будем анализировать результаты и обсуждать их геодинамическую интерпретацию только в отношении методов палеостресс-реконструкций, базирующихся на данных об ориентации плоскости трещины и направлениях борозд скольжения по ней (данные по зеркалам скольжения). Это направление палеостресс-анализа восходит к родоначальникам этих методов Ж. Анжелье и О.И. Гущенко [Гущенко, 1975; Angelier, 1984], и большая часть геологов в России и за рубежом при работе с зеркалами скольжения использует эти методы. В настоящее время в России также начинает активно применяться компьютерная программа, основанная на алгоритме метода катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 2003], выполненная в приложении к данным геологических индикаторов деформаций — зеркал скольжения [Ребецкий и др., 2017а].

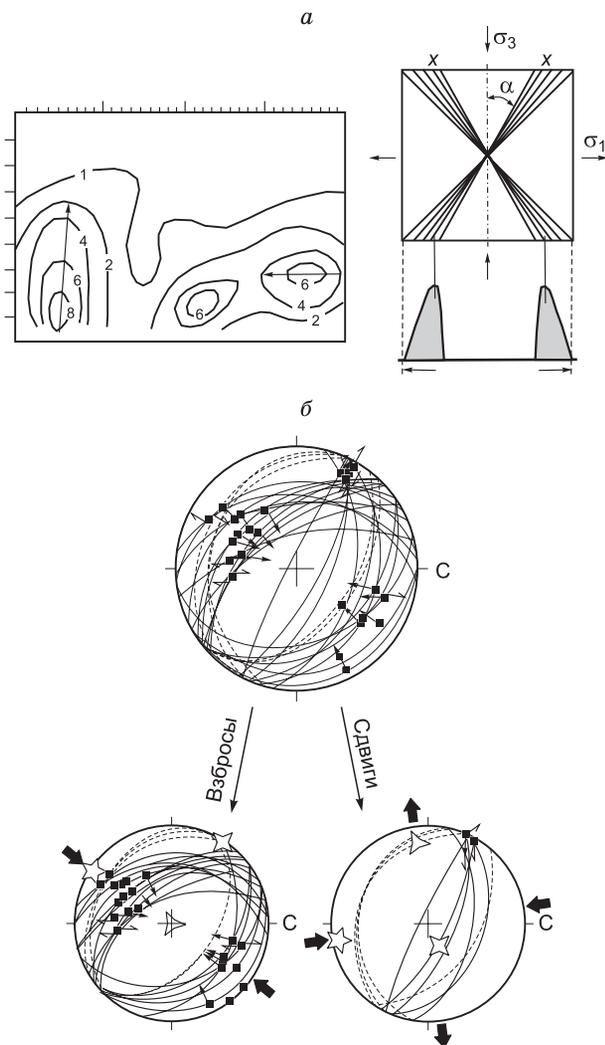
Особенности применения методов палеостресс-анализа разными авторами. Следует отметить, что существует одно принципиальное отличие между методами О.И. Гущенко и Ж. Анжелье по выделению этапов напряженного состояния в рамках одной выборки зеркал скольжения. В методе Анжелье, как и методе Гущенко, присутствует положение об изначальной трещиноватости массива, но при этом считается, что в деформируемом объеме всегда преобладают новообразованные трещины, отвечающие сопряженной системе плоскостей скалывания действующего напряженного состояния. В принципе это вполне допустимая гипотеза. Больше возражение вызывает другая гипотеза, реализованная в методе Анжелье. Считается, что существуют три основных типа напряженных состояний, характеризующихся преобладанием трещин со сбросовой, взбросовой и сдвиговой компонентой. Разделение на этапы напряженного состояния из одной выборки зеркал скольжения производится исходя из того, есть

ли в выборке хотя бы два набора трещин, близких к отмеченным кинематическим типам. Фактически метод Анжелье в том виде, как он практически реализовывался им самим и его учениками, можно считать определенной разновидностью метода сопряженных пар М.В. Гзовского [1954], в котором для реконструкции напряжений используется не два разрыва, а совокупность двух систем разрывов.

В кинематическом методе Гущенко считается, что определяемое стресс-состояние запечатлено в массиве, имевшем на момент его деформирования разнообразно ориентированные ранее возникшие трещины. Поэтому разделение на этапы в методе Гущенко производится путем выделения из общей выборки зеркал скольжения, которые удовлетворяют определенному стресс-состоянию, а оставшиеся в выборке зеркала скольжения проверяют на возможность определения по ним еще одного стресс-состояния. В тех случаях, когда это возможно, в одной точке определяются два, а иногда и более стресс-состояния. Принцип работы алгоритма метода Ю.Л. Ребецкого близок к подходу О.И. Гущенко, но при этом он имеет количественную оценку точности сепарации зеркал скольжения на однородные выборки. В процессе итерационного расчета находят такие выборки и такие стресс-состояния, для которых наблюдается максимум диссипации механической энергии [Ребецкий и др., 2017a].

Неединственность реконструкции напряжений в одном обнажении. Достаточно часто результатом реконструкции палеонапряжений являются данные, показывающие несколько разных ориентаций осей главных напряжений (отклонение осей на 45—90°) для одного обнажения — участка земной коры. Такой результат получают, когда в одном из соседних или даже в одном обнажении встречаются трещины с существенно отличающейся ориентировкой плоскости, либо типом смещения вдоль зеркала скольжения (рис. 1). Иногда на одной плоскости трещины наблюдаются два (и более) направления борозд скольжения, часто свидетельствующих о разных кинематических типах этих зеркал скольжения (со взбросовой, сбросовой, право- или левосдвиговой кинематикой).

Здесь надо отметить, что когда речь идет о получении данных об ориентации осей главных напряжений в эпохи, отстоящие от современности на несколько миллионов или даже десятков миллионов лет, геологу в этом случае часто необходимо провести дополнительные процедуры по повороту глав-



ных осей [Bergerat et al., 2007]. Это связано с тем, что формирование локализованного сдвига и зеркала скольжения происходило в глубине коры (1—3 км, а в каких-то случаях и значительно глубже), и вывод породы на поверхность происходил не простым вертикальным переносом. В процессе тектонического течения, сопровождающегося денудацией рельефа, порода могла испытывать повороты. Анализ углов погружения слоистости и параметров локальных складчатых структур (шарниров) позволяет получить положения породы в момент формирования деформаций (здесь, конечно же, присутствует постулат о горизонтальности слоистости на глубине).

Проделав указанные выше операции и получив фактически для одной точки (в конкретном геологическом обнажении) земной поверхности два отличающихся определения ориентации осей главных напряжений, геолог должен решить вопрос о времени существования каждого из выявленных

Рис. 1. Примеры выделения разных этапов напряженных состояний в методе П.Н. Николаева (а) и Ж. Анжелье (б).

В методе П.Н. Николаева [1992] (σ_3 — максимальное сжатие) разделение напряженных состояний производится на основе анализа максимумов полюсов трещиноватости (изолинии плотности от 1 до 8 для (а) на схеме слева), которые имеют специфические вытянутые «хвосты» — направления пониженного градиента плотности плоскостей скальвания (схема справа). В методе Ж. Анжелье [Angelier, 1984] разные этапы напряженных состояний выделяются путем сепарации разрывных смещений разного кинематического типа.

напряженных состояний. Когда используется метод, базирующийся на анализе только ориентации плоскости трещины (методы М.В. Гзовского, В.Н. Парфенова, П.Н. Николаева), время возникновения трещины и время действия напряженного состояния совпадают. В этом случае возраст пород, в которых образованы трещины, позволяет дать только нижний возрастной предел для времени действия полученного палеонапряженного состояния. Если имеются геологические маркеры на поверхности трещины, то время их возникновения определяется однозначно. В случае использования для реконструкции напряжений борозд скольжения всегда следует допускать возможность подновления структуры поверхности трещины на более поздних этапах в результате изменившегося напряженного состояния. Поэтому время формирования самой борозды на поверхности скола может не соответствовать времени возникновения трещины. Для интерпретации результатов палеостресс-реконструкции достаточно выстроить временную последовательность выявленных состояний без определения абсолютных значений.

Наш собственный опыт реконструкции природных палеонапряжений показывает, что в одном обнажении или в одной локальной структуре можно иногда выделить несколько стресс-состояний, но их практически никогда не бывает больше 2—3. Наличие большего числа эпох напряженного состояния, которые представлены в ряде известных работ, практически всегда связано с привлечением для этого разных, иногда достаточно удаленных друг от друга, участков исследуемого региона.

Поле напряжений. Результатом реконструкции палеонапряжений является карта с изображением данных об ориентации главных осей напряжений. Для анализа особенности геодинамического режима часто используют ориентацию осей максимального и минимального сжатия [Гущенко, 1975; Ребецкий, 2003]. Поскольку девиаторы этих напряжений являются соответственно максимальным девиаторным сжатием и максимальным девиаторным растяжением, их часто определяют как напряжения главного сжатия и главного растяжения или просто напряжения сжатия и растяжения. Кроме этих данных при картировании режимов напряженного состояния используют также данные об ориентации осей максимального горизонтального сжатия [Zoback et al., 1992] или специальные обозначения, комплексно характеризующие ориентацию осей главных напряжений и геодинамический режим [Delvaux et al., 1995].

Отметим, что под полем напряжений правильно понимать не данные из одного обнажения, а совокупность стресс-состояний в разных точках геологического пространства, определяющих одновременное их существование и характеризующих степень однородности или неоднородности деформирования исследуемого участка коры [Ребецкий, 2003]. В механике существует ограничение на характер пространственных изменений компонент тензора напряжений, выражающееся в требовании выполнения уравнений равновесия [Ребецкий, 1991].

Когда в результате палеостресс-реконструкции для какого-то участка коры получают единое поле напряжений, представленное отдельными стресс-состояниями, достаточно равномерно распределенными по всей площади, то подобный результат не вызывает возражений. При этом совсем не обязательно, чтобы такому полю напряжений отвечала одинаковая ориентация главных осей напряжений [Delvaux et al., 2013]. Поле ориентации главных напряжений может иметь участки резких изменений, которые могут быть связаны с блоковостью коры или наличием крупных разломов.

Вопросы возникают, когда единого поля не получается, что происходит в случаях наличия в одном обнажении (одной точке) нескольких стресс-состояний, существенно отличающихся друг от друга по ориентации главных осей [Bergerat et al., 2007; Delvaux et al., 2013; Гончар, 2017]. В этом случае возникают этапы эволюции напряженного состояния по времени. Посмотрим, насколько аргументирован такой подход и насколько он подкреплен возможностями самих методов изучения палеонапряжений.

Как выше уже было отмечено, при использовании данных о зеркалах скольжения время формирования трещины и время создания борозды скольжения часто не совпадают. Поэтому для данных о палеонапряжениях, полученных методами Гущенко и Анжелье, необходимо выдвинуть дополнительные гипотезы, определяющие модель деформирования исследуемого региона. В работах зарубежных и отечественных тектонофизиков, со второй половины 1980-х годов при интерпретации подобных результатов часто используют положения тектоники литосферных плит, определяющие формирование двух основных геодинамических режимов [Тёркот, Шуберт, 1985]: 1) горизонтального сжатия, вызываемого конвергенцией (сближением) плит; 2) горизонтального растяжения при спрединге (раздвижении) плит (рис. 2). Согласно современным представлениям, подобные движения литосферных плит формируют в области их активного взаимодействия (конвергенции или спрединга) соответствующий тип напряженного состояния, которое передается на достаточно большие расстояния. Примером здесь является объяснение напряжений горизонтального сжатия, действующих в коре Центральной Азии на расстояниях в несколько тысяч километров от зоны коллизии Индийской и Евразийской плит [Molnar, Tapponnier, 1975].

В рамках таких подходов считается, что весь исследуемый район на разных этапах развития находился в близких условиях по напряженному состоянию, т.е. в разных его участках геодинамический тип напряженного состояния одинаковый, при допущении некоторой вариации углов простирания и

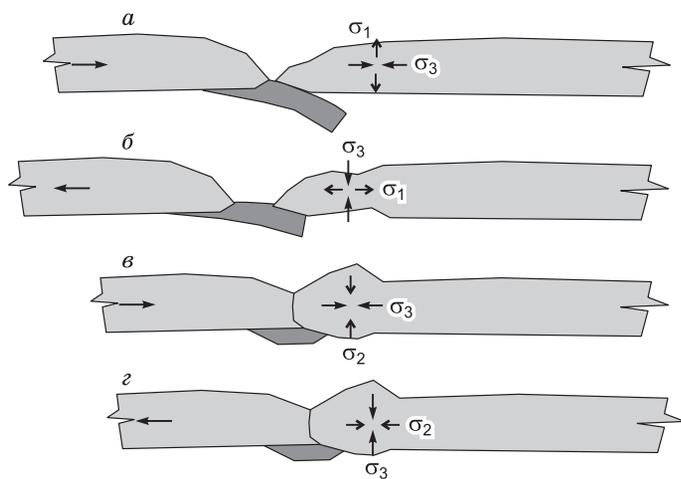


Рис. 2. Схемы смен типов геодинамических режимов в области столкновения литосферных плит:

a — начало субдукции (подвиг океанской литосферной плиты под континентальную) формирует напряженное состояние горизонтального сжатия (максимальное растяжение вертикально); *б* — возвратное (инверсионное) движение океанской литосферной плиты — горизонтальное растяжение; *в* — новый этап сближения континентальных литосферных плит в виде коллизии — горизонтальное сжатие с ростом гор при ориентации минимального сжатия вдоль границы столкновения плит (вертикально промежуточное главное напряжение); *г* — горизонтальное растяжение, возникшее из-за очередного этапа инверсии в движении плит и приводящее к уменьшению горизонтального сжатия до уровня промежуточного главного напряжения.

погружения осей главных напряжений, действующих в латеральном направлении. При этом по умолчанию подразумевается, что такой режим напряженного состояния охватывает всю кору или, как минимум, верхнюю ее часть, включающую сейсмогенные зоны [Zoback и др., 1992].

Пример интерпретации палеостресс-состояний для Северо-Западного Кавказа. Рассмотрим результаты палеостресс-реконструкции, выполненной французскими тектонофизиками [Saintot, Angelier, 2002] для Северо-Западного Кавказа и Крыма. Для разных районов Северо-Западного Кавказа как вдоль береговой линии, так и в глубине горной области по результатам полевых тектонофизических работ были собраны данные о зеркалах скольжения (более 1800 зеркал скольжения). Реконструкция производилась методом, разработанным Ж. Анжелье [Angelier, 1984]. В результате были получены данные о более 100 стресс-состояниях, представленные в виде выходов осей главных напряжений на верхней полусфере рис. 3. На нем следует особо отметить, что оси максимального сжатия и растяжения, а также промежуточного главного напряжения на верхних полусферах образуют две группы: одну, почти изометричную, расположенную в центральном своде полусферы (конусный угол порядка 20—30°), и вторую, концентрическую, охватывающую основание полусферы (конусный угол 30—35°). Существует лишь небольшое число стресс-состояний, попадающих на верхней полусфере в пространство между двумя этими группами.

При интерпретации полученных результатов реконструкции палеонапряжений были использованы положения тектоники литосферных плит. С этой целью все определения палеонапряжений были разделены на временные интервалы, которым отвечали близкие по ориентации главные напряжения, действующие в горизонтальном направлении. В рамках такого подхода в работе [Saintot, Angelier, 2002] было выделено 10 временных этапов развития деформаций исследуемого региона. Эти временные этапы отвечали трем основным геодинамическим типам напряженного состояния: а) горизонтального сжатия; б) горизонтального сдвига; в) горизонтального растяжения. На рис. 4 приведены два примера (два разных этапа) такого объединения локальных стресс-состояний в единое поле напряжений.

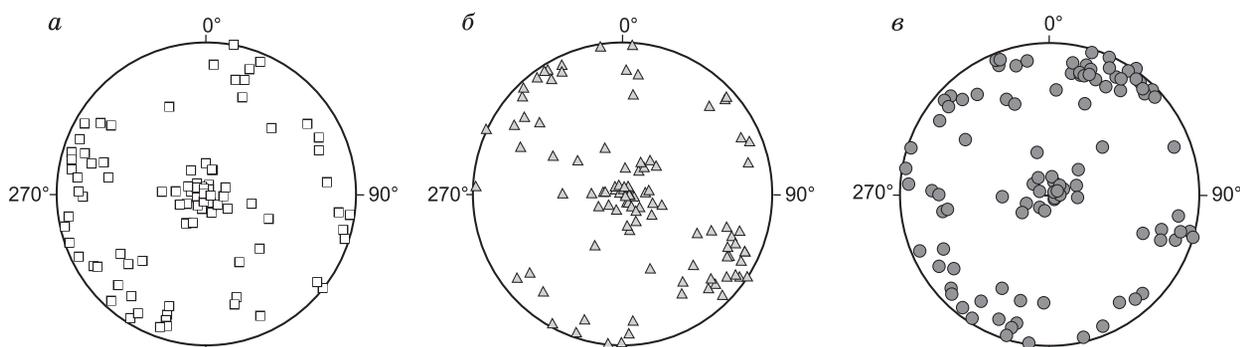
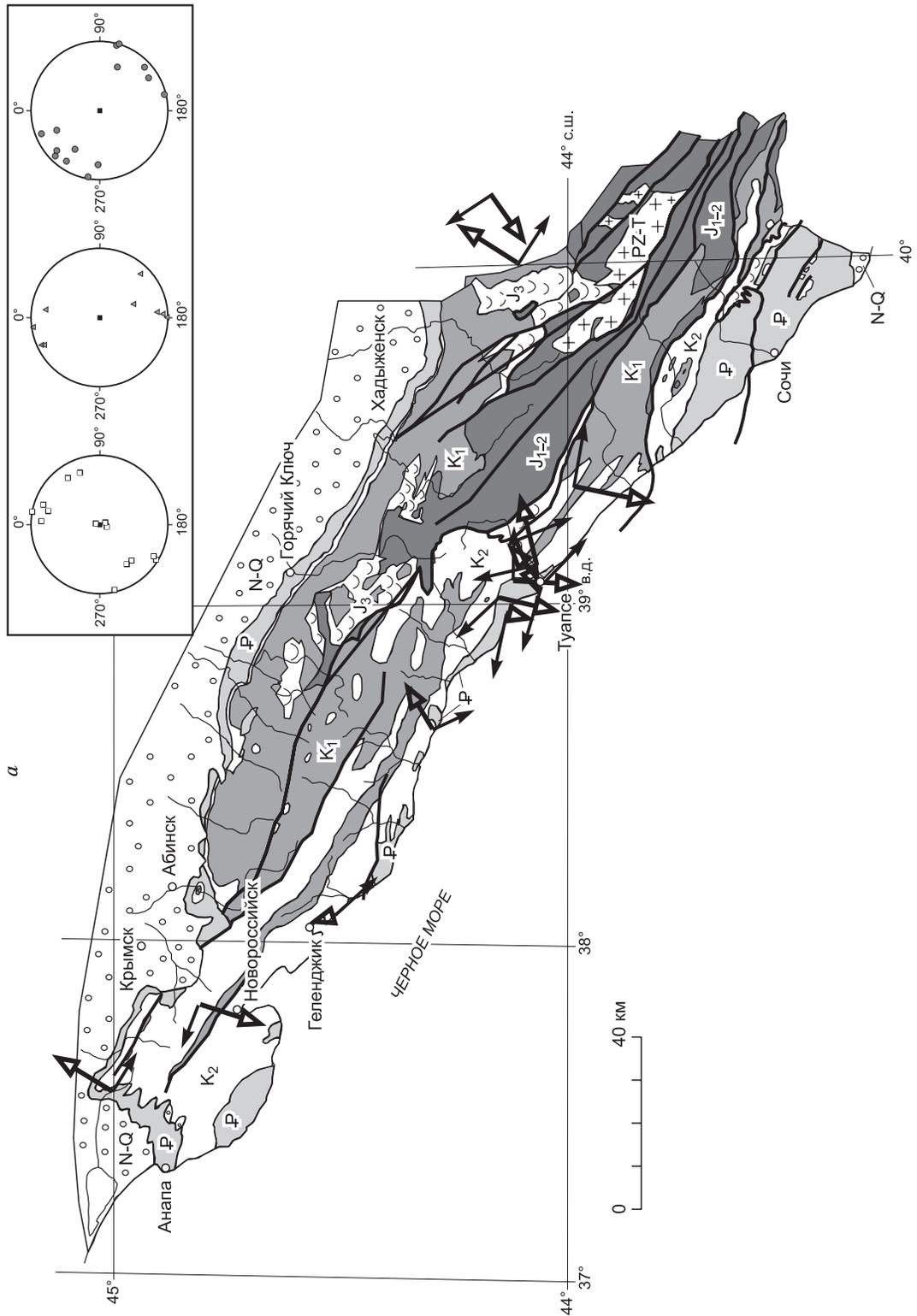


Рис. 3. Круговые диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) положения осей главных напряжений для всех локальных стресс-состояний Северо-Западного Кавказа по результатам палеостресс-анализа [Saintot, Angelier, 2002]:

a — максимальное растяжение, *б* — промежуточное главное напряжение, *в* — максимальное сжатие.

Рис. 4. (Начало).



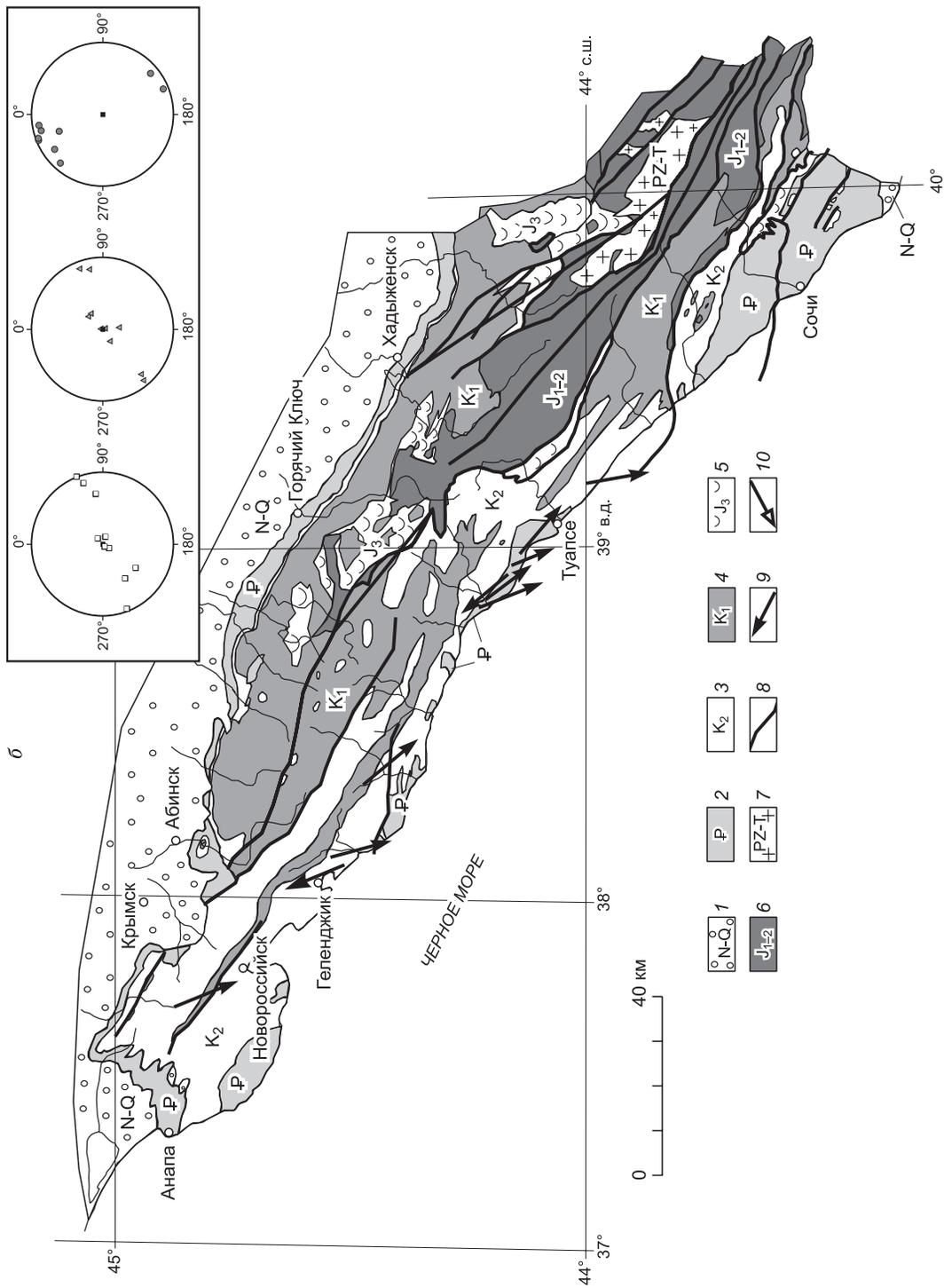


Рис. 4. Ориентация осей максимального сжатия для двух этапов (а) — горизонтальный сдвиг, б — горизонтальное сжатие) напряженного состояния по работе [Saintot, Angelier, 2002] с дополнительным анализом положения трех главных осей совокупностей стресс-состояний на крупных диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу).

1–7 — области развития отложений неогена — антропогена (1), палеогена (2), верхнего мела (4), верхней юры и келловая (5), нижней и средней юры (6), палеозоя (7); 8 — разрывные нарушения, 9, 10 — оси максимального сжатия (9) и растяжения (10) на схеме (показаны проекции их погружения). На врезках в правом верхнем углу показаны выходы осей максимального (квадрат) девиаторного растяжения, промежуточных (треугольник) и максимальных сжимающих напряжений (круг).

Использованный в работе [Saintot, Angelier, 2002] подход фактически базировался на гипотезе, что достоверным является такое поле напряжений, для которого ориентация осей главных напряжений обусловлена определенным тектоническим событием, имеет минимальную вариацию в пространстве и выдержано по площади региона. При этом основанием для отнесения отдельных событий к определенному полю напряжений часто было именно совпадение основных характеристик этого поля и локальной обстановки. Следует отметить, что в механике понятие «поле напряжений» отвечает пространственному изменению параметров напряженного состояния, которые при этом удовлетворяют уравнениям равновесия. Это важное требование, накладывающее в действительности некоторые ограничения не только на пространственные вариации главных осей напряжений, но и на величины напряжений. Однако в механике известны примеры, определяющие резкую смену ориентации главных осей, включающую смену индекса оси главного напряжения, действующего в некотором направлении, и при этом уравнение равновесия удовлетворяется, т.е. все это можно называть единым полем напряжений. В следующем разделе будут представлены примеры такого поля напряжений.

На рисунке 5 все типы напряженного состояния, полученные в этой работе в виде средних ориентаций максимального сжатия или максимального растяжения, действующих в горизонтальном направлении, выстроены во временной ряд, который авторы этой работы предложили на основании представлений тектоники литосферных плит как фактора, формирующего напряженное состояние коры развивающейся складчатой системы. Как следует из рис. 5, в процессе деформационной эволюции коры Северо-Западного Кавказа практически для всех смен эпох наблюдалось изменение ориентации с субгоризонтальной на субвертикальную и наоборот хотя бы одной из осей главных напряжений. Четырежды это происходило с осью напряжений максимального сжатия и максимального растяжения. Для каждой из этих осей как минимум однажды также имело место и латеральное изменение ориентации главных осей на углы, близкие к 90° .

Следует заметить, что такие резкие изменения ориентации главных осей напряжений, вероятно, требуют и некоторого времени, так как должны сопровождаться изменением величин напряжений, действующих в горизонтальном направлении (вертикальные напряжения близки к весу колонки горных пород [Марков, 1977; Гудман, 1987; Brade, Bzown, 2004]). Согласно выводам из работы [Saintot, Angelier, 2002], все эти изменения напряженного состояния происходили в течение 70—100 млн лет (с позднемезозойского до настоящего времени). Возникает вопрос о возможности изменения величин напряжений в

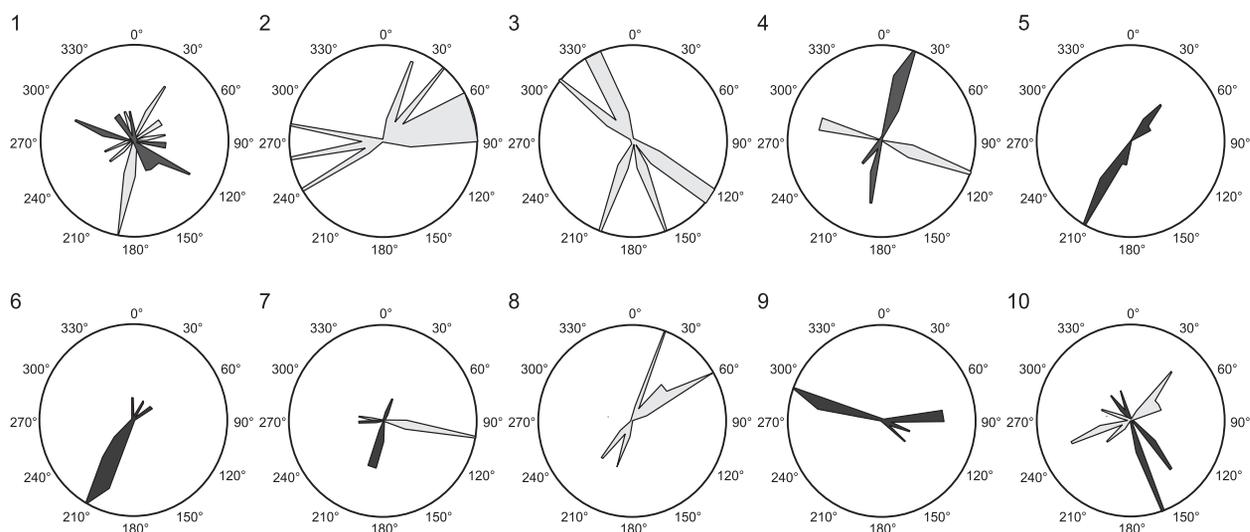


Рис. 5. Роза-диаграммы осей главных напряжений для 10 этапов деформирования коры, построенные по данным из работы [Saintot, Angelier, 2002]:

1 — режим горизонтального сдвига (с перестановками осей до горизонтального сжатия) с основным простираем осей σ_3 (темно-серый цвет) на северо-запад и юго-восток; 2 — режим горизонтального растяжения с преимущественным простираем осей σ_1 (светло-серый цвет) на восток—северо-восток и запад—юго-запад; 3 — режим горизонтального растяжения с простираем осей σ_1 на юго-восток и северо-запад; 4 — режим горизонтального сдвига с преимущественным погружением осей σ_3 на север—северо-восток; 5 — режим горизонтального сжатия с преимущественным погружением осей σ_3 на юго-запад; 6 — режим горизонтального сжатия с погружением осей σ_3 на юго-запад; 7 — режим горизонтального сдвига с преимущественным погружением осей σ_3 на юг—юго-запад; 8 — режим горизонтального растяжения с преимущественным погружением осей σ_1 на восток—северо-восток; 9 — режим горизонтального сжатия и сдвига с преимущественным погружением осей σ_3 на запад—северо-запад; 10 — режим горизонтального сдвига и сжатия с преимущественным погружением осей σ_3 на юг—юго-запад.

такие отрезки времени, для того чтобы в направлении действия максимального сжатия стало действовать максимальное растяжение (см. рис. 5, этапы 1—4).

В работе [Ребецкий, 2015] показано, что в пределах средней коры (20 км) смена геодинамического режима горизонтального растяжения на горизонтальное сжатие или наоборот потребует приложения дополнительных напряжений порядка 5—6 кбар. Это связано с тем, что необходимо не просто изменить ориентацию осей главных напряжений (для этого достаточно 2—3 кбар), а поднять уровень стресса (максимальных касательных напряжений) до предела прочности. Если принять скорости деформирования за последние 100 млн лет близкими к современным ($n \cdot 10^{-9}$ год⁻¹) и считать, что на упругие деформации идет только 10—30 % от общих, то на это потребуется не менее 50 млн лет. Если предположить, что формирование зеркал скольжения происходит на глубинах 5—7 км (глубже режим напряженного состояния более стабилен) и далее они выводятся к поверхности, то приведенные выше расчеты напряжений и времени надо уменьшить в полтора—два раза, до 30 млн лет. При этом за оцененный период времени только создадутся условия для формирования больших деформаций. Само формирование больших амплитуд сокращений и утолщений мощности коры орогенов на 15—30 % потребует еще дополнительно 30—50 млн лет. Таким образом, заключаем, что 3—4 этапа радикальной смены напряженного состояния сложно вместить в эти 100 млн лет. Эта длительность деформирования, оцененная нами на основе приложения очень высоких скоростей деформирования, относящихся только к современному этапу [Трифонов и др., 2012], находится на пределе тех временных оценок, которые давались Ж. Анжелье.

Следует также отметить, что в серии работ по Северо-Западному Кавказу вариации геодинамического типа напряженного состояния и направления действия максимального сжатия связываются иногда с одним, максимум с двумя—тремя деформационными событиями, которые сформировали определенные структурно-парагенетические ассоциации [Расцветаев и др., 1999, 2010; Маринин, 2003, 2013; Маринин, Расцветаев, 2008; Маринин, Сим, 2015; Маринин, Тверитинова, 2016].

Пример интерпретации палеостресс-состояний для Байкальской рифтовой зоны. Схожий тип интерпретации результатов палеостресс-реконструкций был представлен в работах [Delvaux et al., 1995, 1997]. Здесь также выделялись основные геодинамические режимы напряженного состояния с горизонтальным расположением осей главного сжатия и растяжения. При этом в работе Д. Дельво с коллегами, выполненной для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), при делении на временные периоды разных напряженных состояний были выделены эпохи горизонтального сжатия (палеозой и мезозой), предшествовавшие рифту, и эпохи горизонтального растяжения, отвечавшие формированию рифта (Прото, Активный и Современный). Заметим, что в эти эпохи локально также присутствовали стресс-состояния разной выразительности горизонтального сдвига, когда и главное сжатие, и главное растяжение были субгоризонтальны.

Если сравнить вторую и третью эпохи палеозоя (рис. 4, b, c из работы [Delvaux et al., 1995]) представленные стресс-состояниями вдоль большей части северного борта Байкала, то ориентация осей сжатия изменяется с северо-западной на субширотную (разница углов простирания осей около 45°). Для первой эпохи палеозоя, представленной только в районе о. Ольхон и Приольхонского массива, выделены стресс-состояния с субмеридиональной и северо-восточной ориентацией оси сжатия. Данные по эпохам мезозоя и на стадии Проторифта с стресс-состояниями горизонтального сжатия [Delvaux et al., 1995, 1997] относятся соответственно к северо-западному флангу и центральной части Байкала (север—северо-восточное сжатие). При разбросе в ориентации осей сжатия в 45—60° данные о стресс-состояниях различных эпох распределены неравномерно. Для северного борта Байкала только в одном участке — Приольхонский массив — присутствуют стресс-состояния для всех четырех эпох сжатия.

Режим горизонтального северо-западного растяжения, отнесенный к стадии Активного рифта [Delvaux et al., 1997], выделен только в обнажениях северного и южного бортов оз. Байкала и вдоль разломов Баргузинского хребта. Для этой же эпохи в двух точках Забайкалья имеются данные о северо-восточной ориентации осей максимального сжатия, которые вообще-то совпадают с соответствующими стресс-состояниями эпохи мезозоя. Отсутствие стабильно фиксируемого режима горизонтального растяжения в Забайкальском массиве в период образования и развития рифта никак не объяснено в работах Д. Дельво. Для Забайкалья также не оказалось зеркал скольжения, позволивших определить стресс-состояния, которые отвечали бы эпохам сжатия в палеозое.

Таким образом, можно заключить, что подход по разделению стресс-состояний с разной однотипной ориентацией осей главного сжатия и растяжения на эпохи разного типа деформирования также был применен в работах Д. Дельво, что прямо отражено таблицей фаз регионального напряженного состояния [Delvaux et al., 1995].

Близкие по характеру результаты и подход по выделению эпох разных режимов напряженных состояний был применен в работе [Парфеев, Саньков, 2006] для западного продолжения БРЗ в рифтовых впадинах Хубсугул и Тункинская. После группирования разных типов стресс-состояний были выделены системы, отвечавшие трем временным этапам деформирования исследуемых районов: ранний

этап субширотного растяжения — эпизод запад—северо-западного сжатия — и поздний сдвиговый этап с северо-восточной ориентацией оси максимального сжатия.

Этот результат работы [Парфеев, Саньков, 2006] соответствует сочетанию стресс-состояний сжатия и растяжения, полученному в северном и южном бортах оз. Байкал в работах [Delvaux et al., 1995, 1997]. Отметим, что по вполне понятным причинам (обнаженность и доступность) большинство точек сбора данных о зеркалах скольжения находится на границе рифтовых впадин и окружающих их горных поднятий. Такие участки с данными о палеонапряжениях следует рассматривать как переходные зоны, в которых могут формироваться структуры разного генезиса из-за латерального смещения границы впадина—поднятие. Далее в обсуждении мы объясним процессы, которые могут происходить в этих зонах и обеспечивать периодичность смены режимов напряженного состояния.

Применительно к результатам палеонапряженного состояния БРЗ можно сказать, что не будет противоречивым утверждение о совместимости всех стресс-состояний относительно современной стадии формирования рифта. Режим горизонтального растяжения свойствен всем участкам коры, испытывающим нисходящие движения, для участков, испытывающих восходящие движения, свойствен режим с субгоризонтальной ориентацией осей максимального сжатия. Поскольку в переходной зоне происходит смена направленности вертикальных движений, здесь можно восстановить палеостресс-состояния, относящиеся как к режиму горизонтального сжатия, так и к режиму горизонтального растяжения.

С другой стороны, и это вторая проблема, обсуждаемая нами далее, необходимо выяснить, насколько верно само требование квазипостоянной ориентации осей главных напряжений и, следовательно, геодинамического типа напряженного состояния по всей площади региона в каждую из эпох. Здесь надо понимать, что неоднородность напряженного состояния коры, выражающаяся, в том числе, и в изменении ориентации осей главных напряжений, возникает не только из-за неоднородности ее свойств, но и из-за специфики деформирующих воздействий, которые не обязательно являются простым боковым сжатием или растяжением, как это было показано в работе [Мягков, Ребецкий, 2016].

Пример интерпретации палеостресс-состояний Алтая. В более поздней работе Д. Дельво [Delvaux et al., 2013] для Алтая выделил только три эпохи напряженного состояния, относящиеся к эоцену—олигоцену, позднему плиоцену—раннему плейстоцену и среднему плейстоцену—голоцену. На рисунке 6, а, в представлены эти результаты. Как можно видеть, существенные отличия имеют место для эоцена—олигодена, данные по которому относятся к восточной части Чуйской впадины. Здесь имеет место режим горизонтального растяжения при запад — северо-западной ориентации оси максимального горизонтального сжатия. Две другие эпохи дают режимы горизонтального сжатия и горизонтального сдвига при субмеридиональной (поздний плиоцен—ранний плейстоцен) и север — северо-восточной (средний плейстоцен—голоцен) ориентации осей максимального горизонтального сжатия. При этом в пределах отдельных обнажений для каждого из этих режимов возможны отклонения осей горизонтального сжатия на углы порядка 90°.

Таким образом, в этой работе Д. Дельво уже не стал при выделении эпох напряженных состояний, строго придерживаться принципа постоянства не только ориентации осей главных напряжений, но и даже геодинамического типа.

Сравним данные палеостресса [Delvaux et al., 2013] с данными современного поля напряжений, полученными по сейсмологическим индикаторам деформаций [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2013]. На рисунке 6, б, г показана ориентации осей максимального горизонтального сжатия и геодинамический тип напряженного состояния, отвечающие современному полю напряжений. Можно увидеть, что палеостресс каждой из эпох, по Д. Дельво, в разных участках имеет как сходство с современным напряженным состоянием, так и определенные, но не принципиальные отличия.

Можно сказать, что если Д. Дельво выделил указанные эпохи напряженных состояний, опираясь на минералогические маркеры, то за отмеченный им период не произошло существенного изменения напряженного состояния исследуемого участка орогена. Напряженное состояние за достаточно длительный период времени (около 10—30 млн лет) мало изменялось.

О ХАРАКТЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРЫ

Проведем анализ возможности формирования неоднородности напряженно-деформированного состояния коры, опираясь на теоретические тектонофизические исследования, а также данные геодезии, горного дела полевой тектонофизики в области изучения современного напряженного состояния. Здесь прежде всего нас будут интересовать не изменения интенсивности напряжений, а локальные перестройки напряжений, формирующие разные геодинамические типы напряженных состояний при едином региональном механизме нагружения.

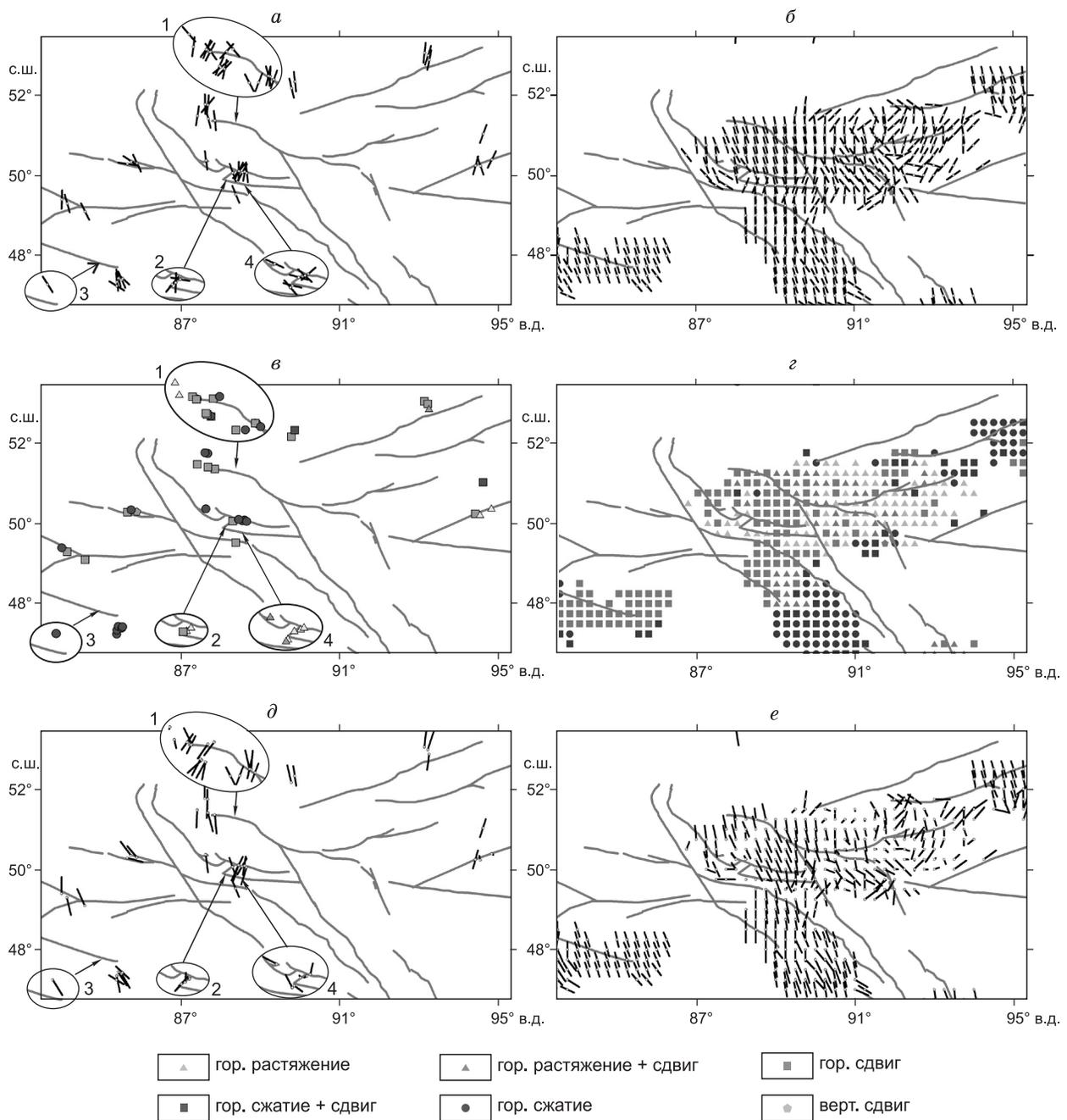


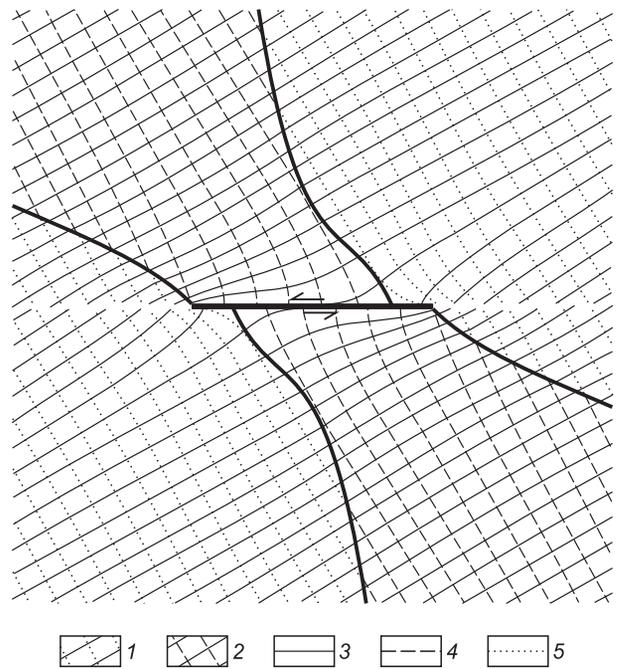
Рис. 6. Напряженное состояние Алтая по данным геологических индикаторов разрывных деформаций [Delvaux et al., 2012] (а, в, д) и по механизмам очагов землетрясений [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2013] (б, з, е).

а, б — ориентация осей максимального сжатия; в, з — геодинамические типы напряженного состояния; д, е — оси максимального сжатия, построенные в направлении их погружения. а, в, з — основной рисунок поздний плиоцен—ранний плейстоцен; врезки 1, 2, 3 — средний плейстоцен—голоцен, врезка 4 — эоцен—миоцен.

Данные теоретической тектонофизики. Приведем примеры формирования неоднородного на локальном уровне геодинамического типа напряженного состояния, полученного в теоретических тектонофизических исследованиях в работе [Осокина, 2008] для регионального состояния, отвечающего горизонтальному сдвигу. Такая неоднородность возникает в окрестности конца вертикальной трещины сдвига (рис. 7) и зависит от соотношения главных напряжений, действующих в латеральном направлении и вертикального напряжения, определяемого весом столба горных пород. Как видно, рядом могут сосуществовать разные геодинамические типы напряженного состояния. Также может иметь место пе-

Рис. 7. Траектории осей главных напряжений и области разного геодинамического типа вблизи разрыва со сдвигом вдоль простирания (план) — левый сдвиг (по работе [Осокина, 2008]).

1 — область горизонтального сдвига; 2 — область горизонтального сжатия; траектории осей: 3 — максимального сжатия, 4 — промежуточного главного напряжения, 5 — максимального растяжения.



реиндексация главных напряжений, действующих вдоль одной и той же траектории. Эта переиндексация происходит, когда траектория главного напряжения пересекает разрыв вблизи конечного участка.

В качестве другого примера латеральных вариаций геодинамических типов напряженного состояния можно привести результаты теоретических тектонофизических исследований, выполненных в работе [Гончаров, 1988]. Здесь было показано, что адвективные течения в слое, вызванные плотностной неустойчивостью [Тёркот, Шуберт, 1985], приводят к формированию вблизи поверхности над восходящей ветвью течения участка горизонтального растяжения, а над нисходящей — участка горизонтального сжатия. При этом слой, в котором происходит такое течение, не испытывает изменения длины и толщины. Важно также заметить, что при действии механизма внутрикорового адвективного течения более глубокие области слоя могут иметь геодинамические типы напряженного состояния совершенно другие, чем те, что расположены вблизи поверхности. Таким образом, теоретические расчеты показывают, что для одного механизма внешнего нагружения участка коры могут иметь место вариации локального поля от горизонтального растяжения до горизонтального сжатия.

Данные геодезии. Используя данные GPS-геодезии, можно методом триангуляционных расчетов получить данные о латеральных деформациях земной поверхности. При подобных расчетах определяются три компоненты деформаций, действующие на поверхности коры в латеральном направлении, а затем определяются направления осей и величины главных продольных латеральных деформаций. Из работы [Саньков и др., 2011] для Центральной Азии можно увидеть, что в большом числе случаев оси главных деформаций показывают направления максимального укорочения и удлинения в горизонтальном направлении, т.е. здесь имеет место геодинамический режим горизонтального сдвига. При этом также существуют отдельные определения, для которых в латеральном направлении фиксируется промежуточная главная деформация. Знак суммарных деформаций в латеральном направлении определяет либо сокращение, либо расширение площади.

На рисунке 8 данные из работы [Саньков и др., 2011] представлены в виде треугольников, испытывающих расширение или сокращение их площади. Видим, что в природных объектах, соответствующих структурам внутриконтинентального Центрально-Азиатского орогена, одновременно сосуществуют области локального расширения площади (как правило, впадины) и области локального сокращения площади (как правило, поднятия). Очевидно, что качество выделения подобных ситуаций по данным GPS-геодезии сильно зависит от размеров триангуляционной сети и попаданию расчетных треугольников сети в структуры одного геодинамического режима.

Напряжения в коре по данным горной механики. Измерения природных напряжений в массивах пород, выполненные в горном деле (*in situ* методы, в основном методы разгрузки и гидравлического разрыва скважин [Пейве, Кропоткин, 1973]), показывают определенную взаимосвязь геодинамического режима напряженного состояния с направленностью вертикальных движений. Заметим, что замеры напряжений *in situ* методами относятся к самой верхней части коры, отвечая глубинами 1—3 км.

В работе [Марков, 1977] показано, что в зонах прогибов и на участках медленных погружений поверхности чехла платформ горизонтальные сжимающие напряжения σ_x и σ_y ($\sigma_{x,y}$) в основном (около 75 %) меньше вертикальных (рис. 9). В скальных породах кристаллического и складчатого фундамента земной коры, выведенных ближе к поверхности вертикальными тектоническими движениями [Марков, 1980; Козырев и др., 1996], напряжения горизонтального сжатия обычно превосходят (около 60 %) вертикальные сжимающие напряжения. Установлено также, что в складчатых областях и щитах на одних и

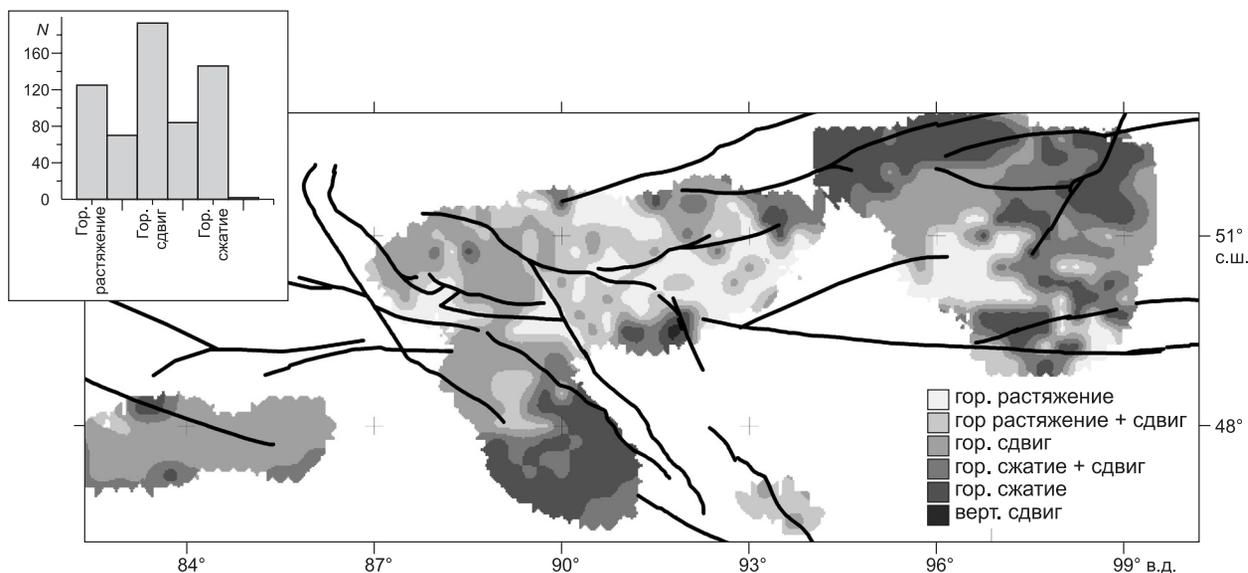


Рис. 10. Геодинамический тип напряженного состояния коры Алтае-Саян [Ребецкий и др., 2013] и карта разломов, по В.Г. Трифонову [Трифонов и др., 2002].

На врезке: гистограмма представительности различных геодинамических типов напряженных состояний.

как результат упругой разгрузки пород, вызванной денудационными процессами. В работах [Ребецкий и др., 2011, 2017б] выполнен теоретический анализ таких остаточных напряжений. Для Хибинского массива [Жиров и др., 2016] установлено наличие одновременно горизонтального сжатия в рудном теле и горизонтального растяжения во вмещающих породах. Таким образом, данные о природных напряжениях в *in situ* замерах показывают возможность одновременного сосуществования напряжений горизонтального сжатия и растяжения.

Тектонофизические данные о современных напряжениях. В этом разделе отдельно будут представлены результаты исследования закономерности природных напряжений, полученных по результатам тектонофизического анализа. В тектонофизике параллельно с развитием методов палеостресс-реконструкции создавались и методы анализа современного напряженного состояния, базирующиеся на сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений [Gephard, Forsyth, 1984; Юнга, 1990; Ребецкий, 2003]. Оба этих направления имеют один и тот же базис, т.е. данные о хрупких трещинах и разрывах типа сдвига (термин «сдвиг» использован в механическом смысле). При этом данные об очагах землетрясений доставляют информацию о напряженном состоянии глубинных слоев коры в современную стадию их деформирования. Посмотрим, какие закономерности распределения напряжений получены подобными тектонофизическими методами для коры внутриконтинентальных орогенов.

Реконструкция природных напряжений для земной коры Алтае-Саян (АС) [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2013] по данным о механизмах очагов землетрясений показала, что в земной коре горных хребтов, формирование которых сопровождается процессами эрозии склонов, в субгоризонтальном направлении преимущественно ориентированы оси максимального сжатия (65 % от площади поднятий, исследованных в работах). Здесь в основном действуют режимы горизонтального сжатия и горизонтального сдвига (рис. 10). Важно отметить, что для платообразных поднятий там, где денудация поверхности минимальна, в коре наблюдается режим горизонтального растяжения или сдвига, т.е. ось максимального растяжения субгоризонтальна [Ребецкий, Алексеев, 2014].

В коре передовых прогибов, межгорных впадин, сопряженно развивающихся рядом с горными поднятиями, наиболее часто напряжение максимального растяжения субгоризонтально (75 % определений). Здесь имеет место геодинамическая обстановка горизонтального растяжения и сдвига в горизонтальной плоскости (см. рис. 10). В крупных межгорных впадинах орогенов, вовлеченных в процесс поднятия, как правило, наблюдается геодинамический режим горизонтального сдвига.

Отметим, что в силу особенности сейсмического режима [Жалковский и др., 1995] количество данных о механизмах очагов землетрясений для областей прогибов коры существенно меньше, чем для областей поднятий. Это предопределило здесь большие масштабы усреднения напряжений в процессе реконструкции и интерполяции при районировании коры по видам геодинамического режима. Кроме выявленной закономерности встречаются и случаи, когда в коре впадин оси максимального растяжения

субгоризонтальны (Зайсанская котловина, центральный сегмент Тувинской котловины, Тоджинская впадина), но такое наблюдается значительно реже (25 % от площади впадин).

Подобное соотношение морфологии кровли коры и геодинамического режима также проявляется в результатах тектонофизической реконструкции, выполненной по данным сети КНЕТ совместно с Н.А. Сычевой [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2016], для Северного Тянь-Шаня. В коре Чуйской котловины вдоль ее южных границ с Киргизским хребтом наблюдаются области горизонтального растяжения. Суусамырской, Кызылшейской и Кочкорской внутригорным впадинам отвечают режимы горизонтального сдвига или сдвига с растяжением, для которых оси главного девиаторного растяжения субгоризонтальны. В коре горных хребтов геодинамический режим, как правило, — горизонтальное сжатие или сдвиг со сжатием.

Выявленная по результатам реконструкции напряжений в коре Алтае-Саян и Северного Тянь-Шаня закономерность, определяющая сочетание субгоризонтальной ориентации осей максимального сжатия в коре областей поднятий и осей девиаторного растяжения в коре областей впадин, нами отнесена к активной стадии формирования горного рельефа. На этой стадии формирования рельефа процессы денудации и эрозии, действующие в поднятых формах, и осадконакопления — в прогибах компенсируются продолжающимися поднятиями гор и опусканиями впадин.

Таким образом, отмечаем, что современное напряженно-деформированное состояние коры внутриконтинентальных орогенов может иметь существенные латеральные вариации геодинамического типа напряженного состояния, характеризуемого ориентацией главных осей напряжений по отношению к оси на зенит. Заметим, что этим областям континентальной коры часто отвечает смена периода поднятия поверхности на период погружения (колебательные вертикальные движения [Белоусов, 1954]). Это говорит о возможности смены геодинамических обстановок напряженного состояния. Для одного и того же участка коры могут чередоваться совершенно противоположные режимы горизонтального сжатия и горизонтального растяжения.

Подтверждение результатов тектонофизического анализа напряженного состояния крупных межгорных впадин находим в данных наземных измерений (светодальномерные наблюдения), которые показывают, что ширина Таджикской депрессии увеличивается несмотря на то, что она, согласно концепции тектоники литосферных плит, находится в обстановке горизонтального сжатия [Гусева и др., 1993]. Это подтверждается сейсмологическими данными, определяющими субгоризонтальную ориентацию осей удлинения тензора сейсмостектонических деформаций для крупных приосевых участков депрессии [Лукк и др., 2008]. Также субмеридиональное и общее латеральное расширение со скоростью порядка 10^{-6} — 10^{-7} год⁻¹ наблюдалось на кварцевых деформографах для станций Алмаатинского прогностического полигона, расположенных в предгорьях хр. Заилийский Алатау [Тихомиров и др., 2001]. Повторное нивелирование показывает, что Чуйская, Иссык-Кульская и Ферганская впадины обладают устойчивым погружением [Абдрахматов, Цурков, 1991].

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты приведенных выше исследований показывают, что для достаточно широкого класса механизмов деформирования литосферы в латеральном направлении, а также по глубине происходит не только изменение ориентации осей главных напряжений, но может иметь место смена геодинамического типа напряженного состояния. Этот факт выявлен в теоретических тектонофизических исследованиях и проверен в наблюдениях за природным напряженно-деформированным состоянием коры. Можно также предположить, что современная эпоха не является уникальной. В настоящее время также существуют области одного региона, где в локальном масштабе действуют режимы горизонтального сжатия, растяжения и сдвига. Как показано в работе [Мягков, Ребецкий, 2016], данные о характерных особенностях напряженных состояний коры накладывают сильное ограничение на выбор возможных механизмов внешнего нагружения региона и поэтому должны рассматриваться в качестве критерия достоверности геомеханического моделирования геологических структур.

Связь палеострессов и локальных структур. Когда М.В. Гзовский в начале пятидесятых годов прошлого века закладывал основы изучения напряженного состояния в природном геологическом объекте, то он считал основной задачей этих работ адекватное описание механизма формирования локальных структур. Если посмотреть на основные его объекты исследования в Байджансайском антиклинории [Гзовский, 1959, 1963], то мы увидим прежде всего складки продольного или поперечного изгиба. Изучение сопряженных пар трещин в крыльях, своде, периклинали и ядре антиклинальных частей складок позволяло Михаилу Владимировичу распознать генезис их формирования. Следует отметить, что при исследовании напряжений М.В. Гзовский также использовал данные о малых структурных формах (кливаж, будинаж, трещинки отрыва и др.). Это давало возможность говорить о восстановлении поля напряжений в период их формирования в позднем палеозое.

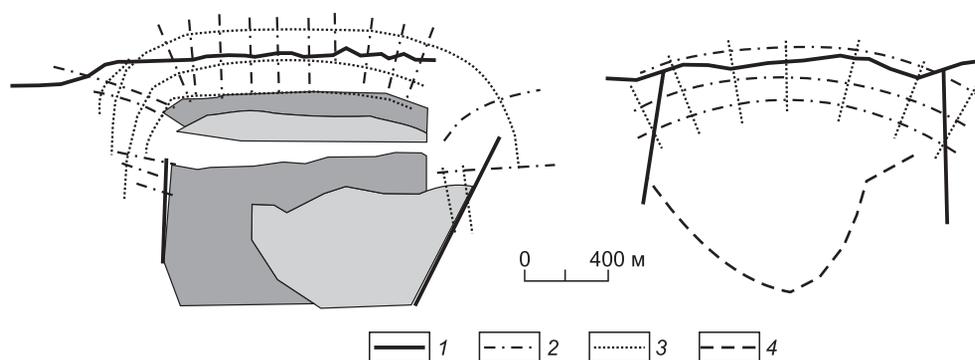


Рис. 11. Характер траектории главных осей палеонапряжений, полученные М.В. Гзовским для Манчабырской антиклинали (а) и Аксуранской синклинали (б) Байджансайского антиклинория:

1 — разломы; 2 — траектории осей алгебраически минимального главного напряжения σ_1 ; 3 — траектории осей алгебраически максимального главного напряжения σ_3 ; 4 — дно Аксуранской синклинали. Рисунок в упрощенной форме взят из работы [Гзовский, 1963].

В результате исследований М.В. Гзовского было установлено, что в Байджансайском антиклинории наиболее крупным складчатым структурам — антиклиналям (поперечный размер — первые километры) отвечает субвертикальная ориентация осей максимального сжатия σ_3 и субгоризонтальная для осей минимального сжатия σ_1 (рис. 11). Траектории осей σ_1 стремятся быть параллельными наклону крыльев антиклинали. Данная закономерность фиксировалась по характерным сопряженным парам сколовых трещин взбросового типа, наблюдаемым в крыльях антиклиналей, и грабенов в его сводовой части.

Для синклиналей данные о разрывных нарушениях в основном относились к их крыльям, т.е. зонам их сопряжения с антиклиналями складок. Оси максимального сжатия здесь имели относительно пологий наклон в сторону ядра антиклинали, что позволило М.В. Гзовскому предположить их субгоризонтальную ориентацию в срединной части синклинали. На рисунке 11 траектории этих осей имеют пологий выгиб вверх, а оси максимального девиаторного растяжения веерообразно расходятся от ядра синклинали. Промежуточная ось главного напряжения σ_2 ориентирована вдоль шарниров складок в антиклинальной и синклиальной ее частях.

В Байджансайском антиклинории наиболее крупные складки (первый ранг) отвечали режиму поперечного изгиба. М.В. Гзовский показал, что складчатые структуры разного ранга — крупные (первого и второго порядка) и дополнительные (третьего, четвертого и т.д.) доставляют информацию о разных масштабах напряжений, действующих в горных массивах. Для дополнительных складок полученные данные их напряженного состояния в момент формирования говорили о действиях механизмов как продольного сжатия, так и поперечного изгиба.

Таким образом, М.В. Гзовский изучаемым палеонапряжениям прежде всего ставил в соответствие локальные и субрегиональные структуры, а не мегарегиональные воздействия.

Связь палеостресса и вертикальных движений. В работах [Ребецкий, 2008; Ребецкий и др., 2017б] было возобновлено обсуждение идеи об ответственности остаточных напряжений за повышенный уровень напряжений горизонтального сжатия, впервые прозвучавшей в работах Б. Войхта [Voight, Pierre, 1974]. Возникновение этих остаточных напряжений связывается с выводом к поверхности пород, которые в коре на больших глубинах получили необратимые, псевдопластические деформации. Сами эти глубинные деформации связываются не с горизонтальным сжатием, а с вертикальным гравитационным уплотнением, происходящим в условиях бокового стеснения. Эти остаточные напряжения являются сжимающими, но в приповерхностных условиях, частично разгружаясь, создают в породах деформации горизонтального удлинения. Порода как бы «разбухает», раздвигая вмещающую раму. Такая разгрузка не бывает полной, и в породе в приповерхностных условиях при малых величинах вертикальных сжимающих напряжений имеются большие горизонтальные сжимающие напряжения (сотни бар).

Участками выходов такой породы являются склоны горных поднятий (области высокого уровня эрозии), т.е. ровно те области, которые в основном и являются источником обнажений в орогенах. Таким образом, в процессе снятия части остаточного горизонтального сжатия за счет наличия поверхностей ранее существовавших трещин возможно появление зеркал скольжения с кинематическим типом в виде взбросов или сдвигов (зависит от высоты измеряемого стресс-состояния на горном склоне). Опыт работы показывает, что в тех случаях, когда на локальном уровне обнажения нет четкой геологической структуры, ориентация главных осей, расположенных субгоризонтально, достаточно вариабельна. Это

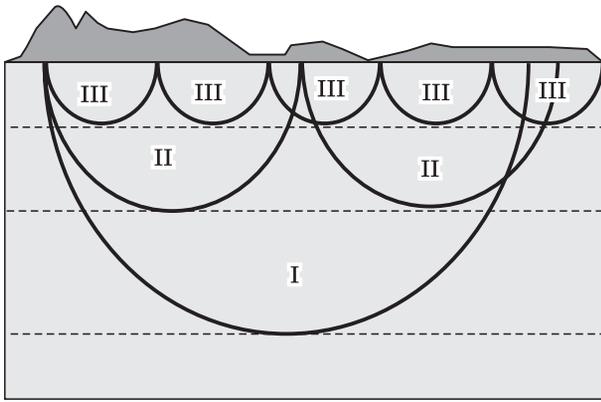


Рис. 12. Схема, по П.Н. Николаеву [1992], определяющая соотношение систем напряженных состояний разного ранга (I—III), охватывающих по глубине разные уровни литосферы.

может свидетельствовать как раз о влиянии остаточных напряжений на получаемые стресс-состояния. При этом статистически представительны режимы горизонтального сжатия или сдвига.

О роли масштабного фактора. Из теоретических тектонофизических исследований [Осокина, 1987] данных геологии и сейсмологии известно, что напряженное состояние иерархично, т.е.

при разном масштабе усреднения напряжений можно получить разные ориентации главных осей напряжений и даже разные геодинамические типы напряженного состояния. В сейсмологии это проявляется в существенном различии кинематических типов механизмов очагов землетрясений, как это имеет место во внутриконтинентальных орогенах, таких как Алтае-Саяны, Тянь-Шань, Памир и др. В таких регионах реконструкция современных напряжений по фокальным механизмам разного диапазона магнитуд покажет отличающиеся друг от друга параметры поля напряжений. Геолог, отбирая данные о разрывных смещениях в обнажении, не всегда может сказать, какой размер трещины или разрыва характеризует данное смещение. Это могут быть и десятки сантиметров, и сотни метров. Из-за этого возможно получение в одном и том же обнажении двух совершенно различных напряженных состояний.

В качестве иллюстрации высказанных соображений посмотрим, как в методе тектонодинамического анализа решалась данная проблема. Напомним, что П.Н. Николаевым был специально разработан этот метод для изучения разномасштабных трещин и линейментов, получаемых в полосе дешифрирования аэро- и космоснимков [Николаев, 1992]. В методе выделялись три основных масштабных ранга полей напряжений (рис. 12), захватывавших последовательно верхнюю кору, кору в целом, литосферу в целом (три ранга). Как следует из рис. 12, для одного и того же участка могут иметь место три отличающихся по латеральной площади усреднения и глубине проникновения в кору поля напряжений разных иерархических масштабов.

Локальная неоднородность поля напряжений. Как выше уже отмечалось, локальная тектоника (складки, разрывы, интрузии и др.) могут формировать пространственную неоднородность напряженного состояния в масштабе первых километров—десятков километров. При этом такому полю напряжений можно подобрать внешнее напряженное состояние, более крупное по линейному размеру усреднения, которому отвечает своя ориентация осей главных напряжений. Примером здесь могут служить решения Д.Н. Осокиной [1987], полученные при изучении неоднородного поля на-

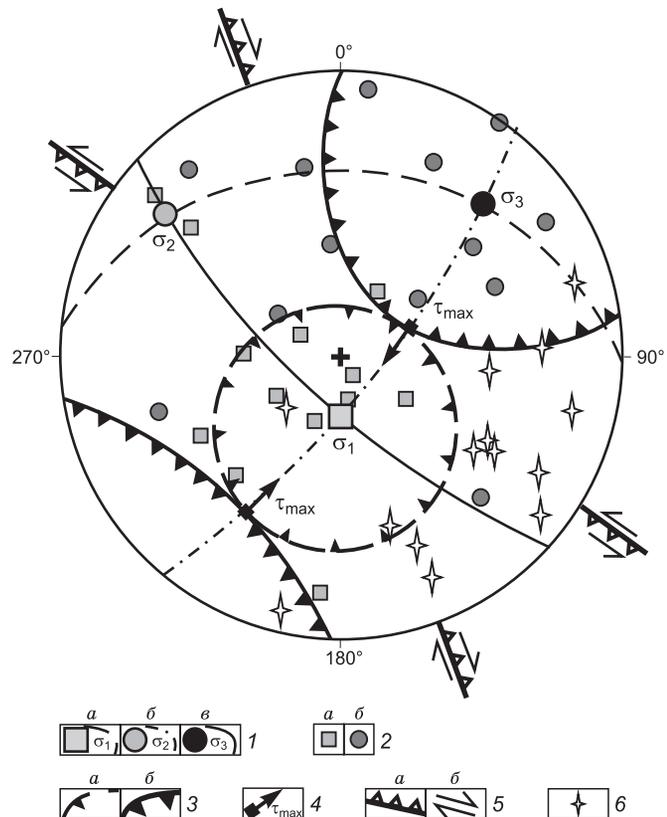


Рис. 13. Стереодиаграмма обработки данных локальных стресс-состояний из работы Л.А. Сим [Ребецкий и др., 2017а].

Сетка Вульфа, верхняя полусфера. 1 — оси: а — растяжения, б — промежуточных, в — сжатия для регионального стресс-состояния; 2 — оси: а — растяжения, б — сжатия для стресс-состояний локального уровня; 3 — региональное стресс-состояние: конусы растяжения (а) и сжатия (б); 4 — полюсы плоскостей действия максимальных касательных напряжений; 5 — типы перемещений по плоскостям действия максимальных касательных напряжений: взбросы, сдвиги; б — положение шарниров складок.

пряжений вблизи разрывов (см. рис. 7). При ограниченном доступе к обнажениям можно, работая в разных бортах концевой и средней частей такого разрыва, получить совершенно различные ориентации осей главных напряжений.

В работах Л.А. Сим [1996] приведен алгоритм обработки такого типа данных о палеострессе. Он именуется как поиск «общего поля напряжений» — напряженное состояние регионального масштаба усреднения. Предлагается нанести данные об ориентации осей главных напряжений сжатия и растяжения на единичную полусферу и, если совокупность выходов этих осей укладываются в свои сектора конусов с углом при вершине 90° , построенных из центра сферы и имеющих ортогональные друг к другу оси, то данное поле напряжений является единым неоднородным локальным полем напряжений (рис. 13). Использование подобного подхода позволяет понять, следует ли локальным изменениям ориентации осей главных напряжений ставить в соответствие смену эпохи напряженного состояния или можно «обойтись» пространственной неоднородностью поля напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих разделах мы уже упоминали результаты тектонофизических исследований современного напряженного состояния, которые говорят о разном геодинамическом режиме крупных межгорных впадин (тем более рифтового генезиса) и соседних с ними горных поднятий. Эти выводы подтверждаются геологическими исследованиями В.В. Ружича в северном обрамлении Тункинской впадины [Ружич и др., 1972], в Прихубсугулье [Ружич, Хилько, 1985] и в районе Чарской впадины [Ружич, 1978], а также сейсмологических данными о механизмах очагов землетрясений, полученными и для коры Хубсугульской и Тункинской впадин [Мельникова и др., 2001]. По этим данным, в глубине впадин для десятка землетрясений их механизмы очагов отвечают либо сбросам (ось P субвертикальна), либо сбросам со сдвигами (ось T субгоризонтальна). В краевой зоне впадин наблюдаются как механизмы в виде взбросов и сдвигов, так и в виде сбросов, а также их сочетания. При этом определения антиподных типов механизмов очагов землетрясения (взброс и сброс) могут располагаться достаточно близко (5—10 км) друг от друга. Отметим, что на основе этих данных В.В. Ружичем было высказано предположение об одновременном сосуществовании обстановки горизонтального растяжения во впадинах и горизонтального сжатия в горном окружении, что совпадает с результатами наших исследований [Ребецкий, 2015].

Предположение о латеральном смещении границы впадина—горное поднятие следует расширить, сказав, что это смещение может носить как направленный, так колебательный характер [Белоусов, 1976], перемешивая в одном обнажении свидетельства о разных типах стресс-состояний. Таким образом, нахождение разрывных структур разного кинематического типа в зонах современного сочленения впадин и поднятий нельзя использовать для выделения разных эпох региональных напряженных состояний.

Также при использовании регионального принципа формирования этапов деформирования путем простой сепарации результатов региональной палеостресс-реконструкции по близкой ориентации осей главных напряжений мы сталкиваемся с проблемой временных ограничений для осуществления подобных эволюционных изменений напряженного состояния. Каждая радикальная смена напряженного состояния, создающая условия достижения нового закритического состояния, сопровождающегося накоплением больших необратимых (разрывных) деформаций, требует не менее 50 млн лет выдержанности однотипного воздействия.

С другой стороны, тектонофизическая реконструкция природного напряженного состояния для коры современных активных внутриконтинентальных орогенов показывает, что в них не наблюдается единого режима напряженного состояния [Rebetsky et al., 2012; Ребецкий и др., 2013; Ребецкий, 2015]. Здесь имеет место сложное сочетание состояний с субгоризонтальной ориентацией осей максимального сжатия в коре активно растущих горных поднятий и осей максимального девиаторного растяжения в коре впадин, увеличивающих мощность формирующихся осадочных пород. О неоднородности напряжений, приводящей к смене геодинамических типов напряженных состояний, также говорят и расчетные модели [Гончаров, 1988; Осокина, 2008].

Вероятно, на настоящем этапе исследований сложно дать единую схему правил интерпретации результатов реконструкции палеонапряжений для регионов разного современного геодинамического типа: внутриконтинентальные орогены, рифты, пассивные и активные окраины и др. В каждом конкретном случае должен применяться индивидуальный подход. Возможно, иногда следует ограничиваться представлением полученных результатов в каждом локальном объеме отдельно или выстраиванием в нем своих этапов смены напряженного состояния. При этом важно сопоставление палеонапряжений и современного напряженного состояния [Delvaux et al., 2013; Soumaya et al., 2015]. Если в современном поле напряжений мы также будем видеть неоднородность ориентации осей главных напряжений (см. рис. 6), то выделять специальные эпохи разных типов нагружения не следует.

Считаем важным и необходимым при анализе регионального напряженного состояния использовать подход Л.А. Сим по поиску напряженного состояния регионального масштаба. Если оси локальных стресс-состояний укладываются в свои конусы сжатия и растяжения, то можно считать, что локальные отклонения связаны либо с неоднородностью поля напряжений в пространстве, либо с разномасштабностью использованных для реконструкции индикаторов разрывных смещений.

Наиболее перспективным следует признать подход, применявшийся на самом раннем этапе развития методов тектонофизической реконструкции напряжений М.В. Гзовским. Необходимо, привязываясь к конкретным структурам, например к крупным складкам и другим геологическим формам, отслеживать смены их напряженного состояния в процессе их развития. При этом сегодняшние наши знания показывают взаимосвязи и дипольность напряженных состояний крупных впадин и поднятий, что также следует использовать при интерпретации палеонапряжений.

Во всяком случае можно заключить, что существующая сегодня тенденция упрощенного представления поля тектонических напряжений прошлого, подогнанная под схемы сжатия и растяжения, вытекающие из тектоники литосферных плит, не соответствует данным о неоднородностях современного поля напряжений. В силу этого обстоятельства такие построения нельзя признать достоверными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-05-01193а) и программы ОНЗ РАН № 8, а также Госзадания ИФЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Абдрахматов К.Е., Цурков В.Е. Современные движения поверхности земной коры // Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня. М., Наука, 1991, с. 75—77.

Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М., Изд-во Моск. ун-та, 1954, 245 с.

Белоусов В.В. Геотектоника. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, 328 с.

Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1954, № 3, с. 390—410.

Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. I, II. М., Изд-во АН СССР, 1959, 255 с.

Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. III, IV. М., Изд-во АН СССР, 1963, 544 с.

Гончар В.В. Разновозрастные поля напряжений Восточного Горного Крыма // Геофизический журнал, 2017, т. 39, № 1, с. 61—78.

Гончаров М.А. Механизм геосинклинального складкообразования. М., Недра, 1988, 264 с.

Гудман Р. Механика скальных пород. М., Стройиздат, 1987, 232 с.

Гусева Т.В., Лукк А.А., Трапезников Ю.А., Шевченко А.И. Геодинамика территории Гармского полигона (Таджикистан) по результатам светодальномерных наблюдений // Геотектоника, 1993, № 3, с. 47—54.

Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Докл. АН СССР. Сер. геофиз., 1975, т. 225, № 3, с. 557—560.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика, 2013, т. 54, (4), с. 469—499.

Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 20—30.

Жиров Д.В., Сим Л.А., Маринин А.В. Реконструкция палеостресс состояний в южной части Хибинского плутона (восток Фенноскандинавского щита) // Труды Всерос. науч. конф. «Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей» (Москва, 24—26 мая 2016 г.) М., МГУ, 2016, с. 39—44.

Карпинский А.П. К тектонике Европейской России // Изв. Академии наук, IV серия, 1919, т. XIII, № 12—15, с. 573—590.

Лукк А.А., Леонова В.Г., Шевченко В.И. Сейсмотектоническая характеристика северного крыла и осевой части Таджикской депрессии (Гармский геодинамический полигон) // Физика Земли, 2008, № 12, с. 24—64.

Маринин А.В. Особенности тектонического строения Северной и Псекупской ступеней (Северо-Западный Кавказ) // Бюл. МОИП. Отд. геол., 2003, № 2, с. 22—24.

Маринин А.В. Тектонофизические исследования Семисамской антиклинали (Северо-Западный Кавказ) // Геодинамика и тектонофизика, 2013, т. 4, № 4, с. 461—484.

Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М., ИФЗ, 2008, с. 191—224.

- Маринин А.В., Сим Л.А.** Новейшее напряженное состояние и деформации на западном погружении Большого Кавказа // Геотектоника, 2015, № 5, с. 62—77.
- Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю.** Строение Туапсинской сдвиговой зоны по тектонофизическим данным // Вестник МГУ. Сер. геол., 2016, № 1, с. 41—55.
- Марков Г.А.** Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л., Наука, 1977, 211 с.
- Марков Г.А.** О распространении горизонтальных тектонических напряжений в зонах поднятий земной коры // Инженерная геология, 1980, № 1, с. 20—30.
- Марков Г.А.** Закономерность распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Новые данные и практические приложения // Взаимосвязь геолого-тектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявления избыточной напряженности. Апатиты, 1985, с. 72—84.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Гилеева Н.А., Курушин Р.А.** Механизм и глубины очагов землетрясений юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Науки о Земле: современные проблемы сейсмологии. М., Вуз. книга, 2001, с. 96—112.
- Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л.** Эволюция структуры течения и рельефа коры эпиплатформенных орогенов под воздействием мелкомасштабной астеносферной конвекции // Вестник КРАУНЦ, 2016, № 1, вып. 29, с. 89—100.
- Николаев П.Н.** Методика тектонодинамического анализа. М., Недра, 1992, 294 с.
- Осокина Д.Н.** Взаимосвязь смещений по разрывам с тектоническими полями напряжений и некоторые вопросы разрушения горного массива // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., Наука, 1987, с. 120—135.
- Осокина Д.Н.** Особенности локальных полей напряжений разных уровней и нарушений второго порядка в окрестностях окончания сдвигового разрыва // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М., ИФЗ РАН, 2008, с. 69—87.
- Козырев А.А., Панин В.И., Иванов В.И., Савченко С.Н., Тимофеев В.В., Ловчиков А.В., Захаров В.В., Мальцев В.А., Белов Н.И., Павлов В.В., Калашник А.И.** Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 1996, ч. 1, 160 с.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А.** Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2006, 149 с.
- Пейве А.В., Кропоткин П.Н.** Новый подход к изучению напряжений в земной коре // Напряженное состояние земной коры. М., Наука, 1973, с. 5—11.
- Расцветаев Л.М., Корсаков С.Г., Тверитинова Т.Ю., Семенуха И.Н., Маринин А.В.** О некоторых общих особенностях структуры и тектодинамики Северо-Западного Кавказа // Материалы 2-й Международной конференции «Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии юга России и Кавказа», Новочеркасск, 1999, т. 1, с. 69—73.
- Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю.** Позднеальпийские дизъюнктивные системы и геодинамика Западного Кавказа // Физика Земли, 2010, № 5, с. 31—40.
- Ребецкий Ю.Л.** Восстановление величин главных напряжений в земной коре по полю их траекторий // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1991, № 5, с. 24—25.
- Ребецкий Ю.Л.** Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин: Автореф. дис.... д.ф.-м.н. М., ОИФЗ, 2003, 45 с.
- Ребецкий Ю.Л.** Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика, 2008, т. 11, № 1, с. 66—73.
- Ребецкий Ю.Л.** Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, вып. 4, с. 437—466.
- Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С.** Тектоническое поле современных напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, вып. 1, с. 257—290.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А.** Первые оценки величин напряжений по геологическим данным // Международная конференция, посвященная памяти В.Е. Хаина «Современное состояние наук о Земле» (1—4 февраля 2011 г., Москва). М., 2011, с. 1553—1559.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.** Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (2), с. 271—291.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В.** Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (3), с. 496—520.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.** От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М., ГЕОС, 2017а, 234 с.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибины, Ловозеро, Ковдор) // Геология рудных месторождений, 2017б, т. 59, № 4, с. 263—280.

Ружич В.В. О сочетании напряжений растяжения и сжатия в Байкальском рифте // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М., Наука, 1978, с. 27—32.

Ружич В.В., Хилько С.А. Некоторые вопросы новейшей и современной геодинамики Прихубсугулья // Труды Международной конференции по результатам работы советско-монгольской комплексной Хубсугульской экспедиции. Иркутск, 1985, с. 20—21.

Ружич В.В., Шерман С.И., Тарасевич С.И. Новые данные о надвигах в юго-западной части Байкальской рифтовой зоны // Докл. АН СССР, 1972, т. 205, № 4, с. 920—923.

Саньков В.А., Парфеев А.В., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Геотектоника, 2011, № 5, с. 52—70.

Сим Л.А. Неотектонические напряжения Восточно-Европейской платформы и структур обрамления: Автореф. дис.... д.г.-м.н. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, 41 с.

Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. М., Мир, 1985, 727 с.

Тихомиров А.В., Смирнов А.Л., Пильгук И.Д., Бакулина М.П. Мониторинг деформационных процессов на территории Алматинского прогностического полигона // Геология геофизика, 2001, т. 42 (10), с. 1659—1666.

Трифонов В.Г., Иванова Т.П., Бачманов Д.М. Эволюция центральной части Альпийско-Гималайского пояса в позднем кайнозое // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 289—304.

Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М., Наука, 1990, 190 с.

Anderson E.M. The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh Geol. Sec (8). 1951, v. 8, p. 387—402.

Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets // Geophys. Res., 1984, v. 89 № B7, p. 5835—5848.

Bergerat F., Angelier J., Andreasson Per-G. Evolution of paleostress fields and brittle deformation of the Tornquist Zone in Scania (Sweden) during Permo-Mesozoic and Cenozoic times // Tectonophysics, 2007, v. 444, p. 93—110.

Brady B., Bzown E. Rock mechanics for underground mining. Third ed. Kluwer Academic Publishers, 2004, 688 p.

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

Delvaux D., Moeys R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., Sankov V. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part 2. Cenozoic rifting // Tectonophysics, 1997, v. 282, p. 1—38.

Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai-Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // Tectonophysics, 2013, v. 602, p. 194—222.

Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence // J. Geophys. Res., 1984, v. 89, № B11, p. 9305—9320.

Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision // Science, 1975, v. 189, p. 419—426.

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the Central Asia // Tectonophysics, 2012, v. 581, p. 114—131.

Saintot A., Angelier J. Tectonic paleostress fields and structural evolution of the NW-Caucasus fold-and-thrust belt from Late Cretaceous to Quaternary // Tectonophysics, v. 357, 2002, p. 1—31.

Soumaya A., Ben Ayed N., Delvaux D., Ghanmi M. Spatial variation of present-day stress field and tectonic regime in Tunisia and surroundings from formal inversion of focal mechanisms: Geodynamic implications for central Mediterranean // AGU, Tectonics, 2015, p. 1154—1180, doi: 10.1002/2015TC003895.

Voight B., St Pierre B.H.P. Stress history and rock stress // Third Congr. Int. Soc. Rock Mechanics. Denver. Proc., 1974, v. 2, p. 580—582.

Zobak M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project // J. Geophys. Res., 1992, v. 97, № B8, p. 11703—11728.