



Ребецкий Юрий Леонидович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией тектонофизики им. М.В. Гзовского, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Автор метода каткластического анализа разрывных смещений и компьютерных программ для реконструкции напряжений по геологическим и сейсмологическим индикаторам разрывных деформаций. Совместно с сейсмологами из Новосибирска, Сахалина и Бишкека получил данные о современных природных напряжениях коры основных сейсмоактивных регионов Евразии.



Сим Лидия Андреевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории тектонофизики им. М.В. Гзовского, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Автор структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений на основе анализа оперяющих разрывов в зонах сдвигов и метода нахождения общих полей напряжений по данным о локальных стресс-состояниях. Комплексом методов восстановила неотектонические напряжения платформ Северной Евразии, складчатых сооружений Урала, Кавказа, Тянь-Шаня и Сахалина.



Маринин Антон Витальевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики им. М.В. Гзовского, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Специалист по региональной геологии Большого Кавказа, разрывной тектонике и полевым тектонофизическим методам. Выполнил реконструкции тектонических палеонапряжений в пределах горно-складчатых сооружений Кавказа, Северного Тянь-Шаня, Горного Алтая, а также на Балтийском щите. Установил закономерности различия характеристик напряженно-деформированного состояния горных пород вдоль складчатого сооружения Северо-Западного Кавказа.

**Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим,
А.В. Маринин**

ОТ ЗЕРКАЛ СКОЛЬЖЕНИЯ К ТЕКТОНИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЯМ. МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМЫ



**Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим, А.В. Маринин
ОТ ЗЕРКАЛ СКОЛЬЖЕНИЯ К ТЕКТОНИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЯМ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю.Шмидта
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ТЕКТониКИ И ГЕОДИНАМИКИ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим, А.В. Маринин

**ОТ ЗЕРКАЛ СКОЛЬЖЕНИЯ
К ТЕКТОНИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЯМ.
МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМЫ**

Ответственный редактор
академик РАН *Ю.Г. Леонов*

МОСКВА
ГЕОС
2017

УДК 551.2.3

ББК 26.324

Р 68

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы / Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим, А.В. Маринин; отв. редактор Ю.Г. Леонов; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. – Москва: Издательство ГЕОС, 2017 – 234 с.
ISBN 978-5-89118-740-5

В монографии представлены тектонофизические методы реконструкции природных напряжений по данным о геологических индикаторах тектонических деформаций. Эти методы развивались в бывшем СССР и в России после работ М.В. Гзовского. Дается обзор большого числа методов, использующих не только данные о полюсах трещин, но также и данные о зеркалах скольжений трещин сдвига. Особое внимание уделено четырем методам реконструкции напряжений: О.И. Гущенко, Л.М. Расцветаева, Ю.Л. Ребецкого и Л.А. Сим. Детально обсуждаются способы документации трещин в геологических обнажениях, приводится программный алгоритм метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого с описанием входных и выходных файлов. Приведены примеры реконструкции напряжений в ряде регионов.

Книга рассчитана на геологов, специалистов в структурной геологии, геотектоники и геодинамики.

Рецензенты:

Член-корреспондент РАН *В.А. Петров*
Д.физ.-мат.н. *Л.М. Богомолов*

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 17-15-00017.

Издание РФФИ не подлежит продаже

© Коллектив авторов, 2017
© ГЕОС, 2017

Рецензии

Уважаемый читатель ! Вашему вниманию предлагается научный труд «От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы». Это методическое руководство по реконструкции природных напряжений по важнейшим геологическим индикаторам – зеркалам скольжения на плоскостях разрывов. Руководство включило в себя детальное рассмотрение теоретических основ четырех тектонофизических методов, которые нашли широкое применение в практике геологических исследований: кинематический метод О.И. Гущенко, структурно-парагенетический метод Л.М. Расцветаева, структурно-морфологический метод Л.А. Сим и метод катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого. Методическое руководство открывают материалы, посвященные разрывным нарушениям как сложным геологическим телам, которые несут в себе индикаторы тектонических напряжений. В этой связи рассмотрены все элементы строения разрывных нарушений и их основные параметры, а также геологические индикаторы сдвига, растяжения и сжатия. Далее приводится обзор методов измерений и способов систематизации результатов в базах полевых данных с учетом специфики полевого изучения геологических индикаторов напряжений. Большое внимание уделено анализу результатов полевых исследований с помощью принятых в структурной геологии графических построений, включая стереографическую (равноугольную) и равно-великую (равноплощадную) проекции, а также при использовании статистических круговых диаграмм. Этот раздел очень хорошо дополняют практические рекомендации по обработке данных полевого изучения элементов строения разрывных нарушений на стереографических сетках (палетках) Г.В. Вульфа (экваториальная), А.К. Болдырева (полярная) и В. Шмидта (равноплощадная экваториальная). Рекомендации сопровождаются рядом примеров представления геологических данных и результатов реконструкции тектонических напряжений на различных картах, схемах и диаграммах. Отдельное внимание уделено методам реконструкции тектонических напряжений и катакластических деформаций по системам сколовых трещин. Все перечисленные вводные материалы необходимы для более полного понимания четырех выше названных тектонофизических методов реконструкции природных напряжений. Для каждого метода приведены базовые положения, детально прописаны практические приемы, способы интерпретации результатов и примеры использования. Методы рассмотрены в отдельных главах, что позволяет не только сравнить их возможности, но и применить выбранный метод или сочетание методов в зависимости от конкретной геологической обстановки и/или решаемой задачи. Завершается руководство примерами результатов реконструкции тектонических напряжений при изучении складчатых и разрывных деформаций, тектонических напряжений в зонах разрывов, а также при прогнозе условий разработки месторождений углеводородов и оценке устойчивости гражданских сооружений. Руководство сопровождается списком литературы, который содержит практически все основные публикации по данной проблематике. В целом руководство по своей структуре и содержанию может использоваться в повседневной практике геологоразведочных работ и научных изысканий, а также в учебно-образовательном процессе. Надеюсь, что на всех этапах изучения разрывных структур и природного напряженного состояния это методическое руководство станет незыблемым спутником для геологов и специалистов из смежных областей наук о Земле – геофизиков, горняков, геомехаников.

Член-корреспондент РАН В.А. Петров

Уважаемый читатель ! Перед Вами научное издание «От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям: методики и алгоритмы», в котором содержится обоснование четырех наиболее эффективных тектонофизических методов определения параметров напряженного состояния земной коры и подробное руководство по применению этих методов в практике геолога - геофизических исследований. Все описанные методы: кинематический метод О.И. Гущенко, метод катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого, структурно-геоморфологический метод Л.А. Сим и структурно-парагенетический метод Л.М. Расцветаева позволяют получить количественную информацию об усредненных напряжениях в массивах горных пород при наличии достаточного объема исходных полевых данных высокого качества. Красной нитью проходит через всю книгу идея авторов, что параметры напряженного состояния на натурном для геологии и тектонофизики масштабе (десяtkи километров, или, по терминологии авторов, мегамасштабе) оцениваются по совокупности данных об индикаторах: зеркалах скольжения, поверхностях трещин, имеющих меньшие размеры (единицы- десятки сантиметров). При реконструкции тектонических напряжений предложенными методами фактически решается обратная задача, постановка которой имеет интересную и нетривиальную особенность. В обычных случаях для решения обратных задач геофизики (например, уточнение структурных моделей земной коры) наиболее информативны исходные данные о распределении геофизических полей по всему объему, а отдельные элементы (индикаторы) или локальные зоны лишь способствуют регуляризации задачи. Для реконструкции поля напряжений эффективными оказываются именно локальные элементы, о чем убедительно свидетельствует данное издание. А «объемные» данные отражают прежде всего упругую составляющую поля деформаций, на фоне которой проявляются структурообразующие напряжения и деформации. Авторы научного труда – ведущие ученые в области тектонофизики и современной геодинамики, благодаря работам которых были развиты два из четырех описываемых методов определения параметров напряженного состояния земной коры. Обобщение их оригинальных работ вошло в обзорные разделы книги, и таким образом читателю предоставлена возможность «из первых уст» ознакомиться с состоянием проблемы реконструкции тектонических напряжений и псевдопластических деформаций по данным о трещинах скола и зеркалах скольжения блоков. Общенаучная значимость книги определяется уже тем, что земная кора и литосфера доступны для исследования только в исторически сложившемся напряженно- деформированном состоянии (как есть). Тектонические напряжения действуют постоянно, в отличие от большинства технических систем, они не могут быть приложены или сняты. Развитие методов реконструкции и анализа тектонических напряжений способствует пониманию взаимосвязи и взаимообусловленности вещественного состава, геологической структуры и напряженного состояния земной коры. По новой терминологии, это создание когнитивных (распознаваемых) моделей. Приведенные в книге фотографии геологических объектов также исключительно полезны для подобной «узнаваемости» реальной среды в комплексе с описанием сложных алгоритмов. Научное издание адресовано прежде всего специалистам в области наук о Земле, которые занимаются съемкой структурно-геологических или геоморфологических данных или проводят обработку и интерпретацию данных о разрывных структурах и подвижках на контактах блоков. В этой связи выделяется глава, посвященная методу катакластического анализа разрывных смещений, в которой наряду с алгоритмом дано описание авторской программы Ю.Л. Ребецкого *STRESSgeol* с примерами входных и выходных файлов и рабочих окон при расчетах напряжений. Книга представляет интерес для широкого круга научных работников и аспирантов по специальностям наук о Земле в силу ее научно-методической значимости и практических приложений, важные примеры которых представлены в заключительной главе.

Д.физ.-мат.н.

Л.М. Богомолов

Предисловие

Изучение закономерностей пространственного распределения и изменения во времени тектонических напряжений является одной из важнейших задач в целом ряде дисциплин наук о Земле. В геодинамике к таким задачам относят объяснение механизма формирования тектонических структур различного масштаба уровня; в сейсмологии – изучение формирования очаговой области на стадии, предшествовавшей землетрясению, и развития процесса постсейсмической релаксации на афтершоковой стадии; в полевой геологии – установления взаимосвязи условий формирования складчатых, разрывных и других деформационных структур с залежами полезных ископаемых.

Сформулированные выше задачи смежных дисциплин наук о Земле объединяются в рамках одной науки – тектонофизики. При ее создании М.В. Гзовским [1954] впервые было дано понятие «тектонических напряжений» как напряжений, ответственных за формирование локальных и региональных деформационных структур земной коры и литосферы. В этом определении ключевыми факторами, требующими добавления к понятию “напряжения” слова тектонические, являются масштаб объектов исследования (десятки метров – десятки километров) и сам объект исследования – горные породы.

В качестве более общего определения термина “тектонические напряжения” следует принять напряжения, ответственные за деформации достаточно больших масс горных пород, которые возникают вследствие действия внутренних распределенных гравитационных сил или температурных деформаций, а также как результат взаимодействия с соседними структурными элементами, т.е. в результате внешнего нагружения вдоль границы исследуемого объекта. В этом случае напряжения, действующие на микроскопическом (структуры, наблюдаемые в оптический или электронный микроскоп: кристаллы, зерна и агрегаты) и макрокопическом (структуры, наблюдаемые невооруженным глазом в отдельных кусках горных пород) уровнях, нельзя считать чисто тектоническими, поскольку на этих масштабных уровнях вклад в напряженное состояние процессов, связанных с физико-химическими изменениями вещества, может быть более существен. Используемая выше градация масштабных уровней взята из работы Л. Оберта [1976], который подчеркивал, что механика разрушений металлов и других технических материалов имеет дело с субмикроскопическим, микроскопическим и макрокопическим масштабами. В противоположность этому задача исследования тектонических напряжений в массивах горных пород отвечает мегаскопическому масштабу осреднения (структуры с линейным размером от десятков и сотен метров до десятков и сотен километров).

Актуальность и практическая потребность в изучении напряженного состояния земной коры определяется также возрастающей необходимостью создания в тектонически сложных и сейсмически опасных районах все более крупных промышленных, горнодобывающих и социальных объектов.

Катастрофы прошлых лет на целом ряде энергообъектов (Припятская АС, Саяно-Шушенская ГЭС) связываются, в том числе, с тектоническими условиями района их размещения. В настоящее время уже не вызывают вопросов представления о техногенной сейсмичности районов заполнения крупных водохранилищ и добычи углеводородов, где активно используется водное замещение углеводо-

родов в пластах. Катастрофическое Веньчуаньское землетрясение накануне китайской олимпиады 2008 г (провинция Сыньчуань) показало всю опасность неучета этих факторов. В силу указанных обстоятельств вновь становятся актуальными взгляды одного из основателей проблемы оценки сейсмической опасности Г.А. Гамбурцева, который отдавал приоритет методам детерминированной оценки сейсмической опасности на основе изучения физики явления и структуры природных объектов. Он считал, что эти методы должны опираться на результаты исследований фундаментальных наук о природных напряжениях, оцениваемых для горных массивов в их естественном состоянии. Представляемый нами проект развивает именно это фундаментальное направление.

Для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации подземных горных выработок и крупных открытых карьеров необходимо изучение не только тектоники районов их создания, но и установление геодинамических особенностей этих территорий, проявляющихся в характере напряженного состояния верхних слоев земной коры. Горным инженерам при расчетах по обеспечению безопасности карьеров, горных выработок и др. сооружений необходимо знать начальное тектоническое напряженное состояние [Турчанинов и др., 1978].

Следует принимать во внимание, что результаты тектонофизического районирования тектонической опасности районов расположения промышленных, горнодобывающих, энергетических и социальных объектов в ближайшие годы могут найти свое приложение в сфере страхования.

Тектонические напряжения, наряду с тектоникой, магматизмом и метаморфизмом играют важную роль в процессах рудообразования, поэтому создание геодинамических моделей минерализации необходимо для определения мест локализации как рудных, так и нерудных полезных ископаемых. Динамика изменчивости геодинамических условий при формировании магматических массивов во времени дает возможность прогноза в массивах ультрабазитов с первично равномерно рассеянным повышенным кларковым содержанием благородных металлов условий перераспределения и мест концентрации золота и платины. Тектонофизический прогноз участков с повышенной проницаемостью дает возможность для обоснованной постановки разведочных и поисковых скважин на месторождениях углеводородов, а также для прогноза перспективных площадей с локализацией гидротермальных и гидротермально-метасоматических рудных тел.

В тектонофизике [Ребецкий, 2002, 2007] и структурной геологии [Кирмасов, 2011; Родыгин, 1996] созданы методы экспериментального изучения (реконструкции) параметров тектонических напряжений и приращений сеймотектонических деформаций, использующие для анализа данные о сколовых разрывах и трещинах (данные о механизмах очагов землетрясений). В подобных методах активные разрывы и трещины следует рассматривать как своеобразные динамометры, тензодатчики напряжений и деформографы, которые обычно используются при осуществлении лабораторных экспериментов по деформированию образцов горных пород. Таким образом, методы реконструкции тектонических напряжений мегаскопического масштаба определенным образом эквивалентны тем инструментам исследования напряжений и деформаций, которые имеет экспериментатор при лабораторном моделировании, но для объекта несоизмеримо меньшего масштаба.

В представляемом методическом руководстве читателю предлагают изучить способы применения четырех тектонофизических методов: 1) кинематический

метод О.И. Гущенко; 2) метод анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого; 3) структурно-геоморфологический метод Л.А. Сим; 4) структурно-парагенетический метод Л.М. Расцветаева. Если первые два метода имеют ряд схожих положений, близкие алгоритмы и ориентированы на одинаковый тип исходных данных, то два других метода (Л.А. Сим, Л.М. Расцветаева) используют иной тип исходных данных и могут применяться в тех случаях, когда методы О.И. Гущенко и Ю.Л. Ребецкого не дают возможности определить параметры напряженного состояния.

Методическое руководство написано в стиле монографии, т.е. содержит не только практические примеры определения напряжений по совокупности разрывных смещений, но и теоретические положения методов, а также обзор большего числа других методов, которые также применяются при изучении природных напряжений. Важным элементом руководства является описание способов получения исходных данных о параметрах разрывных смещений, а также детальное описание всех этапов ручной обработки и алгоритма программ (метод Ю.Л. Ребецкого).

Цель руководства – дать возможность исследователям применять в полевых работах широкий спектр методов, ориентируясь при этом в их возможностях и особенностях алгоритма.

В память о Юрии Георгиевиче Леонове

Когда монография уже была подготовлена и находилась в редакции ГЕОС на последней стадии сдачи в типографию, нас настигло трагическое известие о смерти ответственного редактора академика Ю.Г. Леонова. Мы не могли просто в виде скорбной рамочки обозначить это событие. Ниже в краткой форме мы постарались сказать, что значил Ю.Г. Леонов для нас, как старший товарищ и учитель.



Юрий Георгиевич Леонов

Ю.Г. Леонов был ответственным редактором целой серии монографий и трудов конференций, которые были выпущены лабораторией тектонофизики ИФЗ РАН за последние двадцать лет. И это было не случайно, т.к. он всегда живо интересовался нашими самыми свежими идеями и разработками, поддерживал их, давая важные комментарии в возникавших обсуждениях. Такой его интерес не был случаен, ведь в его длинном научном пути были и годы (с 1964 по 1970 гг), когда он работал в ИФЗ РАН под руководством М.В. Гзовского. В своей книге – эссе «Камень – ножницы – бумага» он тепло вспоминает эти годы, определяя их как важный университет, который в дальнейшем оказал влияние и на круг его научных интересов.

Вот как в двух предложениях Ю.Г. Леонов описал научные приоритеты лаборатории тектонофизики под руководством М.В. Гзовского «Интересы и стиль работы МВ и его сотрудников, включая автора данных строк (Ю.Г. Леонов), определялись в первую очередь стремлением проникнуть в суть изучаемого явления».

Следует сказать, что период работы в лаборатории тектонофизики Ю.Г. Леонов руководил работой тектонофизических полевых экспедициях на Памире, который давно его манил. В этот период времени им был накоплен большой багаж данных и знаний о геологии орогенов, который, конечно, он пытался осмысливать с позиции возможного механизма их формирования (в 1979 году вышла его монография). Следует сказать о чрезвычайно важной роли Таджикского тектонофизического отряда для лаборатории. Эти работы финансировались Гидропроект, были очень ответственны и позволяли наметить ряд новых интересных научных проблем для теоретической части лаборатории (из воспоминаний Д.Н. Осокиной).

То, что Ю.Г. Леонов уже в зрелом научном возрасте, поработав во ВНИИ природного газа до и короткое время в ГИН РАН после окончания аспирантуры МГУ в 1963 г, пришел в лабораторию М.В. Гзовского, объясняется его интересом с молодых лет к математике и вообще к точным наукам. Учась в аспирантуре, он посещал лекции по математике и некоторым разделам физики вечернего отделения Физфака МГУ. Ю.Г. Леонов и в дальнейшей своей научной работе подчеркивал важность тектонофизики для геологии (Напряжения в литосфере и внутриплитная тектоника // Геотектоника. 1995. № 6; О некоторых особенностях геологии на современном этапе // История наук о Земле. Вып. 3. М.: Ин-т истории естествознания и техники. 2009).

Особые человеческие качества Ю.Г. Леонова, проявлявшиеся во внимательном отношении к новым, пускай еще «сырым» идеям, помогали нам открывать тайны природы, которые она рассыпала в геологических структурах. Мы всегда будем помнить этого *замечательного человека и выдающегося ученого нашей страны.*

Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим, А.В. Маринин

ГЛАВА 1. Разрывы и геологические индикаторы тектонических напряжений (классификация)

1.1. Разрывы

Разрывы (англ.: *fault*; синонимы: разрывные смещения, разрывные нарушения, разрывные дислокации, дизъюнктивы) в геологической среде являются следствием нарушения её сплошности, проявляющемся в процессе деформирования при достижении критического напряженного состояния. В геологическом словаре [Геологический..., 2012] дается следующее определение разрыва – в структурной геологии – вид дизъюнктивных дислокаций – поверхность разрушения массива горных пород, фиксируемая по видимому смещению слоев и других перересекаемых ими образований, либо при отсутствии маркеров смещения, по тектоническому контакту горных пород разного состава и возраста. Нарушение сплошности могут быть отрывного типа, когда в момент образования разрыва нарушается непрерывность смещений, нормальных к нему. В этом случае в сам момент образования отрыва берега разрыва отходят друг от друга, образуя полость. Другим видом нарушения сплошности являются разрывы сдвигового типа. Здесь термин сдвиг употребляется в том значении, как он принят в механике (мех.), т.е. когда нарушается непрерывность смещений, параллельных разрыву.

Мелкие разрывные смещения называют тектоническими трещинами. У трещин достаточно четко видны борта, узкое пространство между которыми может быть заполнено новообразованными минералами, а может фрагментарно сохранять пустотность. Для «невооруженного» взгляда вещество бортов трещин не отличается от более удаленных от нее участков породы. Выделяемые в полевых условиях трещины могут иметь протяженность от первых миллиметров до десятков и сотен метров. Для трещин протяженностью десятки сантиметров и даже в несколько метров, как правило, хорошо видны ее концы (кончик трещины – мех.). Вблизи концов трещин возможно появления мелких трещин сдвига и отрыва. Более крупные разрывные смещения могут быть определены как разломы или разрывные (разломные) зоны. Они отличаются от трещин тем, что в них стирается четкая граница между разрывной зоной и ненарушенным бортом. *Внутреннее тело разрыва* [Ребецкий, 2009] – область повышенной трещиноватости, объемного механического разрушения, глубокого структурно-вещественного преобразования (различные виды тектонитов) [Чиков, 1985], заключенная внутри блоков малоизмененного вещества. Разлом разделяет участки земной коры на блоки относительно стабильного ненарушенного состояния [Садовский, Писаренко, 1991]. Для разлома практически невозможно четко указать его окончание. Эта область, как правило, характеризуется постепенным понижением уровня преобразования вещества в теле разлома, которое в конце концов становится невозможным отделить от фоновых деформаций.

Существует также понятие *зона разлома*, которое прикладывают к группе близко расположенных, взаимноподсекающих друг друга, но имеющих в целом близкое простирание отдельных сегментов разлома. При близком расположении сегментов разлома понятие *тело разлома* совпадает с зоной разлома. Для крупного разлома отдельные его сегменты могут «разбегаться» друг от друга так, что во внутренней зоне разлома будут появляться практически не-

нарушенные участки, такие же, как в его обрамлении. В этом случае тело разлома и зона разлома различаются.

В работах [Борняков, 1981, 1988; Шерман др., 1983; Лобацкая, 1983, 1985, 1987] было введено понятие «зона динамического влияния разлома». Авторы этого понятия считают, что к этой зоне относятся участки, в которых в той или иной мере проявляется влияние разлома. Этот термин не является чисто геологическим в отличие от терминов «тело разлома» и «зона разлома». Включение в термин слова «динамического» определяет то, что речь идет о влиянии на напряженное состояние. Таким образом, зона влияния может быть существенно больше, чем зона и тем более тело разлома. Какие-либо разрывы и трещины, не попадающие в зону разлома, но достаточно близко к ней расположенные, будут попадать в зону динамического влияния этого разлома.

Описываемые тектонические трещины и разломы занимают макро- (сантиметры – первые метры) и мегаскопические (десятки метров – сотни километров) масштабы. Но трещины также можно увидеть и на мезо- (доли миллиметров) и микроуровнях (микронны). В кристаллах и зернах существуют дислокации, создающие смещения сдвигового типа. Из теории пластичности известно, что пять разноориентированных дислокаций способны реализовать любой тип пластических деформаций.

Имеющиеся геологические, геофизические и сейсмологические данные [Кочарян, 2014], а также теоретические представления, опирающиеся на геомеханический эксперимент, позволяют предположить, что каждый из рассмотренных трех типов сдвиговых нарушений сплошности (дислокация, трещина, разлом) имеет свой характерный способ реализации смещения [Ребецкий, Лермонтова, 2015]. Таким образом, на определенных диапазонах масштабных уровней имеет место триада: дислокации, трещины, разломы. При этом на границах перехода от одного типа разрыва сплошности к другому возможно наложение (одновременное сосуществование) двух смежных типов разрывов.

1.1.1. Элементы разрыва

При изучении разрывов рассматривают следующие элементы: 1) крылья (или борта) разрыва; 2) сместитель; 3) зона разрыва; 4) область динамического влияния разрыва (рис. 1.1).

Крылья разрыва (англ.: *fault wall*, синонимы: борта, бока, берега, фланги) представляют собой относительно не нарушенные (на рассматриваемом уровне изучения) блоки горных пород. Крыло разрыва, расположенное над поверхностью сместителя, называют *висячим крылом* разрыва, а расположенное под поверхностью сместителя называют *лежащим крылом* разрыва (рис. 1.2). В случае, если наклон поверхности сместителя близок к вертикальному или нет возможности определить этот наклон, удобнее придавать крыльям разрыва названия по их географическому положению. Например, северное и южное крылья разрыва (рис. 1.3). Если при работе на геологическом обнажении, находясь напротив плоскости разрыва, исследователь видит её падение в свою сторону, то рассматриваемое крыло именуется лежащим, а при падении от исследователя – висячим, т.е. крыло разрыва «висит» над наблюдателем.

Сместитель (англ.: *fault surface*) представляет собой поверхность, по которой происходит относительное перемещение крыльев разрыва в процессе деформации разрушения. В большинстве случаев сместитель можно представить в виде воображаемой плоскости, называемой **плоскостью сместителя** или **плоскостью разрыва** (*fault plane*), относительно которой крылья разрыва испытывают относительные перемещения. Вблизи и на самой плоскости сместителя эти движения оставляют разнообразие следы или кинематические признаки перемещений.

Реальная зона разрывного нарушения имеет более сложное строение и представляет собой геологическое тело, которое не во всех случаях может быть представлено в виде плоскости. Часто встречаются изогнутые и волнообразные поверхности сместителя. При полевом изучении сложная форма разрывных нарушений документируются либо в виде серии отдельных описаний его участков (которые могут быть описаны как плоскости), либо непосредственным картированием с фиксацией изменений параметров сместителя в пространстве. На поверхностях смещения часто наблюдаются зеркала скольжения, образующиеся в результате механического взаимодействия путем истирания и растворения противоположных крыльев разрыва. В других случаях эти поверхности могут быть представлены полностью дезинтегрированной породой (тектонитом), в которой сложно выделить основную поверхность смещения.

Зона разрыва (*fault zone*) представляет собой область, в которой проявлены связанные с основным разрывом трещины, оперяющие разрывные нарушения и продукты разрушения (тектонические брекчии, глинки трения, милониты и т.п.). При полевом изучении важно оценить зону разрыва, где проявлены изменения и сопутствующие нарушения в массиве горных пород, связанные с деформациями разрушения этого дизъюнктива (рис. 1.4). Внутри этой зоны иногда может выделяться главный (*master fault*) или магистральный разрыв [Геологический..., 2012].

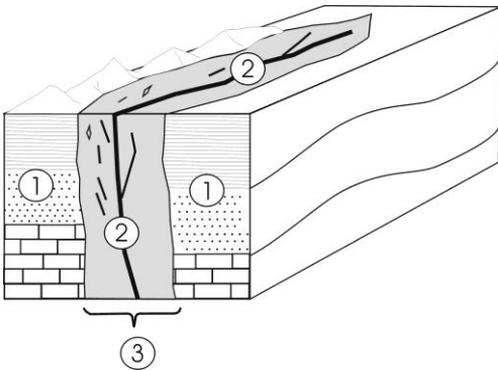


Рис. 1.1. Основные элементы разрыва: 1 – крылья (борта) разрыва, 2 – сместитель, 3 – зона разрыва

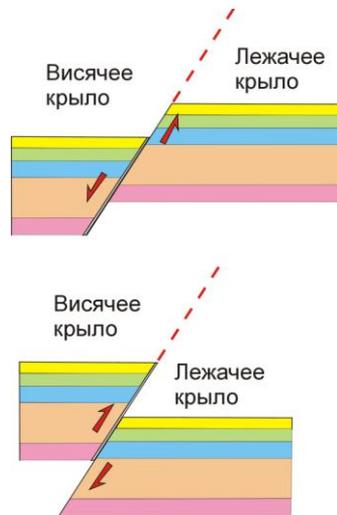


Рис. 1.2. Название крыльев разлома по их положению относительно сместителя. Висячее крыло расположено над плоскостью сместителя, а лежачее крыло под плоскостью сместителя

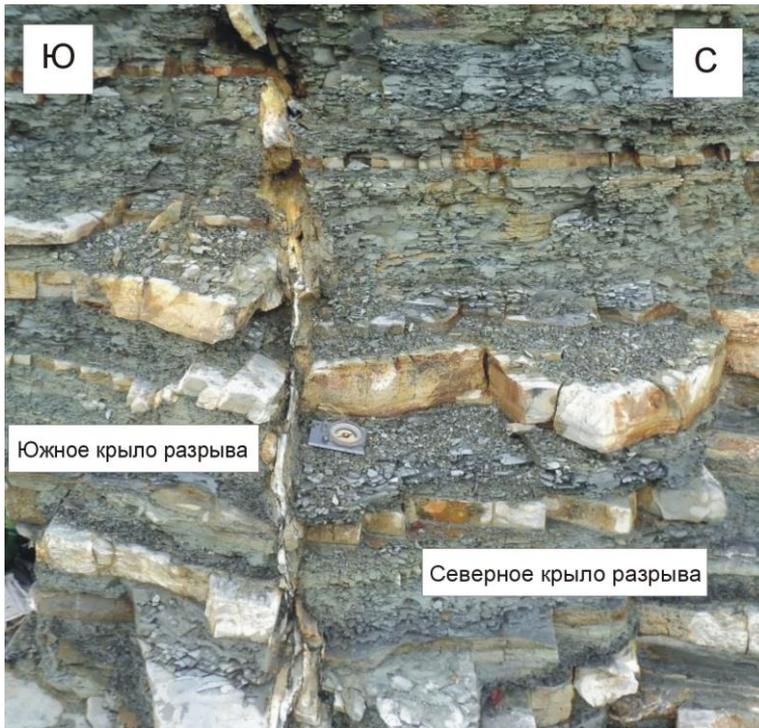


Рис. 1.3. Название крыльев разрыва с субвертикальной плоскостью сместителя в кампанских отложениях Северо-Западного Кавказа по их географическому положению (северное и южное крылья)

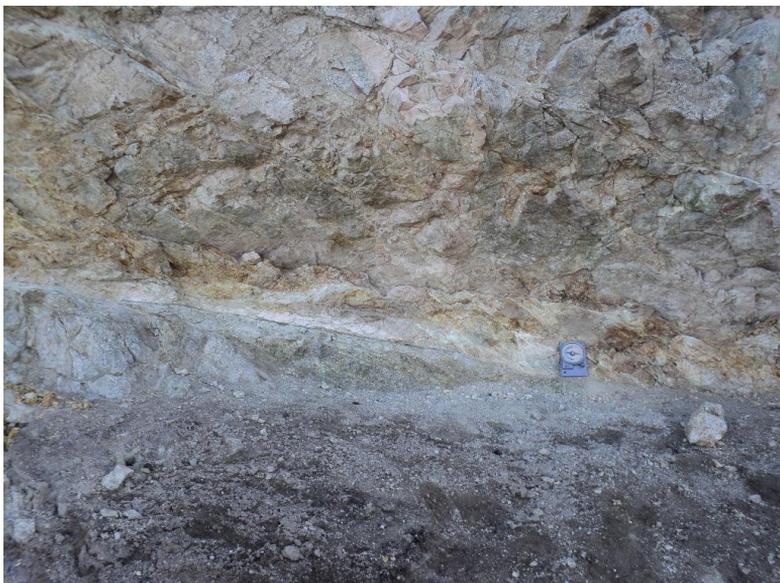


Рис. 1.4. Фото зоны разрыва в палеозойских породах (Северный Тянь-Шань). Виден выход плоскости сместителя (ниже компаса) и область дезинтеграции пород крыльев в зоне разрыва

Область динамического влияния разлома (*fault impact zone*, [Шерман и др., 1983; Лобацкая, 1983; Борняков, 1988]) представляет пространство с проявлением следов деформаций, вызванных формированием разрыва и подвижками по нему. В этой области региональное поле напряжений испытывает значительные вариации, связанные с существованием разрыва. В строении области динамического влияния разлома выделяется приразломная часть, в которой проявлены остаточные деформации и окружающая её зона с измененным напряженным состоянием. Под областью динамического влияния разлома по Р.М. Лобацкой [1983] принято понимать область, связанную с формированием разлома и движением по нему, в пределах которой горные породы подвергаются механическим, химическим и структурным изменениям (т.е. фактически близки к зоне разрыва). Согласно геологическому словарю [Геологический..., 2012] применение к термину область динамического влияния разлома синонима зона разлома (разрыва) не совсем корректно.

На основании экспериментальных данных были оценены области динамического влияния разломов для различных кинематических типов разломов при разной тектонической активности территорий, а также мощности и вязкости земной коры [Шерман и др., 1983]. В наиболее общем виде соотношение между длиной (L) и шириной (m) зоны разлома может быть выражено как $m = 0.22 L^{0.95}$ (км) [Шерман, 1977]. При моделировании сдвиговых зон были установлены соотношения между мощностью модели (глубиной) и шириной зоны дробления [Борняков, 1981].

1.1.2. Основные параметры разрыва

Разрывное нарушение может быть охарактеризовано следующими основными параметрами: формой, элементами залегания (азимут падения и простирания, угол падения), направлением относительного перемещения крыльев разрыва (угол подвижки и кинематический тип), амплитудой относительного перемещения (амплитуда по смещению или компонента горизонтального/вертикального смещения), мощностью зоны сместителя и зоны разрыва, текстурными и минеральными особенностями и т.д.

Элементы залегания плоскости сместителя разрыва позволяют зафиксировать азимут простирания/азимут падения плоскости сместителя и угол падения плоскости сместителя (рис. 1.5).

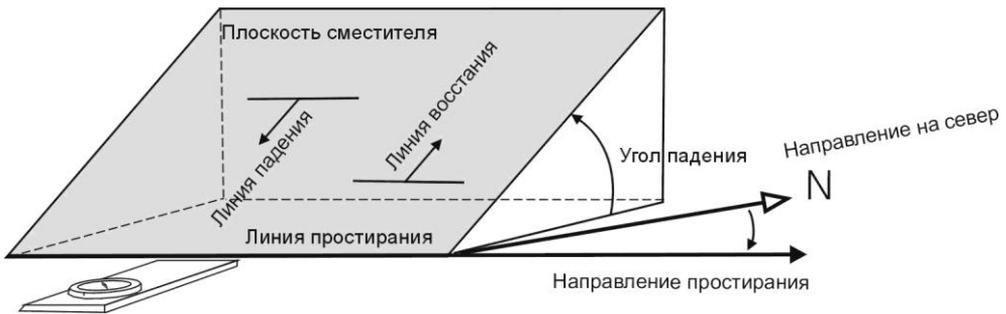


Рис. 1.5. Элементы залегания плоскости сместителя разрыва. В верхней части блок-диаграмма с положением линий падения, простирания, восстания и углом падения. В нижней части показано соотношение между направлением на север и линией простирания

Линия простирания (*strike line*) представляет собой линию пересечения плоскости сместителя с горизонтальной плоскостью. Правило определения **направления простирания** состоит в том, что наблюдатель, смотрящий вдоль линии простирания, видит висячее крыло разрыва справа (по правую руку). Соответственно, направление наибольшего уклона, называемое направлением падения, у наблюдателя также расположено справа.

Измеряемый по часовой стрелке угол от направления на север до направления простирания называется **азимутом простирания** (*strike azimuth*). Угол (также измеряемый по часовой стрелке) от направления на север до направления падения называется **азимутом падения** (*dip azimuth*). Значения азимута простирания и азимута падения изменяются в пределах от 0 до 359°. Угол между азимутом простирания и азимутом падения составляет 90°. Обычное сокращение при полевых записях: аз. пр. и аз. пад.

При полевых исследованиях часто удобнее производить измерения азимута падения плоскости сместителя, что обусловлено конструктивными особенностями горного компаса (в случае, если встроенный уровень предназначен для измерения азимута падения). Для проведения замера компас ориентируют по падению плоскости (направляя северным лимбом в направлении наибольшего уклона), устанавливают компас по уровню в горизонтальное положение и по северной (окрашенной обычно в синий цвет) стрелке снимают показания азимута падения плоскости.

При измерении азимута простирания плоскости разрыва компас ориентируют северным лимбом в направлении простирания таким образом, чтобы висячий блок и направление наибольшего уклона плоскости находилось справа (по правую руку) от направления простирания, затем устанавливают компас по уровню в горизонтальное положение и по северной стрелке компаса снимают показания азимута простирания плоскости. Азимут простирания и азимут падения плоскости связаны простым соотношением (аз. пад. – 90° = аз. пр., при азимуте падения от 90 до 360°; аз. пад. + 360° – 90° = аз. пр., при азимуте падения от 0 до 89°). Таким образом, при внесении полевых замеров в базу данных эти параметры могут быть легко подсчитаны автоматически в ячейках программы Excel.

Угол падения (*dip angle*) плоскости сместителя разрыва (рис. 1.5) представляет угол между горизонтальной плоскостью и плоскостью сместителя. Значение угла падения изменяется от 0 до 90°. При полевых измерениях для однозначного определения направления падения и линейных элементов в плоскости вертикального разрыва можно придать углу падения значение 89°, искусственно сделав одно из вертикальных крыльев лежащим. Для измерения угла падения используется эклиметр горного компаса или электронный наклонномер. При использовании эклиметра компас прикладывают длинной стороной (около нулевого значения на шкале эклиметра) и нажимают кнопку, блокирующую стрелку эклиметра. Важно помнить, что угол падения плоскости сместителя должен быть наибольшим углом, который возможно измерить между данной плоскостью и горизонталью.

При освоении методики измерений рекомендуется использовать маркер для нанесения на исследуемую плоскость направления простирания и падения. В таком случае угол падения легко измеряется при приложении эклиметра к линии падения, которая является перпендикуляром к линии простирания (направленным, соответственно, по падению сместителя).

Кинематический тип разрыва и угол подвижки. Кинематический тип разрыва определяется по относительному перемещению его бортов. На поверхности плоскости сместителя мы часто можем наблюдать знаки (свидетельства) относительных перемещений бортов разрыва, представленные различными штриховками, бороздами, зеркалами скольжения, структурами минерального нарастания и т.д. Положение линейных элементов в плоскости сместителя однозначно фиксируется при векторном представлении относительного перемещения всячего блока (рис. 1.6).

Вектор перемещения указывает на направление перемещения всячего блока относительно лежащего блока. Данный вектор определяется углом между азимутом простираения плоскости сместителя (измеренного по правилу правой руки) и линией перемещения бортов разрыва (измеренного в плоскости сместителя), а также направлением относительного перемещения всячего блока (по падению или по восстанию в плоскости сместителя). Таким образом, **угол подвижки (угол скольжения)** представляет собой угол наклона следов относительных перемещений (штриховок, борозд и т.д.) в плоскости сместителя, измеряемый в этой плоскости между вектором перемещения всячего блока разрыва и азимутом простираения разрыва. При использовании термина «угол скольжения» важно помнить о нескольких возможных его значениях в геологической литературе.

В отличие от угла подвижки иногда удобно использовать **угол наклона вектора перемещения**, который измеряется также в плоскости сместителя, но отсчитывается от линии простираения к линии перемещения (штриховки) в сторону линии восстания и изменяется от 0 до 90 градусов (рис. 1.7). Необходимо помнить, что в этом случае информация о направлении перемещения всячего блока в значении угла не фиксируется. Для однозначного определения этого направления следует обозначить кинематический тип разрывного нарушения.

Выделяются следующие основные кинематические типы разрывных нарушений связанные со сдвигом в механическом смысле слова: сдвиг по простираению или просто сдвиг (в структурной геологии), сдвиг по падению или восста-

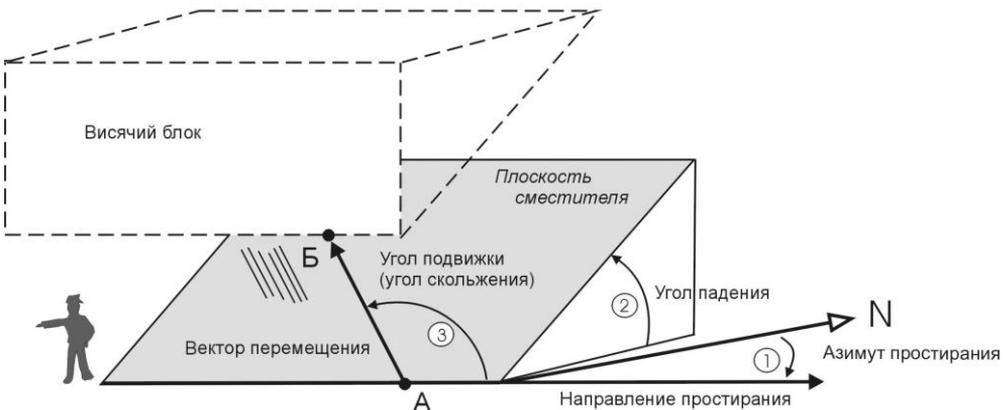


Рис. 1.6. Вектор перемещения, указывающий на относительное перемещение всячего блока (из точки А в точку Б).

Цифрами показаны три основных компонента для фиксации элементов залегания плоскости сместителя разрыва и характера подвижки по разрыву (1 – азимут простираения, 2 – угол падения, 3 – угол подвижки)

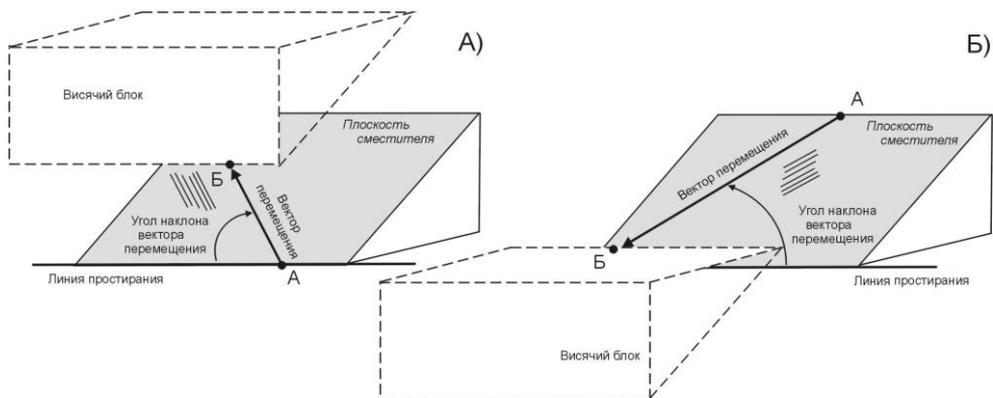


Рис. 1.7. Угол наклона вектора перемещения (в плоскости сместителя):

А – измеренный по часовой стрелке от линии простирания до штриховки, Б – измеренный против часовой стрелки от линии простирания до штриховки

нию (взброс, сброс и взрез). С деформациями отрыва связано формирование разрывов раздвигового типа. С деформациями сплющивания связаны разрывы содвигового типа. Основные кинематические типы разрывов дополняются различными сочетаниями основных типов. При смешанных кинематических типах разрывов принято преобладающий тип перемещения указывать в конце (например: правый взбросо-сдвиг – преобладает правосдвиговая компонента смещения). М.В. Гзовский предлагал различать морфологическую (кинематическую) и генетическую (геолого-генетическую) классификацию разрывов, в последней характеризуется механизм (способ) формирования разрывов [Гзовский, 1971]. Ниже рассмотрим наиболее распространенную характеристику основных кинематических типов разрывных нарушений, используемую в структурной геологии при полевых исследованиях.

Сдвиг (strike-slip fault) – левый сдвиг (*sinistral strike-slip fault*) – правый сдвиг (*dextral strike-slip fault*). Смещение бортов разрыва преимущественно по простиранию, при угле наклона вектора перемещения в плоскости сместителя от 0 до 45 градусов называется сдвигом (в геологическом смысле слова). При этом угол падения самой плоскости сместителя может изменяться в любых пределах от 0 до 90 градусов. По относительному перемещению блока относительно сместителя выделяются правые и левые сдвиги (рис. 1.8). Синонимом являются правосторонние и левосторонние сдвиги, а также уже почти не употребляемые правобоковые и левобоковые смещения. При правом сдвиге к наблюдателю, смотрящему вдоль простирания сдвига, приближено правое относительно разрыва крыло или же наблюдатель видит, что находящееся за плоскостью сместителя крыло смещено направо (рис. 1.9). При левом сдвиге к наблюдателю приближено левое относительно разрыва крыло или же наблюдатель видит, что находящееся за плоскостью сместителя крыло смещено в левую сторону (рис. 1.10).

Необходимо отметить ситуацию для горно-складчатых районов, в которых возможно опрокинутое залегание элементов складчатой структуры (крыльев складок). При опрокидывании крыла складки доскладчатые левосдвиговые нарушения (сформированные при нормальном залегании отложений) будут диагностироваться как правосторонние смещения и наоборот.

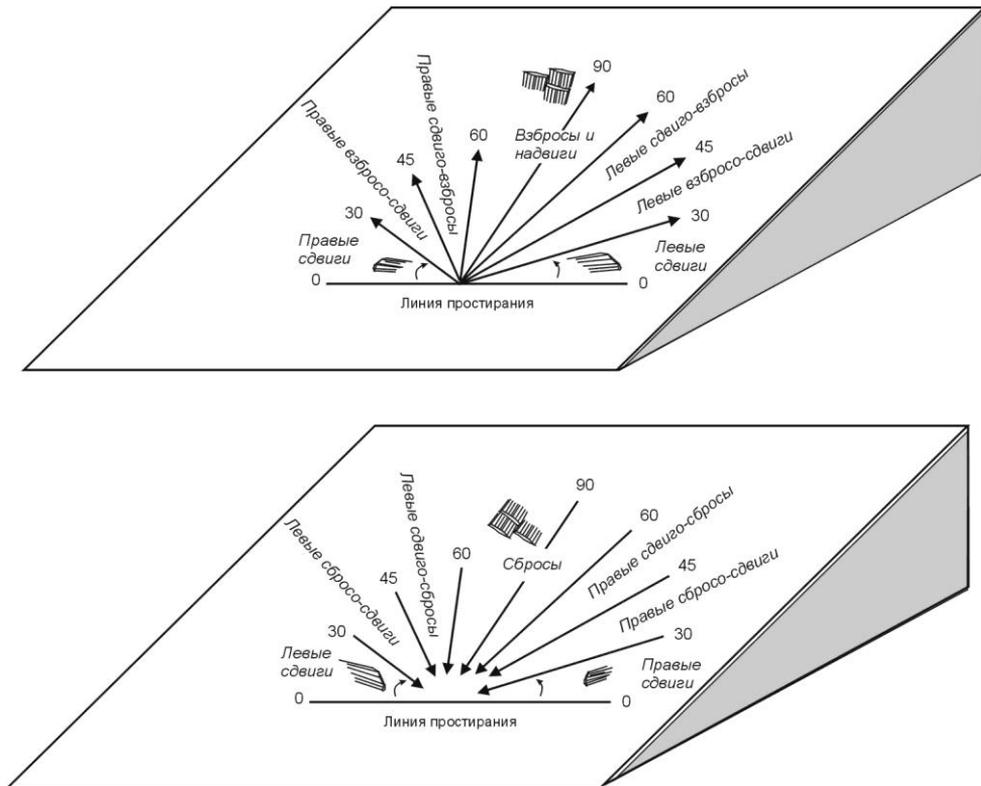


Рис. 1.8 Соотношение кинематических типов разрывных нарушений в зависимости от значения угла между линией простирания и направлением смещения висячего блока измеренного в плоскости сместителя (угол наклона вектора перемещения). Черными стрелками показано направление относительного перемещения висячего блока. Значение угла наклона вектора перемещения показано цифрами около этих стрелок

В случае значительной компоненты смещения бортов сдвига по или против падения (угол наклона вектора перемещения в плоскости сместителя от 30 до 45 градусов) говорят о взбросо- или сбросо-сдвигах. Например, левый взбросо-сдвиг или правый сбросо-сдвиг (рис. 1.8). При пологих углах наклона сместителя сдвиговое перемещение по простиранию по своей морфологии становится похожим на надвиговые и покровные нарушения. В этом случае важно оценивать направление перемещения висячего блока, которое говорит о преобладающей ориентировке движения масс горных пород.

Взброс (reverse fault) – надвиг (trust), шарьяж, покров (nappe). Смещение бортов разрыва преимущественно по падению, при котором висячий блок поднят (смещен вверх) относительно лежащего называется взбросом. При этом угол наклона вектора перемещения в плоскости сместителя составляет от 46 до 90 градусов. Плоскость сместителя падает в сторону противоположную направлению смещения висячего блока (рис. 1.11). При наклоне плоскости сместителя положе 30 градусов взбросы обычно именуется надвигами, а более пологие (3-5 градусов) разрывные структуры образуют покровы (шарьяжи). Условное разделение разрывных нарушений (с преимущественным смещением по- или

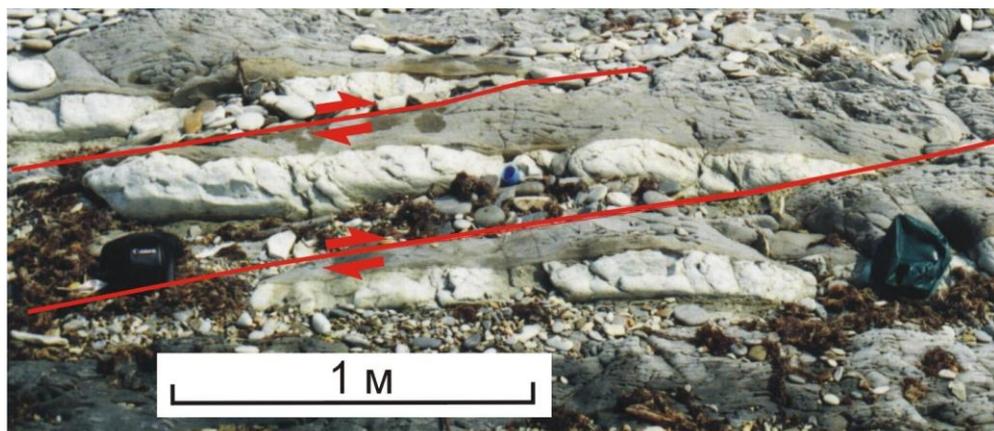


Рис. 1.9. Серия правых сдвигов в верхнемеловом карбонатно-терригенном чередовании (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.10. Левый сдвиг в долине р. Убинка (Северо-Западный Кавказ). Амплитуда перемещения по разрыву (5 м) фиксируется по смещению стратиграфической границы между светло-зелеными и темно-серыми глинами

против падения) в зависимости от угла наклона плоскости сместителя показано на рис. 1.14. Сдвиговую компоненту во взбросовом нарушении удобно оценивать по углу наклона вектора перемещения, измеряемого в плоскости сместителя. При угле наклона вектора перемещения в плоскости сместителя от 46 до 60 градусов говорят



Рис. 1.11. Взброс в толще маастрихтских отложений (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.12. Сброс в толще карбонатно-терригенного переслаивания маастрихта в приосевой части Семисамской антиклинали (Северо-Западный Кавказ)

о правых или левых сдвиго-взбросах, в зависимости от наличия право- или левосдвиговой компоненты относительных перемещений (рис. 1.8).

Сброс (*normal fault*). Смещение бортов разрыва преимущественно по падению, при котором висячий блок опущен (смещен вниз) относительно лежащего именуется сбросом. При этом угол наклона вектора перемещения в плоскости сместителя составляет от 46 до 90 градусов. Плоскость сместителя падает в сторону направления смещения висячего блока (рис. 1.12). При угле наклона вектора перемещения в плоскости сместителя от 46 до 60 градусов говорят о правых или левых сдвиго-сбросах, в зависимости от наличия право- или левосдвиговой компоненты относительных перемещений (рис. 1.8).

Взрез (*ledge fault; subvertical dip-slip fault*). Термин «взрез» был предложен в 1971 г. В.В. Белоусовым для обозначения субвертикальных разрывов. Взрезы представляют крайний случай при смещении бортов разрыва преимущественно по падению, угле наклона вектора перемещения в плоскости сместителя от 46 до 90 градусов и угле наклона самой плоскости сместителя равному 90 градусам (рис. 1.15, №13). В этом случае сделать формальное определение взбросового или сбросового перемещения не представляется возможным и можно говорить об относительно поднятом или опущенном блоке, указывая его географическое положение (например: поднят северо-восточный блок). Подобная ситуация может быть и при неровном сместителе разрыва с крутым падением - взбросовое смещение при небольшом изменении угла становится сбросовым нарушением (рис. 1.13). В ряде классификаций к взрезам относят крутые сбросовые и взбросовые нарушения с наклоном сместителя круче 80° (рис. 1.14.). При полевой документации при четко определенном угле наклона сместителя разрыв следует классифицировать как взбросовое или сбросовое нарушение.

Раздвиг (*extensional fault*) – отрыв (*tensional gash*). Смещение (или скорее отдаление) бортов разрыва от плоскости разрушения с образованием приоткрытого или заполняемого синхронными с образованием разрыва осадками или ми-

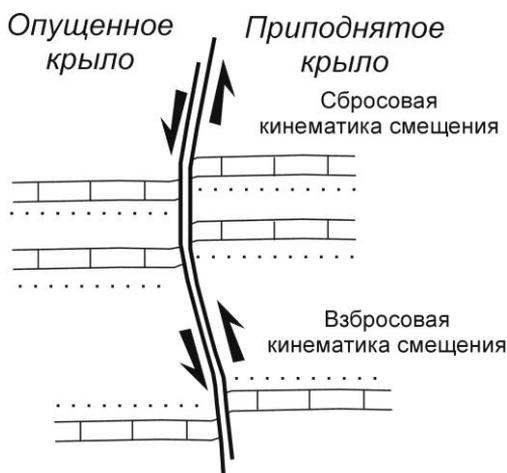


Рис. 1.13. Изменение кинематики разрывного нарушения с неровной поверхностью сместителя и крутым залеганием

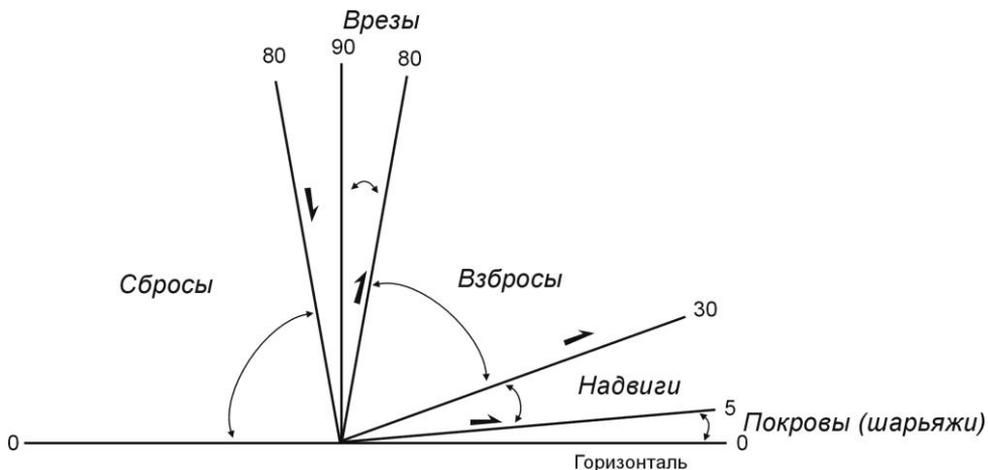


Рис. 1.14. Наиболее распространенная схема разделения разрывных нарушений (с преимущественным перемещением по или против падения) по значению угла падения плоскости сместителя

неральным выполнением называется раздвигом. Этот тип смещения выделен сравнительно недавно [Белоусов, 1954; Гзовский, 1954] и связывался с простым-раздвиганием крыльев трещины. Вектор перемещения направлен по нормали от плоскости сместителя (рис. 1.15, пункт 15). Небольшие раздвиговые структуры, изучаемые в масштабе геологического обнажения, называются отрывами. Приоткрытая часть отрыва называется зиянием, а минеральное выполнение на бортах разрывного именуется щетками отрыва (рис. 1.16). В случае присутствия сдвиговой (в механическом смысле слова) компоненты по раздвигам и отрывам наблюдаются различные сочетания с рассмотренными выше кинематическими типами разрывных нарушений (транстензионные структуры).

В геологическом словаре дается следующее определение: **раздвиг** – общий термин для образующихся и развивающихся при участии растяжения разрывов или трещин, крылья которых удаляются в противоположные стороны, образуя полость. При этом раздвиги могут быть представлены как отрывами, возникающими в результате растяжения, так и сколами, формирующимися благодаря действию касательных напряжений при дополнительном растяжении [Геологический..., 2012].

Ось минимального сжимающего напряжения (девиаторного растяжения) бывает ориентирована как поперек стенок раздвига (отрывной характер), так и несколько косо (сколовый характер). Считается, что зияющие раздвиги, как правило, современные и имеют сейсмогенное или оползневое происхождение. Раздвиговыми структурами глобального масштаба можно считать крупные рифтовые системы.

Cодвиг (compressional fault; closure; converging sides fault). Термин «содвиг» был предложен в 1973 г. Л.М. Расцветаевым [1973; 1991] для обозначения кинематического типа дизъюнктивных структур, возникающих на стыках сближающихся масс горных пород. В геологическом словаре [Геологический..., 2012] содвиг определяется как разрыв, противолежащие крылья которого смещаются навстречу друг другу, в противоположность раздвигу. К числу содвигов относятся [Расцветаев, 1985; 1997; 2002]: *трещины сплющивания; стилолитовые швы; плоскости*

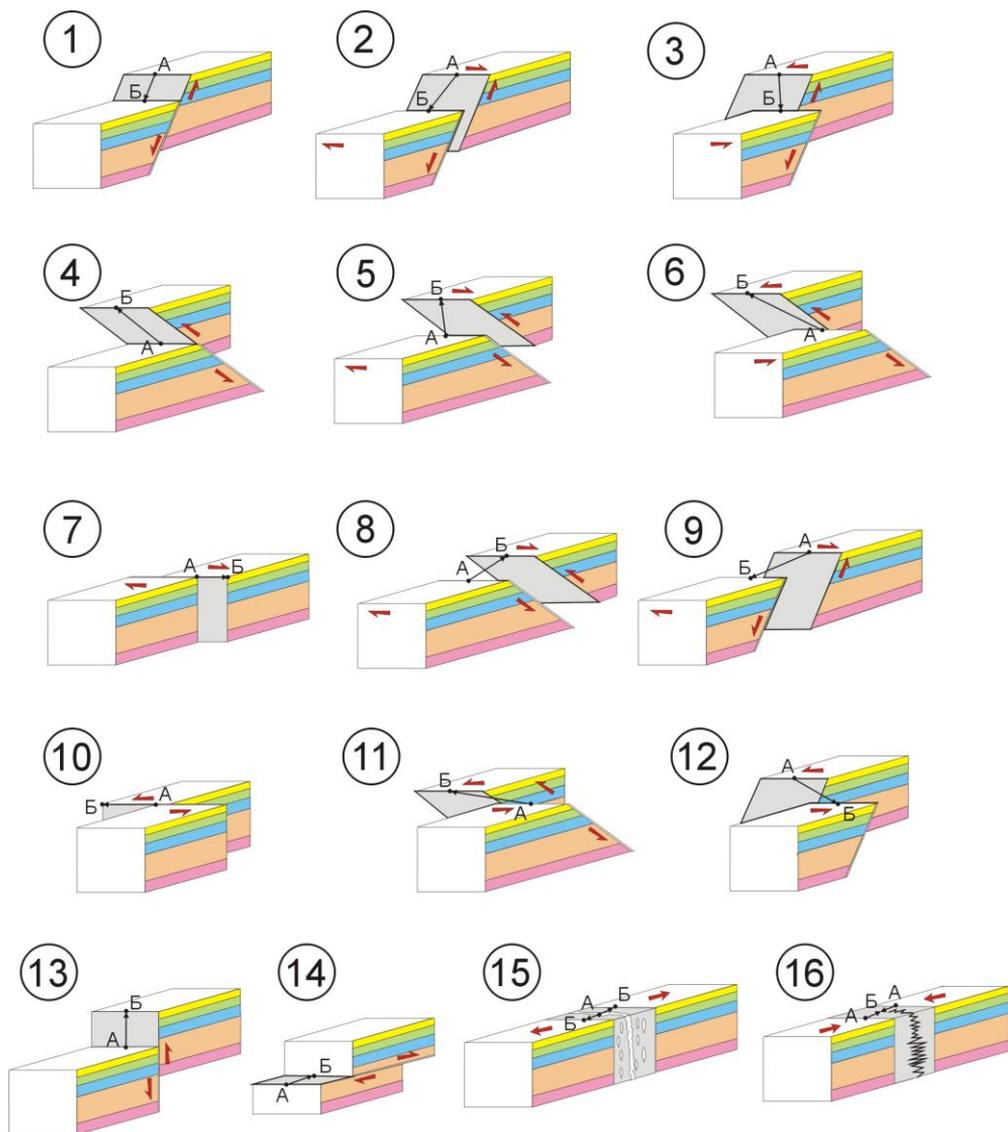


Рис. 1.15. Кинематические типы разрывов: 1 – сброс, 2 – правый сдвиг – сброс, 3 – левый сдвиг – сброс, 4 – взброс, 5 – правый сдвиг – взброс, 6 – левый сдвиг – взброс, 7 – правый (правосторонний) сдвиг, 8 – правый взбросо-сдвиг, 9 – правый сбросо-сдвиг, 10 – левый (левосторонний) сдвиг, 11 – левый взбросо-сдвиг, 12 – левый сбросо-сдвиг; 13 – взрез; 14 – покров; 15 – раздвиг; 16 – сдвиг.

На рисунках черными стрелками показано относительное перемещение висячего блока (дальнего от наблюдателя блока в случае сдвига или взреза). Точка А черной стрелки показывает первоначальное положение на сместителе разрыва, а точка Б – положение на висячем крыле после формирования нарушения. Красными стрелками показано относительное перемещение крыльев разрыва

расланцевания и кливажа; дизъюнктивы сжатия; кливажные разрывы; придвижки; структуры тектонического сшивания; некоторые типы сурт и зон смятия.

Сдвиги ориентированы поперек оси максимальных сжимающих напряжений, а векторы перемещения его крыльев направлены по нормали к плоскости (или зоне) сместителя навстречу друг другу (рис. 1.15, пункт 16). Формирование сдвига, как правило, сопровождается дезинтеграцией, деформацией и расплющиванием горных пород, выносом вещества из сдвиговой зоны, а нередко также и весьма существенной текстурной, структурно-минералогической и иной перестройкой литосферы. Деформации, преобладающие в крупных сдвиговых зонах, в механическом отношении происходят по принципу деформации чистого сдвига, когда укорочение вдоль оси сжатия компенсируется удлинениями в поперечных этой оси направлениях. В случае присутствия сдвиговой (в механическом смысле слова) компоненты смещения вдоль сдвиговых зон образуются дизъюнктивные системы смешанного кинематического типа (транспрессионные структуры). Обобщающая блок-диаграмма рассмотренных выше кинематических типов разрывов приведена на рис. 1.15.

Амплитуда перемещения по разрыву (англ.: *separation*; синонимы: амплитуда разрыва, амплитуда смещения). Расстояние между некогда смежными точками, разъединенными разрывами, называется **амплитудой разрыва**. По определению Геологического словаря [Геологический..., 2012] амплитудой разрыва называется величина относительного перемещения противоположных крыльев разрыва, измеренная в плоскости сместителя или в другом доступном для наблюдения сечении. Амплитуда перемещения по разрыву определима в случае нахождения маркеров, которые показывают величину относительного перемещения крыльев разрыва. Такими маркерами могут являться разнообразные геологические объекты, сформированные до времени формирования разрывного нарушения.

В осадочных слоистых толщах возможно использование характерных прослоев (по составу, цвету, мощности и т.д.), биогенные объекты. Для определения амплитуды используются магматические и кластические дайки, границы разнородных магматических образований, фациальных и стратиграфических единиц. Крыло разрыва, приподнятое гипсометрически выше относительно другого крыла, называется поднятым крылом, а расположенное ниже – опущенным. Для разрывных нарушений со взбросовой составляющей висячее крыло приподнято, а для нарушений со сбросовой составляющей висячее крыло опущено.



Рис. 1.16. Трещина отрыва в верхнемеловых (маастрихтских) отложениях Семигорской антиклинали (Северо-Западный Кавказ)

На рисунке 1.17 приведены некоторые из разновидностей измеряемой амплитуды перемещения по разрыву. При полевых наблюдениях фиксируется наиболее подробная информация из возможной по амплитуде перемещения по разрывному нарушению.

При документировании амплитуды относительного перемещения по разрыву следует проводить анализ по согласованности наблюдаемой амплитуды перемещения с направлением и характером штриховки (борозд скольжения), а также других скульптурных знаков на поверхности дизъюнктивного нарушения. Максимальная амплитуда смещений для большинства разрывных нарушений характерна для центральных (средних) их частей, а к концевым частям амплитуда уменьшается.

Полная амплитуда представляет величину смещения крыльев разрыва, измеренную в плоскости сместителя (рис. 1.17). Ввиду того, что полную амплитуду не всегда удается измерить, при полевых исследованиях фиксируют и другие возможные характеристики перемещений (вертикальная/горизонтальная амплитуда, амплитуда смещения по падению/простираанию и т.д.).

Вертикальная амплитуда (vertical separation) представляет собой величину смещения крыльев разрыва, измеренную в вертикальной плоскости (по вертикали).

Горизонтальная амплитуда (horizontal separation) представляет собой величину смещения крыльев разрыва, измеренную в горизонтальной плоскости (по горизонтали).

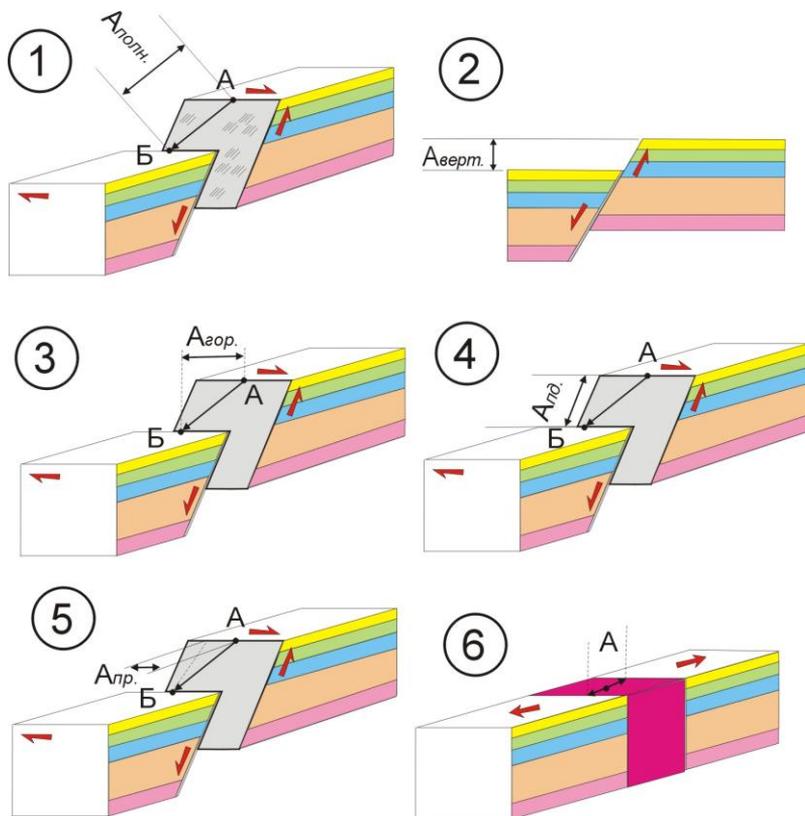


Рис. 1.17. Разновидности амплитуды перемещений по разрывным нарушениям: 1 – полная амплитуда ($A_{полн.}$), 2 – вертикальная амплитуда ($A_{верт.}$), 3 – горизонтальная амплитуда ($A_{гор.}$), 4 – амплитуда смещения по падению ($A_{нд.}$), 5 – амплитуда смещения по простираанию ($A_{пр.}$), 6 – амплитуда раздвижения (A)

Амплитуда смещения по падению (dip slip separation) представляет собой величину смещения крыльев разрыва, измеренную вдоль линии падения плоскости сместителя.

Амплитуда смещения по простиранию (strike slip separation) представляет собой величину смещения крыльев разрыва, измеренную вдоль линии простирания плоскости сместителя.

Видимая амплитуда смещения представляет собой величину смещения крыльев разрыва, измеренную в плоскости, доступной наблюдению (т.е. видимую исследователю в геологическом обнажении).

Суммарная амплитуда представляет сумму всех величин (возможно хронологически разных) смещений крыльев разрыва.

М.В. Гзовским [1971] предложена следующая классификация разрывных нарушений по их суммарной амплитуде:

- скрытоамплитудные трещины – амплитуда не поддается определению даже с помощью оптического микроскопа;
- мелкоамплитудные трещины – амплитуда измеряется и не превышает 1 мм;
- среднеамплитудные трещины - от 1 мм до 1 см;
- крупноамплитудные трещины – от 1 см до 10 см;
- мелкоамплитудные разрывные смещения – от 10 см до 10 м;
- среднеамплитудные разрывные смещения – от 10 м до 100 м;
- крупноамплитудные разрывные смещения – от 100 м до 1000 м;
- весьма крупноамплитудные разрывные смещения – более 1000 м.

Мощность зоны сместителя и зоны разрыва зависит от размера разрывного смещения, его амплитуды и кинематического типа. Кроме того, она определяется физико-механическими свойствами массива горных пород, в котором происходит деформация разрушения. Для небольших разрывов она измеряется первыми сантиметрами, а для крупных разломных зон может достигать десятков километров.

Текстурные и минеральные особенности зоны разрыва. Зона разрыва характеризуется значительными изменениями минерального состава массива горных пород, подвергшегося разрушению. Раздробленная зона является флюидопроницаемой, поэтому зона разрыва часто выполнена жилами, прожилками различного минерального состава. В данной зоне часто наблюдаются проявления стресс-метаморфизма, возникающие в результате воздействия повышенных температур и давления в области формирования дизъюнктивного нарушения.

1.2. Геологические индикаторы тектонических напряжений

Геологические индикаторы тектонических напряжений – обобщенное название всех геологических структур, прямо или косвенно указывающих на распределение действующих в момент из формирования напряжений (ориентировку осей главных напряжений, коэффициент Лодэ – Надаи и другие параметры). В литературе встречаются разные варианты этого обобщающего понятия: мезоструктуры, тектоническая трещиноватость, малые структурные формы, мезомасштабные структурные формы и др. Геологические индикаторы используются в том или ином объеме в различных методах реконструкции напряженного состояния литосферы. Как и при рассмотрении разрывных нарушений, геологиче-

ские индикаторы тектонических напряжений можно сгруппировать в три основные категории индикаторов по механизму их формирования:

1) разрывные нарушения сдвига в механическом смысле слова (разрывные нарушения с определенным в поле направлением относительного перемещения по ним: правые и левые сдвиги, сбросы, взбросы, надвиги, шарьяжи; зеркала скольжения с бороздами, штриховками и минеральными агрегатами, указывающими на вектор относительного перемещения их крыльев; сопряженные сколовые трещины);

2) разрывные нарушения, формирующиеся в обстановке растяжения/удлинения, ориентированного ортогонально к плоскости дизъюнктива (раздвиги; отрывы; минерализованные жилы; дайки магматических пород; кластические дайки);

3) разрывные нарушения, формирующиеся в обстановке сжатия/укорочения, ориентированного ортогонально к плоскости дизъюнктива (плоскости расщепления и кливажа; стилолитовые швы; содвиги).

1.2.1. Геологические индикаторы сдвига (мех.)

Зеркала скольжения (*slickenside*) образуются по сколовым тектоническим нарушениям, и представляют следы относительного перемещения крыльев разрывов (трещин) в виде борозд скольжения, уступов, минерального выполнения и примазок тектонита. Зеркала скольжения широко развиты в породах складчатых областей, концентрируясь в зонах крупных разрывных нарушений или в сложнопликативных структурах. Кроме того, при формировании зеркала скольжения часто используют ослабленные поверхности разного генезиса: трещины отдельности, поверхности напластования, прототектонические трещины (образованные при остывании интрузива) и т.д.

Первые упоминания о зеркалах скольжения встречаются уже в 18 веке при описании структур в жилах с галенитом в Дербшире (Англия). Основные элементы зеркала скольжения включают сместитель (*плоскость зеркала скольжения*), скульптуры на поверхности зеркала скольжения и зону изменений, связанного с его формированием. По характеру скульптур на поверхности зеркал скольжения выделяются неминерализованные зеркала скольжения (где мы видим лишь следы и знаки механического воздействия крыльев нарушения друг на друга) и зеркала скольжения с минерализацией, вызванной нарастанием минералов и/или флюидодинамической переработкой крыльев разрывного нарушения. Пример зеркала скольжения, сформированного в результате только механического взаимодействия его бортов, приведен на рис. 1.18. Зеркала скольжения, выполненные кальцитовой минерализацией, представлены на рис. 1.19. Размер наблюдаемых зеркал скольжения изменяется от первых сантиметров до десятков метров (рис. 1.19).

Сместитель. Поверхность сместителя зеркала скольжения часто может иметь далекий от плоскости вид, изгибаясь и меняя своё залегание. На плоскостях зеркал скольжения часто присутствуют следы двух и более следов перемещений (рис. 1.20), которые в одних случаях четко дифференцируются по своей относительной хронологии, а в других установление последовательности их образования затруднено.



Рис. 1.18. Зеркала скольжения без минерализации (Северный Тянь-Шань)



Рис. 1.19. Зеркала скольжения с минерализацией (Северо-Западный Кавказ). На рисунках показаны зеркала скольжения разного размера (слева – первые сантиметры, справа – более 5 метров)

Скульптуры («тектоглифы») на поверхности зеркал скольжения представлены:

- уступами (ступени скольжения поверхности зеркал, *slickenfibre steps*), которые в большинстве случаев перпендикулярны направлению относительных смещений;
- штриховками, бороздами или линиями скольжения (*stria*);
- мелкими выемками, ложбинками и желобками («рифли») на поверхности скольжения (*slickenside flutes*).

Наиболее сложный вопрос касается определения относительного направления перемещения крыльев зеркала скольжения. Самый простой способ определения основан на образовании уступов на зеркалах скольжения при скольжении с отрывом. Данный способ определения перемещений по зеркалам скольжения хорошо работает в умеренно дислоцированных осадочных толщах, где зеркала скольжения часто выполнены кальцитовой или кварцевой минерализацией. Он известен в структурной геологии как «правило Гофера». Крутые стороны уступов представляют собой небольшие отрывчики, смотрящие в сторону отсутствующего сместившегося блока. Обратная ситуация наблюдается в областях с высокотемпературным и высокobarными условиями образования зеркал скольжения, где при скольжении образуются уступы «вдавливания».



Рис. 1.20. Зеркало скольжения с двумя направлениями штриховки (борозд скольжения) в долине р. Сочи (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.21. Сколовые трещины в терригенных отложениях палеозоя (Северный Тянь-Шань)

В этом случае крутые стороны уступов обращены по направлению наблюдаемого блока. Противоположный характер скульптуры зеркал скольжения с минеральным выполнением требует определенного полевого опыта в её распознавании для конкретного региона исследования. В начале исследований необходимо найти и тщательно изучить зеркала скольжения с видимыми смещениями, чтобы понять характер их скульптуры и минерализации.

Зона изменений, связанная с формированием зеркала скольжения, обычно фиксируется визуальными наблюдениями структур (с учетом масштаба исследуемых объектов). Эти структуры представлены более мелкими («опеоряющими») зеркалами скольжения, отрывами, стресс-стилолитами и т.д. Основанием для отнесения этих геологических индикаторов напряжений к единому структурному парагенезу могут служить: сходное, а часто и неразрывное минеральное выполнение; закономерное в тектонофизическом плане расположение структур и другие признаки.

Сколовые трещины (трещины скалывания, *shear fractures, joints*). Сколовые трещины характеризуются гладкими ровными плоскостями, срезающими породы разной литологии. Трещины имеют выдержанную ориентировку по падению и простиранию. Эти трещины образуют два ряда (сопряженные системы), выраженные не всегда одинаково и образующие обычно с осью максимального сжимающего напряжения угол, несколько меньший 45 градусов.

Трещины отдельности (*joints*) возникают на этапе литификации и диагенеза горных пород. Трещины отдельности магматических горных пород связаны в первую очередь с уменьшением объема при их образовании из магматического расплава и дальнейшем остывании. Трещины отдельности осадочных горных пород связаны преимущественно с уплотнением осадков при диагенезе и эпигенезе.

Существующие в формирующейся породе напряжения, вызванные гравитационными, ротационными и тектоническими силами, приводят к возникновению упорядоченных систем трещиноватости (рис. 1.22). Такие системы трещин отдельности могут простираться на десятки километров с выдержанными элементами залегания. Последующие деформации часто используют эти системы.

1.2.2. Геологические индикаторы растяжения

Трещины отрыва (отрывы, раздвиги; *tension joint, tension gash*) обычно непротяженные, с раздвинутыми крыльями. Отрывы часто заполнены жилами неправильной формы, переменной мощности, иногда ветвящимися и кулисообразными. Минеральное выполнение трещин отрыва обладает неровной зернистой поверхностью и обычно лишено следов относительных перемещений (рис. 1.23 и 1.24). Трещины отрыва без минерального заполнения, образовавшиеся под воздействием сил, направленных по нормали к плоскости разрушения, имеют специфическую морфологию: поверхность трещины имеет раковистый излом, «перья отрыва» расходятся веерообразно от одной точки, знаменующей начало роста трещины (рис. 1.25).

При наличии в породах более ранних систем диагенетических трещин отдельности отрывы часто используют их. Однако нередки случаи и секущего характера отрывов.



Рис. 1.22. Трещины отдельности в пласте песчаника (скала «Парус», Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.23. Система жильно-отрывных трещин.
Ручкой показано направление девиаторного растяжения, действовавшего в момент формирования этих трещин в карбонатно-терригенных палеоценовых отложениях (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.24. Трещина отрыва в палеоценовых отложениях в районе Большого Утриша (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.25. Трещина отрыва с раковистым изломом в ордовикских песчаниках (Северный Тянь-Шань)

Взаимное расположение и пересечение отрывных трещин позволяет выделять разные генерации отрывных систем. Разные по времени формирования отрывные трещины часто отличаются по составу минерального выполнения, а также форме и размеру кристаллов. Региональную отрывную систему (или системы) трещин обычно активно используют карстовые процессы, речная и овражная сети. Зоны концентрации приоткрытых трещин отрыва служат проводниками подземных вод и газовых эманаций. С такими «приоткрытыми» зонами часто связаны месторождения углеводородов, гидротермальных руд и минеральных вод.

Дайки магматических пород (*magmatic dykes*, син.: дайки магматические) представляют пластообразные тела, ограниченные параллельными границами с вмещающими горными породами (рис. 1.26). Характерной особенностью даек являются значительное преобладание их линейных размеров по падению и простиранию над их мощностью. В общем случае дайки ориентированы ортогонально к действующему в момент их формирования девиаторному растяжению. Однако большую роль играет первоначальная неоднородность массива горных пород, существующая система трещин и разрывов разного типа. Благодаря этому, мы часто видим целые системы ветвящихся и изогнутых даек, показывающих сложный характер пространственно-временных вариаций поля напряжений.

Дайки осадочных пород (*clastic dykes*, син.: кластические дайки) представляют пластообразные тела, сформированные в результате внедрения материала (инъекционные дайки) в приоткрытые трещины или заполнения осадками (нептунические дайки) раздвиговых/отрывных структур (рис. 1.27). Кластические инъекционные дайки характерны для областей с повышенной скоростью седиментации, в которых не успевает происходить уплотнение обводненных осадков. Кластические дайки представляют собой индикаторы растяжения, а их формирование часто связано с повышенной сейсмичностью региона осадконакопления. Мощность даек изменяется от первых сантиметров до десятков метров, а их протяженность может составлять первые километры.

1.2.3. Геологические индикаторы сжатия

Стилолитовые швы представляют собой структуры растворения в условиях ориентированного давления. Оси зубьев стилолитов указывают на направление максимального стресса. В карбонатолитах (преимущественно известковых породах) наряду с послойными (горизонтальными) стилолитами, образующимися при литостатическом давлении, широкое распространение имеют **тектонические стилолиты** или **стресс-стилолиты** (рис. 1.28 и 1.29). Они являются важными “тензодатчиками” при изучении палеодинамических обстановок в слабодислоцированных и пологозалегающих толщах осадочных пород.

Стилолитовая зона состоит из тела стилолита и обрамляющих его стилолитовых швов (“сутуры”); стилолитовых зубьев и ограничивающих их стилолитовых крыльев; стилолитовых игл – линейных текстурных образований, участвующих в строении как тела стилолита, так иногда и его стенок, и образующих местами “стилолитовые обоймы” (пучки однонаправленных стилолитовых игл больших объемов) [Расцветаев, 1987а, б].



Рис. 1.26. Магматическая дайка (измененные ультрабазиты), разорванная небольшими разрывными смещениями (Северный Тянь-Шань)



Рис. 1.27. Кластическая дайка песчаника в породах карбонатно-терригенного чередования (сел. Джанхот, Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.28. Стресс-стилолиты в маастрихтских отложениях (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.29. Стресс-стилолитовые структуры в турон-коньякских отложениях юго-западного опрокинутого крыла Семигорской антиклинали (Северо-Западный Кавказ)



Рис. 1.30 Стилолитовые крылья в турон-коньякских известняках (Северо-Западный Кавказ)

При изучении стилолитовых структур необходимо отмечать угловые соотношения между простиранием стилолитовых игл и ориентировкой всей зоны в целом, отдельных стилолитовых крыльев или других плоскостных ограничений стилолитизированных блоков горных пород. Стилолитовые крылья, наклоненные к зоне стилолита под углом более 45° , внешне напоминают зеркала скольжения (рис. 1.30). Стилолитовые иглы похожи на тектоническую штриховку зеркал скольжения, а группы игл образуют уступчики, напоминающие стенки отрывов на поверхностях зеркал скольжения. Однако эти уступчики представляют собой структуры сжатия, свидетельствуя о противоположном правилу Гофера перемещению стилолитовых крыльев. Между стресс-стилолитами и другими геологическими индикаторами напряжений, как правило, просматривается закономерная связь. Стилолитовые швы обычно поперечны к трещинам отрыва и жилам, но параллельны “трещинам сжатия”.

Кливаж. В общепринятом значении кливаж представляет деформационную микроструктуру, в формировании которой существенную роль играет механизм растворения под давлением (Геологический..., 2012). По «ослабленным» кливажным зонам происходит расщепление горных пород на пластинки и линзочки, именуемые микролитами. Направление реконструируемой оси максимальных сжимающих напряжений ориентировано ортогонально к плоскостям кливажных зон.

Трещины сплющивания (*flattening joints*, [Ажгирей, 1956]) по определению геологического словаря представляют собой трещины, ориентированные нормально к образующим их тектоническим силам. Тектонические разделы между участками, по-разному удлиняющимися в результате дифференциального пластического растекания вещества горных пород под воздействием сжимающих напряжений, образуют хорошо отполированные плоскости скольжения трещин сплющивания [Геологический..., 2012].

ГЛАВА 2. Измерение и создание банка данных геологических индикаторов тектонических напряжений (обзор истории вопроса)

Полевые измерения позволяют собрать сведения о пространственной ориентировке геологических индикаторов тектонических напряжений, их относительном соотношении, минеральном выполнении, характерных амплитудах перемещений по ним, приуроченности к определенным тектоническим зонам, структурным этажам или структурно-вещественным комплексам.

2.1. Обзор способов полевой документации зеркал скольжения

Разные методы изучения и обработки данных по зеркалам скольжения исторически обусловили разные системы полевой документации зеркал скольжения.

2.1.1. Система измерений и записи в кинематическом методе

Система измерений в кинематическом методе, разработанном О.И. Гущенко, активно используется в настоящее время многими исследователями (Л.А. Сим, М.Л. Копп, Н.Ю. Васильев, А.О. Мострюков, А.А. Колесниченко и др.). Ниже приводится пример возможной записи полевых данных:

1. *Общие данные для точки замеров* (привязка точки, координаты, состав и возраст пород в обнажении, элементы залегания слоистости; обязательно определяется структурная позиция горных пород, в которых производится измерение (элементы складчатой структуры, разлома, контакты магматических тел и т.д. с фиксированием элементов залегания пород и т.д.);

2. *Элементы залегания плоскости зеркала скольжения (или другого геологического индикатора палеонапряжений)*. Замеряется азимут и угол падения плоскости сместителя (рис. 2.1), указывается, в каком крыле произведен замер (10 \angle 30 лежачее, или 10 \angle 30 висячее);

3. *Измерение угла наклона вектора перемещения к горизонту*. Замеряется ориентация вектора перемещения на плоскости сместителя. Для этого следует приложить компас длинной и ближней к эклиметру стороной к плоскости сместителя параллельно вектору перемещения (бороздам или штрихам скольжения) так, чтобы плоскость компаса была перпендикулярна плоскости сместителя. Взять отсчет угла наклона вектора к горизонту и определить отклонение «верхнего конца» линии перемещения от линии падения-восстания. Отклонение направо обозначается буквой П, налево – Л (10 \angle 30 леж Л23, 10 \angle 30 вис П23). Обращаем внимание на то, что отклонение борозды скольжения от линии восстания зеркальное в висячем и лежачем крыльях сместителя – направо П в лежачем и налево Л в висячем крыльях. Важно также, что угол наклона борозды скольжения всегда должен быть меньше угла падения самой плоскости сместителя (либо равен углу падения этой плоскости в случае перемещения по- или против падения);

4. Установление кинематического типа нарушения. Устанавливается тип («знак») перемещения. В приводимом примере это может быть либо левый сдвиг-сброс (ЛС), либо правый сдвиг-взброс (ПВ). Направление (знак) смещения устанавливается по ориентировке уступов, обрывающих борозды. Эти уступы препятствуют перемещению висячего крыла вверх и влево. При указании знака смещения приняты следующие обозначения: взброс – В, сброс – С, правый сдвиг – П, левый – Л. Слово «сдвиг» не фиксируется, чтобы не перепутать со словом «сброс». Возможны также сокращения при записи: *w* – взброс, *s* – сброс, *p* – правый сдвиг, *l* – левый сдвиг, *ws?* – смещение взбросового или сбросового характера, *pl?* – смещение сдвигового характера. В нашем случае согласно (рис. 2.1, вверх) это левый сдвиг-сброс и сокращенно 10∠30 леж Л23, СЛ. В случае рассмотрения висячего крыла этого же зеркала запись выглядела бы следующим образом: 10∠30 вис П23, СЛ. Для оценки надежности полученных данных возможно использование при записи кинематического типа зеркала скольжения дополнительного цифрового или знакового символа (например, при уверенном определении добавить знак «!»).

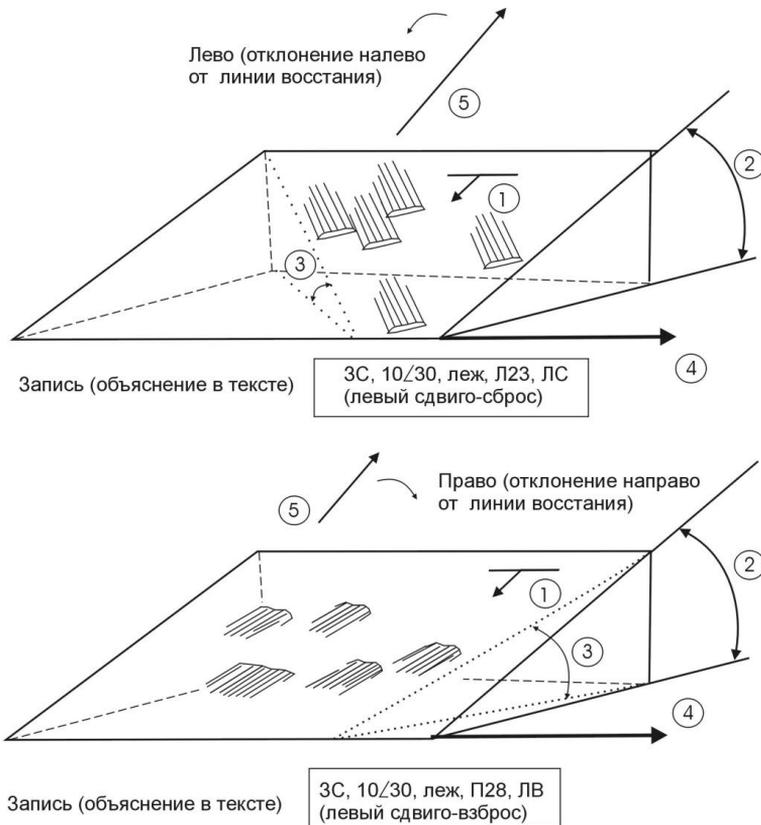


Рис. 2.1. Схема измерений в кинематическом методе.

Точками показаны линии, параллельные векторам перемещения и их проекции на горизонтальную плоскость. Условные обозначения: 1 – азимут падения, 2 – угол падения, 3 – угол падения штриховки с указанием направления отклонения от линии восстания («лево» или «право»), 4 – азимут простираения (измеренный с учетом правила «правой руки»), 5 – линия восстания

Итак, окончательный замер вектора перемещения (для рис. 2.1, верхняя часть) записывается следующим образом: $10\angle 30$ леж Л23, СЛ1. В нижней части рис. 2.1 показан вариант с бороздами скольжения, отклоняющимися направо от линии восстания, а система уступов говорит о смещении висячего крыла вверх. Для этого зеркала скольжения можно сделать следующую запись: $10\angle 30$ леж П28, ЛВ.

Примечание. Для однозначной записи в кинематическом методе при четко установленном кинематическом типе достаточно угла наклона вектора перемещения (борозды скольжения) к горизонту без указания его отклонения направо или налево от линии восстания. К примеру, при полевой документации $10\angle 30, 28, lw!$ – левосдвиго-взбросовая кинематика и угол наклона вектора перемещения к горизонту однозначно определяют относительное перемещение висячего блока. Однако такая запись допускает возможность ошибки у начинающих осваивать методику замеров исследователей при неправильном определении одной из компонент перемещений (взбросо-сбросовой или сдвиговой).

2.1.2. Система записи в структурно-парагенетическом методе

Данную систему записи используют Л.М. Расцветаев, Н.Н. Курдин, А.С. Бирман, Т.Ю. Тверитинова, А.В. Маринин и др. В структурно-парагенетическом методе [Расцветаев, 1987а, б] разработана следующая форма документации полевых данных (рис. 2.2).

Общие данные для точки замеров (привязка точки, координаты, геологическое положение, состав и возраст пород в обнажении, элементы залегания слоистости и т.д.).

Данные по зеркалам скольжения

- 1) номер замера
- 2) азимут падения плоскости сместителя (зеркала скольжения)
- 3) угол падения плоскости сместителя (зеркала скольжения)
- 4) экспозиция (прямая (+), когда измерения ведутся на лежащем крыле трещины или обратная (-), в случае проведения замеров на висячем крыле (для единообразного определения знака угла бета ($\angle\beta$); возможна также запись «лежащее» или «висячее» крыло).

5) угол бета ($\angle\beta$), отсчитываемый от линии простирания до штриховки в плоскости сместителя (рис. 2.2 и рис. 2.3). Берется наименьший угол между линией простирания и штриховкой (в направлении к линии восстания плоскости сместителя), а также отмечается направление его отсчета: "+" по часовой, "-" против часовой стрелки. Знак для внесения в базу данных сохраняется при положительной экспозиции и меняется на противоположный при отрицательной экспозиции. Определение этого угла позволяет произвести формальное разделение на сдвиги, взбросо-сдвиги и сбросо-сдвиги, сдвиго-взбросы и сдвиго-сбросы, взбросы и сбросы, что удобно для составления общих диаграмм тектонической трещиноватости в рамках метода структурно-парагенетического анализа (см. глава 8).

6) кинематический тип трещины, определяемый вектором относительных смещений по линии штриховки. Поскольку предыдущий замер фиксирует только угол между линией простирания и штриховкой (угол наклона вектора перемещения), то определение кинематического типа однозначно фиксирует направление

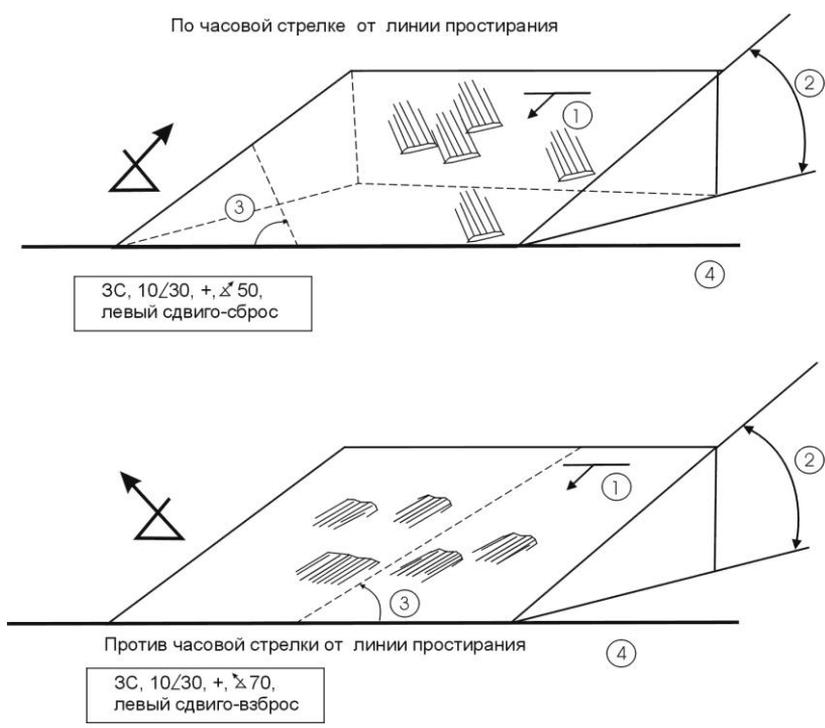


Рис. 2.2. Схема измерений в структурно-парагенетическом методе [Расцветаев, 1987а, б].

Условные обозначения: 1 – азимут падения, 2 – угол падения, 3 – угол от линии простираия до штриховки в плоскости сместителя (по или против часовой стрелке), 4 – линия простираия

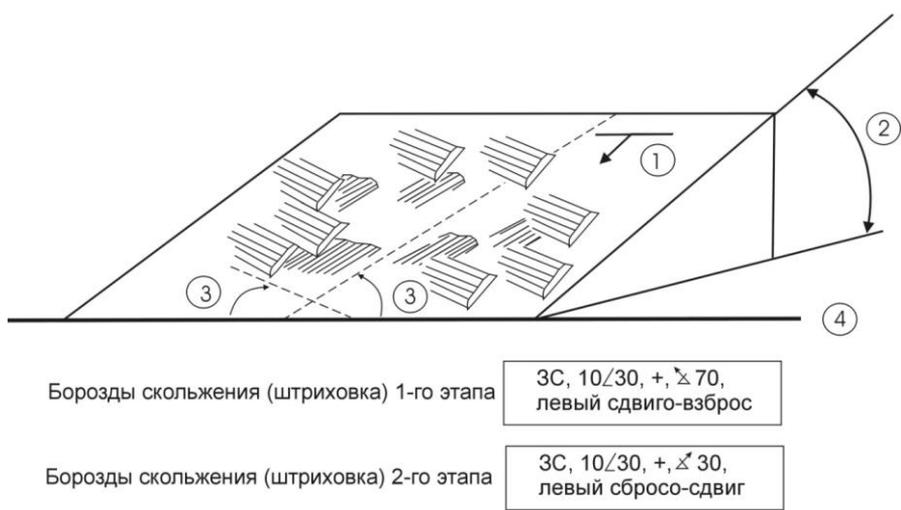


Рис. 2.3. Пример измерения на зеркале скольжения с двумя и более следами относительного скольжения бортов.

Первый и второй этап обозначен условно, отражая лишь относительную хронологическую последовательность формирования борозд скольжения. Условные обозначения на рис. 2.2

относительного перемещения. Например: левый сдвиг-сброс и левый сдвиг-взброс, показанные на рис. 2.2 в верхней и нижней части соответственно.

7) степень достоверности вектора перемещения (относительного перемещения крыльев трещины).

8) амплитуда перемещения.

9) оценка величины зеркала скольжения.

10) размер скульптурных знаков на зеркале скольжения (величина борозд скольжения и бугорков, длина уступов отрыва или вдавливания и т.д.).

11) соотношение с другими элементами тектонической структуры и геологическими индикаторами палеонапряжений (рис. 2.3).

12) минеральное выполнение (состав, форма и величина кристаллов).

2.1.3 Другие системы записи

В большинстве зарубежных работ для фиксации данных по элементам залегания плоскости зеркалам скольжения и линейных элементов, маркирующих относительные смещения бортов, используются азимут простираения плоскости нарушения (*fault strike*), угол падения плоскости (*plunge*) и угол подвижки или скольжения (*rake, slip, pitch*). Угол измеряется от направления простираения, измеренного по «правилу правой руки», до штриховки в плоскости сместителя с положительным отсчетом против часовой стрелки. Существует вариант измерения угла подвижки в направлении линии падения с фиксацией компоненты смещения сбросовой (лево-, правосдвиговой) или взбросовой (лево-, правосдвиговой) компоненты относительного смещения. Эта компонента при записи обычно обозначается первыми буквами кинематического типа зеркала скольжения: *T* – взброс, *N* – сброс, *L* – левый сдвиг, *R* – правый сдвиг и сочетание разных типов (*TR, TL, NR* и *NL*).

2.2. Полевая документация зеркал скольжения

Предлагаемая нами система записи данных по зеркалам скольжения для обработки методом катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого опирается на основные приемы записи кинематического и структурно-парагенетического методов анализа геологических индикаторов. Данная система унифицирована с международной системой записи сейсмологических данных [Аптекман и др., 1988].

2.2.1. Основные сведения при полевом изучении зеркал скольжения

Основные сведения предлагаемой системы записи фиксируются всего тремя параметрами (азимут простираения, угол падения и угол подвижки), которые уже позволяют производить расчет в программе *STRESSgeol*.

Азимут простираения (с учетом правила «правой руки»): азимут простираения и/или азимут падения плоскости сместителя (зеркала скольжения). Азимут простираения измеряется с учетом правила «правой руки». Если удобнее проводить измерение азимута падения, то он может быть легко пересчитан в азимут простираения уже после внесения в базу данных.

Угол падения: угол падения плоскости сместителя (зеркала скольжения).

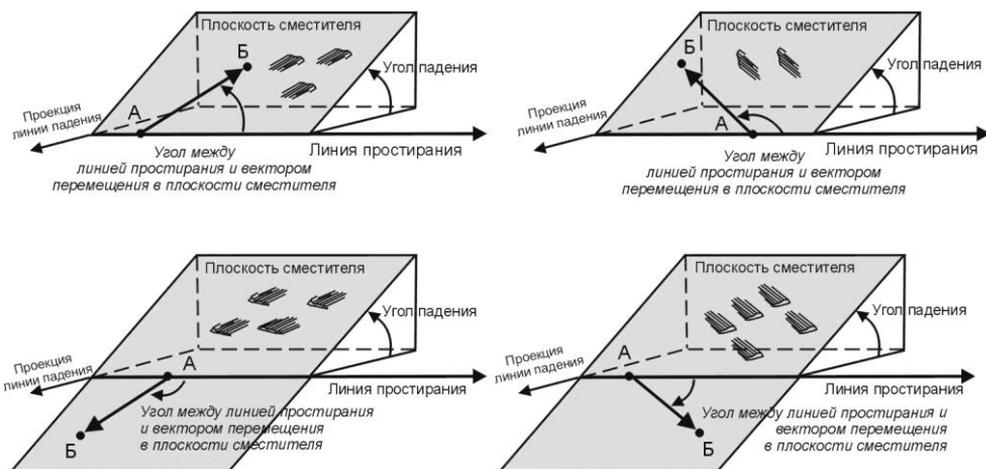


Рис. 2.4. Схема измерения угла подвижки при положительной экспозиции (замеры проводятся в лежащем крыле).

Показаны варианты измерения в плоскости сместителя с отсчетом от направления (азимута) простирания

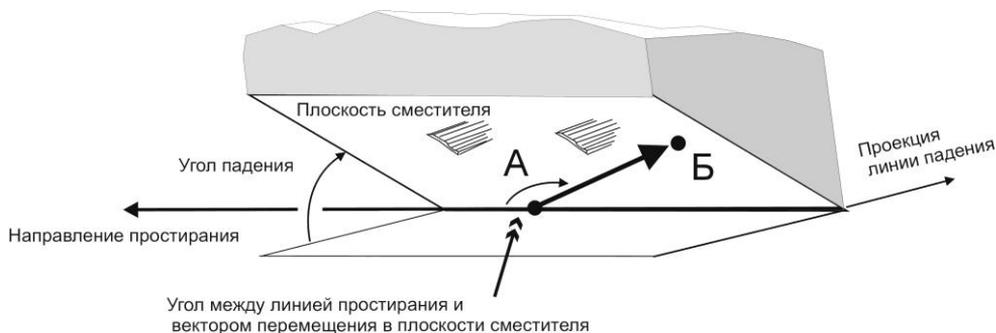


Рис. 2.5. Схема измерения угла подвижки при отрицательной экспозиции (замеры проводятся в висячем крыле).

При измерении угла подвижки (скольжения) необходимо помнить, что его направление определяется по перемещению висячего блока (т.е. который мы рассматриваем в данном случае)

Угол подвижки (скольжения): Угол наклона следов относительных перемещений (штриховок, борозд и т.д.) в плоскости сместителя. Измеряется угол между вектором перемещения висячего блока разрыва и азимутом простирания разрыва в плоскости сместителя. При отклонении угла от азимута простирания вверх (по восстанью плоскости сместителя) значения угла принимаются положительными, а при отклонении от азимута простирания вниз (по падению плоскости сместителя) значения принимаются со знаком минус. Благодаря измерению направления относительного перемещения висячего блока этим замером устанавливается и геолого-кинематический тип разрывного нарушения. Таким образом, при угле скольжения в диапазоне от 0 до 180 градусов висячий блок смещается вверх относительно лежащего блока, и это говорит о наличии взбросовой компоненты данного разрыва. При угле подвижки в диапазоне от 0 до -180 градусов висячий блок смещается вниз относительно лежащего блока, фиксируя на-

личие сбросовой компоненты разрыва. При угле скольжения равном нулю разрыв имеет только левосдвиговую компоненту относительного смещения. А при угле подвижки равном 180 градусов – только правосдвиговую компоненту относительного смещения. В случае если знак относительных перемещений (в какую сторону по штриховке двигался висячий блок) установить невозможно, фиксируется угол при относительном перемещении висячего блока вверх (по восстанию), а также отмечается отсутствие определения направления относительного перемещения. Схемы измерений при положительной экспозиции плоскости сместителя (т.е. мы проводим измерения на лежащем крыле разрыва) приведены на рис. 2.4, а пример измерений при отрицательной экспозиции (измерения на висячем крыле разрыва) на рис. 2.5.

Вариантом измерения угла подвижки может быть измерение его в диапазоне от 0 до 359 градусов с положительным отсчетом против часовой стрелки. В таком случае при значении от 0 до 180 градусов висячий блок смещается вверх относительно лежащего блока, а при угле подвижки в диапазоне от 180 до 359 градусов висячий блок смещается вниз относительно лежащего блока.

Как мы уже отмечали, при освоении методики измерений зеркал скольжения необходимо использовать маркер. Это поможет избежать возможных ошибок и лучше начать ориентироваться в трехмерном пространстве геологической среды. Последовательность действий при замерах с использованием маркера приведена на рис. 2.6. После нахождения плоскости сместителя с бороздами (штриховкой) скольжения рисуем на ней **первую** линию простирания (необходимо использовать уровень компаса для определения горизонтального её положения). Затем стрелочкой указываем направление простирания по правилу правой руки (наблюдатель, смотрящий вдоль линии простирания, видит висячий блок справа). Проводим измерение азимута простирания, для чего, сориентировав компас севером по направлению простирания, снимаем показания по северной стрелке компаса.

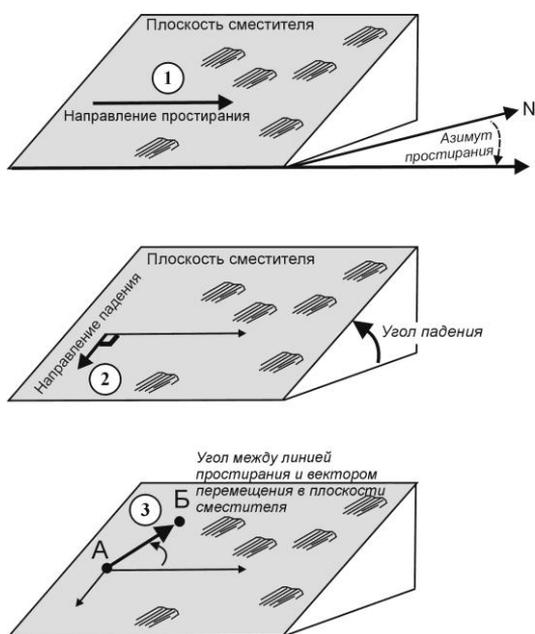


Рис. 2.6. Последовательность измерений в поле с использованием маркера (отмечаются три линии, по которым снимаются измерения)

Вторую линию проводим маркером по направлению падения (под 90 градусов к простиранию и по наибольшему уклону поверхности сместителя). Эклиметром компаса или наклономером проводим измерение угла падения.

Третью линию проводим по направлению (вектору) перемещения всячего блока (она параллельна штриховке). После определения вектора перемещения всячего блока стрелочкой отмечаем это направление. Далее производим измерение угла между направлением простирания и направлением перемещения всячего блока. Для этого можно использовать градусные шкалы компаса, угломер или транспортир.

2.2.2. Дополнительные сведения при изучении зеркал скольжения

Дополнительные сведения позволяют зафиксировать все необходимые сведения при изучении зеркал скольжения или иных геологических индикаторов тектонических напряжений.

Геологическая обстановка: отмечаются наклон слоев или полосчатости вмещающих пород, соотношения с соседними нарушениями, состав и структура минерального выполнения.

Размер зеркала скольжения: Проводится оценка величины в баллах (1 – площадь до 100 см², 2 – 100-10000 см², 1-10 м², 4 – 10-100 м², 5 – более 100 м²).

1 – плоскость до 0.1 м x 0.1 м (примерно тонкие трещины VIII порядка СНиП 2.02.02-85)

2 – плоскость до 1 м x 1 м (примерно мелкие трещины VII порядка СНиП 2.02.02-85)

3 – плоскость до 5 м x 5 м (примерно средние трещины VI порядка СНиП 2.02.02-85)

4 – плоскость до 10 м x 10 м (примерно крупные трещины V порядка СНиП 2.02.02-85)

5 – плоскость более 10 м x 10 м (примерно крупные трещины V порядка и разломы IV порядка СНиП 2.02.02-85).

Достоверность определения кинематического типа разрывного нарушения. Оценка достоверности определения направления относительного перемещения крыльев в баллах: 0 – невозможно определить, 1 – очень низкая, 2 – низкая, 3 – средняя, 4 – высокая (с предполагаемой амплитудой и 5 – очень высокая (с отлично видимой амплитудой смещения). Нулевая оценка достоверности означает, что сделать какие-либо выводы об относительном перемещении крыльев разрывного нарушения не представляется возможным. Оценка в 1 балл означает слабые признаки (иногда противоречивые) относительных перемещений. При оценке 2 балла разрывное нарушение уже характеризуются уверенными свидетельствами, но с рядом обратных признаков. Четкое зеркало скольжения (или разрывное нарушение) с присутствием основных характерных признаков смещения оценивается по достоверности в 3 балла, а такое же с предполагаемой или четкой амплитудой смещения оценивается соответственно в 4 или 5 баллов. Достоверность определения кинематического типа разрывного нарушения – важная характеристика, которая позволяет на этапе обработки и интерпретации полевых данных оценить значимость тех или иных замеров зеркал скольжения.

Амплитуда нарушения (если возможно): Фиксируется полная амплитуда. В случае невозможности измерить полную амплитуду измеряется го-

ризонгальная или вертикальная амплитуда относительного смещения крыльев разрывного нарушения.

Тип скульптуры на поверхности. При определении типа скульптуры на поверхности зеркала скольжения определяются следующие особенности: 1 – борозды скольжения с уступами отрыва, 2 – борозды скольжения с уступами вдавливания, 3 – борозды скольжения без уступов, на ровной поверхности, 4 – борозды скольжения с уступами неясной природы, 5 – только уступы, неясной природы, 6 – уступы как скульптура растяжения, 7 – уступы как скульптура вдавливания, 8 – только поверхность тектонита, без уступов и борозд;

Размер скульптурных знаков. Величина борозд скольжения и бугорков, длина уступов отрыва или вдавливания на поверхности зеркал скольжения: тонкие (до 1 см), мелкие (1-5 см), средние (5-15 см), крупные (15-50 см) и грубые (свыше 50 см).

Степень сохранности штриховки. Оценка сохранности штриховки: 1 – неясная (тектоническая природа штриховки сомнительна), 2 – слабо выраженная, но несомненно тектоническая, 3 – хорошо выраженная на всей поверхности, 4 – хорошо выраженная на всей поверхности, сопровождающаяся тектонитом и ступенчатым изломом с “треугольником скольжения”, 5 – хорошо выраженная на всей поверхности крупного ЗС, сопровождающаяся тектонитом и ступенчатым изломом с “треугольником скольжения”.

Мощность зоны скольжения в целом (включая экзоконтакговые изменения);

Мощность тектонита или **минерального выполнения** зоны скольжения;

Помимо этих дополнительных сведений важно производить непосредственное изучение зеркал скольжения в обнажениях с зарисовкой и фотографированием малых структурных форм, определения их соотношений, относительной хронологической последовательности и установления структурно-парагенетических ассоциаций, о принципах выделения которых будет рассказано в главе 6.

2.3. Создание базы данных по геологическим индикаторам напряжений

Для обработки собранных при полевых исследованиях замеров необходимо их внести в базу данных, которые удобно создавать на основе таблиц Excel. В базу данных вносятся основные сведения по точке замеров (привязка точки, координаты, геологическое положение, состав и возраст пород в обнажении и т.д.). Для каждого замера геологического индикатора палеонапряжений вносится номер замера, основные сведения о пространственной ориентации (азимут падения, угол падения и т.д.), экспозиция, кинематический тип, степень достоверности (для вектора перемещения), амплитуда перемещения, оценка величины (размера), размер скульптурных знаков на зеркале скольжения, минеральное заполнение и т.д. (Таблица 2.1).

В созданной базе данных по геологическим индикаторам тектонических напряжений удобно производить различные операции по подсчету как общего количества собранных сведений, так и избранных кинематических типов индикаторов. Из таблиц базы данных формируются файлы для расчетов и графического представления собранных замеров разными программными средствами. Первичную обработку собранных замеров можно провести, используя различные типы гистограмм и диаграмм Excel.

Таблица 2.1. Пример базы данных по геологическим индикаторам тектонических напряжений

№	Данные	Итого замеров с установленным смещением		палеоцен, датский ярус													
		Кадошский мыс															
		Азимут падения лежачего крыла	Азимут простирания лежачего крыла	Угол падения	Угол бета	Тип трещины	8	9	10	11	12	13	14				
1	Маринин	310	220	75		el	элементы залегания	Степень достоверности	Амплитуда, см	размер (от 1 до 5)	размер штриховки, тмскт	Тип заполнения	Мощность заполнения, см				
2	Маринин	250	160	60	15	ls	левый сбросо-сдвиг	1		1	m1	кальцит	0.2				
3	Маринин	10	280	20		o	отрыв			1		кальцит	0.4				
4	Маринин	140	50	80	20	ls	левый сбросо-сдвиг	1		1	мс2	кальцит	0.3				
5	Маринин	285	195	75	5	pw	правый взбросо-сдвиг	4	10	2	c2	кальцит	2				
6	Маринин	240	150	50	10	pl	сдвиг	0		1	c1	кальцит	1				
7	Маринин	280	190	70		v	жила			2		кальцит	2				
8	Маринин	150	60	80	25	pl	сдвиг	0		1	мс1	кальцит	0.1				
9	Маринин	280	190	65	20	pw	правый взбросо-сдвиг	1		2	c2	кальцит	1				

ГЛАВА 3. Анализ полевых данных

Анализ собранной информации по геологическим индикаторам напряжений может идти по двум основным направлениям. Первое направление сосредоточено на графическом представлении собранных замеров (которое, по сути, представляет собой картину наблюдаемых деформаций в массиве горных пород), а второе на реконструкции тектонических напряжений с использованием полевых данных (рассматривается далее в главах 5 и 8). Графическое представление собранных геологических индикаторов палеонапряжений уже может дать первоначальное представление о характере тектонических деформаций, об основных кинематических типах разрывных нарушений, о преобладающих направлениях и углах наклона разрывных нарушений. На этом этапе анализа полевых данных определяются плотностные максимумы распределения систем тектонической трещиноватости и мелких разрывов, соотношение разных структурных форм в точках наблюдения и в пространстве (на картах и разрезах). Подобная статистическая обработка может быть применена также для массовых замеров других линейных и плоскостных природных элементов, таких как первичные и вторичные текстуры, элементы складок (оси, крылья, шарниры и осевые поверхности), кристаллографические оси и т.д.

3.1. Основные способы графического представления данных

Представление пространственного положения геологических индикаторов палеонапряжений возможно разными способами. Поскольку элементы залегания фиксируются двумя основными параметрами (азимут падения/простираения и угол падения), их возможно нанести на простой прямоугольной диаграмме. По одной оси отложен азимут падения, а по другой – угол падения (рис. 3.1).

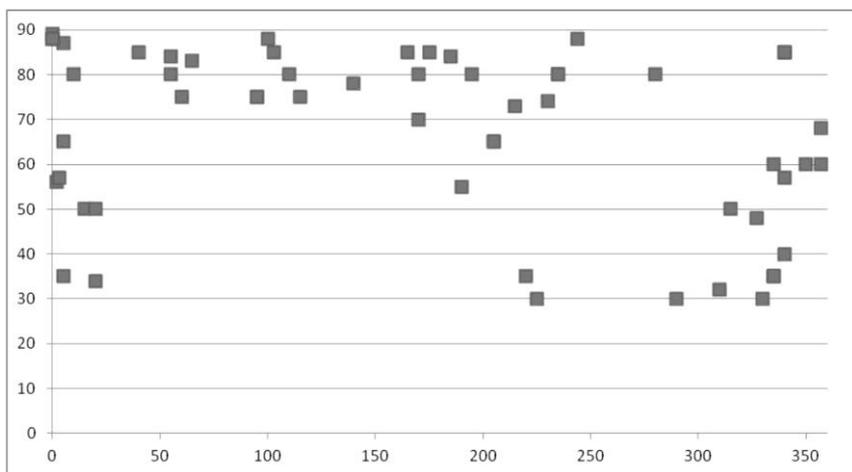


Рис. 3.1. Пример точечной диаграммы.

Прямоугольная точечная диаграмма (построено в Excel) распределения азимутов падения (по горизонтальной оси) и углов падения измеренных зеркал скольжения и разрывных зон (по вертикальной оси) для группы точек наблюдения в пределах рудника «Центральный» (Хибинский массив, замеры Л.А Сим и А.В. Маринина)

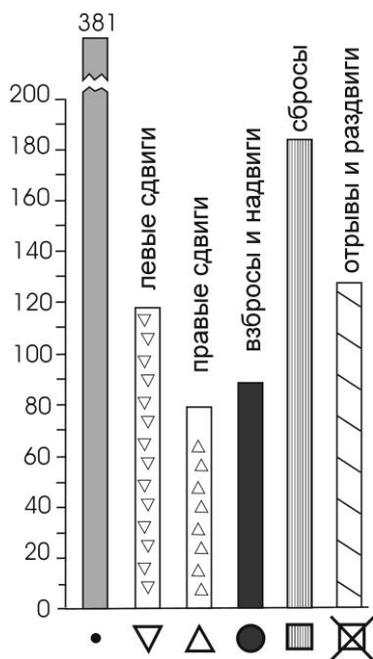


Рис. 3.2. Гистограмма распределения разных кинематических типов разрывов и трещин

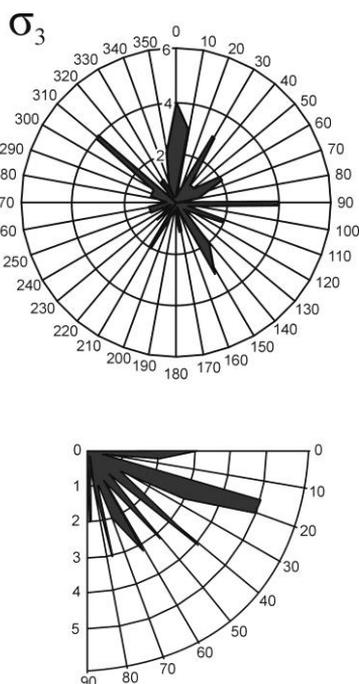


Рис. 3.3. Пример розы-диаграммы азимутов и углов падения

Для статистического анализа распределения одной из измеренных величин, например простирания разрывов, используются гистограммы или столбчатые диаграммы (рис. 3.2).

Наиболее простым и наглядным способом представления данных являются розы-диаграммы (рис. 3.3). Роза-диаграмма представляет собой круг, поделенный на секторы, в которых с определенным шагом отложены пространственные характеристики геологических структур. Это могут быть азимуты или направления простираний, азимуты падений, углы падения и т.д. Для построения розы-диаграммы область изменения наблюдаемой в поле величины необходимо разделить на интервалы, соответствующие выбранным значениям секторов, и осуществить выборку. Интервал или шаг розы-диаграммы зависят от точности произведенных замеров.

В структурной геологии наиболее часто используются круговые диаграммы, которые позволяют отобразить точки сферической поверхности на плоскости. Однако сфера не обладает возможностью равномерной развертки на плоскость, что приводит к искажению её изображения. Характер этого искажения зависит от способа проекции. В геологии обычно используются стереографическая (равноугольная) или равновеликая (равноплощадная) проекции. Круговые диаграммы, представляющие геологическую информацию в стереографической проекции, называют часто сокращенно стереограммами (*stereoplot*). Подробное их описание и приемы работы с ними приводятся далее в разделах 3.2, 3.3 и 3.4.

Графическое представление геологических индикаторов палеонапряжений на диаграммах разного вида можно выполнять как вручную с применением палеток, так и при помощи компьютерных программ. Для построения столбчатых и точечных диаграмм, а также роз-диаграмм удобно использовать Excel. Для по-

строения различных видов стереограмм возможно применение находящейся в свободном доступе программы Stereonet, разработанной Рурским университетом. Программу Stereonet различных версий можно скачать по адресу:

<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>

Наиболее информативными способами графического представления полевых данных по геологическим индикатором напряжений можно считать следующие:

- *розы-диаграммы азимутов простирания и падения,*
- *стереограммы плоскостей разрывных нарушений,*
- *стереограммы векторов перемещений,*
- *стереограммы полюсов,*
- *стереограммы плотностей.*

Большинство из этих способов связано с пространственным представлением данных полевых измерений.

3.2. Сферические проекции в структурной геологии

Наиболее информативно представить пространственное расположение разнообразных структурных элементов, в том числе геологических индикаторов напряжений, позволяют сферические проекции на плоскость. Используемые в геологии стереографическая (равноугольная) и равновеликая (равноплощадная) проекции позволяют, как это следует из их названия, передать без искажения угловые величины либо площади проецируемых фигур.

Созданные на основе данных проекций координатные сетки состоят из системы параллелей (дуг малых кругов) и меридианов (дуг больших кругов). Данные сетки используются в качестве шаблонов для выполнения пространственных операций и построения круговых диаграмм. При структурно-геологических исследованиях наиболее часто используются координатные сетки, использующие стереографическую проекцию. Это сетка Вульфа (экваториальная) и сетка Болдырева (полярная). Сетку Федорова, сочетающую в себе обе эти сетки, используют преимущественно в кристаллографии.

3.2.1. Стереографическая (равноугольная) проекция

В стереографической проекции точка зрения (центр проектирования) располагается на поверхности сферы (рис. 3.4 и 3.5), а картинная плоскость (т.е. плоскость на которую осуществляется проектирование) – в центре, перпендикулярно радиусу, идущему к точке зрения [Очеретенко, Трошенко, 1978].

Главными отличительными особенностями стереографической проекции является сохранение угловых значений (углы между дугами, лежащими на сфере, равны углам между дугами, спроектированными на картинную плоскость). В зависимости от положения точки зрения (центра проектирования) выделяют *полярные и экваториальные* сетки. При расположении точки зрения на полюсе сферы, а картинной плоскости в плоскости экватора сферы образуется полярная проекция. При расположении точки зрения на экваторе, а плоскости проекции (картинной плоскости) в плоскости одного из меридианов образуется экваториальная проекция. Для отображения структурных элементов используются стереографические проекции как на *нижнюю*, так и на *верхнюю* полусферы.

В зарубежной литературе по структурной геологии и сейсмологии наиболее распространена проекция на нижнюю полусферу (*lower hemisphere*). В отечественной литературе часто используется проекция на верхнюю полусферу (*upper hemisphere*). Переход между проекциями на разные полусферы осуществляется простым разворотом диаграммы на 180 градусов. На стереографических сетках можно решать задачи по определению углов между линейными и плоскостными элементами геологической структуры. В данном методическом пособии эти задачи не рассматриваются, а подробную информацию можно найти в работах [Вистелиус, 1958; Очеретенко и Троценко, 1978].

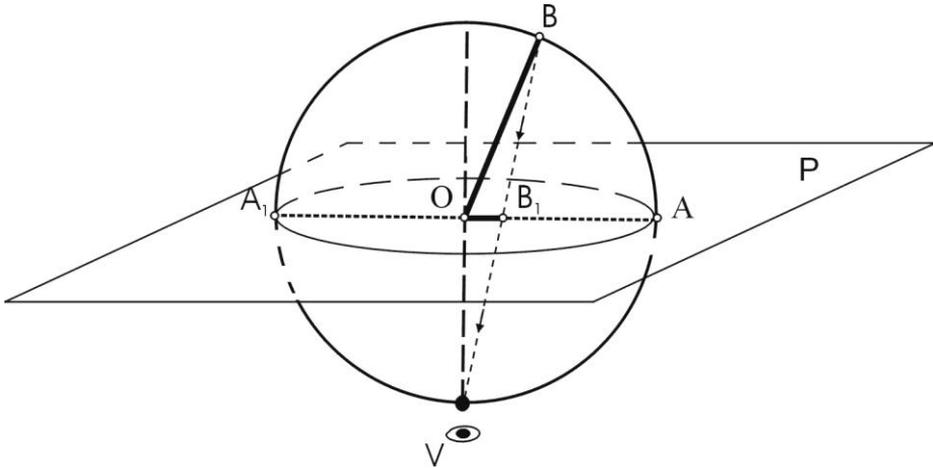


Рис. 3.4. Стереографическая проекция.

Линия OB проецируется на картинную плоскость (P) линией OB_1 для точки зрения V . Радиус OA или OA_1 указывает азимут восстания или погружения соответственно, а длина линии OB_1 указывает на угол наклона линии OB

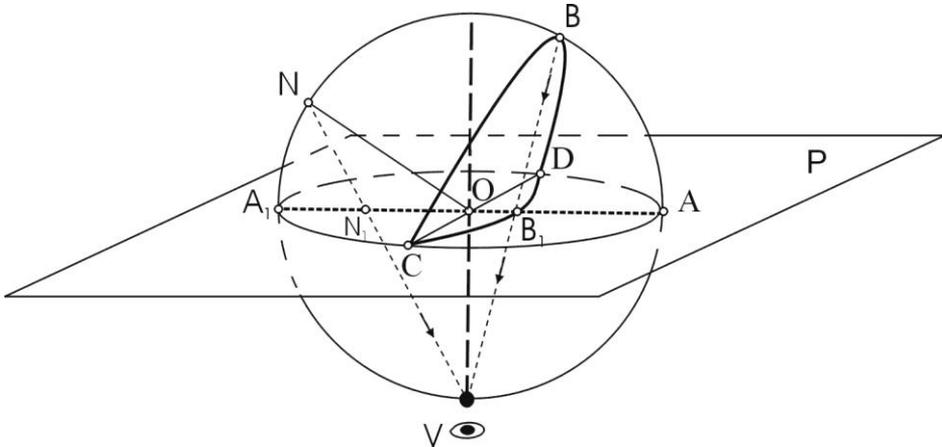


Рис. 3.5. Стереографическая проекция.

Плоскость B_1CD проецируется на картинную плоскость (P) дугой CB_1D и отрезком COD . Полюс плоскости точка N (нормаль к плоскости) проецируется на картинную плоскость точкой N_1 . Радиусы OA и OA_1 показывают азимуты падения, а длина отрезков OB_1 и ON_1 указывают на углы наклона плоскости и нормали к ней

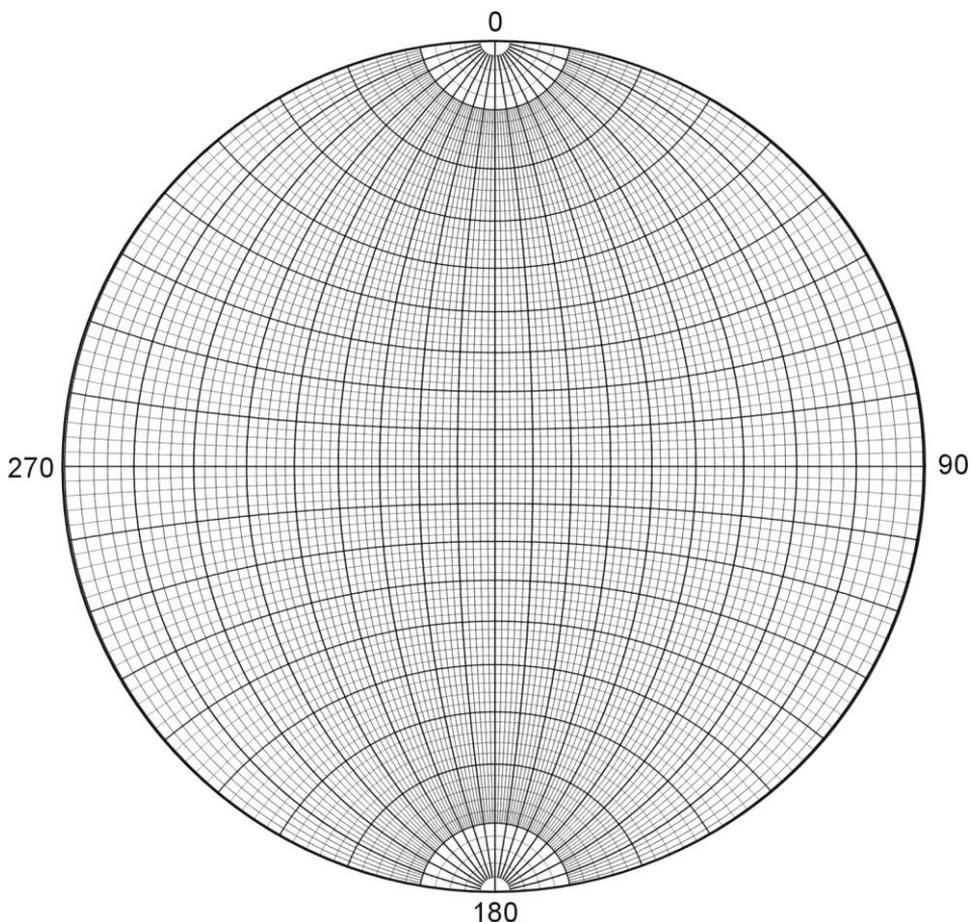


Рис. 3.6. Равноугольная экваториальная сетка (сетка Г.В. Вульфа)

Сетка Вульфа (равноугольная экваториальная сетка) строится путем проецирования полусферы на плоскость одного из меридианов, совмещенной с горизонтальной плоскостью. Сетка состоит из меридианов (дуги больших кругов) и параллелей (дуги малых кругов). Внешняя азимутальная шкала имеет оцифровку от 0 до 360 градусов, отвечающая азимутам падения или простираения. Положение на определенном меридиане, которые имеют оцифровку от 0 до 90 градусов, показывает угол наклона к горизонту (падения или погружения) для отображаемых на сетке данных (рис. 3.6). Сетка разбита параллелями и меридианами через 2 градуса. Сетка удобна для построения проекций плоскостных (трещин, зеркал скольжения, отрывов и т.д.) и линейных (шарниры складок, структуры течения и т.д.) элементов, а также полюсов плоскостей. Стандартный диаметр сетки 20 см, возможно использование сетки с диаметром 10 см.

Вот как описывает сетку Вульфа М.В. Гзовский [1971, стр. 29] «*В сетке Вульфа имеются два семейства кривых линий, которые пересекаются под прямым углом. Линии одного семейства пересекают экватор сетки и сходятся к двум полюсам – концам перпендикулярного экватору диаметра сетки. Эти линии*

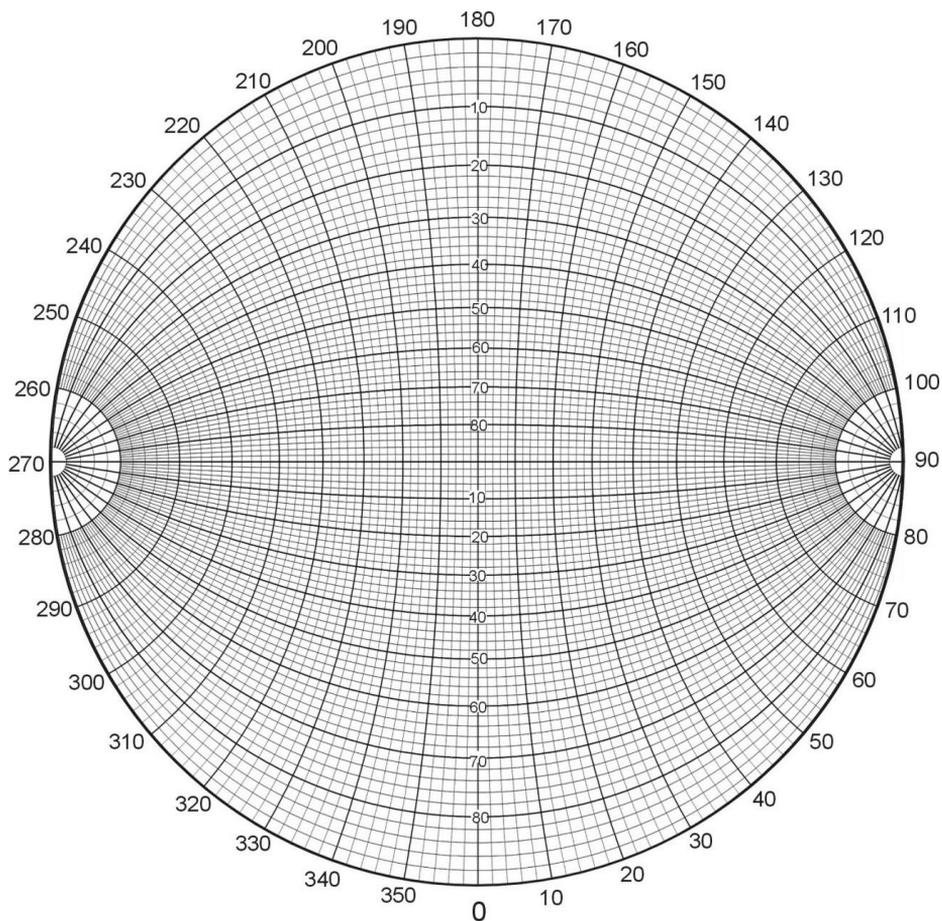


Рис. 3.7. Равноугольная экваториальная сетка (сетка Г.В. Вульфа) с оцифровкой, используемой в структурной геологии для построения круговых диаграмм на кальке (лавсане)

подобны меридианам полушарий и являются следами больших кругов, т.е. проекциями линий пересечения полусферы плоскостями, проходящими через ее центр и полюсы. Линии второго семейства нигде не соединяются между собой. Они подобны широтам на географической карте и являются следами малых кругов, т.е. проекциями линий пересечения плоскостями, перпендикулярными ее основанию и прямой, соединяющей два полюса. Все кривые на сетке Вульфа являются дугами окружностей. Меридианы, широты, экватор и полюсы сетки Вульфа никак не связаны с одноименными географическими названиями».

В структурной геологии при построении круговых диаграмм обычно используют сетку Вульфа (рис. 3.7) отличающуюся положением полюсов и экватора, а также с оцифровкой шкал удобной для построения диаграмм на прозрачной кальке (или лавсане). У этой сетки полюса расположены по горизонтальной линии, а экватор лежит на вертикальном диаметре. Внешняя азимутальная шкала оцифрована от нижней точки окружности сетки против часовой стрелки. Для нанесения замера север предварительно размеченной кальки ориентируют (путем поворота) на

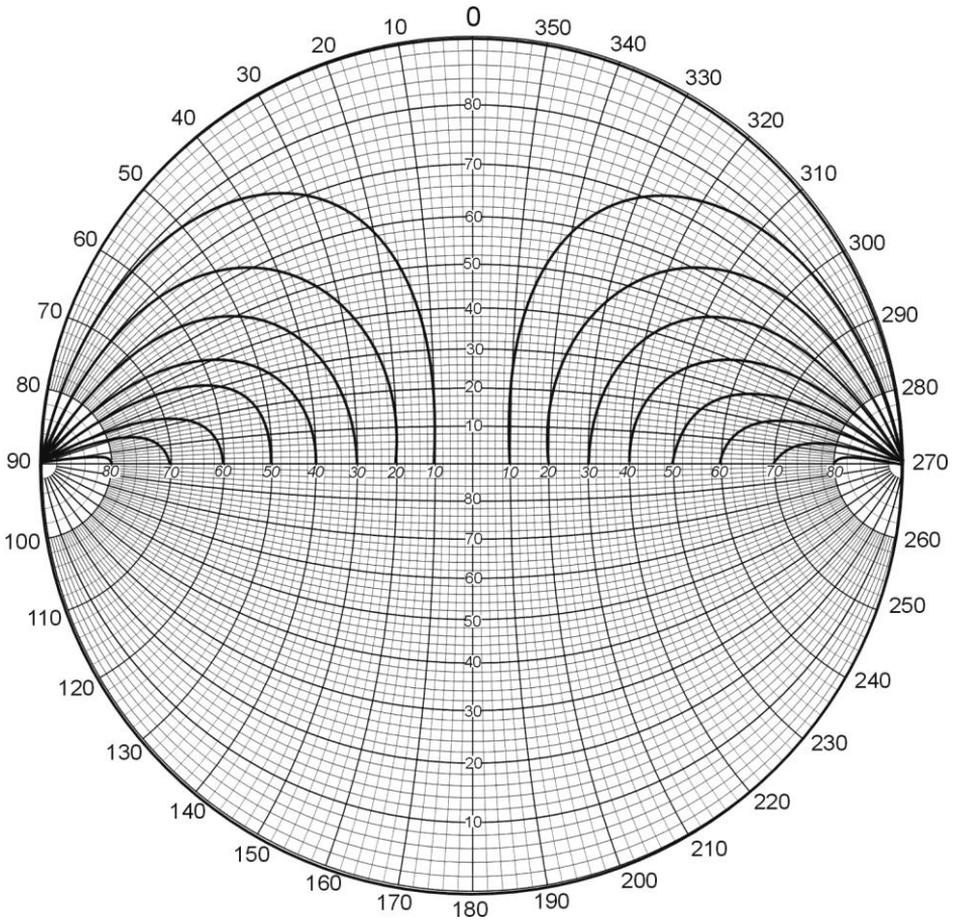


Рис. 3.8. Равноугольная экваториальная сетка (сетка Вульфа – Гущенко)

нужное показание по внешней азимутальной шкале, а остальные действия производятся по вертикальному диаметру, размеченному под шкалу углов наклонов.

Сетка Вульфа-Гущенко. Для реконструкции тектонических напряжений с помощью метода кинематического анализа, о котором подробно будет рассказано в главе 6, используется сетка Вульфа – Гущенко. У данной сетки внешняя азимутальная шкала имеет оцифровку против часовой стрелки от верхней точки окружности сетки и дополнительную нанесенную палетку Гущенко (рис. 3.8) при помощи которой на стереограммах производится построение векторов перемещений, зафиксированных на плоскостях зеркал скольжения. Палетка О.И. Гущенко [1979] состоит из дуг, дающих возможность наносить вектора перемещений с разными углами наклона к горизонту, измеренных в соответствии с системой записи в кинематическом методе.

На горизонтальных радиусах, делящих палетку на северную и южную части, обозначены углы наклона векторов перемещений от 0 градусов до 90 градусов. Отсчет начинается от центра палетки и через 10 градусов приближается к внешнему

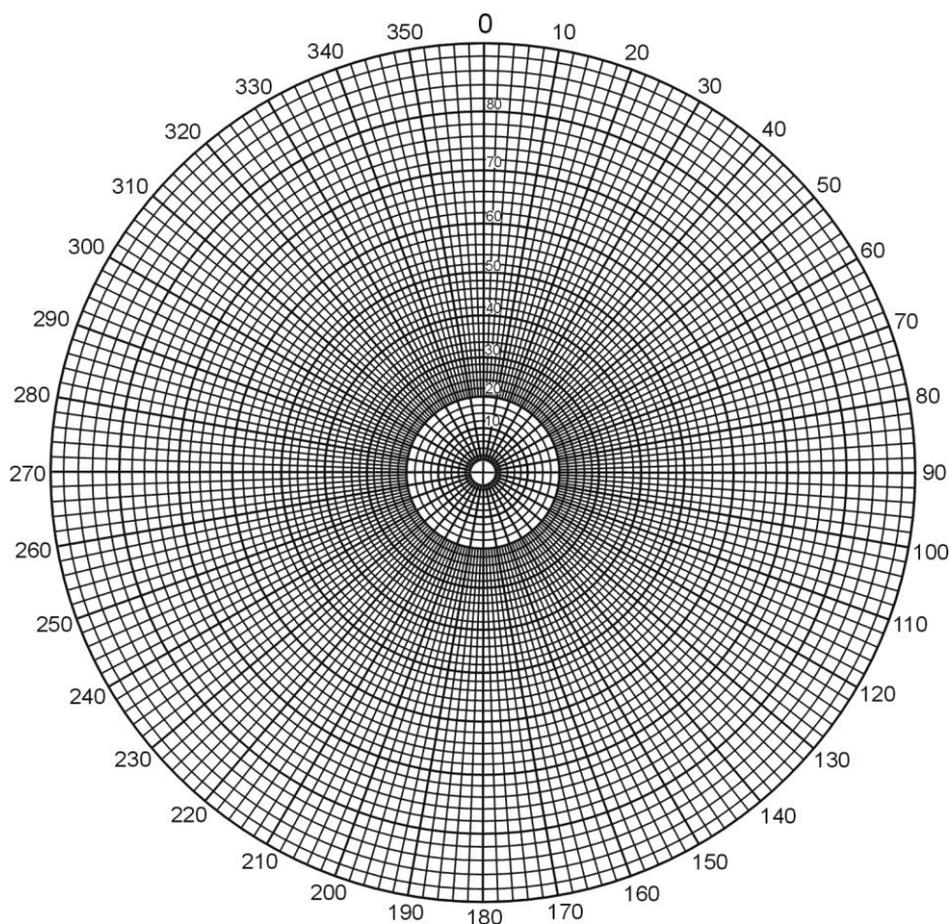


Рис. 3.9. Равноугольная полярная сетка (сетка А.К. Болдырева)

кругу. Дуги расположены симметрично относительно вертикального радиуса. Система дуг, расположенных направо от вертикального радиуса, предназначена для нанесения векторов перемещения, отклоняющихся направо от линии восстания плоскости с зеркалом скольжения (при замерах в лежащем крыле). Система дуг, расходящихся налево от вертикального радиуса, используется для векторов перемещения, отклоняющихся налево от линии восстания (при замерах в лежащем крыле).

Сетка Болдырева (равноугольная полярная сетка) строится путем проецирования полусферы на плоскость экватора, совмещенной с горизонтальной плоскостью. Сетка состоит из радиально расходящихся меридианов (радиусов) и концентрических окружностей (параллелей). Положение на определенном меридиане или радиусе сетки показывает на географическое направление (азимут), а положение на окружности – угол наклона (падения или погружения) для отображаемых на сетке данных (рис. 3.9). Сетка разбита параллелями и меридианами через 2 градуса. Сетка удобна для построения полюсов плоскостных (трещин, зеркал скольжения, отрывов и т.д.) и линейных (шарниры складок, структу-

ры течения и т.д.) элементов, но не предназначена для построения проекций плоскостей. Стандартный диаметр сетки 10 или 20 см.

Существуют разновидности сетки Болдырева для нанесения линейных элементов и для нанесения плоскостных элементов (полюсов плоскостей). Эти разновидности сетки отличаются оцифровкой градусных шкал. Наиболее часто используется сетка Болдырева для нанесения плоскостных элементов (полюсов), которая имеет оцифровку азимутальной шкалы по часовой стрелке от верхней точки окружности сетки и шкалу углов наклона с оцифровкой шкалы углов наклона от центра к окружности рис. 3.9.

Проверкой правильности построения структурных элементов на любом варианте стереографической сетки является их пространственная ориентировка относительно сторон света. На размеченной для построения кальке, как и на исходной сетке Вульфа (рис. 3.6) или на сетке Болдырева (рис. 3.9), север располагается вверху, восток – справа, юг – внизу, а запад с левой стороны. Примеры построения плоскостных и линейных элементов на стереографических сетках приведены в разделе 3.4.

3.2.2. Равновеликая (равноплощадная) проекция

Сетка Шмидта (равноплощадная экваториальная сетка, *Schmidt net*) используется для построения равноплощадную проекцию Ж. Ламберта. Положение экватора и полюсов сетки Шмидта, а также оцифровка внешней (азимутальной) шкалы сходно с сеткой Вульфа. Особенность сетки состоит в равной площади элементарных ячеек сетки в каждом горизонтальном ряду, что хорошо видно на рисунке с показанными одинаковыми сегментами на сетке Шмидта (рис. 3.10). Однако угловые величины испытывают значительные искажения по периферии сетки. Сетку Шмидта удобно использовать для непосредственной графическо-статистической обработки массовых замеров геологических индикаторов.

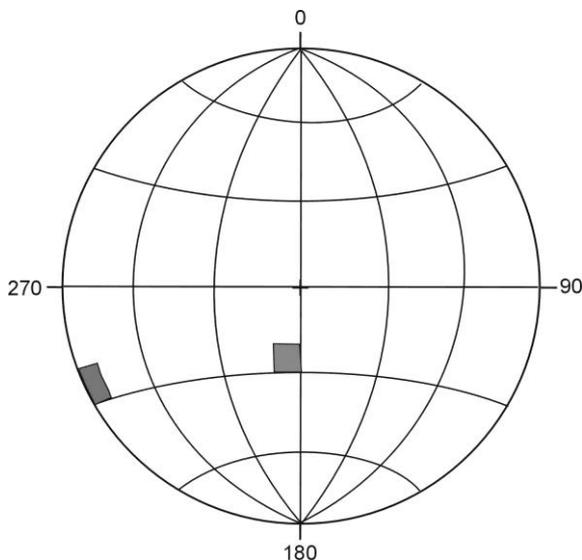


Рис. 3.10. Равноплощадная экваториальная сетка (Сетка В. Шмидта)

3.3. Статистические круговые диаграммы

Планисфера Пронина дает возможность построения статистических круговых диаграмм на стереографической равноугольной сетке (рис. 3.11). Поскольку проекции равной площади ближе к центру диаграммы отображаются меньшими площадями, А.В. Пронин предложил использование специальной планисферы с множеством мелких кружков разного диаметра, покрывающие равные по площади участки полусферы. Кружки на планисфере называются статистическими окнами, которые представляют проекцию на картинную плоскость одинаковых (по 1%) площадей поверхности полусферы. Определяя число попаданий, например измеренных полюсов трещин на единицу поверхности сферы, можно оценить особенности их распределения.

К недостаткам палетки можно отнести учет одних и тех же замеров в разных статистических окнах, что приводит к некоторому искажению границ статистического распределения. Пример статистической диаграммы распределения трещин, построенной с использованием планисфер Пронина, показан на рис. 3.12. Если данные замеров внесены в базу данных, то удобнее использовать программные средства для их обработки (рис. 3.13)

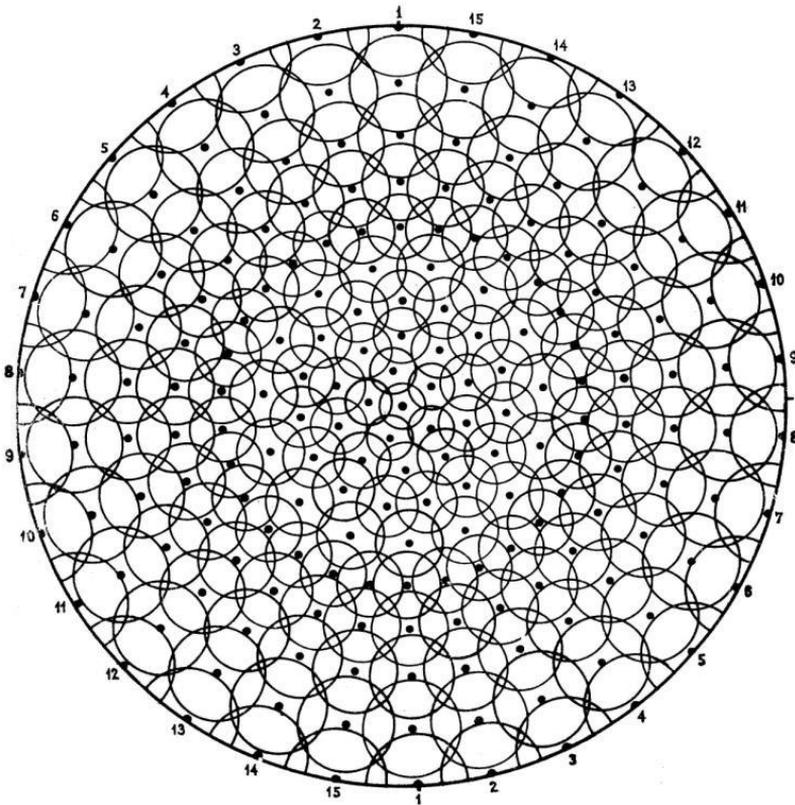


Рис. 3.11. Планисфера А.В. Пронина (палетка Пронина) для построения круговых статистических диаграмм на стереографической равноугольной сетке

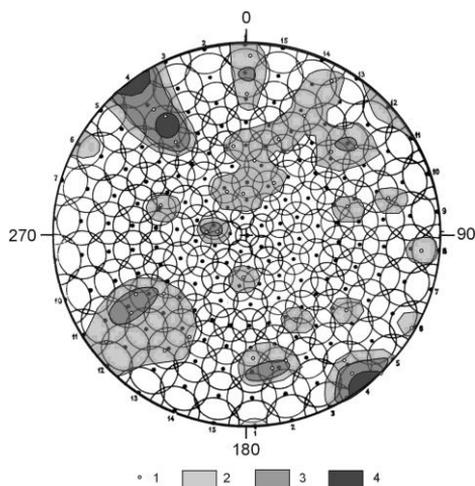


Рис. 3.12. Пример диаграммы построенной с использованием планисферы Пронина (стереографическая проекция на верхнюю полусферу).
1 – полюса трещин, 2-4 области с участками разной плотности трещин

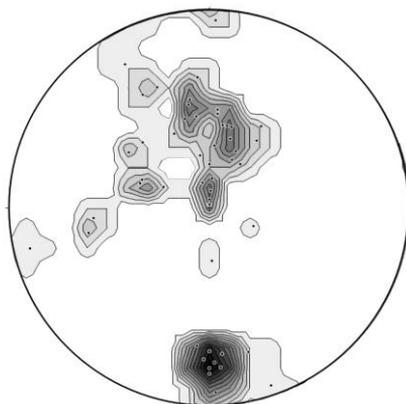


Рис. 3.13. Пример диаграммы построенной с использованием программы *Stereonet*

3.4. Практические занятия по нанесению и обработке полевых данных на стереографических сетках (палетках)

При ручной камеральной обработке полевых данных на круговых диаграммах используются прозрачные кальки (восковки). При этом на кальку с использованием вышеописанных стереографических сеток (сетки Вульфа, Болдырева и Вульфа – Гущенко) наносятся плоскостные и линейные элементы геологических индикаторов напряжений. Большая часть построений производится на равноугольной сетке Вульфа (проекция на верхнюю полусферу). Для подсчета плотностного распределения геологических структур используется палетка (планисфера) Пронина. Ниже приведены некоторые основные приемы работы по нанесению плоскостных и линейных элементов на стереографических сетках.

3.4.1. Построение проекции прямой линии по сетке Вульфа

Построение на рис. 3.14 производится в следующей последовательности (для замера линии *азимут падения СВ 25°, угол падения 50°*):

- 1) На сетку Вульфа накладывается прозрачная калька (лавсан), наносятся контуры, центр и некоторые элементы азимутальной шкалы диаграммы;
- 2) Поворачивая кальку по кругу, совмещаем север кальки с отметкой 25° на азимутальной шкале сетки Вульфа;
- 3) По верхней половине вертикального радиуса (меридиана) сетки отсчитываем угол падения ($\angle 50^\circ$) и ставим точку. Полученная точка представляет проекцию выхода измеренной линии (линейного элемента структуры) на верхнюю полусферу;

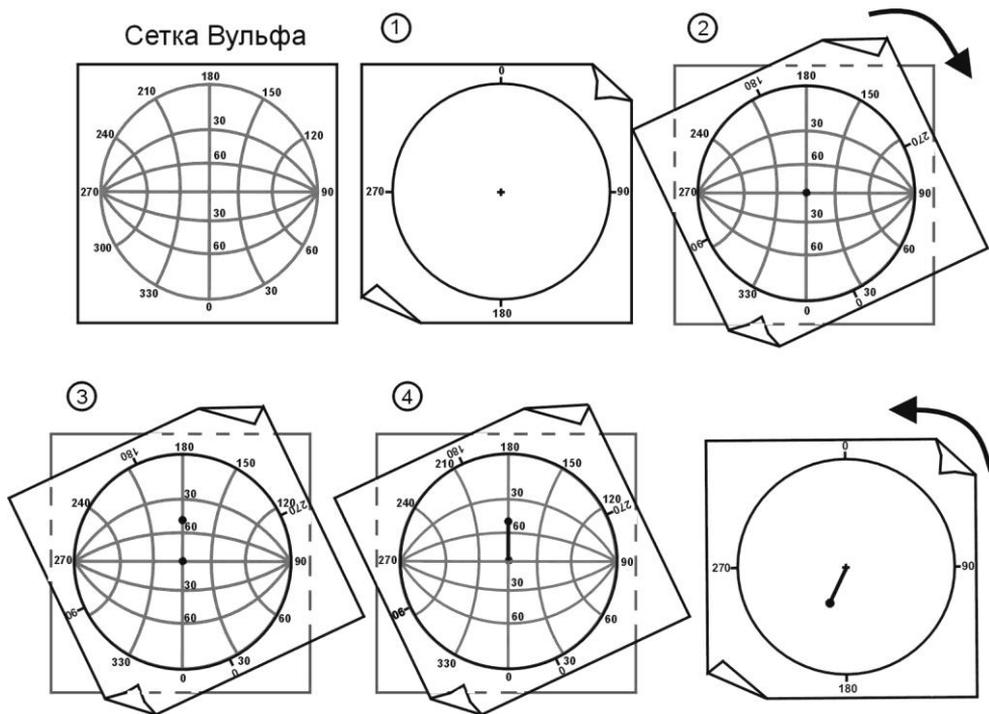


Рис. 3.14. Построение проекции прямой линии по сетке Вульфа

4) Для отображения проекции прямой линии соединяем данную точку с центром диаграммы.

При построении по сетке Вульфа – Гущенко (с развернутой на 180 градусов оцифровкой азимутальной шкалы) для получения проекции на верхнюю полусферу необходимо (в шаге № 3) брать отсчет по нижней половине вертикального радиуса.

3.4.2. Построение проекции прямой линии по сетке Болдырева

Построение на рис. 4.15 производится в следующей последовательности (для замера линии *азимут падения (погружения) СВ 60°, угол падения (погружения) 20°*):

1) На сетку Болдырева накладывается прозрачная калька (лавсан), наносятся контуры, центр и некоторые элементы азимутальной шкалы диаграммы;

2) Разворачиваем кальку по кругу на 180°, совмещая север кальки с отметкой 180° на азимутальной шкале сетки Болдырева;

3) По значениям внешней азимутальной шкалы сетки находим радиус, соответствующий азимуту падения (60°);

4) По окружностям находим угол падения ($\angle 20^\circ$). Для этого необходимо на шкале углов наклона рассчитать необходимую параллель по формуле $90^\circ - \text{угол}$ (в данном случае это параллель 70 градусов). В месте пересечения найденных радиуса и параллели ставим точку.

5) Для отображения проекции прямой линии соединяем данную точку с центром диаграммы.

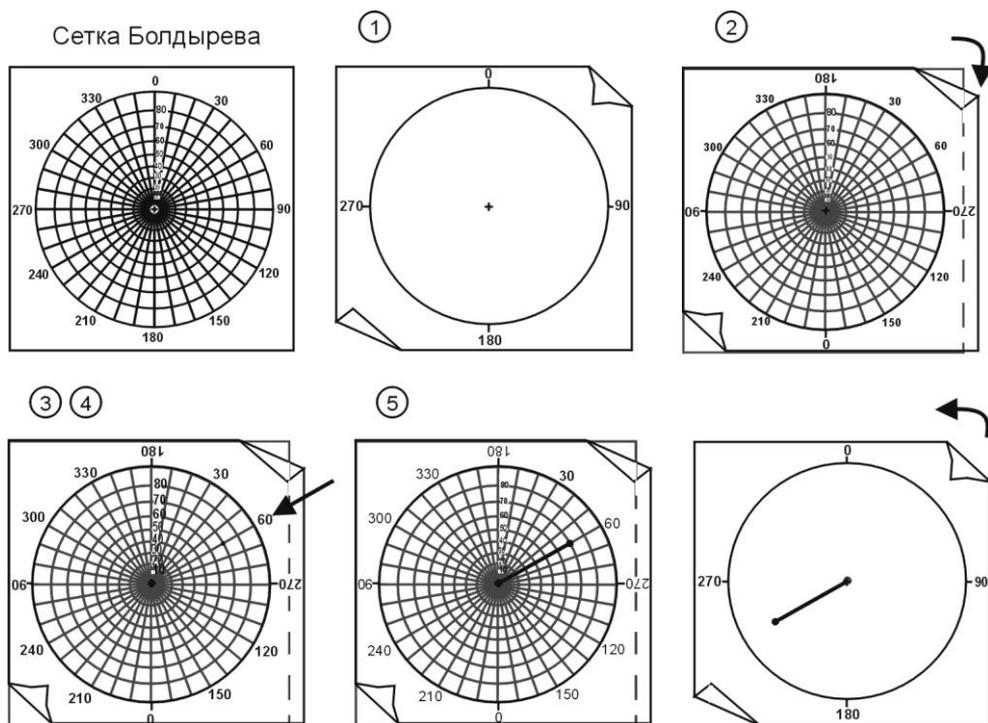


Рис. 3.15. Построение проекции прямой линии по сетке Болдырева

Указанные построения произведены с помощью сетки Болдырева для плоскостных элементов (как наиболее распространенной). На сетке Болдырева предназначена для нанесения линейных элементов, т.е. когда у сетки шкала углов наклона имеет увеличение от 0 на окружности до 90° к центру диаграммы, разворот кальки (пункт № 2) выполнять не нужно, а на шкале углов наклона уже указаны углы падения (погружения) для линейных элементов.

3.4.3. Построение проекции плоскости по сетке Вульфа

Построение на рис. 3.16 производится в следующей последовательности (для замера плоскости *азимут падения ЮВ 150°*, *угол падения 40°*):

- 1) На сетку Вульфа накладывается прозрачная калька (лавсан), наносятся контуры, центр и некоторые элементы азимутальной шкалы диаграммы;
- 2) Поворачивая кальку по кругу, совмещаем север кальки с отметкой 150° на азимутальной шкале сетки Вульфа;
- 3) По верхней половине вертикального радиуса (меридиана) сетки отсчитываем угол падения ($\angle 40^\circ$) и прочерчиваем проходящую через него дугу сетки;
- 4) Соединяем окончания построенной дуги диаметром и получаем проекцию заданной плоскости.

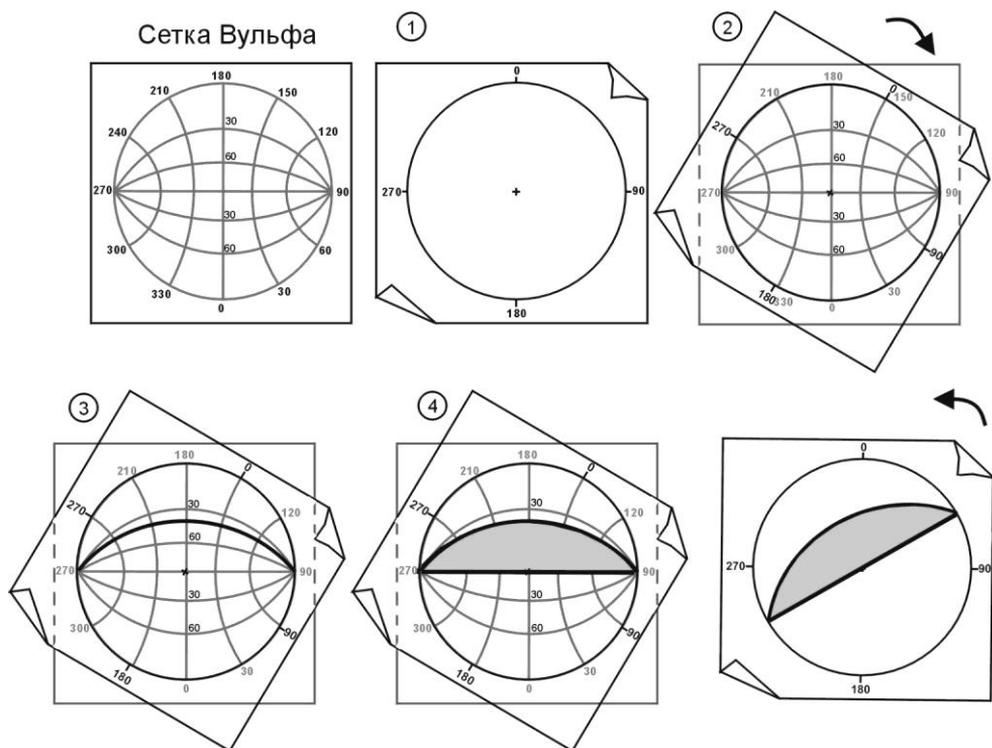


Рис. 3.16. Построение проекции плоскости по сетке Вульфа

3.4.4. Построение проекции полюса плоскости по сетке Вульфа

Для того чтобы найти полюс плоскости при уже построенной проекции этой же плоскости (пункт 3.4.3) достаточно отсчитать 90 градусов по шкале угла наклона от дуги плоскости (рис. 3.17).

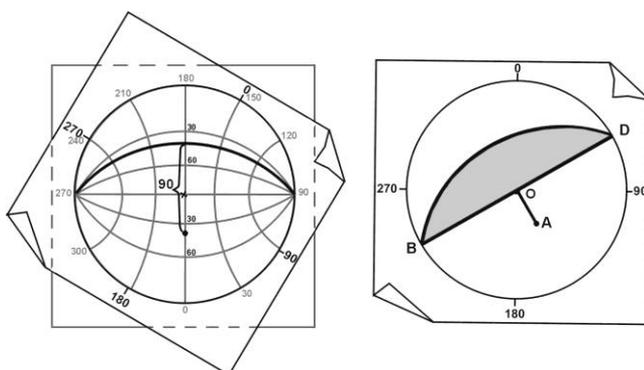


Рис. 3.17. Построение полюса плоскостного элемента при построенной проекции плоскости.

От проекции плоскости (BOD с азимутом падения 150° и углом падения 40°) по градусной шкале углов наклона отсчитывается 90 градусов для нахождения её полюса (A). Отрезок OA представляет проекцию нормали к данной плоскости

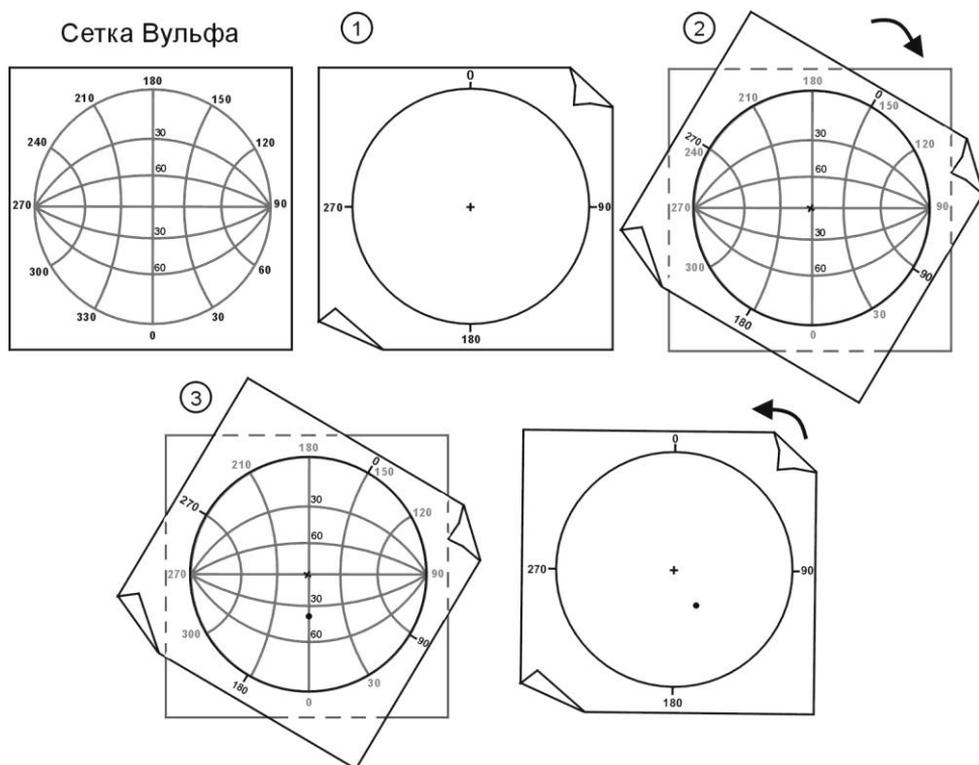


Рис. 3.18. Построение проекции полюса плоскости по сетке Вульфа

Построение проекции полюса плоскости по сетке Вульфа (рис. 3.18) производится в следующей последовательности (для замера плоскости *азимут падения ЮВ 150°*, *угол падения 40°*):

- 1) На сетку Вульфа накладывается прозрачная калька (лавсан), наносятся контуры, центр и некоторые элементы азимутальной шкалы диаграммы;
- 2) Поворачивая кальку по кругу, совмещаем север кальки с отметкой 150° на азимутальной шкале сетки Вульфа;
- 3) По нижней половине вертикального радиуса (меридиана) сетки отсчитываем угол падения ($\angle 40^\circ$) и ставим точку. Полученная точка представляет проекцию полюса плоскостного элемента на верхнюю полусферу.

3.4.5. Построение проекции полюса плоскости по сетке Болдырева

Построение на рис. 3.19 производится в следующей последовательности (для замера плоскости *азимут падения ЮЗ 210°*, *угол падения 65°*):

- 1) На сетку Болдырева накладывается прозрачная калька (см. примечание), наносятся контуры, центр и некоторые элементы азимутальной шкалы диаграммы;
- 2) По значениям внешней азимутальной шкалы находим радиус, соответствующий азимуту падения (ЮЗ 210°);
- 3) По окружностям определяем угол падения ($\angle 65^\circ$) и в месте пересечения ставим точку.

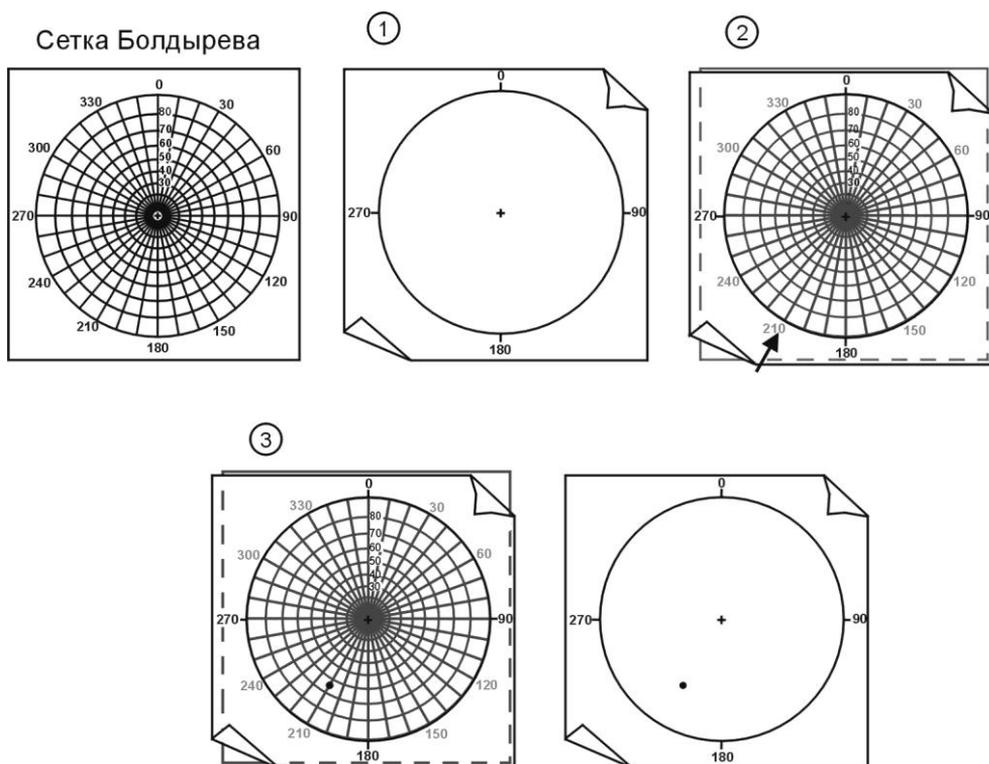


Рис. 3.19. Построение проекции полюса плоскости по сетке Болдырева

Данная точка является проекцией полюса данной плоскости на стереографическую сетку, а сокращенно - полюсом на диаграмме (стереограмме). Построения производятся на стационарно закрепленной кальке либо непосредственно на сетке Болдырева (копии), т.к. при этом не требуется разворота кальки, как при использовании сетки Вульфа. Используя разные значки полюсов для различных кинематических типов разрывов, возможно на одной стереограмме отобразить многообразие дизъюнктивных нарушений в точке наблюдения.

3.4.6. Построение проекции линейных элементов плоскостей (векторов перемещений на плоскостях зеркал скольжения) по сетке Вульфа

Построение на рис. 3.20 производится в следующей последовательности (для замера плоскости взбросового нарушения азимут падения ЮВ 150° , угол падения 40° , угол подвижки 110°):

1-4) Построение проекции плоскости (с азимутом падения 150° и углом падения 40° рассмотрено в пункте 3.4.3)

5) От направления простираения (определенного по правилу правой руки) по нарисованной дуге плоскости отсчитываем 110 градусов и ставим точку.

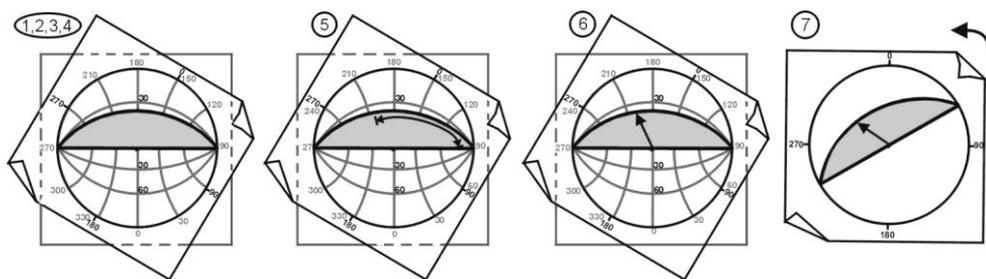


Рис. 3.20. Построение проекции линейных элементов плоскостей (векторов перемещений на плоскостях зеркал скольжения) по сетке Вульфа

б) Для того, чтобы изобразить вектор перемещения для взбросового нарушения, соединяем полученную точку с центром диаграммы и указываем направление относительного смещения для висячего блока.

3.5. Представление полевых геологических данных и результатов реконструкции тектонических напряжений

Результаты проведенной реконструкции напряжений представляются в виде таблиц, различных видов диаграмм и карт. При представлении в виде диаграмм, так же как и для геологических индикаторов (раздел 3.1), используются круговые диаграммы (стереограммы), розы-диаграммы и гистограммы. Наиболее наглядно смотрятся данные по тектоническим напряжениям, представленные в виде различных карт, среди которых следует отметить следующие:

- карты локальных стресс-состояний (рис. 3.21)
- карты ориентировок проекций реконструированных осей главных напряжений (рис. 3.22)
- карты (структурно-кинематические схемы) систем разрывов, сгруппированных в зоны концентрации деформаций разных типов (рис. 3.23)
- карты поля напряжений (объединение локальных стресс-состояний в единое поле напряжений) (рис. 3.24)
- карты распределения типов напряженного состояния (геодинамических режимов) (рис. 3.25).

Вместе с картами удобно располагать диаграммы, показывающие статистическое распределение реконструированных осей главных напряжений для разных точек наблюдения (рис. 3.22, верхний правый угол). На врезке к карте с левой стороны показана круговая диаграмма (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) с плотностным распределением выходов осей σ_3 , а правее расположена розы-диаграммы азимутов погружения (вверху) и углов наклона (внизу) осей σ_3 (показано количество точек с определением локальных стресс-тензоров с шагом 10° для азимутов погружения и с шагом 5° для углов наклона).

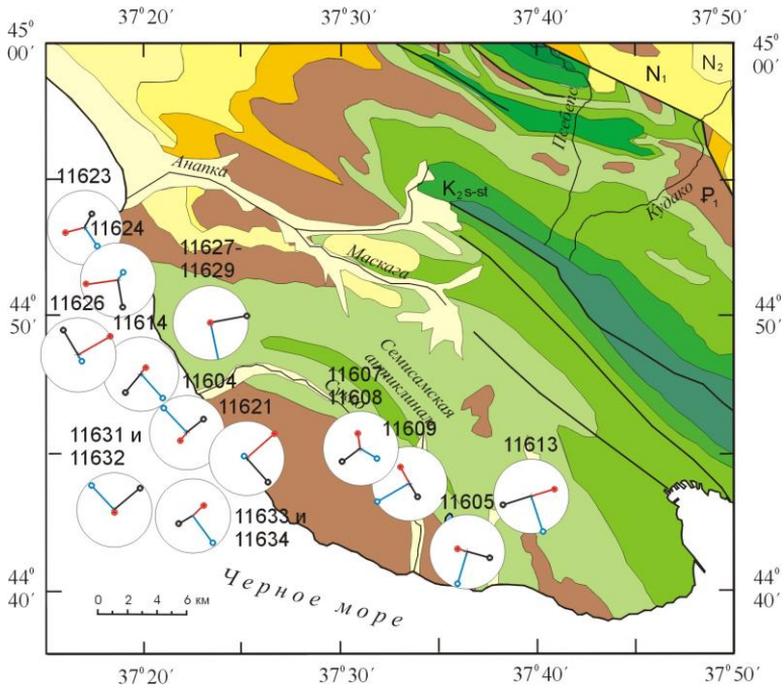
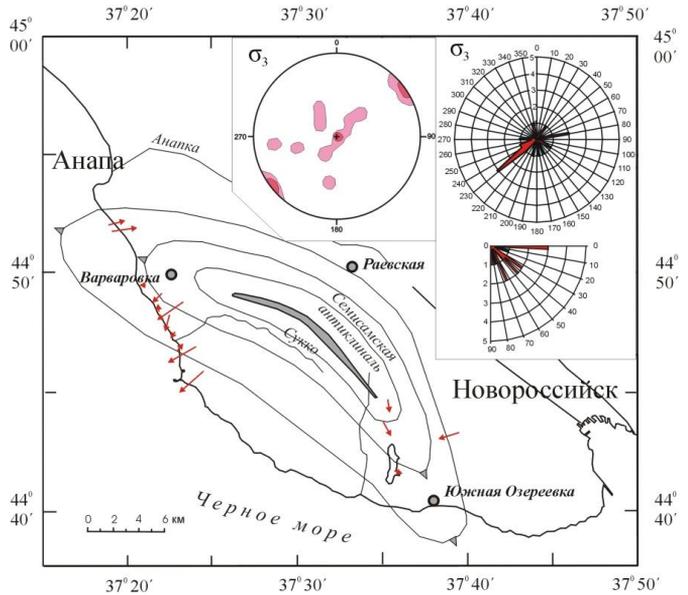


Рис. 3.21. Карта локальных стресс-состояний. На круговых диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) показано положение осей главных напряжений

Рис. 3.22. Карта ориентировки проекций осей максимальных сжимающих напряжений (в пределах Семисамской антиклинали).

Стрелками красного цвета показаны проекции осей (σ_3) максимальных сжимающих напряжений (направление стрелок в сторону погружения, их длина соответствует углу погружения оси с при вертикальном положении стрелки короткие, а при горизонтальном длинные)



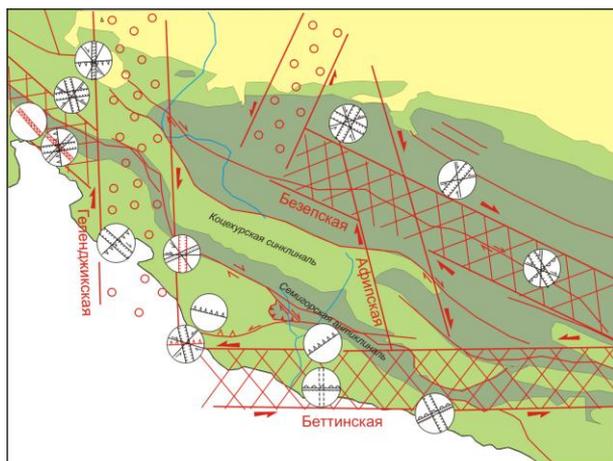


Рис. 3.23. Структурно-кинематическая схема.

На схеме показаны зоны концентрации деформаций с преобладанием определенной кинематической составляющей. Условные обозначения: 1-3 зоны концентрации разрывных деформаций: 1 – взбросо-надвиговых, 2 – сбросо-раздвиговых, 3 – лево- или правостдвиговые (указано стрелками); 4 – простирание систем тектонической трещиноватости с установленным при полевых исследованиях кинематическим типом перемещения

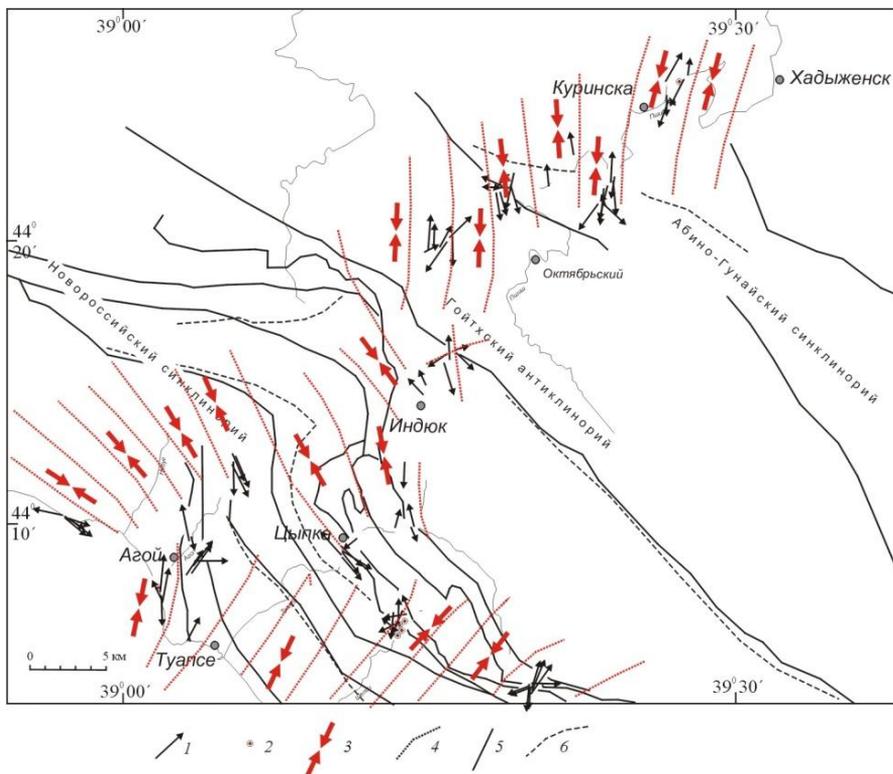


Рис. 3.24. Карта поля напряжений.

Красным цветом показаны направления действия и траектории проекций осей максимальных сжимающих напряжений. Черным цветом ориентировки проекций осей максимальных сжимающих напряжений установленные в точках наблюдения

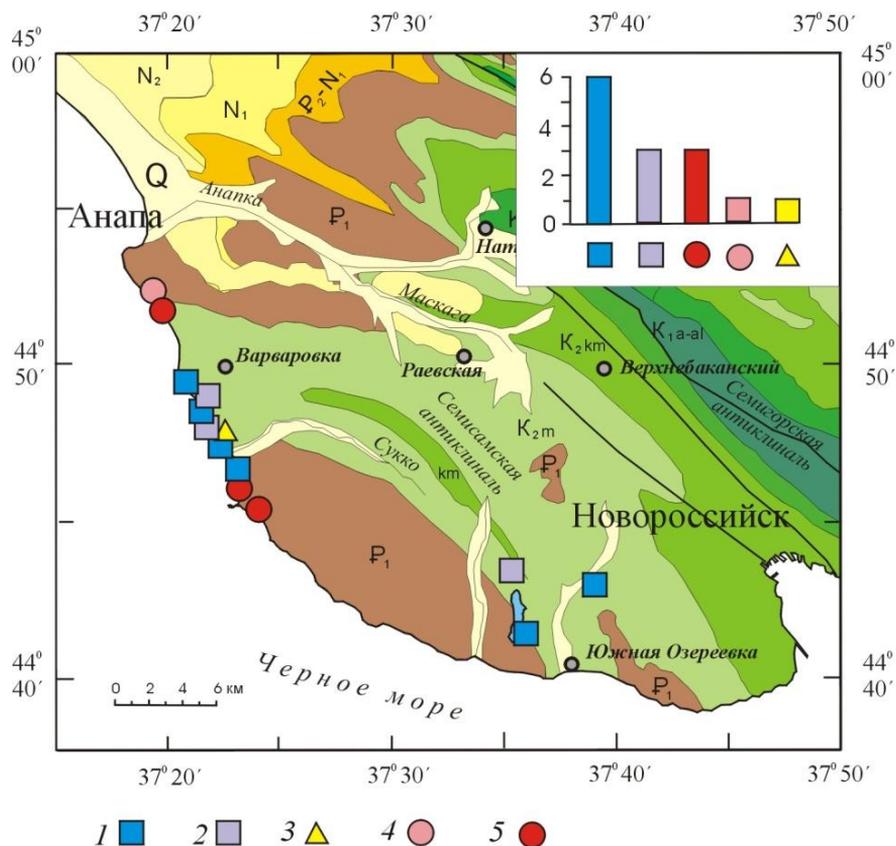


Рис. 3.25. Карта распределения типов напряженного состояния, определяемого в точках наблюдения, с замерах трещин со структурно-кинематической информацией по пространственному положению реконструированных осей главных напряжений (в пределах Семисамской антиклинали).

1 – горизонтальное растяжение, 2 – горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом, 3 – горизонтальный сдвиг, 4 – горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом, 5 – горизонтальное сжатие

ГЛАВА 4. Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и катакластических деформаций по совокупностям сколовых трещин

Все методы реконструкции напряжений и деформаций можно разделить на две основные группы методов: *структурного*, *квазипластического анализа трещин*. В основе такого разбиения методов лежат используемые в них принципы перехода от структурно-кинематических данных о разрывах и трещинах к параметрам искомым тензоров [Ребецкий, 2002, 2007]. Следует отметить, что ранее в указанных работах предлагалось разделить все методы на три группы: *структурного*, *дислокационного* и *квазипластического анализа трещин*.

Отметим, что в методах структурного анализа речь идет о расчете только ориентации главных осей тензора напряжений по структурно-кинематическим данным о трещинах – зеркалах скольжения (ЗС), в методах дислокационного и квазипластического анализа помимо ориентации главных осей тензоров напряжений или приращений сеймотектонических деформаций рассчитывается также коэффициент Лоде – Надаи, определяющий вид этих тензоров. ЗС фиксируют в пространстве ориентацию плоскостей сдвиговых трещин и направлений скольжения по ним для геологических данных и нодальных плоскостей для сейсмологических данных об очагах землетрясений.

В методах *структурного анализа трещин* такой переход обосновывается закономерностями механики разрушения, в методах *дислокационного анализа трещин* – положениями дислокационной пластичности, а в методах *квазипластического анализа трещин* их авторы интуитивно или осознанно используют положения современной теории пластичности. В рамках нового разбиения методы дислокационного анализа вошли в группу методов квазипластического анализа трещин.

Здесь и далее под терминами “*квазипластическое течение*” и “*квазипластическое деформирование*” понимается процесс накопления остаточных, необратимых деформаций, которые возникают за счет разного рода структур кристаллических горных пород (в том числе за счет смещений вдоль разрывов и трещин) много большего размера, чем размер зерен и кристаллов.

4.1. Методы структурного анализа трещин

Совокупность методов структурного анализа берет начало от работ [Becker, 1893; Anderson, 1951; Гзовский, 1954], в которых было предложено связывать ориентацию сколового разрыва с ориентацией главных осей тензора напряжения на основе положений механики разрушений. Эти положения опираются на экспериментальные данные, полученные при деформировании вплоть до разрушения образцов горных пород [Бриджмен, 1955], и соответствуют представлениям теории прочности Кулона, или Кулона – Мора, в которой образование нового разрыва связывается с площадкой действия касательных напряжений высокого уровня при относительно низком уровне нормальных напряжений – плоскость скалывания.

Метод сопряженных пар сколов. Согласно предложенной М.В. Гзовским методике, при реконструкции ориентации главных осей тензора напряжений

(син. осей главных напряжений) следует выделять пары сколовых трещин – разновозрастных трещин, сформировавшихся в условиях однородного поля напряжений, при этом “сопряженность сколовых разрывов двух направлений определяется по их слиянию, взаимному пересечению, противоположности направлений смещений” [Гзовский, 1954, стр. 399].

Линия пересечения этих трещин совпадает с осью промежуточного главного напряжения, а биссектрисы смежных углов – с направлениями осей главных напряжений (рис. 4.1). Согласно экспериментам ось максимального сжатия σ_3 располагается в створе острого угла пары сколов. В методе М.В. Гзовского допускается, что из-за длительного действия сжимающих напряжений плоскости трещин могли испытать повороты и угол, в створе которого находится ось максимального сжатия, становится тупым (более 90°). Поэтому для таких пар сколов расстановка индексов осей главных напряжений осуществляется на основании данных о направлениях смещения вдоль берегов сопряженных пар трещин.

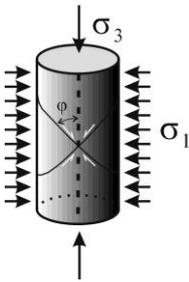


Рис. 4.1. Схема формирования трещин в экспериментах на разрушение образцов горных пород – определение ориентации главных осей тензора напряжений по данным пары сопряженных сколов

Метод P , T осей отдельных механизмов очагов землетрясений. Первыми результатами по определению осей главных напряжений принято считать работы [Балакина, 1962; Балакина и др., 1972], в которых для этого использовали сейсмологические данные. В своих исследованиях А.В. Введенская и Л.М. Балакина считали, что оси P и T отдельных механизмов являются осями алгебраически наименьшего σ_3 и наибольшего σ_1 из главных напряжений соответственно (см. рис. 4.2, а).

По этому поводу в 60-х годах прошлого века в советской сейсмологической науке велась широкая дискуссия. В работах Б.Г. Кострова [1975] было показано, что подобная гипотеза фактически означает, что обе нодальные плоскости (рис. 4.2, б) являются плоскостями действия максимальных касательных напряжений. Если бы горные породы не имели дефектов прочности, связанных с деформациями прошлых эпох, и разрушались бы по плоскостям действия максимальных касательных напряжений (рис. 4.2, в), как это имеет место для металлов (критерий Треска), то тогда оси P и T могли бы рассматриваться в качестве главных осей напряжений. Но на самом деле это не так.

Подобный подход также применялся в работах известных американских ученых М.Д. Зобак и М.-Л. Зобак [M.-L. Zobak, et.al., 1989]. Здесь в качестве осей главных тектонических напряжений принимались направления осей P и T механизмов очагов только сильных землетрясений с магнитудой $M_w > 7$. Это ограничение сопровождалось также разделением землетрясений по качеству определения механизмов очагов на три класса (А, В, С – 10, 20, 30 град). В совокупности

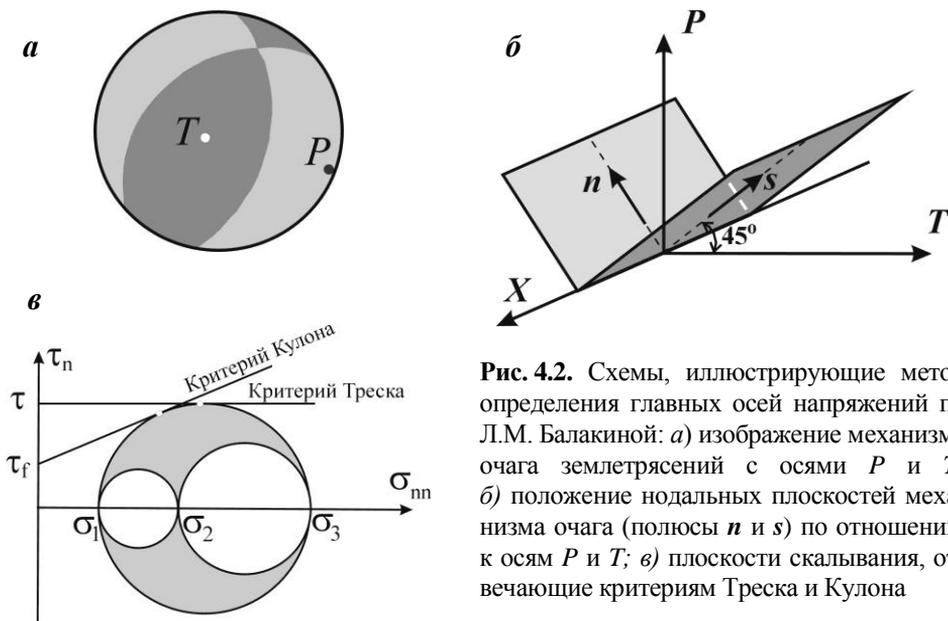


Рис. 4.2. Схемы, иллюстрирующие метод определения главных осей напряжений по Л.М. Балакиной: а) изображение механизма очага землетрясения с осями P и T ; б) положение нодальных плоскостей механизма очага (полюсы n и s) по отношению к осям P и T ; в) плоскости скалывания, отвечающие критериям Треска и Кулона

предложенные фильтры при анализе сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений в некоторых регионах позволяли получить достаточно устойчивую картину ориентации главных осей напряжений.

Понятна причина, по которой авторы этого подхода отказались от использования данных осей P и T для отдельных землетрясений средних и малых магнитуд. Вариабильность их ориентации существенно усложняет картину пространственного распределения осей главных напряжений.

Метод квазиглавных напряжений. В.Д. Парфенов [1981, 1984] предложил метод определения осей главных напряжений, основывающийся на гипотезе о том, что плоскости трещин совпадают с плоскостью действия наибольших касательных напряжений. Допускается, что возможны небольшие отклонения от этого правила. Поэтому для нахождения ориентации главных осей используется совокупность сколовых трещин. Предполагается, что такая совокупность трещин, распределенная в небольшом геологическом объеме, характеризует квазиоднородное напряженное состояние.

Согласно методике В.Д. Парфенова для каждой трещины ($k = 1, \dots, K$) на основе данных об ориентации ее плоскости и направления борозд скольжения на единичной полусфере в стереографической проекции (см. раздел 3.2) строятся оси P^k и T^k (подобно тому, как это делается в сейсмологии по данным о механизмах очагов землетрясений). Таким образом, получают два облака точек (рис. 4.3, а), центры которых определяют как выходы на полусферу осей квазиглавных напряжений σ_3 и σ_1 . Заметим, что при определении положения осей главных напряжений необходимо также соблюдать требование их ортогональности. Автором подхода не указано, как решается проблема выполнения ортогональности осей главных напряжений и их стремление к центрам полученных облаков точек.

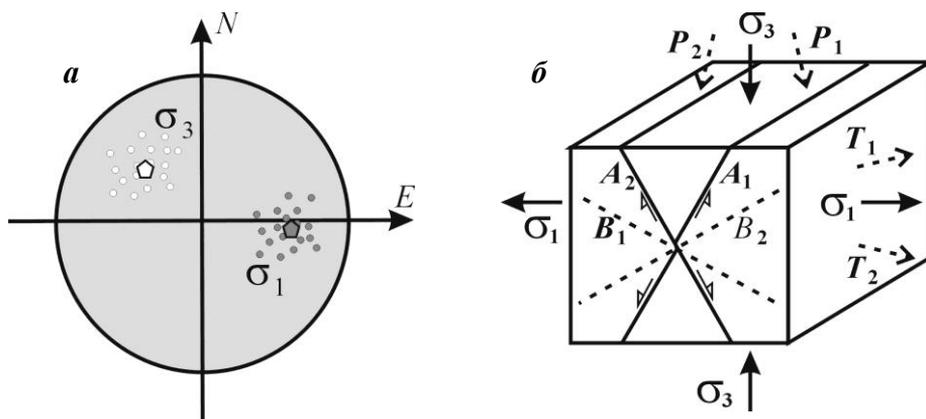


Рис. 4.3. Схемы, иллюстрирующие метод В.Д. Парфенова: *а)* построения на верхней (нижней) полусфере облаков точек выходов осей P (красные точки) и T (синие точки) отдельных трещин и определения их центров в качестве осей главных напряжений; *б)* положение дополнительных плоскостей и осей P и T , построенных подобно тому, как это делается в сейсмологии (пояснения в тексте)

Заметим, что в случае реализации сопряженной пары сколовых трещин согласно результатам экспериментов по разрушению горных пород в остром угле между их плоскостями находится ось напряжений максимального сжатия (рис. 4.1). Для каждой из этих двух трещин (A_1 и A_2 на рис. 4.3, б) можно построить сопряженную плоскость (B_1 и B_2), подобно тому, как это делается в сейсмологии для нодальных плоскостей механизмов очагов землетрясений. Продолжая эту аналогию, для каждой из этих пар «нодальных плоскостей» можно найти положение осей P_1, T_1 и P_2, T_2 . Замечаем, что оси главных напряжений σ_3 и σ_1 будут располагаться между парами таких осей P, T соответственно. Проведенный анализ говорит о том, что если хрупкое разрушение в массиве горных пород реализуется по имеющим ограниченные отклонения от плоскостей скальвания и если при этом реализуются обе системы трещин, симметричные относительно осей главных напряжений, то метод В.Д. Парфенова будет работать.

В исследованиях зарубежных ученых аналогичный метод развивается в работах [Xu et al., 1992; M.-L. Zobak, 1992; Hardebeck, Hauksson, 2001]. Он, как правило, используется для определения напряжений по сейсмологическим данным. В этом случае прямо используются данные об осях P и T отдельных механизмов очагов средне- сильных и слабых землетрясений ($0 < M_w < 6$).

Статистический метод. Существенное развитие анализа трещиноватости было сделано в работах П.Н. Николаева [1977, 1992]. Суть метода состоит в статистическом анализе разброса пространственной ориентации одноранговой совокупности трещин, входящих в однородный по характеру деформирования объем. В результате такого анализа выделяются сопряженные системы трещин. Технически это осуществляется с помощью нанесения данных на прямоугольную диаграмму-матрицу с осями, определяющими соответственно азимут и угол вектора падения плоскости каждой трещины (рис. 4.4, а). Далее в заданном интервале углов простираения и погружения (прямоугольник) производилось суммирование числа полюсов индивидуальных трещин, в него попадающих. Центру интервала

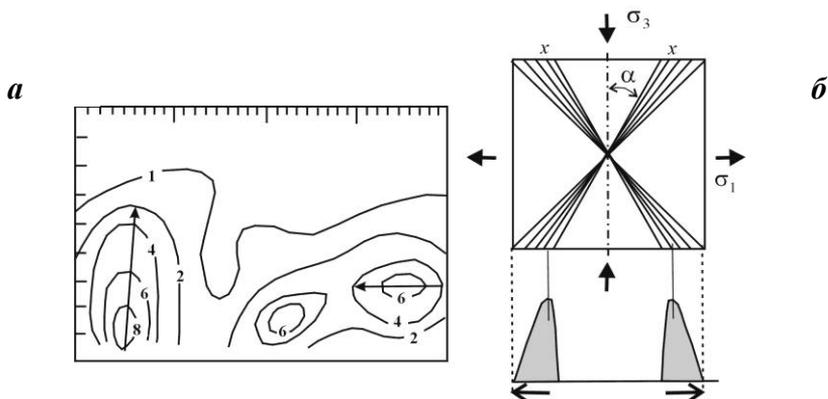


Рис. 4.4. Схема построения на прямоугольной диаграмме (по горизонтали азимут простирания, по вертикали угол погружения/восстания) изолиний плотности выходов полюсов трещин (а) и иллюстрация изменений угла между плоскостью трещины и осями главных напряжений в процессе пластического деформирования пород (б), отражающихся в представительности трещин определенного наклона в системе, связанной с главными осями напряжений. Рисунок из работы [Николаев, 1992]

присваивалось полученное значение. Поиск полюсов сопряженной системы трещин осуществлялся путем выделения локальных максимумов.

Практическое использование метода показало, что на диаграмме-матрице максимумы трещиноватости вместо симметричной формы изолиний равных значений, отвечающей равной вероятности отклонения каждой трещины от центра максимума, имеют явно асимметричный характер. Максимум сдвинут в сторону оси максимального сжатия σ_3 , а преимущественный разброс – в сторону оси максимального девиаторного растяжения σ_1 (рис. 4.4, б).

Выделение на диаграмме-матрице указанной асимметрии, по мнению П.Н. Николаева, служит также доказательством однородности деформирования макрообъема, в пределах которого осуществляется реконструкция напряжений, и однородности исходных данных в виде выборки трещин. Кроме того, асимметрия максимумов трещиноватости позволяла устойчиво осуществлять индексацию осей главных напряжений и для тех стадий деформационного процесса, для которых в ходе последующего тектонического течения угол между сопряженными системами сколов мог превышать 90° .

Следует отметить, что опыт автора в использовании статистического метода реконструкции тектонических напряжений на Тимане и Мезенской синеклизе показал затруднительность однозначного выделения сопряженных пар трещиноватости статистическим методом в рифейских и палеозойских породах Среднего Тимана. Лишь в четвертичных отложениях Мезенской синеклизы обнаружен отчетливо выраженный асимметричный разброс трещин, позволивший установить ориентировки осей главных нормальных напряжений [Сим, 1980, 2000].

Метод тектонодинамического анализа. П.Н. Николаев разработал методику определения параметров напряженного состояния коры разных масштабных уровней [Николаев, 1987, 1992], в которой помимо данных о трещинах использовались и результаты дешифрирования аэро- и космоснимков. При этом выделяемые по резуль-

татам дешифрирования линеаменты требовали заверки наземными наблюдениями. Рассматривались три масштабных ранга полей напряжений, захватывавших последовательно верхнюю кору, кору в целом, литосферу в целом (три ранга).

В рамках такого подхода П.Н. Николаевым производилось ранжирование трещин, линеаментов, разрывов и устанавливалась связь их формирования с тектонодинамическими системами разных рангов. Им были выделены три основных типа поля напряжений, характеризующихся разной степенью разброса на стереограммах осей главных напряжений низшего уровня, а также специфическим распределением на них зон покрытия разными главным напряжениями.

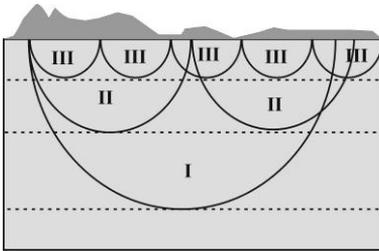


Рис. 4.5. Схема по П.Н. Николаеву, определяющая соотношение систем напряженных состояний разного ранга, охватывающих по глубине разные уровни литосферы. Рисунок с упрощениями из работы [Николаев, 1992]

Морфокинематический метод. Данный метод, основанный на изучении и детальном картировании внутренней структуры зоны скалывания вблизи разлома, предложен в работах [Гинтов, Исая, 1984а, б]. При этом под зоной скалывания понимается линейно вытянутая область развития тех или иных структурных и динамоморфических парагенезисов. Этот метод в определенном смысле можно рассматривать как существенное развитие подхода к определению структурно-кинематических параметров крупных разломов и параметров тензора напряжений соответствующего масштабного уровня по изучению совокупности ориентации различных типов более мелких структур: сколовых трещин, трещин отрыва, структур сжатия и складок волочения, образующихся в зоне скалывания более крупного разлома (рис. 4.6).

Неизвестные параметры тензора напряжений (ориентация главных осей), среднего для объема, охватывающего целиком зону скалывания, связываются в этом методе с количественными данными об ориентации указанных выше структур в предложенной авторами системе уравнений.

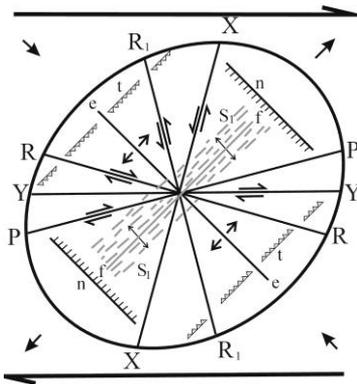


Рис. 4.6. Прогноз вторичных структур по Ханкоку (принципиальная схема по работам P.L. Hancock) в зоне локализации горизонтального сдвига: R и R_1 – сопряженные сколы Риделя, Y – магистральные сдвиги, X , P – вторичные сдвиги, e – отрывы, n – сбросы, t – взбросы, f – складки, S_1 – кливаж

Структурно-геоморфологический метод. В основу структурно-геоморфологического (СГ) метода Л.А. Сим [1991; 2000] положено предположение о преобладающих сдвиговых перемещениях по разломам фундамента платформ в новейший этап.

Обоснованием преобладания сдвиговых перемещений по разломам осадочного чехла платформ являются следующие данные:

1. Подавляющее большинство разломов в осадочном чехле ориентировано суб-вертикально, что требует сдвигового поля напряжений с горизонтально ориентированными осями максимальных (σ_3) и минимальных сжимающих (девиаторное растяжение σ_1) напряжений;
2. Отсутствие вблизи дневной поверхности литостатических напряжений, что приводит к горизонтальному положению оси сжатия [Ребецкий, 1987, 1988; Ребецкий, Михайлова, 2011, 2014];
3. Данные математического [Ребецкий, 1987, 1988] и физического [Михайлова, 2007] моделирования сдвигов, показывающие концентрацию касательных напряжений над сдвигом в фундаменте непосредственно в основании осадочного чехла и на дневной поверхности.

В зонах сдвигов развиваются опережающие и опережаемые разрывы с закономерной ориентировкой: две системы сколовых трещин и одна система отрывов. Взаимная ориентировка этих трех систем разрывов и ориентация их по отношению к сдвигу была установлена как по полевым данным, так и по данным физического моделирования; М.В. Гзовский обобщил эти данные и выделил 4 возможных варианта взаимной ориентировки опережающих разрывов в зоне правого (и зеркального – в зоне левого) сдвига [Гзовский, 1975]. В СГ методе производится дешифрирование линеаментов – возможных сдвигов, вблизи которых выделяются мелкие прямолинейные элементы рельефа (мегатрещины). СГ метод применяется тогда, когда взаимные ориентировки мегатрещин как между собой, так и относительно плоскости линеамента находятся в соответствии с одним из вариантов ориентации разрывов оперения в зонах сдвигов, выделенных М.В. Гзовским. В этом случае принимается, что линеамент и мегатрещины имеют разломную природу. По данным об ориентации мегатрещин по отношению к линеаменту восстанавливаются: А) направления осей максимального девиаторного сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости; Б) устанавливается знак сдвига (правый или левый); В) выявляется обстановка дополнительного сжатия или растяжения, ориентированного нормально к плоскости сдвига [Сим, 1991; 2000]. В одном из следующих разделов будет дано более развернутое описание основных положений и алгоритма работы СГ метода.

Метод тройственного парагенезиса трещин К.Ж. Семинского [2003]. Массовые замеры трещиноватости в зонах разломов позволяют на стереографических проекциях выделить три системы полюсов трещин, плоскости которых приблизительно перпендикулярны друг другу. Наибольшая плотность полюсов трещин отвечает главной системе. Ориентация трещин второстепенной системы зависит от кинематического типа разлома, для которого определяется тройственный парагенезис (рис. 4.7).

Для напряженного состояния горизонтального сдвига второстепенная система трещин вертикальна. Для разломов в обстановке сжатия и растяжения она

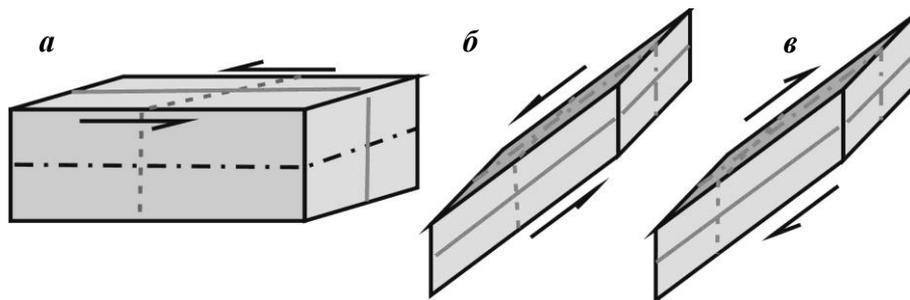


Рис. 4.7. Расположение тройственной системы трещин: *а*) в вертикальной зоне разлома в обстановке горизонтального сдвига; *б*) в наклонной зоне разлома типа сброс (обстановка растяжения); *в*) в наклонной зоне разлома типа взброс (в обстановке сжатия). Зона разлома имеет светло-серую заливку, ближний (*а*) и верхний (*б*, *в*) борта разлома имеют темно-серую заливку. Системы трещин: главная – сплошная линия, второстепенная – штрих-пунктир с точкой, дополнительная – короткий штрих-пунктир

простирается так же, как и главная, но имеет противоположное погружение. Трещины главной и второстепенной систем являются сопряженными. Третья система именуется дополнительной. Она горизонтальна для обстановки горизонтального сдвига и вертикальна для обстановки сжатия и растяжения.

Для определения положения этих полюсов систем трещин используются изолинии плотностей выходов полюсов индивидуальных трещин на стереографическую плоскость. Максимум изолиний полюсов индивидуальных трещин определяет положение полюса данной системы. Ось промежуточного главного напряжения σ_2 совпадает с линией пересечения главной и дополнительной систем трещин. Оси главных напряжений σ_3 и σ_1 располагаются в створе плоскостей главной и дополнительной систем трещин.

Используя результаты физических экспериментов по моделированию зон горизонтального сдвига [Бокун, 1991, 2009; Борняков, 1980; Гзовский, 1975; Гинтов, 2005; Стоянов, 1977; Cloos, 1930; Ridel, 1929; Tchalenko, 1968], можно утверждать, что главная и второстепенная системы трещин в методе К.Ж. Семинского – это R и R' сколы соответственно. Дополнительная система трещин формируется в направлении, перпендикулярном оси промежуточного главного напряжения. В тектонофизических экспериментах она не проявляется и ранее никем не выделялась [Hancock, 1985; Sylvester, 1988].

Фрактографический метод. Метод П. Банквитца [Bankwitz P., 1966; Bankwitz P., Bankwitz E., 1984] заключается в анализе морфологии трещин отрыва (фото 4.1). Отрывы развиваются при хрупком или квазихрупком поведении материала. «Фрактографические структуры на поверхности трещин – это окаменевшие свидетельства» напряженного состояния, которое обусловило процесс разрушения и повлияло на характер его течения. Они содержат информацию об ориентации горизонтальных осей главных нормальных напряжений и об анизотропии напряжений» [Банквитц, 2000, стр. 266-267].

Спецификой трещин отрыва являются наличие на них точки роста трещины и симметрично расположенные фрактографические признаки - «перья отрыва» (фото 4.1). В однородном массиве следы распространения разрывов образуют



Фото 4.1. а) ось максимального сжатия субвертикальна, б) ось максимального сжатия субгоризонтальна

радиально расходящиеся следы вспарывания (фото 4.1, а), в случае слоистого строения массива следы распространения разрыва образуют центральные оси, от которых распространение следов роста упирается в верхнюю и нижнюю границы слоя (фото 4.1, б). На трещинах отрыва выделяют кольцевые структуры (ундуляции), линии остановки роста трещин, зоны краевых трещин с засечками, кулисами. В методе крайне важна тщательная документация фрактографии трещин отрыва (положение и величина начальной плоскости в целом, положение и величина краевых зон, ширина краевой зоны, положение краевых трещин и т.д. дают возможность классификации геологических тел по их прочности и расходу энергии на разрушения [Банквитц, 2000]).

В самом простом случае анализа трещины отрыва ось растяжения ориентирована нормально к плоскости трещины, а ось максимального сжатия параллельна оси симметрии и лежит в плоскости трещины.

Все рассмотренные выше методы используют представления, базирующиеся на закономерностях квазиоднородного деформирования на стадии разрушения как в образцах, так и в массивах горных пород. Фактически предполагается, что сколовые трещины, являющиеся исходными для реконструкции, образовывались в период времени, в течение которого поле напряжений либо было близким к постоянному, либо параметры тензора напряжений менялись пропорционально одному параметру (условие простого нагружения). В силу этого одна из главных задач реконструкции состоит в выделении однородно деформируемых, в общем случае, четырехмерных пространственно-временных объемов, в пределах которых и должна осуществляться выборка ЗС. Если при использовании ЗС, получаемых на основе геологических наблюдений, проблема однородности деформирования в пространстве решается на стадии сбора материала, то проблему выделения временных интервалов (этапов) однородного деформирования, как правило, приходится решать на стадии обработки данных.

Во всех методах существуют свои критерии, по которым возможно создание однородной выборки ЗС. Это сопряженные пары или системы сколов в методах М.В. Гзовского, П.Н. Николаева и К.Ж. Семинского, соответствие системы

оперяющих сколов положению главного разлома в методе О.Б. Гинтова [Гинтов, Исай, 1986] и т.д. Из перечисленных методов реконструкции только в методе П.Н. Николаева имеется возможность создания формализованных приемов выделения объемов, однородных во времени и пространстве. Однако такой прием выделения однородных пространственно-временных объемов не может считаться удовлетворительным в силу его интегральности. Он малочувствителен к отдельным событиям и может проявляться лишь на статистически представительных множествах.

Особо следует отметить одно важное положение, лежащее в основе метода тектонодинамического анализа П.Н. Николаева. Оно касается смещения максимума трещиноватости (нормали к плоскостям трещин) в сторону оси максимального девиаторного сжатия при наличии большого разброса в направлении оси максимального девиаторного растяжения (см. рис. 4.4). Это положение соответствует критерию прочности теории Кулона – Мора и отвечает результатам экспериментальных наблюдений над образцами горных пород. Таким образом, можно говорить, что результаты экспериментов над образцами были подтверждены исследованиями П.Н. Николаева в массивах горных пород.

Сделанный ранее анализ (рис. 4.2, б), показывает, что метод В.Д. Парфенова дает систематическую ошибку в случае, когда в массиве реализуется не чистый, а простой сдвиг [Надаи, 1969]. Величина такой ошибки в определении осей главных напряжений σ_3 и σ_1 будет составлять порядка 12-15°.

Особо следует отметить, что статистический анализ множества трещин, в том виде как он реализован в методах П.Н. Николаева и В.Д. Парфенова, фактически определяет не направления осей главных напряжений, а ориентацию осей главных катакластических – трещинных деформаций. Именно с этим связана устойчивость работы методов при достаточном количестве исходных данных.

Возвратимся теперь к широко используемому в сейсмологии методу М.-Л. Зобак. В нашем обзоре мы привели этот метод, а также метод В.Д. Парфенова, которые ориентированы на использование данных о механизмах очагов землетрясений, т.к. подобные подходы начинают также часто использовать и геологи [Marrett, Allmendinger, 1990].

Предложенные в методе М.-Л. Зобак фильтры при переходе от осей P и T отдельных механизмов очагов землетрясений к осям главных напряжений, решая часть проблемы реконструкции напряжений (устойчивость ориентации главных осей в пространстве), создают систематическую ошибку в их определении.

Это связано с тем, что совпадение осей P и T с соответствующими осями главных напряжений фактически означает, что в методе предполагается совпадение плоскости разрыва в очаге с плоскостью действия максимальных касательных напряжений. Подобные представления существовали в геологии и в сейсмологии в первой половине прошлого века, но после экспериментальных исследований [Mogi, 1964; Byerlee, 1967, 1978; Brace, 1978; Ставрогин, Протосеня, 1992; и др.] были отвергнуты. В этих экспериментах было показано, что трещины в изначально однородных и ненарушенных образцах горных пород развиваются вблизи положения плоскости скалывания. Для образцов, имевших предварительно подготовленные внутренние дефекты прочности, хрупкое разрушение может

развиваться на плоскостях трещин, имеющих достаточно сильное отклонение от ориентации плоскости скальвания [Ребецкий, 2007].

Таким образом, при обсуждении методических основ работы [М.-Л. Zobak, 1992] нам приходится вернуться на 40 лет назад к известным дискуссиям, возникшим в работах Б.В. Кострова [1975] и А.В. Введенской [1961, 1969], о том, можно ли в качестве тектонических напряжений прямо использовать данные об ориентации снимаемых напряжений в очагах единичных сильных землетрясений. И хотя в теоретических работах Б.В. Кострова и в практических реконструкциях [Гущенко, 1996, 1999; Ребецкий, 2007] было показано, что этого делать нельзя, многие авторы продолжают идти этим более простым, но менее достоверным по получаемым результатам путем.

Иллюстрация неточности в понимании взаимосвязи тензора напряжений с морфологией хрупкого разрушения, вытекающая из подхода Л.М. Балакиной и М.Л. Зобак, приведена на рис. 4.8, а. Для хрупкого разрушения однородно деформируемых образцов характерно совпадение положения плоскости трещин с плоскостью скальвания горной породы. Плоскости скальвания представляют собой сопряженную пару, каждая из которых отклоняется от плоскости действия максимальных касательных в сторону оси максимального сжатия (σ_3) на угол φ_f (рис. 4.8, б).

На диаграмме Мора (рис. 4.8, а) нормальному σ_n и касательному τ_n напряжениям на этих плоскостях отвечают точки A и A' , лежащие на большом круге Мора соответственно в верхнем и нижнем его секторах. Эти плоскости отклоня-

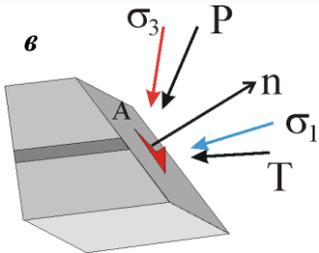
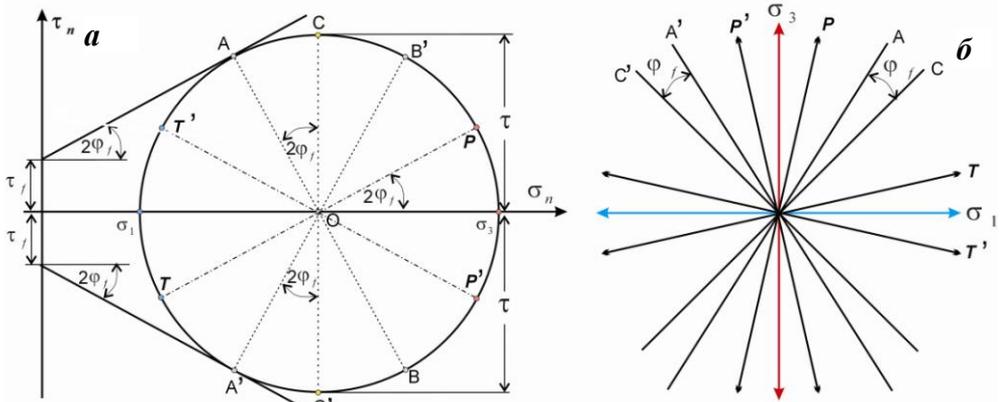


Рис. 4.8. Диаграмма Мора (а), 2D схема ориентации главных осей напряжений, плоскостей скальвания и максимальных касательных напряжений в плоскости, ортогональной оси промежуточного главного напряжения σ_2 (б), 3D схема ориентации осей главных напряжения и осей P и T по отношению к плоскости разрыва, совпадающей с плоскостью скальвания – точка A на диаграмме Мора (в).

A, B, P, T – индексы для напряженных состояний на двух нодальных плоскостях и для нормальных напряжений вдоль главных осей сжатия и растяжения снимаемых напряжений для первого землетрясения, A', B', P', T' – такие же индексы для второго землетрясения. Оба землетрясения имеют одну нодальную плоскость, совпадающую с одной из сопряженных плоскостей скальвания. Пояснение в тексте

ются от плоскостей действия максимального касательного напряжения τ (точки C и C'). На моровской параметрической области все углы между нормальными n к плоскостям, попадающим на большой круг Мора, увеличиваются вдвое по отношению к нашему трехмерному пространству (рис. 4.8, б). Углу φ_f на рис. 4.8, б между нормальными к плоскости внутреннего трения (точки A и A') и плоскости максимального касательного напряжения (C и C'), в моровой параметрической области отвечает угол $2\varphi_f$ (рис. 4.8, а). Считается, что для горных пород угол φ_f может изменяться в диапазоне 13-18°.

Будем полагать, что точка A определяет напряжения, действующие на плоскости очага землетрясения (первая нодальная плоскость). Т.е. плоскость очага землетрясения совпадает с плоскостью скальвания для тензора напряжений, действующего в окрестности очага. Заметим, что наши исследования [Ребецкий, 2007] показывают, что чем выше магнитудный уровень землетрясения, тем чаще встречается ситуация, когда реализованная в очаге плоскость на диаграмме Мора близко расположена к плоскости скальвания. Однако это не является правилом, а лишь встречается в каких-то районах более, а в каких-то менее часто.

Найдем на диаграмме Мора напряжения, отвечающие второй нодальной плоскости, сопряженной к плоскости A . Этой плоскости будет отвечать точка B . Нормали к плоскостям для этих точек отличаются в моровом пространстве на 180°, что в нашем пространстве как раз и дает необходимые 90°. Мы видим, что точка B очень далеко отстоит от точки A' , определяющей положение плоскости скальвания. Это говорит о том, что вторая нодальная плоскость не может реализоваться в качестве разрыва в данном напряженном состоянии. Сопряженной паре нодальных плоскостей A и B механизма очага землетрясения будут отвечать снимаемые напряжения, действующие на плоскостях, отклоняющихся от плоскостей A и B на 45° в нашем пространстве и на 90° в моровом. На рис. 4.8, а напряжения, действовавшие на этих плоскостях до активизации разрыва, показаны точками P и T . Видно, что на этих плоскостях действовали касательные напряжения, а нормальные напряжения отличаются как по величине, так и по направлению (в нашем пространстве на угол φ_f) от главных напряжений соответственно σ_3 и σ_1 .

Если теперь сопряженную плоскость скальвания A' рассматриваемого на рис. 4.8, а напряженного состояния принять в качестве плоскости очага другого землетрясения, то ей будет отвечать сопряженная нодальная плоскость B' и снимаемые напряжения P' и T' . Мы видим, что оси этих снимаемых напряжений, так же как и для первого очага землетрясения, отличаются от положения осей главных напряжений σ_3 и σ_1 на угол φ_f , который при этом отсчитывается в противоположном направлении. На рис. 4.8, в в трехмерном пространстве показано взаимоотношение плоскости разрыва с осями главных напряжений и осями P и T для случая, когда плоскость разрыва параллельна плоскости скальвания, т.е. ее напряженное состояние совпадает с предельной точкой A . Этот рисунок фактически повторяет рис. 4.8, б.

О чем говорят результаты выполненного анализа? Они говорят о следующем: если для какого-то участка коры будут существовать два землетрясения, плоскости очага которых совпадали с сопряженными плоскостями скальвания действующего здесь напряженного состояния, то ориентации соответственно P и

T осей этих землетрясений будут отличаться на угол $2\varphi_f$. При этом оси P и T каждого из землетрясений будут отличаться от ориентации главных напряжений на угол φ_f (рис. 4.8, б).

Таким образом, применение подхода А.В. Введенской и М.-Л. Зобак помимо высокой неустойчивости ориентации главных осей напряжений, определяемых по положению осей P и T механизмов очагов сильных землетрясений, имеют систематическую ошибку 13-18°. Это положение может подправить методика В.Д. Парфенова по определению в качестве квазиглавных напряжений центра облака выходов на единичную полусферу соответственно осей P и T отдельных механизмов. Однако здесь более важно само непонимание авторами, применяющими эти подходы, закономерности взаимосвязи морфологии хрупкого разрушения и параметров тензора напряжений, которое затем проявляется и в интерпретации получаемых данных о напряженном состоянии.

Также следует отметить одно важное обстоятельство. Как это следует из выражений (П.25), приведенных в приложении для правильного перехода от осей главных напряжений к величинам напряжений, действующим в любой другой системе координат (в том числе и топоцентрической, как это делается в работах М.-Л. Зобак и ее последователей) необходимы данные о значении коэффициента Лодде – Надаи. Этих данных в методе М.-Л. Зобак и поэтому она априорно задает этот параметр, отвечающим чистому сдвигу (т.е. принимает равным нулю). Это гипотеза хорошо работает в зонах субдукции [Ребецкий, Маринин, 2006а, б; Ребецкий, 2009; Ребецкий, Полец, 2014; Rebetsky, et al., 2016], но не работает в континентальных сейсмоактивных областях [Ребецкий, 2015; Ребецкий и др., 2013; 2016; Ребецкий, Алексеев, 2014; Rebetsky, et al., 2012].

Обсуждаемый метод М.-Л. Зобак в настоящее время применяется в основном при работе с сейсмологическими индикаторами разрывных деформаций, но метод В.Д. Парфенова, использующий фактически аналогичные постулаты предложен именно для обработки сколовых трещин. Поэтому мы посчитали важным высказать представленные выше замечания.

4.2. Методы квазипластического анализа трещин

Методы квазипластического анализа, так же как и методы структурного анализа, направлены на реконструкцию параметров напряженного состояния. В этих методах данные о направлениях относительных движений бортов разрывов используются на равноправной основе с ориентацией плоскости скола. Название этой группы методов связано с тем, что в ней могут развиваться подходы, использующие не только данные о хрупких трещинах скальвания (например, метод Л.М. Расцветаева).

Считается, что для большинства методов, включенных в эту группу, базисом для реконструкции природных напряжений является гипотеза о совпадении смещения на разрыве с направлением касательных напряжений [Wallace, 1951; Vott, 1959]. Поскольку эта гипотеза лежит в основе теории дислокационной пластичности [Батдорф, Будянский, 1961], то ранее [Ребецкий, 2002, 2003, 2007] эти методы были объединены в методы дислокационного анализа трещин. В методе О.И. Гущенко [1981], который можно рассматривать в качестве примера целой группы методов второй половины XX века (методы Ж. Анжелье,

Дж. Гепхарда, Э. Майкла, С.Л. Юнги), положения теории дислокационного скольжения Батдорфа – Будянского использовались в качестве обоснования. Ниже приведены три базовых положения метода О.И. Гущенко, которые распространяются и на указанные выше методы также:

1. В процессе упругопластического деформирования преобразование части упругих деформаций в необратимые (остаточные), обуславливающее диссипацию упругой энергии в объеме геосреды, может осуществляться как за счет сдвигов по вновь образующимся поверхностям нарушений сплошности геоматериала, так и за счет смещения берегов уже существующих трещин и разрывов различного масштабного уровня,
2. Каждое индивидуальное смещение вдоль поверхности трещины возмущает поле напряжений только более низкого масштабного уровня и не влияет на кинематику трещин этого же масштаба,
3. Направление среднего вдоль поверхности скола смещения совпадает с направлением действия среднего на этой поверхности касательного напряжения, отвечающего искомому для квазиоднородного объема тензору средних напряжений.

Отметим отличие последнего положения от гипотезы, высказанной ранее в работах [Wallace, 1951; Bott, 1959] о том, что направление перемещения сразу после возникновения скола должно совпадать с направлением максимального касательного напряжения на плоскости разрыва, действовавшего здесь перед его возникновением. Именно второй постулат об отсутствии взаимного влияния трещин одного ранга определяет совпадение третьего постулата дислокационного анализа и постулата Уоллеса и Ботта.

Положения метода О.И. Гущенко [1981] и методов, близких к нему по идеологии, используют принципы дислокационной теории пластичности, что в приложении к реальным горным породам, изначально имеющим большое число разнонаправленных поверхностей пониженной прочности, является более перспективным по сравнению с методами, построенными на принципах механики разрушения. В рамках этого направления удалось найти достаточно эффективные формализованные способы выделения однородно деформированных объемов, а также сочетать численные приемы нахождения максимума “функции однородности” и графические приемы, основанные на приведенных выше неравенствах. Кроме того, здесь удается, помимо ориентации главных осей тензора напряжений, определять и соотношение величин главных напряжений – коэффициент Лоде – Надаи.

К проблемам данного подхода следует отнести экспериментально наблюдаемый факт отклонения ориентации сколовых смещений от теоретически предсказываемых (до 90°). В методах нахождения максимума “функции однородности” эти расхождения связывают с неточностью экспериментальных данных [Никитин, Юнга, 1977] и локальной анизотропией на плоскости разрыва. В кинематическом методе О.И. Гущенко делается попытка объяснить эти различия в рамках предположения о постоянстве ориентации осей главных напряжений и изменчивости во времени коэффициента вида напряженного состояния (одноосное напряженное состояние [Гущенко, 1982]). Последнее выглядит новым дополнительным постулатом, устанавливающим различную зависимость от краевых условий нагружения и свойств среды, вообще говоря, равноправных параметров тензора напряжений: углов Эйлера, определяющих ориентацию глав-

ных осей тензора, и коэффициента Лодэ – Надаи, характеризующих соотношение величин главных напряжений.

В конце прошлого века начал развиваться метод катакластического анализа разрывных смещений [Rebetsky, 1996, 1998; Rebetsky, et al., 1997; Ребецкий, Фурсова, 1997; Ребецкий, 1997, 1999]. Основные положения этого подхода определяются энергетическими ограничениями теории пластичности:

1. В процессе упругопластического деформирования преобразование части упругих деформаций в необратимые (остаточные), обуславливающие диссипацию упругой энергии в объеме геосреды, может осуществляться как за счет сдвигов по вновь образующимся поверхностям нарушений сплошности геоматериала, так и за счет смещения берегов уже существующих трещин и разрывов различного масштабного уровня,
2. Разрывы и трещины одного ранга могут влиять друг на друга, что приводит к отклонению среднего смещения на их плоскости от направления среднего касательного напряжения для искомого тензора напряжений.
3. Каждое разрывное смещение, реализующееся на трещине или разрыве, на искомом тензоре напряжений, должно приводить только к уменьшению упругой энергии геосреды и формированию необратимых деформаций в направлениях действия главных напряжений в соответствии с принципом упорядоченности.
4. В своей совокупности разрывные смещения формируют тензор необратимых катакластических деформаций, для которого искомым тензор напряжений доставляет максимум диссипации упругой энергии.

Как видно, только первое положение этого подхода совпадает с положением метода теории дислокаций. Второе положение прямо ему противоречит. Два последних положения являются абсолютно уникальными, ранее никем не сформулированными.

Выполненный в работе [Ребецкий, 2007] анализ показал, что все выше перечисленные авторские методы напрямую не использовали постулат [Wallace, 1951; Bott, 1959]. Считалось, что необходимо найти такой тензор напряжений, для которого отклонения от этого постулата будут минимальные. Это фактически означает, что использовались алгоритмы, вытекающие из положений метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого. Поэтому в настоящий момент все указанные методы объединены в единую группу методов квазипластического анализа трещин.

Методы определения параметров тензора напряжений, использующие представленные выше положения, можно разбить на две группы:

- численные методы реконструкции тензора тектонических напряжений на основе нахождения экстремума “функций однородности” для выборки ЗС;
- графические методы выделения областей допустимой ориентации главных осей тензора тектонических напряжений на основе анализа кинематических ограничений.

На первый взгляд, различие между двумя направлениями состоит лишь в технике реализации одних и тех же базовых гипотез. Однако практическое применение этих методов показывает, что различие носит более принципиальный характер, поскольку именно в рамках второй группы методов удалось создать алгоритмы формирования однородных выборок ЗС, чувствительных к параметрам отдельных сколов.

Следует отметить, что в этой группе методов в 60-70е годы прошлого века развивались также подходы по расчету тензора приращений необратимых деформаций, накапливаемых за счет разрывных смещений, – квазипластические деформации. Исходными для расчета являлись как сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений, так и геологические данные о зеркалах скольжения. Сейсмологи и геологи интуитивно развивали эти подходы, не сформулировав его теоретической базис.

Таким образом, к концу XX века сформировались методы, в которых по одним и тем же данным можно было определить параметры как тензора напряжений, так и тензора приращений сеймотектонических деформаций. При этом единственным методом, в котором выполнялся расчет обоих тензоров, являлся метод катакластического анализа трещин Ю.Л. Ребецкого. В нем расчет этих тензоров велся не просто параллельно, а связано (см. далее).

Нахождение экстремума “функции однородности”. Это направление реконструкции тензора тектонических напряжений развивается в работах большой группы исследователей (в основном России, Франции и США [Carey, Bruneier, 1974; Никитин, Юнга, 1977; Angelier, 1975a, b; Angelier et al., 1982; Gephart, Forsyth, 1984; Carey-Gailhardis, Mercier, 1987]) и базируется на нахождении максимума “функции однородности” ЗС (“функции совместности” по С.Л. Юнге) для совокупности (выборки) сколовых трещин – зеркал скольжения ($k = 1, \dots, K$):

$$F_1 = \sum_{\alpha=1}^A \left(\frac{(\mathbf{u}^\alpha \mathbf{t}^\alpha)}{|\mathbf{u}^\alpha \parallel \mathbf{t}^\alpha|} \right). \quad (4.1)$$

Это сложное на первый взгляд выражение на самом деле имеет простую интерпретацию. Искомой ориентацией осей главных напряжений для совокупности сколов с нормальными \mathbf{n}^k является такая, для которой сумма косинусов углов θ^k между направлением смещения \mathbf{u}^k на этих плоскостях сколов и направлением касательных напряжений \mathbf{t}^k (рис. 4.9) будет минимальная.

В выражении (4.1) искомая функция представляет собой сумму скалярных произведений известного единичного вектора подвижки \mathbf{u}^k на поверхности скола и единичного вектора касательного напряжения \mathbf{t}^k . Выражение (4.1) можно переписать в виде:

$$F_1(\alpha, \beta, \varphi, \mu_\sigma) = \sum_{\alpha=1}^K (\cos \theta^k) = \sum_{\alpha=1}^K (\ell_{us}^k \ell_{ts} + \ell_{up}^k \ell_{tp}). \quad (4.2)$$

Здесь ℓ_{us}^k, ℓ_{up}^k – направляющие косинусы вектора скольжения \mathbf{u}^k с векторами простираения \mathbf{s}^k и погружения \mathbf{p}^k плоскости, нормалью к которой является вектор \mathbf{n}^k . Это известные величины для сколов из выборки. Направляющие косинусы отвечают углам между вектором касательных напряжений \mathbf{t}^k и векторами простираения и погружения плоскости с нормалью \mathbf{n}^k .

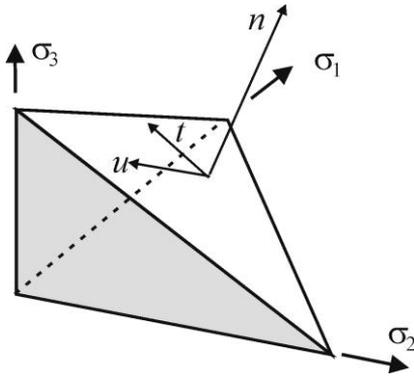


Рис. 4.9. Схема, определяющая угол между единичным вектором касательных напряжений \mathbf{t} и единичным вектором смещений \mathbf{u} на плоскости с нормалью \mathbf{n}

Величины l_{is} , l_{ip} можно определить, задавая всевозможные ориентации осей главных напряжений. Для этого вначале, варьируя углы Эйлера ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$, $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$), определяем [Ребецкий, 2007] направляющие косинусы l_{Ni} , l_{Ei} , l_{Zi} осей главных напряжений σ_i ($i = 1, 2, 3$).

Затем рассчитаем направляющие косинусы для векторов \mathbf{n}^k , \mathbf{s}^k и \mathbf{p}^k в системе координат, связанной с главными осями напряжений

$$l_{ri}^k = l_{Ni} l_{rN}^k + l_{Ei} l_{rE}^k + l_{Zi} l_{rZ}^k, i = 1, 2, 3, r = n, s, p. \quad (4.3)$$

Здесь l_{rN}^k , l_{rE}^k , l_{rZ}^k ($r = n, s, p$) - направляющие косинусы векторов \mathbf{n}^k , \mathbf{s}^k и \mathbf{p}^k в географической системе координат.

Далее, используя выражения для напряжений на наклонных площадках и значения главных напряжений через максимальное касательное напряжение, среднее напряжение и коэффициент Лоде – Надаи, находим компоненты касательных напряжений σ_{ns} и σ_{np} на плоскости с нормалью \mathbf{n}^k . Эти касательные напряжения будут зависеть не только от направляющих косинусов главных напряжений l_{ri}^k , но и от μ_σ и максимального касательного напряжения τ . Нормируя эти выражения на τ_n [Ребецкий, 2007], найдем направляющие косинусы l_{is} и l_{ip} .

Поскольку направление касательного напряжения (значения направляющих косинусов l_{is} , l_{ip}) на произвольной плоскости с нормалью \mathbf{n} будут зависеть не только от ориентации главных напряжений, но и от вида эллипсоида напряжений, то при нахождении максимума функции F необходимо выполнить вариацию коэффициента Лоде – Надаи от -1 до 1. Таким образом, максимум F ищется в четырехмерной области параметров α , β , φ , μ_σ .

В работах [Carey, Bruneier, 1974; Никитин, Юнга, 1977; Мухамедиев, 1993] предлагались и другие способы представления “функции однородности”.

Следует отметить, что указанные выше подходы применяются не только к геологическим данным о трещинах сдвига, но и к сейсмологическим – механизмы очагов землетрясений. Их применение к этому типу данных требует произвести предварительный выбор одной из нодальных плоскостей механизма, которая реализовалась в виде хрупкого разрыва [Ребецкий, 2007]. Поэтому разные авторы предлагали разные критерии для выделения реализованной при землетрясении плоскости разрыва.

Методы нахождения областей “допустимых решений”. На основе наблюдаемых закономерностей разрывообразования в горных породах при использовании сформулированных выше кинематических постулатов [Гущенко, 1981] рядом авторов были предложены графические методы реконструкции напряжений: метод *M-плоскостей* [Arthaud, 1969], *кинематический метод* [Гущенко, Сим, 1974; Гущенко, 1975; Гущенко, Сим, 1977; Гущенко и др., 1977], методы *right dihedral* [Mercier et al., 1976a, б; Angelier, Mechler, 1977; Гущенко, Кузнецов, 1979; Angelier, 1984] и *right threhedra* [Гущенко, Кузнецов, 1979; Гущенко, 1982; Lisle, 1987, 1992]. Во всех этих методах использовались графические приемы построения векторов в сферической системе координат.

Кинематический метод, созданный О.И. Гущенко в 70-80-х годах прошлого века, являлся первым, в котором на равноправной основе использовались данные как об ориентации плоскости трещины, так и борозд скольжения. О.И. Гущенко показал, что из третьего постулата методов дислокационного анализа следует, что при известной ориентации осей главных напряжений направление вектора скольжения на плоскости произвольно ориентированной трещины лежит в створе угла, определяемого крайними значениями коэффициента Лоде – Надаи μ_σ (см. рис. 4.10). Используя данные рис. 4.10, О.И. Гущенко предложил первый, графический, вариант кинематического метода. В этом варианте необходимо было построить на верхней полусфере (стереографической проекции) в полюсах трещин векторы борозд скольжения единичной длины для замеров из одного обнажения. Далее требовалось провести дугу большого круга, разделяющую построенные векторы на две системы противоположной ориентации. По данным об ориентации этих систем трещин можно определить точки выходов на полусферу осей главных напряжений σ_1 и σ_3 .

Наиболее просто показать принцип нахождения положения осей главных напряжений в случае, когда искомому напряженному состоянию отвечает значение $\mu_\sigma = \pm 1$. В этом случае векторы скольжения двух систем стремятся быть

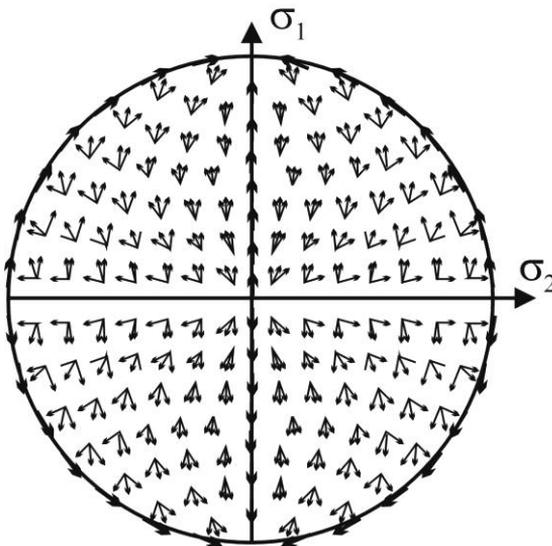


Рис. 4.10. Схема на верхней полусфере, показывающая ориентацию вектора скольжения в полюсах трещин для трех разных значений коэффициента $\mu_\sigma = -1, \mu_\sigma = 0, \mu_\sigma = +1$. Рисунок из работы [Гущенко, 1981]

ортогональными разделяющей их дуге большого круга. При этом для $\mu_\sigma = +1$ (одноосное сжатие) векторы скольжения этих систем ориентированы в сторону дуги, а при $\mu_\sigma = -1$ (одноосное растяжение) от нее. Если через все векторы скольжения провести дуги большого круга, то в их пересечении окажется ось σ_3 для случая одноосного сжатия и σ_1 – для одноосного растяжения (см. рис. 4.10).

Как следует из рис. 4.10, в других случаях, когда $-1 < \mu_\sigma < 1$ на верхней полусфере необходимо подобрать такое положение главных осей напряжений, чтобы дуги больших кругов, проведенные через точки выхода осей на полусферу и полюс каждой трещины, заключали в створе острого угла вектор скольжения. Фактически данный алгоритм кинематического метода графически приближенно реализует численный принцип расчета, основанный на минимизации функционала (4.1).

Method right dihedral разработан Ж. Анжелье [Angelier, Mechler, 1977]. Он связан с закономерностью, впервые отмеченной в работе [McKenzie, 1969] и заключающейся в том, что при решении прямой задачи кинематические постулаты теории дислокационного анализа однозначно связывают ориентацию вектора скольжения вдоль плоскости скола с параметрами тензора напряжений [Гущенко, Кузнецов, 1979]:

$$\ell_{si}^k = \frac{\ell_{ij}^k}{|\tau_n|} \sum_{j=1}^3 (\sigma_i - \sigma_j) (\ell_{nj}^k)^2. \quad (4.4)$$

При решении обратной задачи выражения (4.4) позволяют составить ряд неравенств, накладывающих определенные ограничения на возможную ориентацию главных осей тензора напряжений. Здесь ℓ_{si}^k и ℓ_{ni}^k – проекции на главные оси искомого тензора напряжений σ_i единичных векторов соответственно нормали к плоскости разрыва и подвижки по ней. В частности, как показано в работе [Гущенко, Кузнецов, 1979], из (4.4) и возможности изменения коэффициента Лоде – Надаи от -1 до +1 следует требование выполнения неравенства:

$$\ell_{n1}^k \ell_{s1}^k \geq 0, \quad \ell_{n3}^k \ell_{s3}^k \geq 0. \quad (4.5)$$

На основании неравенств (4.5) каждая из трещин допускает возможное падение осей алгебраически минимального и максимального главных напряжений в разные пары накрестлежащих квадрантов, на которые нодальные плоскости делят сферу единичного радиуса (см. рис. 4.11).

Алгоритм реконструкции напряжений метода *right dihedral*, развиваемого из ограничений (4.5), состоит в нахождении графическим способом двух областей на сфере единичного радиуса, в которых для совокупности сколовых нарушений выполняется каждое из этих неравенств. При этом область, в которой выполняется первое из неравенств (4.5), отождествляется с областью, где на сфере может находиться выход оси максимального из растягивающих главных напряжений. Область, где выполняется второе из неравенств (4.5), – с областью выхода оси максимального сжимающего главного напряжения.

Дальнейшее развитие *кинематического метода* [Гущенко, Кузнецов, 1979] сильно сблизило его с методом *right dihedral*, когда исходными данными являлись

сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений [Гущенко, 1982]. При этом выполнение для совокупности механизмов очагов неравенств (4.5) рассматривалось как способ создания однородных выборок данных, характеризующих однородную фазу деформирования объема. Метод *right dihedral* применяется не только к геологическим данным (зеркала скольжения), но и к сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений.

В работах [Гущенко, Кузнецов, 1979; Lisle, 1987, 1992] было также показано, что из требования совпадения на плоскости скола касательных напряжений с направлением подвижки следует дополнительное ограничение, накладываемое на ориентацию главных осей тензора в системе координат, связанной со сдвиговой трещиной

$$\ell_{m1}^k \ell_{m3}^k \ell_{s3}^k \ell_{s1}^k \geq 0, \quad (4.6)$$

где ℓ_{mi}^k – направляющие косинусы вектора \mathbf{m}^k в системе координат, связанной с

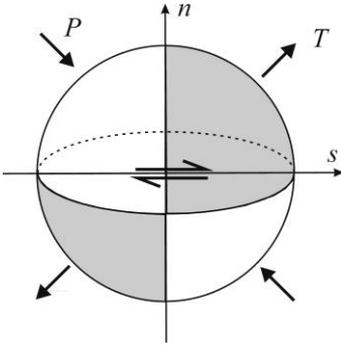


Рис. 4.11. Квадранты, в которых согласно (4.5) возможен выход осей алгебраически максимального и минимального главных напряжений сжатия: белые квадранты – области для σ_3 ; серые квадранты – области для σ_1

главными осями тензора напряжений. Для сейсмологических данных с неизвестной плоскостью подвижки последнее неравенство не применимо. Неравенство (4.6) фактически накладывает ограничения на область возможного положения промежуточного из главных напряжений.

Данный подход требует суммирования октантов при нахождении осей главных напряжений. Он позволяет работать с данными о ЗС скольжениях, в которых не установлен знак смещения.

В работах [Lisle, 1987, 1992] также использовалось условие (4.6). В этих работах данный подход назван *методом right threhedral*.

В работе [Гущенко, 1982] переход от равенств (4.4), определяющих направление вектора подвижки на произвольно ориентированной плоскости скола к неравенствам (4.5), (4.6), доставляющим вектору подвижки широкий диапазон возможной ориентации, основан на следующем предположении: в процессе квазипластического деформирования однородного объема, реализующегося в виде сколовых смещений по трещинам, ориентация осей главных нормальных напряжений остается постоянной, но при этом допускается изменение во времени значений коэффициента Лоде – Надаи, определяемого по индивидуальным ЗС. Этот принцип именуется принципом выделения *однородноосных объемов*.

В методе кинематического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого (см. далее) показано, что отклонение смещения на плоскости ЗС от направления касательного напряжения является следствием взаимного влияния трещин. В квазиоднородно деформирующихся участках земной коры эти отклонения

должны быть ограничены условиями, вытекающими из энергетических положений теории пластических сред.

Методы расчета необратимых деформаций. Помимо методов расчета параметров тензора напряжений параллельно как в сейсмологии, так и в геологии, развивались методы расчета параметров тензора квазипластических деформаций. В сейсмологии эти методы базировались на сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений, а в геологии – на данных о ЗС и других разрывно-пликативных структурах.

Метод расчета тензора скорости сеймотектонических деформаций [Ризниченко, 1965, 1977; Brune, 1968] сразу был ориентирован на определение тензора приращений или скорости сеймотектонических деформаций за счет вклада быстрых движений по разрывам (в очагах землетрясений). В рамках этого подхода предлагалось рассматривать процесс сеймотектонического разрушения как часть процесса квазипластического течения горных масс, реализующегося за счет быстрых или медленных смещений по разноориентированным разномасштабным нарушениям прочности. При этом из постулатов дислокационного анализа используются только первые два положения без введения каких-либо ограничений на направление смещения, реализующегося вдоль разрыва.

Используя предложенную Ю.В. Ризниченко модель сейсмического течения горных масс и работу [Костров, 1975], тензор скорости необратимых деформаций, накапливаемых в объеме ΔV за счет землетрясений, запишем в следующем виде:

$$S_{ij} = \frac{1}{2\Delta V \Delta T} \sum_{k=1}^K \bar{U}^k \Omega^k (\ell_{ni}^k \ell_{sj}^k + \ell_{nj}^k \ell_{si}^k), \quad (4.7)$$

где ΔT – интервал времени наблюдения, \bar{U}^k – средняя величина подвижки, Ω^k – площадь очага землетрясения, а ℓ_{ni}^k и ℓ_{si}^k – направляющие косинусы нормалей к двум нодальным плоскостям землетрясения в ортогональной системе координат (например, географическая система координат). Поскольку уровень магнитуд напрямую связан с размером объема осреднения, то, как правило, при реконструкции параметров тензора скорости сеймотектонических деформаций регионального масштабного уровня (масштаб осреднения: первые километры – десятки километров) нижним пределом магнитуд является $M_s = 4$. Эти значения магнитуд, в свою очередь, являются верхним пределом магнитуд при реконструкции соответствующих параметров локального масштабного уровня (масштаб осреднения: сотни метров – первые километры).

Следует особо отметить, что при практической реализации метода Ю.В. Ризниченко все землетрясения, эпицентры которых попадают в наперед заданное окно расчета деформаций (например, 1×1 град.), участвуют в расчете тензора S_{ij} . На основе метода Ю.В. Ризниченко в работах геологов и сейсмологов получены параметры тензора приращений сеймотектонических деформаций для активных сеймотектонических районов [Кузнецова и др., 1995; Трифионов и др., 2002].

Как отмечалось в работе [Лулк, Юнга, 1988], выражение (4.7) не позволяет устойчиво определять тензор скорости сеймотектонических деформаций в силу существенно большей его зависимости от сильных единичных землетрясений, чем от

совокупности землетрясений средней интенсивности. В работе [Степанов, 1979] было предложено этот тензор рассчитывать для ограниченного интервала магнитуд. Тогда, в силу прямой связи площади разрыва с магнитудой землетрясений и зависимости амплитуды смещений от площади разрыва [Штейнберг, 1983; Wells, Coppersmith, 1994] оба параметра в (4.7) можно вынести из-под знака суммирования. При таком подходе за счет выбора интервала магнитуд в наиболее представительном спектре удастся решить проблему устойчивости определения тензора S_{ij} .

Заметим, что в этом случае нельзя постулировать однозначную связь рассчитанного тензора с тензором приращений полных упругопластических деформаций.

Метод расчета тензора среднего механизма С.Л. Юнга [1979, 1990] предложил применять вместо расчета тензора скорости сеймотектонических деформаций по Ризниченко – Брюну. При этом тензор среднего механизма рассчитывается по формуле:

$$P_{ij} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (\ell_{ni}^k \ell_{sj}^k + \ell_{nj}^k \ell_{si}^k). \quad (4.8)$$

Здесь тензор P_{ij} нормирован так, что величина интенсивности тензора меньше единицы. Предлагается считать, что тензор среднего механизма подобен тензору скорости квазипластических деформаций. Такой переход от (4.7) к (4.8) основывается на высказанном в работах К. Аки [Аки, 1972] постулате о подобии процессов сеймотектонического течения, осуществляемых за счет дефектов прочности различных размеров (землетрясений различных диапазонов магнитуд) и на требовании полноты представительности сейсмологических данных о механизмах очагов в выборке землетрясений, определяющей средний механизм.

Подобный подход использовался при оценке композитного механизма по совокупности знаков вступления продольных волн для роя землетрясений [Мишарина и др., 1975].

Метод расчета сеймотектонических деформаций в кумулятивной области был предложен в работе [Ландер и др., 1993]. Предполагалось, что деформация, снимаемая в некоторой области (*область упругой разгрузки*), окружающей очаг землетрясения, не зависит от его магнитуды. При этом характерный размер области упругой разгрузки определяется магнитудой землетрясения. Это положение связывается с известным фактом о постоянстве плотности энергии, рассеиваемой в сейсмических волнах [Касахара, 1985].

Предполагается также, что в пределах окрестности очага распределение снимаемых деформаций изменяется обратно пропорционально расстоянию от гипоцентра. По мнению авторов, такой подход позволяет для любой точки сейсмоактивной области осуществлять расчет тензора приращений сеймотектонических деформаций путем суммирования вкладов от тех землетрясений, области разгрузки которых накрывают данную точку. Иными словами, тензор приращений сеймотектонических деформаций рассчитывается в области взаимного пересечения областей разгрузок совокупности землетрясений – области кумулятивного сложения.

Метод парагенетического анализа дизъюнктивных структур Л.М. Расцветаева [1982, 1987а, б] следует отнести к методам расчета параметров

тензора квазипластических деформаций. Его особенность состоит в том, что он применяется исключительно к геологическим данным о ЗС. Основу метода составляет установленная автором зависимость от параметров тензора напряжений различных структурных форм, связанных предполагаемой общностью условий формирования. По сути используемых в методе Л.М. Расцветаева исходных данных речь должна идти о реконструкции параметров тензора деформаций, обусловленных разрывной и трещинной тектоникой. О реконструкции параметров тензора напряжений можно говорить, только подразумевая постулат об изотропии свойств и в предположении об установившемся процессе упругопластического деформирования.

Главной проблемой метода является дешифрирование натуральных структурных рисунков с использованием разработанных Л.М. Расцветаевым базовых геомеханических моделей дизъюнктивных деформаций (шаблонов). Каждая из таких моделей характеризуется определенным дизъюнктивным структурным рисунком – закономерностью взаимосвязанного образования структур разрушения разного типа. Выделяются следующие типы структур: парные и произвольные сколы, пирамиды сжатия и растяжения, конусы сжатия и растяжения, пояса вращения и течения, системы содвига и раздвига. Следует отметить, что количественные данные с помощью этого метода получаются только в отношении определения ориентации главных осей тензора трещинных деформаций. Вид эллипсоида деформаций определяется качественным образом. Далее будет дано более детальное описание этого метода.

Методы анализа напряжений на основе совмещения разных подходов.

Практика применения методов реконструкции напряжений подтолкнула к построению методов, повышающих устойчивость получаемого результата. Это стало возможным путем совмещения расчета напряжений и квазипластических деформаций.

Метод локализации хрупкого разрушения применяется исключительно к геологическим ЗС, в работах зарубежных исследователей [Carey-Gailhardis, Mercier, 1987; Hung, Angelier, 1989]. Данный метод несет в себе элементы как метода тектонодинамического анализа П.Н. Николаева, так и метода анализа экстремума “функции однородности”. Метод состоит в нанесении на палетку Вульфа (сейчас для этого используются возможности компьютерной обработки и визуализации геологических данных о разрывах и трещинах) ориентации плоскостей разрывов и направлений смещений вдоль них (рис. 4.12).

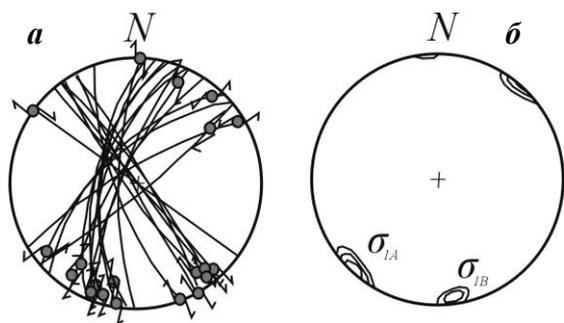


Рис. 4.12. Метод «локализации разрушения», изображения на полусферах: а) плоскости трещин с направлением смещения; б) области возможного выхода оси максимального сжатия (два варианта). Принципиальная схема по работам J. Angelier

Далее выделяют совокупности трещин, близкие в структурно-кинематическом отношении, при этом оценивается близость ориентации не только плоскостей сколов, как в методе П.Н. Николаева, но и направлений скольжения берегов трещин. При этом разные родственные ансамбли сколовых трещин, полученные в результате указанной выше сепарации данных из одного обнажения, отождествляются с разными этапами тектонических условий нагружения исследуемой области. Затем, после выбора “функции однородности” того или иного вида, производится определение параметров тензора напряжений. Сепарация данных считается удовлетворительной, если максимальное отклонение направления подвижки вдоль плоскости скола для ЗС выборки не превышает некоторого принятого предельного значения.

Таким образом, метод локализации разрушения объединяет алгоритмы метода расчета напряжений с методом структурного анализа катакластических деформаций.

Метод катакластического анализа разрывных смещений – МКА первоначально рассматривался Ю.Л. Ребецким как развитие кинематического метода О.И. Гущенко [Ребецкий, 1997]. В нем появилось неравенство, дополняющее условие (4.6). Если неравенства (4.5) ограничивали ориентацию осей алгебраически наибольшего и наименьшего из главных напряжений, то дополнительное неравенство накладывало ограничение на ориентацию оси промежуточного главного напряжения. Полная система неравенств являлась следствием энергетических ограничений, вытекающих из теории пластичности. Именно привлечение базисных положений теории пластичности позволяет отнести этот метод к методам, в которых трещинные смещения рассматриваются как квазипластическое течение.

Несколько позднее [Ребецкий, 1999] в МКА появился параллельный с созданием однородной выборки механизмов очагов землетрясения расчет тензора приращений сеймотектонических деформаций. И только после этого пришло понимание необходимости взаимосвязного расчета компонент тензора напряжений и приращений сеймотектонических деформаций. Детальное изложение этого метода будет дано в следующем разделе.

МКА начал развиваться в конце XX века как метод реконструкции современных напряжений, использующий данные о механизмах очагов землетрясений. В середине нулевых годов XXI века была создана модификация компьютерной программы, ориентированная на обработку данных о зеркалах скольжения, сохранившая все основные принципы МКА, применявшиеся к сейсмологическим данным.

Можно сказать, что перечисленные методы реконструкции параметров тензора приращений сеймотектонических деформаций целиком опираются на представления теории квазипластических деформаций горных пород, осуществляемых за счет смещений по множеству поверхностей пониженной прочности. В них не постулируется однозначная связь ориентации плоскости разрыва с параметрами тензора напряжений, и фактически предполагается произвольность ориентации сколовых смещений.

К проблемам, не решенным в рамках представленного направления в методах расчета квазипластических деформаций, следует отнести проблему выделения однородно деформируемых пространственно-временных объемов и разработку приемов создания однородных выборок ЗС. Нельзя считать удовлетворительным формирование выборок данных о механизмах очагов, осуществляемое простым суммированием всех землетрясений, попадающих в окно наперед заданного размера (например, 1 град.). В этом случае возможен расчет тензора сеймотектонических деформаций за период времени, в который произойдет достаточно резкое изменение фазы деформирования, так что суммарные деформации могут быть и нулевыми. Точно так же отсутствие критериев однородности выборки ЗС позволяет выполнить суммирование вкладов разрывных движений для двух соседних участков, доставляющих для взаимно ортогональных направлений деформации разного знака. Такой суммарный тензор сеймотектонических деформаций также может иметь нулевые значения.

Все эти замечания относятся и к методам расчета тензора напряжений, опирающихся на нахождение экстремума функции однородности.

Проблема создания однородных выборок зеркал скольжения была решена только для методов, в которых выполнялся графический анализ трещин (методы Ж. Анжелье, О.И. Гущенко, Ю.Л. Ребецкого)

ГЛАВА 5. Кинематический метод реконструкции палеонапряжений О.И. Гущенко

Кинематический метод основан на анализе массовых замеров векторов перемещений на плоскостях трещин – *зеркала скольжения*, а также плоскостях любого другого генезиса: плоскостях напластования, контактах магматических и осадочных пород и т.д. Обоснование и принципы указанных методов подробно изложены в работах О.И. Гущенко [1973, 1979], а также в монографии Ю.Л. Ребецкого [2007] и в докладах-лекциях [Сим, 2009; Сим, Маринин, 2015] на молодежных тектонофизических конференциях в ИФЗ РАН. Для упрощения восприятия текста оси главных нормальных напряжений – алгебраически минимального сжатия (σ_1) будем далее именовать *осью растяжения*, алгебраически максимального сжатия (σ_3) – *осью сжатия*.

5.1. Основные положения метода

Кинематический метод [Гущенко, 1973, 1979] базируется на анализе векторов тектонических перемещений на зеркалах скольжения, измеренных *in situ* непосредственно в горных породах. Исходные предпосылки кинематического метода следующие:

1. В результате внешних воздействий в массиве горных пород возникают необратимые деформации за счет сдвиговых смещений (мех.) по совокупности произвольно ориентированных ослабленных поверхностей (трещин) любого генезиса и возраста. Вектор этих смещений совпадает с ориентировкой касательных напряжений, действующих на этой плоскости, и выражается в виде штрихов и борозд скольжения [Wallace, 1951; Bott, 1959].

2. Ослабленные плоскости имеют *иерархическую структуру*, т.е. в массиве присутствуют разномасштабные структуры разрушения. Тектонические напряжения, вызывающие смещения по региональным разломам и несущие информацию о наиболее устойчивом во времени и пространстве региональном уровне поля напряжений, являются основной причиной возмущения напряжений на каждом из более мелких (детальных) уровней.

3. Смещения по отдельным плоскостям одного уровня не приводят к изменению ориентации векторов перемещений на прочих плоскостях этого же уровня и ориентации осей напряжений регионального уровня.

4. В пределах локального объема горных пород ориентация осей главных нормальных напряжений остается постоянной, а соотношения их величин, определяемых коэффициентом Лоде – Надаи μ_σ , могут меняться от +1 до -1, т.е. вид тензора напряжений изменяется от одноосного сжатия ($\mu_\sigma \approx +1$) через чистый сдвиг ($\mu_\sigma \approx 0$) до одноосного растяжения ($\mu_\sigma \approx -1$).

По ориентировкам векторов перемещения на совокупности зеркал скольжения решается обратная задача по восстановлению ориентировок параметров тектонических напряжений, обусловивших эти перемещения.

5.2. Практические приемы использования кинематического метода для реконструкции палеотектонических напряжений

Реконструкция палеотектонических напряжений в рамках кинематического метода исторически связана с использованием ручных приемов графического решения на круговых диаграммах (стереограммах). Позднее с развитием метода были разработаны программные средства для вычисления положения параметров напряженного состояния [Гущенко, 1996; Angelier et al., 1994]. Следует сказать, что алгоритмы ручной и автоматизированной обработки совокупностей зеркал скольжения существенно различаются, давая при этом близкие результаты. Опыт стереографического представления полевых данных и освоение приемов графических решений сейчас необходим для понимания принципов работы кинематического метода.

5.2.1. Нанесение векторов перемещений на стереограммы палеотектонических напряжений

Для составления кинематической стереограммы удобно пользоваться кинематической сеткой (палеткой) Вульфа – Гущенко. Здесь на сетку Вульфа, развернутую на 90° , нанесены рассчитанные О.И. Гущенко дополнительные дуги, используемые для нанесения векторов перемещений (рис. 5.1). Любой линейный элемент задается на стереограмме стереографическим полюсом (*stereographic pole*), который представляет точку пересечения проведенной из центра сферы линии с поверхностью исходной сферы.

Отметим, что все построения, приведенные ниже, производятся в проекции на верхнюю полусферу. Это отличается (см. глава 3) от обработки геологических индикаторов хрупкого разрушения, выполняемых в работах зарубежных исследователей [Angelier et al., 1982], и от обработки сейсмологических индикаторов [Ребецкий, 2007].

На рис. 5.1 показана схема изображения двух линейных элементов ОА ($340^\circ/70^\circ$) и ОБ ($140^\circ/10^\circ$) с помощью сетки Вульфа – Гущенко. Построение аналогично проведенному в главе 3 (пункт 3.4.1): север кальки совмещается на оцифрованной внешней дуге основания полусферы с азимутом ориентировки прямой линии (например, 340°), а по **нижнему** радиусу полусферы находится точка, соответствующая углу наклона к горизонту прямой линии – $340^\circ/70^\circ$. Различия обусловлены оцифровкой внешней шкалы сетки, что приводит к необходимости брать отсчет по противоположным радиусам сеток (при использовании разных вариантов сетки). Стереографический полюс линии, имеющей более крутой угол наклона (погружения), расположен ближе к центру диаграммы (точка А с элементами залегания $340^\circ/70^\circ$). Линия, наклоненная под малым углом к горизонту, будет иметь полюс ближе к внешнему кругу палетки (точка Б с углом падения $140^\circ/10^\circ$).

Плоскости трещин и разрывов изображаются как следы пересечения плоскости с поверхностью исходной сферы в виде дуг больших кругов, являющихся *стереографическими проекциями плоскостей*. Построение осуществляется по схеме (рис. 5.2), которая с небольшим различием аналогична проведенному в главе 3 (пункт 3.4.3) построению. Для трещины с аз. пд. $340^\circ/70^\circ$ совмещается север кальки с аз. 340° на внешнем круге палетки. Угол падения для точки А,

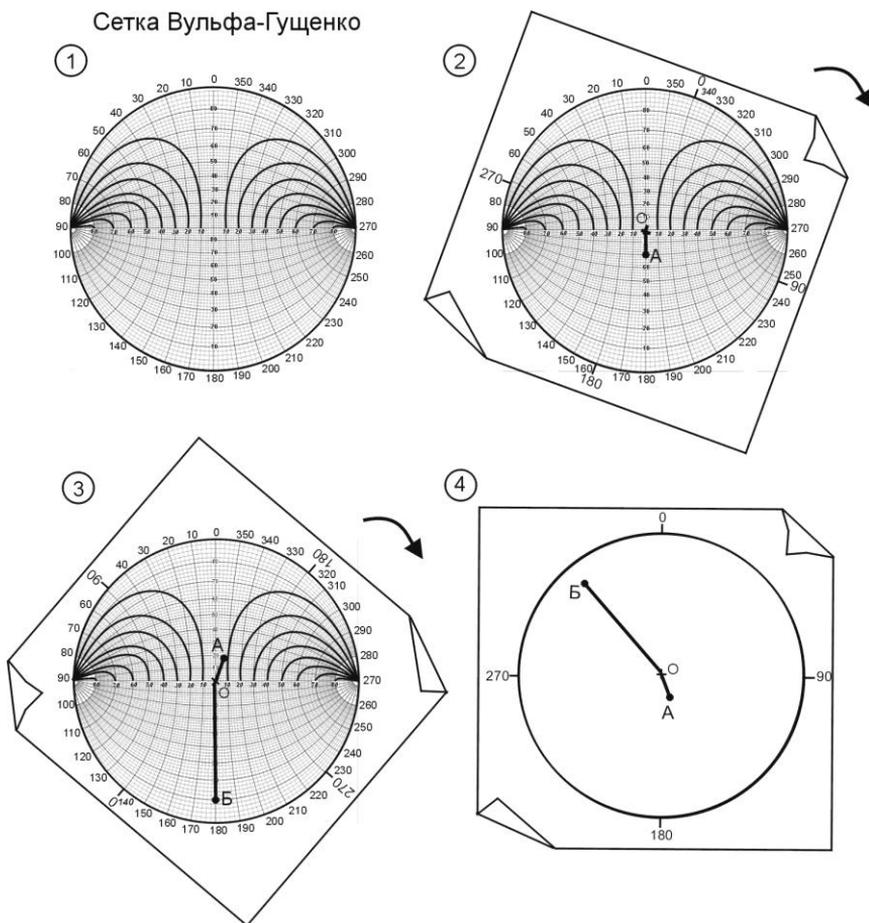


Рис. 5.1. Нанесение прямых линий по сетке Вульфа – Гуценко (все построения выполнены на верхнюю полушару).

Линия OA представляет проекцию линейного элемента с аз. пд. $340^\circ \angle 70^\circ$, а линия OB – с аз. пд. $140^\circ \angle 10^\circ$

представляющей проекцию полюса трещины (нормаль к плоскости трещины), наносится по *верхнему* радиусу (отметка 70°), а проекция самой плоскости трещины наносится по *нижнему* радиусу (отметка 70°). Таким образом, проекция плоскости трещины проводится по дуге большого круга (дуга A_1A_2) в нижней части палетки и проходит через отметку 70° на нижнем радиусе (рис. 5.2).

Простирание трещины A наносится по горизонтальному диаметру сетки (прямая линия A_1A_2). Аналогично наносится пологая трещина с аз. пд. $140^\circ \angle 10^\circ$ – ее полюс нанесен в точке B (для этого север кальки был совмещен с отметкой 140° на внешнем круге, а точка B нанесена по верхнему радиусу); плоскость B_1B_2 в соответствии с перечисленными выше правилами совпадает с меридианом, проходящим через отметку 10° на нижнем радиусе (дуга B_1B_2). Чем круче наклон трещины, тем ближе соответствующая ей дуга к центру сферы. При угле падения равном 90° проекция трещины совпадет с горизонтальным диамет-

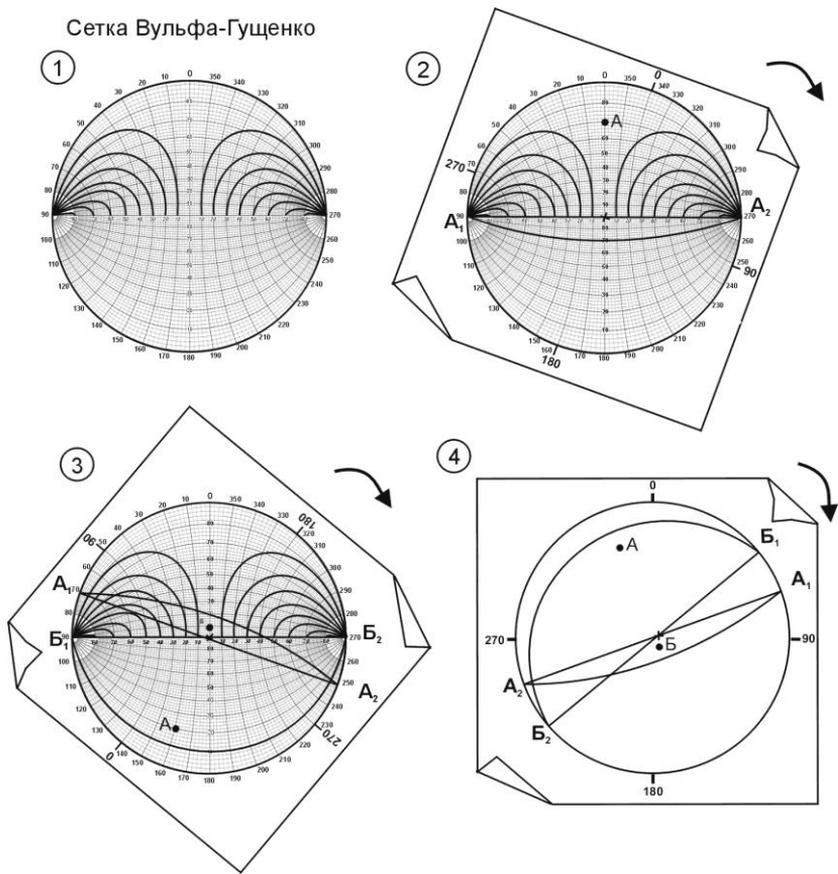


Рис. 5.2. Нанесение плоскостей и их полюсов по сетке Вульфа – Гуценко (все построения выполнены на верхнюю полушфору).

Точка А представляет проекцию полюса плоскости с аз. пд. $340^{\circ} \angle 70^{\circ}$, а дуга A_1A_2 – проекцию этой же плоскости. Точка Б представляет проекцию полюса плоскости с аз. пд. $140^{\circ} \angle 10^{\circ}$, а дуга B_1B_2 – проекцию данной плоскости

ром, а точка ее полюса будет совпадать с отметкой 340° на внешнем круге палетки. Горизонтальная трещина совпадает с внешним кругом палетки (основанием полушферы), а ее полюс располагается в центре круга.

Рассмотрим пример нанесения вектора перемещения. На обнажении сделан замер зеркала скольжения (использована система записи кинематического метода): $92 \angle 54$ леж П28 ВЛ. Здесь дана запись в том виде, как она производится при полевых измерениях. В полевом дневнике азимутам простирания/падения и углам падения не приписывается знак градуса (чтобы не перепутать с цифрой ноль в записи). Сама приведенная выше запись означает, что на плоскости с азимутом падения 92° и углом падения 54° в лежачем крыле (леж) зафиксирован вектор перемещения, отклонившийся от линии восстания плоскости направо (П); он наклонен к горизонтальной плоскости под углом 28° , кинематический тип – взбросо-сдвиг левый (ВЛ). Далее сокращенное обозначение кинематического типа пере-

мещений следующее: **В** – взброс, **С** – сброс, **П** – правый, **Л** – левый сдвиги (более подробно о системе записи в кинематическом методе см. главу 2, пункт 2.1.1). Построение проекции вектора перемещения по сетке Вульфа – Гущенко производится в следующей последовательности (рис. 5.3):

1. На восковку наносятся проекция полюса и плоскости зеркала скольжения с аз. пд. $92^\circ/54^\circ$ (согласно правилам, изложенным ранее). Проекция полюса трещины – точка **А**, проекция плоскости зеркала скольжения – дуга A_1A_2 .

2. Точку полюса **А** вращаем направо (по часовой стрелке), т.к. борозда скольжения смещена от линии восстания направо (П28), до совпадения ее на палетке Гущенко с дугой, оцифрованной на горизонтальном диаметре 28° (мысленно проводя её между имеющимися дугами 20° и 30°).

Примечание: При нанесении замеров, сделанных в висячем крыле зеркала скольжения, вращение палетки осуществляется в противоположном направлении от замеренного отклонения наклона штриховки от линии восстания («лево» и «право»). Таким образом, если тот же замер взят по висячему крылу, то борозда скольжения отклоняется налево – П28, а точку полюса необходимо вращать в противоположном направлении, т.е. направо.

3. На кальке (восковке) поднимаем дугу большого круга, на которую попала точка **А**: K_1KA_2 . Эта дуга отражает проекцию плоскости, которая перпендикулярна плоскости зеркала скольжения и параллельна борозде скольжения. Данная плоскость K_1KA_2 именуется кинематической, поскольку на ней лежит борозда скольжения. Палетка Гущенко построена таким образом, что изолинии величины углов наклона штриховки (борозд скольжения) нанесены на горизонтальный диаметр сетки Гущенко и отражают все возможные варианты взаимного расположения плоскости трещины и штриховки, расположенной на этой же плоскости. Согласно проведенным построениям пересечение плоскости зеркала скольжения с кинематической плоскостью образует прямые углы AKA_1 и AKA_2 . Точка **К**, расположенная на пересечении двух плоскостей $KKAK_1$ и A_1KA_2 , является выходом на верхнюю полусферу (стереографическим полюсом) борозды скольжения (вектора перемещения), отражающей относительное смещение висячего крыла.

4. В точке **А** поднимаем часть дуги, направленной от точки **А** налево (Левый сдвиг; висячий блок имеет левосдвиговую компоненту относительного смещения) и указываем стрелкой направление смещения. Взбросовая составляющая дает вклад на направление к центру диаграммы по радиусу сетки Вульфа – (Взброс; висячий блок имеет взбросовую компоненту относительного смещения). Длина вектора в полюсе зеркала скольжения произвольная и обычно стандартная для всех измерений. Изображенный на диаграмме знак смещения – левый взбросо-сдвиг, такой же знак присваивается вектору **ОК**, лежащему в плоскости трещины и отражающему перемещение отсутствующего висячего крыла. Соответственно в случае противоположного смещения – правого сбросо-сдвига (ПС) поднимается часть дуги AK_2 – направо (Правый сдвиг). Сбросовая составляющая дает вклад на направление в сторону периферии диаграммы по радиусу сетки Вульфа (Сброс).

Примечание: Проверкой правильности построения на стереограмме вектора перемещения в полюсе зеркала скольжения может служить следующая правило. Проекции векторов перемещения, имеющие сбросовую компоненту

смещения, направлены к внешней дуге сетки, а имеющие взбросовую компоненту, напротив, «устремлены» к центру стереографической сетки. Проекции векторов перемещения, имеющие правосдвиговую компоненту смещения, направлены по часовой стрелке (параллельно окружности сетки), а левосдвиговые смещения – против часовой.

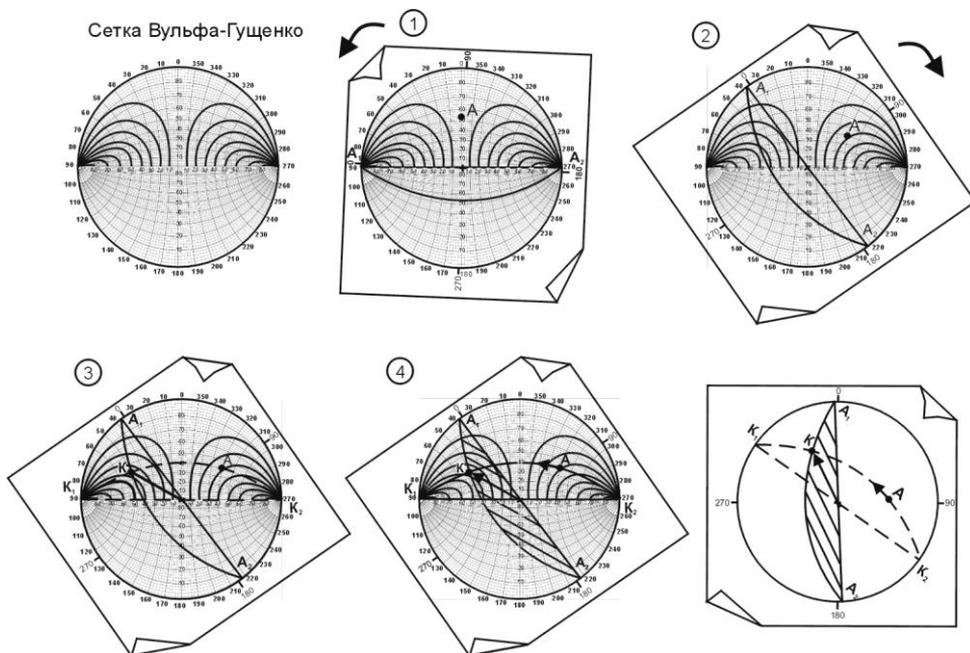


Рис. 5.3. Нанесение проекции кинематической плоскости и вектора перемещения (безд скольжения) на плоскости трещины и на полюсе трещины. Объяснение в тексте

5.2.2. Определение параметров главных напряжений

Рассмотрим пример определения параметров напряженного состояния для банка данных по зеркалам скольжения, представленных в табл. 5.1. Необходимо определить следующие параметры напряженного состояния: ориентировку осей главных нормальных напряжений ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), положение плоскостей действия трех главных касательных напряжений ($\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{\max} = \tau_{13}$ – максимальное из главных касательных напряжений) и оценить вид напряженного состояния (коэффициент Лоде – Надаи).

На стереограммах два полюса для τ_{13} находятся на дуге, отвечающей главной кинематической плоскости на равном расстоянии (45°) от осей σ_1 и σ_3 ; два полюса для τ_{12} находятся на дуге, отвечающей плоскости действия оси σ_3 на равном расстоянии (45°) от осей σ_1 и σ_2 ; два полюса для τ_{23} находятся на дуге, отвечающей плоскости действия оси σ_1 на равном расстоянии (45°) от осей σ_2 и σ_3 .

Таблица 5.1. Банк данных по зеркалам скольжения (с измеренной ориентацией борозд скольжения и геолого-кинематическим типом относительных перемещений по ним)

1. 30 \angle 85, леж, П20, ВЛ	8. 261 \angle 36, вис, П27, ВП
2. 349 \angle 67, леж, П56, СП	9. 100 \angle 60, леж, Л30, ВП
3. 316 \angle 71, вис, Л3, СП	10. 15 \angle 60, леж, Л30, СЛ
4. 298 \angle 66, леж, Л8, ВП	11. 230 \angle 50, леж, 0 (гор), Л
5. 306 \angle 84, леж, Л7, ВП	12. 240 \angle 70, леж, 0 (гор), Л
6. 250 \angle 85, леж, Л45, СЛ	13. 92 \angle 54, леж, П28, ВЛ
7. 228 \angle 85, леж, Л4, СЛ	

Всего 13 измерений

Определение ориентировки осей главных нормальных напряжений. Для проведения реконструкции необходимо в согласии с выше обсужденными положениями нанести на круговую диаграмму (стереограмму) данные измерений – проекции полюсов зеркал скольжения и векторов перемещений по ним (рис. 5.4, А). Далее все измерения борозд скольжения в графическом методе О.И. Гущенко анализируются на стереограмме согласно следующим правилам:

а) все вектора перемещений должны расходиться от оси σ_3 и сходиться к оси σ_1 ;

б) плоскости действия осей σ_3 и σ_1 должны разделять разнонаправленные вектора перемещений;

в) проверка на соответствие векторов перемещения найденному полю напряжений производится на следующем этапе.

Для выполнения этих правил полезно выполнить следующие операции. Оконтурировать области, к которым сходятся (или расходятся) вектора перемещений. Область схождения векторов перемещения расположена вблизи севера и юга стереограммы, а область расхождения – на западе и востоке (рис. 5.4, Б). После этого подыскиваются поочередно плоскости действия осей σ_1 , σ_3 – *плоскости, перпендикулярные этим осям*; для этого нужно учитывать, что плоскости действия искомым осей должны разделять разнонаправленные вектора перемещений.

Область возможного расположения оси растяжения σ_1 локализована лучше (синяя заливка на рис. 5.4, Б), так как между векторами, направленными на север (замеры №№ 8, 13), и направленными на юг векторами №№ 9, 11 должна проходить плоскость действия оси растяжения. В этой области возможно существование нескольких вариантов нахождения оси растяжения – σ_1^1 и σ_1^2 . Вариант выбора более пологой оси растяжения (σ_1^2) исключается из-за того, что плоскость ее действия не разделяет замеры №№ 8, 13 от векторов №№ 9, 11 – они все оказываются в нижней части стереограммы (рис. 5.4, Б).

После этого на плоскости действия оси σ_1^1 подбираются возможные варианты нахождения оси сжатия, которая должна лежать на плоскости действия оси растяжения и в пределах области, от которой расходятся вектора перемещений

(оранжевая заливка на рис. 5.4, Б). Далее наносятся относительно равнозначные три варианта возможного положения осей сжатия и плоскостей их действия: σ_3^1 , σ_3^2 и σ_3^3 . Для первого варианта оси σ_3^1 (промежуточного между 2-м и 3-м положением оси сжатия) наносится плоскость его действия (σ_3^1 , жирная красная линия). Точка пересечения плоскостей действия выбранных осей σ_3 и σ_1 является промежуточной осью σ_2 . Плоскость действия промежуточной оси σ_2 называется главной кинематической плоскостью. В тестовом варианте ось σ_1 погружается по азимуту $182^\circ \angle 10^\circ$, ось σ_2 – $318^\circ \angle 76^\circ$ и ось σ_3 – $92^\circ \angle 10^\circ$. Отсчет угла наклона и ориентации осей главных нормальных напряжений на сетке Вульфа – Гущенко производится по нижнему вертикальному радиусу, т.к. оси – линии, в отличие от плоскостей трещин и полюсов к ним.

Определение положения плоскостей действия главных касательных напряжений. Для нахождения плоскостей действия максимальных касательных напряжений необходимо развернуть стереограмму так, чтобы промежуточная ось σ_2 совпала с нижним вертикальным радиусом палетки: на ее плоскости действия – главной кинематической плоскости (рис. 5.4, В) отсчитать по 45° от осей σ_1 , σ_3 и определить полюса двух сопряженных плоскостей действия главных касательных напряжений τ_{13}^1 и τ_{13}^2 ; вектора перемещений поднимаются по главной кинематической плоскости – они направлены к оси растяжения и расходятся от оси сжатия – по аналогии с бороздами скольжения.

На внешний контур стереограммы наносятся простирающиеся плоскости действия главных касательных напряжений и определяется кинематический тип разрывов, отвечающих направлениям действия этих касательных напряжений. Главное касательное напряжение τ_{13}^1 ориентировано по аз. $46^\circ \angle 89^\circ$, что соответствует взбросо-сдвигу левому (ВЛ), а сопряженное с ним главное касательное напряжение τ_{13}^2 – $316^\circ \angle 75^\circ$, что отвечает правому сдвигу. Итак, параметры локального стресс-состояния, определенного по 13 векторам перемещений, следующие: ось σ_1 – $182^\circ \angle 10^\circ$, σ_2 – $318^\circ \angle 76^\circ$, σ_3 – $92^\circ \angle 10^\circ$, τ_{13}^1 – $46^\circ \angle 89^\circ$, взбросо-сдвиг левый (ВЛ), а τ_{13}^2 – $316^\circ \angle 75^\circ$, правый сдвиг.

Оценка вида тензора напряжений. Проверка соответствия векторов перемещения определенных нами ориентировок осей главных нормальных напряжений проводится следующим образом. Подбираются 2 системы дуг больших кругов, которые совмещают полюс каждого вектора перемещения: 1) – с осью сжатия, 2) – с осью растяжения. Совпадение вектора перемещения с дугами больших кругов, совмещающих его с осями растяжения (рис. 5.5, Ж, 3) и сжатия (рис. 5.5, Б-Д), свидетельствует о формировании вектора либо при виде тензора напряжений одноосного растяжения, либо одноосного сжатия. Попадание вектора перемещения в створ острого угла, образованного дугами, расходящимися от осей сжатия и растяжения, говорит о формировании вектора перемещения при трехосном виде тен-

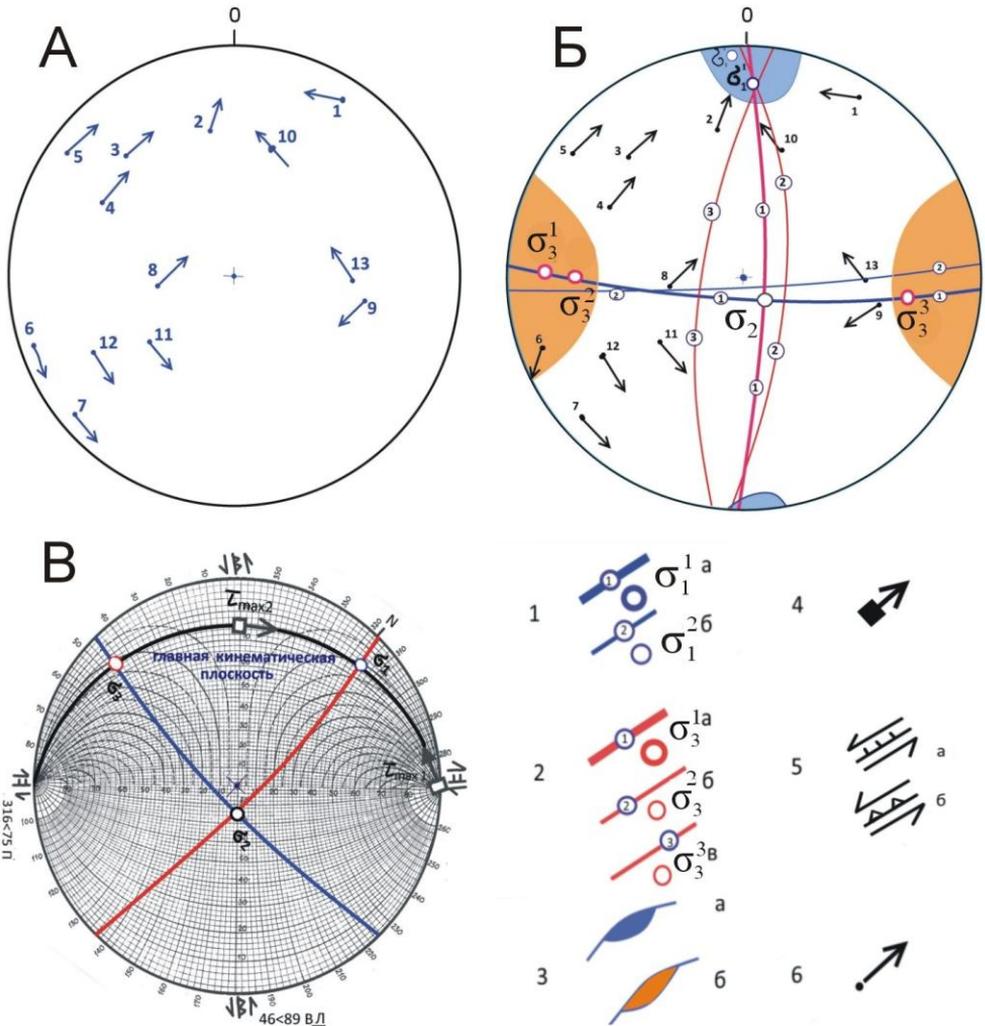


Рис. 5.4. Пример последовательных действий для определения параметров напряженного состояния: *A* – построение на стереограмме проекций полюсов зеркал скольжения (с векторами перемещения); *Б* – предварительное оконтуривание областей возможного расположения осей сжатия и растяжения; *В* – определение положения осей главных нормальных напряжений и плоскостей действия главных касательных напряжений.

Условные обозначения: 1-2 – положение осей и плоскостей их действия: 1а и 1б – растяжения, 2а, 2б, 2в – сжатия и плоскости их действия; варианты №1 – окончательные; 3 – области возможного нахождения оси растяжения (*а*) и сжатия (*б*); 4 – полюса плоскостей действия максимальных касательных напряжений; 5 – простирации плоскостей действия максимальных касательных напряжений и их кинематические типы: *а* – сдвиги, *б* – взбросо-сдвиги и сдвиго-взбросы; 6 – вектора перемещений по трещинам в точке полюса

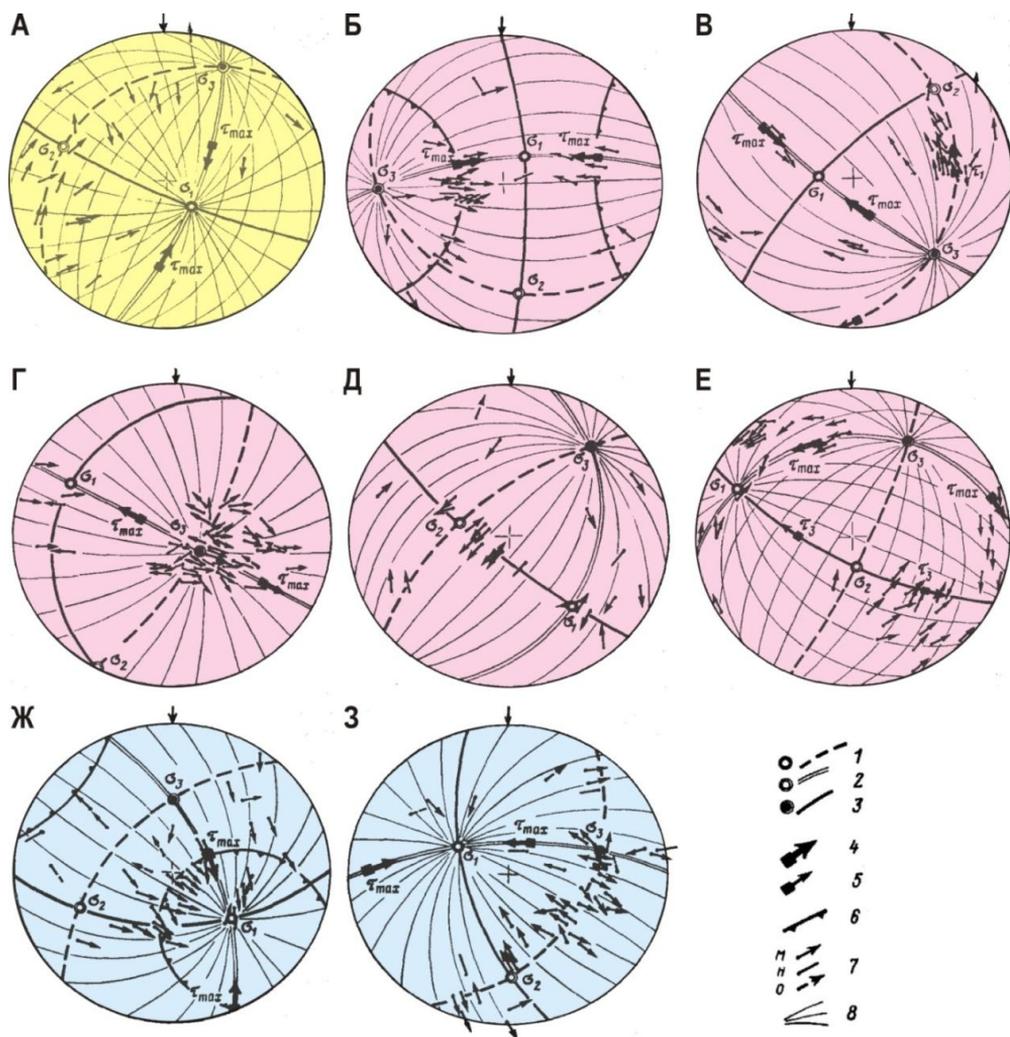


Рис. 5.5. Стереогаммы с примерами обработки зеркал скольжения, отвечающие разным видам тензора напряжений: 1–3 – оси главных нормальных напряжений и плоскости их действия: 1 – растяжения, 2 – промежуточной, 3 – сжатия. 4, 5 – направления перемещения на плоскости действия главных касательных напряжений: 4 – максимальных $\tau_{max} = \tau_{13}$, 5 – τ_{12} , 6 – конуса сжатия и растяжения (см. рис. 5.5 в гл. 5.4. 13). 7 – вектора перемещений на зеркалах скольжения: м – с определенным, н – с неопределенным знаками смещений, о – противоречащие найденному локальному напряженному состоянию. 8 – дуги больших кругов, расходящихся от осей σ_1 и σ_3 . Б, В, Г, Д – тензор одноосного сжатия, Ж, З – тензор одноосного растяжения; Е – трехосный вид тензора, А – ВВНС – вариация вида тензора напряжений

зора напряжений (рис. 5.5, А). Его положение в створе тупого угла свидетельствует о противоречии такого вектора найденной ориентации осей главных напряжений. Т.е. это смещение не является одновозрастным с остальными, либо оно образовалось в поле напряжений другого ранга по сравнению с восстановленным.

Для качественной оценки величины μ_σ совместить каждый вектор перемещения последовательно с определенными выше осями сжатия и растяжения. Если вектора перемещений совпадают с дугами больших кругов, расходящихся от оси σ_1 , то они свидетельствуют о смещении, произошедшем в найденном локальном стресс-состоянии при одноосном растяжении ($\mu_\sigma \approx -1$).

На рис. 5.5, Ж, 3 большинство векторов перемещения близко к дугам больших кругов, расходящихся от оси растяжения. Если вектора перемещений совпадают с дугами больших кругов, расходящихся от оси σ_3 , то они свидетельствуют о смещении, отвечающем найденному локальному стресс-состоянию при одноосном сжатии ($\mu_\sigma \approx +1$), на рис. 5.5, Б-Е.

В случае, если вектор перемещения попадает в створ острого угла между дугами больших кругов, расходящихся от осей σ_1 , σ_3 , и близок к его биссектрисе, то на качественном уровне определяется, что величина μ_σ близка к нулю (рис. 5.5, А, Е). На рис. 5.5 приведены примеры стереограмм, показывающие разный вид тензора напряжений, определенный на качественном уровне.

Полезно подчеркнуть, что анализ вида тензора напряжений важен при прогнозе мест локализации полезных ископаемых гидротермального и гидротермально-метасоматического генезиса [Сим и др., 2008; Сим, 2011]

5.3. Определение общего поля напряжений по данным локальных стресс-состояний

При обработке множества локальных стресс-состояний, характеризующих локальные или региональные деформации, вызванные достаточно простым способом нагружения массива, удобно использовать усредненные параметры тензора напряжений обозначаемые термином – «общее поле напряжений». Обоснованием метода расчета параметров такого тензора, предложенного Л.А. Сим [1982], служат данные математического и физического моделирования тектонических напряжений вокруг одиночного разрыва [Осокина, 1987а, б; 2000]. По результатам моделирования установлено, что независимо от угла наклона оси сжатия к сдвиговому (мех.) разлому, перераспределение ориентировок осей локальных напряжений вокруг последнего остается близким к ориентировке внешнего сжатия, закономерно изменяясь к концам разлома (рис. 5.6). При этом локальные оси сжатия на концах разлома во фронте смещающегося крыла становятся параллельными, а на противоположном крыле – нормальными к плоскости разлома; соответственно, ось растяжения во фронтальной части субперпендикулярна, а в тыльной части субпараллельна сместителю.

В трехмерном варианте изменения локальных осей сжатия и растяжения вокруг разлома также отклоняются на угол не более 45° независимо от ориентировки осей сжатия внешней нагрузки по отношению к разрыву. Таким образом, все варианты локальных осей сжатия и растяжения, нанесенные на единую стереограмму, можно описать двумя коническими поверхностями с углом при вершине 90° ; оси этих конических поверхностей взаимно перпендикулярны. Места их касания являются полюсами плоскостей действия максимальных касательных напряжений.

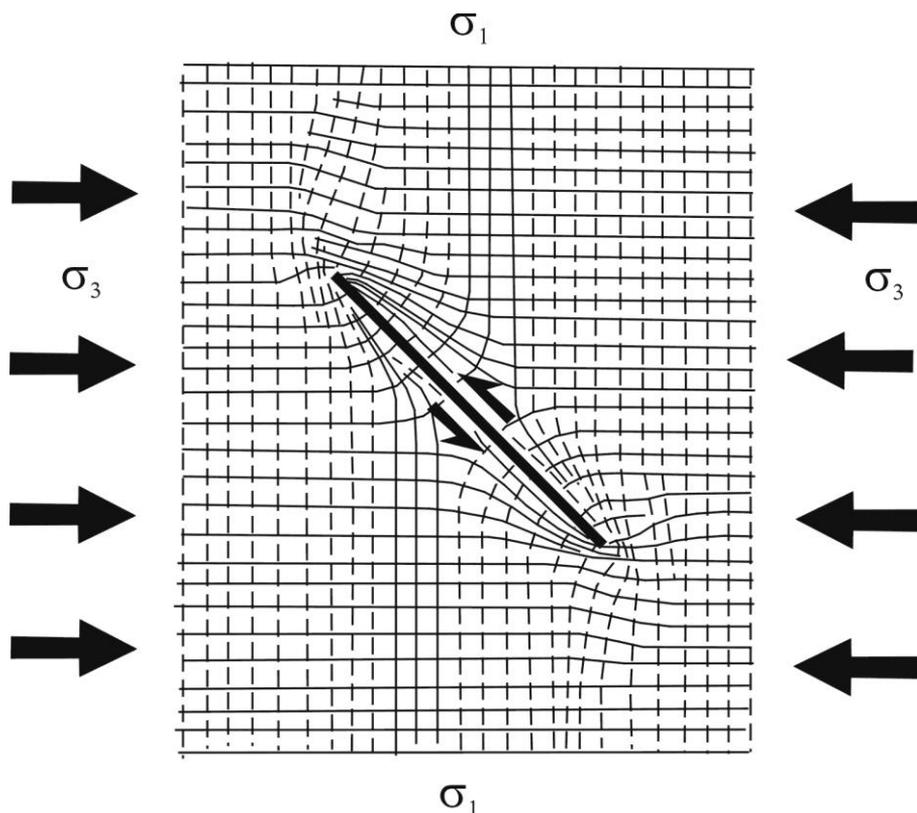


Рис. 5.6. Траектории осей главных напряжений двумерного поля напряжений в окрестностях разрыва (левый сдвиг) после смещения его бортов. Оси растяжения показаны пунктирными линиями, а оси сжатия – сплошными; разрыв – в центре рисунка; на концах разрыва показаны области возмущения ориентировок осей главных нормальных напряжений, вызванных перемещением по разлому (рисунок из работы [Осокина, 1987, 2000] с изменениями)

В одном из этих конусов не будет ни одной оси растяжения, его ось будет совпадать с осью внешнего сжатия, а в другом конусе не будет ни одной оси сжатия; ось второго конуса является осью растяжения внешнего поля.

На основании этих правил составлена коническая палетка О.И. Гущенко [1979] (рис. 5.7), на которой на нижнем вертикальном радиусе отмечены углы наклона к горизонту осей главных нормальных напряжений (т.к. оси – прямые линии, то пологая ось в 10° близка к внешнему кругу, а вертикальная ось расположена в центре палетки). Кроме этого, на палетку нанесены поверхности конусов, наклоненных к горизонту под углами от 0° до 90° , концы этих конусов оцифрованы по внешней окружности палетки; угол при вершине этих конусов равен 90° .

Если угол наклона – 0° , то ось конуса лежит в горизонтальной плоскости, а конус симметрично пересекает верхнюю полусферу и отражается на палетке в виде следов полуконусов с отметкой 0; начиная от 10° угла наклона конуса его проекция на верхнюю полусферу разбивается на две части, расположенные в

верхней и нижней частях палетки с соответствующей оцифровкой углов наклона.

При определении общего поля напряжений требуется подбор таких конусов со взаимно перпендикулярными осями, в которых в одном не будет ни одной оси локального растяжения, его ось будет совпадать с осью общего сжатия, внешнего по отношению к деформируемому объему, а в другом конусе не будет ни одной оси локального сжатия; ось второго конуса является осью растяжения внешнего поля.

Последовательность определения параметров общего поля напряжений показана на (рис. 5.8) и состоит из следующих этапов:

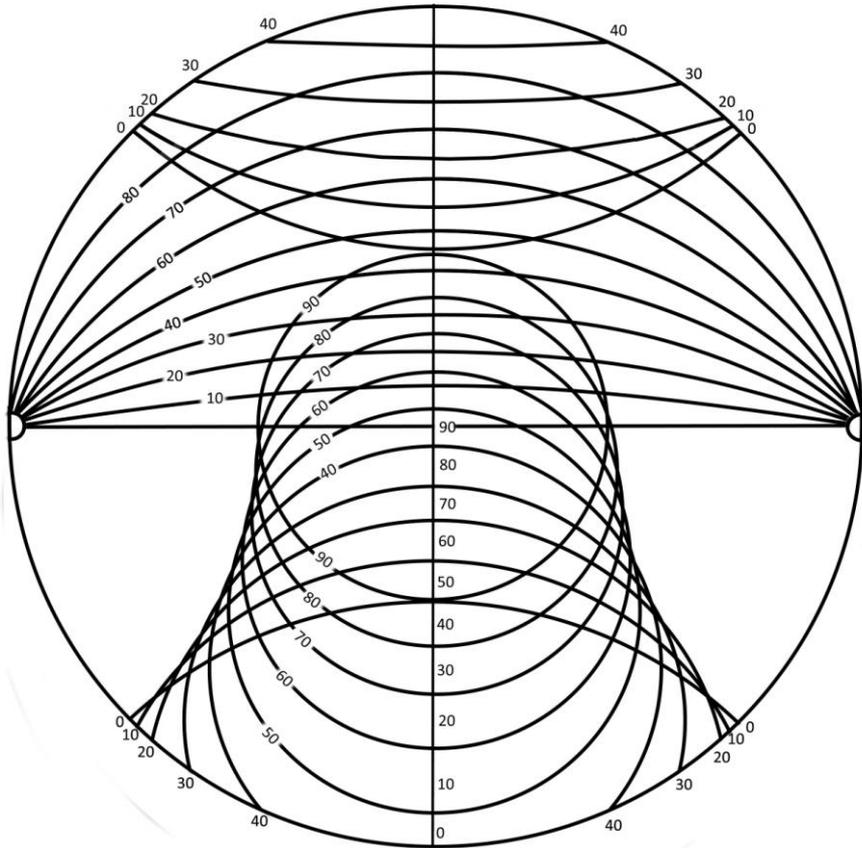


Рис. 5.7. Коническая палетка О.И. Гущенко [1979]

1. Все оси сжатия и растяжения локальных полей (табл. 5.2) нанести на одну стереограмму. На этой стереограмме (рис. 5.8, А) локальных осей сжатия и растяжения производится предварительное оконтуривание областей, в которых нет осей сжатия – место возможного нахождения оси растяжения общего поля и осей растяжения – соответственно, место нахождения оси сжатия общего поля напряжений. В центре выделенных областей предварительно определяется положение осей сжатия ($\sigma_3^{\sigma\sigma}$) и растяжения ($\sigma_1^{\sigma\sigma}$). Подбираем дугу большого круга, которая

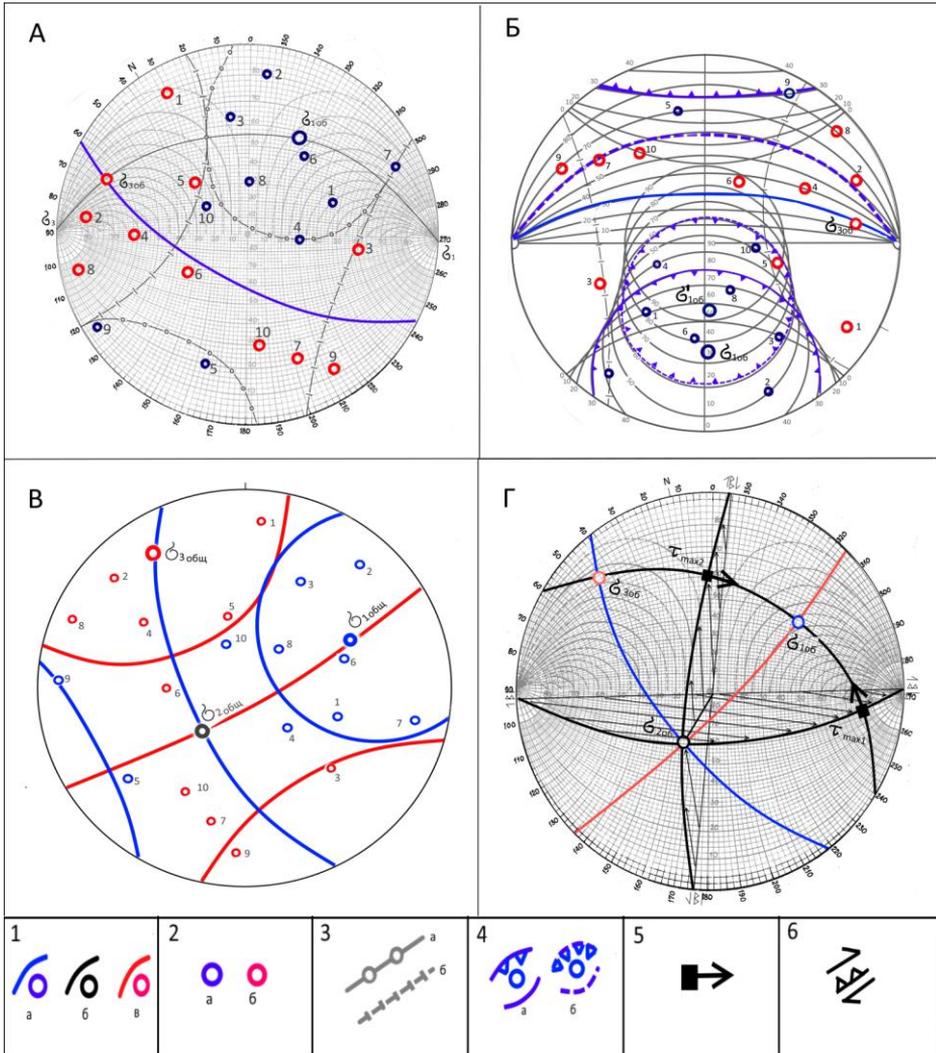


Рис. 5.8. Определение параметров общего поля напряжений. А – Предварительное оконтуривание областей нахождения осей сжатия и растяжения общего поля напряжений; Б – Выбор конусов растяжения общего поля напряжений; В – Общее поле напряжений и определение кинематических плоскостей общего поля напряжений. Г – Общее поле напряжений и плоскости действия максимальных касательных напряжений. Условные обозначения: 1 – оси главных нормальных напряжений общего поля напряжений и плоскости их действия: а – растяжения, б – промежуточной; в – сжатия; 2 – оси локальных тектонических напряжений: а – растяжения, б – сжатия; 3 – границы областей предполагаемого нахождения осей растяжения (а) и сжатия (б) общего поля напряжений. 4 – оси растяжения общего поля напряжений, плоскости их действия и конуса растяжения: а – установленные, б – предполагаемые. 5 – полюс плоскостей действия максимальных касательных напряжений. 6 – простираения плоскостей действия максимальных касательных напряжений и кинематический тип, отвечающих этим плоскостям разрывов – взбросо-сдвиги и сдвига-взбросы

объединяет выбранные оси; по этой дуге расстояние между осями должно быть

90° (этот отсчет производится по палетке Вульфа – Гущенко).

2. После совмещения стереограммы с конической палеткой Гущенко подбираются конуса сжатия и растяжения. Предварительно определенная ось растяжения (σ_1^{ob}) совмещается с нижним вертикальным радиусом палетки, на котором нанесены углы наклона конических поверхностей. Ось σ_1^{ob} совпадает с отметкой угла наклона 30°; не смещая кальку, наносим конус 30°, который из-за пологого расположения оси пересекает верхнюю полусферу в верхней и нижней части стереограммы (рис. 5.8, Б).

Наносим плоскость действия подобранной оси растяжения. По построению она проходит через предварительно подобранную ось сжатия. В этом же положении кальки находим более крутую ось растяжения σ_1^{ob} , наклоненную под углом 60°, оконтуриваем конус 60° и проводим плоскость действия этой оси растяжения. Последняя отклоняется от центра выбранной на 1-м этапе области распространения осей сжатия, поэтому отдается предпочтение оси растяжения с углом 30°.

3. По аналогии с конусом растяжения находим конус сжатия: ось сжатия общего поля совмещается с вертикальным радиусом конической палетки (отметка 10°), проводится 10°-й конус и плоскость действия оси сжатия общего поля. На рис. 5.8, В показано реконструированное общее поле. Точка пересечения плоскостей действия осей сжатия и растяжения является промежуточной осью (σ_2^{ob}), точки касания конусов сжатия и растяжения являются выходом на верхнюю полу сферу плоскостей действия максимальных касательных напряжений общего поля.

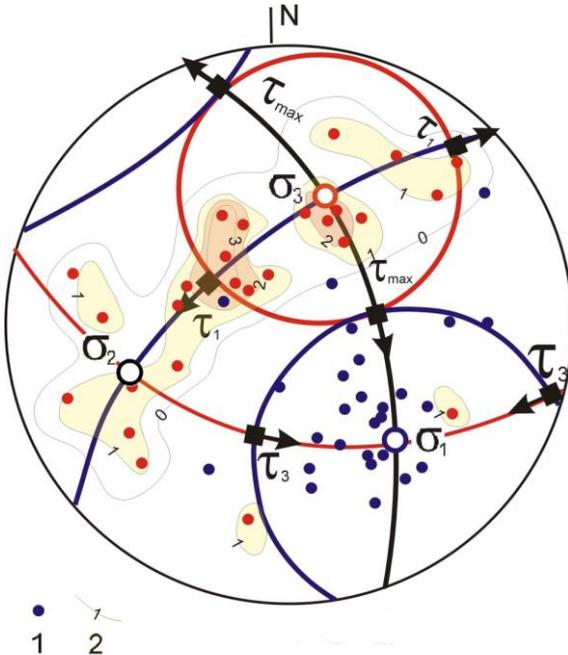


Рис. 5.9. Общее поле напряжений Пелинжичейского блока (Приполярный Урал) [Сим и др., 2005]: 1 – оси главных нормальных напряжений для локальных стресс-состояний (синим показаны оси растяжения, красным – оси сжатия); 2 – изолинии плотностей осей сжатия локальных стресс-состояний

4. Проводим собственно плоскости действия касательных напряжений, наносим вектора перемещения по этим плоскостям (рис. 5.8, Г) – очевидно, что

сдвиговая компонента перемещений преобладает над взбросовой (следствие полного погружения осей сжатия и растяжения общего поля).

По стереограммам с общим полем напряжений можно на качественном уровне определить вид тензора напряжений, свойственный площади, охарактеризованной этим общим полем. На рис. 5.9 видно, что подавляющее большинство осей растяжения локальных стресс-состояний сконцентрировано в конусе растяжения, что говорит о деформировании блока с видом тензора одноосного растяжения. Поясное распределение осей сжатия локальных стресс-состояний вдоль плоскости действия оси растяжения также свидетельствует о том, что в целом в Пелингичейском блоке доминирует вид тензора одноосного растяжения (Таблица 5.2). В этом блоке открыто большинство месторождений и проявлений пьезосырья Приполярного Урала, блок насыщен мощными кварцевыми жилами, ориентированными нормально к оси растяжения.

Таблица 5.2. Результаты определения осей сжатия и растяжения локальных стресс-состояний исследуемого (тестового) участка

№ объема с ЛСС	№ точки наблюдения	Расположение	Ось растяжения	Ось сжатия
1	1-3	Тест	284 \angle 40	185 \angle 10
2	4-5		222 \angle 10	131 \angle 10
3	6		206 \angle 27	312 \angle 30
4	7-8		308 \angle 60	125 \angle 30
5	9-11		54 \angle 20	170 \angle 50
6	12		251 \angle 37	93 \angle 50
7	13-14		280 \angle 10	14 \angle 20
8	15		217 \angle 60	112 \angle 7
9	16		93 \angle 5	3 \angle 10
10	17		160 \angle 62	30 \angle 30

Этап определения общего поля напряжений важен для оценки опасности разломов, откартированных на исследуемом участке, как с точки зрения сейсмичности, так и для оценки потенциальной устойчивости опасных гражданских сооружений, проектируемых на участке. Проницаемость разломов как для углеводородов, так и для водоносности, также оценивается согласно общему полю напряжений: плоскости разломов, перпендикулярных оси растяжения, будут максимально проницаемыми при прочих равных геологических условиях. Определение общего поля напряжений полезно применять при массовых определениях осей главных нормальных напряжений по трещинам отрыва фрактурграфическим методом П. Банквитца.

ГЛАВА 6. Метод катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого

Метод катакластического анализа разрывных смещений (МКА) исходно создавался для расчета напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений. В этом случае речь идет о тех напряжениях, которые существуют в земной коре в инструментальный период сейсмологических наблюдений, т.е. о современных напряжениях. Однако все основные его положения могут быть применены и к анализу геологических индикаторов о трещинах сдвига (скола).

Разница в алгоритме МКА, направленном на работу с сейсмологическими с алгоритмом для геологических данных, состоит прежде всего в том, что в первом случае надо определить, какая из двух нодальных плоскостей механизма очага реализована в виде сейсмического разрыва (плоскость трещины определяют геологи). Подобное различие оказывается очень полезным, т.к. позволяет проверить критерий МКА для выделения реализованной плоскости в очаге землетрясения (см. далее).

Другим различием является возможность из сейсмологических записей получить дополнительную информацию о величине сброшенных напряжений в очагах наиболее сильных землетрясений. Это приводит к тому, что в МКА для сейсмологических данных имеется четыре этапа, позволяющих последовательно определять: 1) ориентацию главных осей и вид эллипсоида напряжений и сеймотектонических деформаций; 2) нормированные величины эффективного давления и максимального касательного напряжения (нормировка на прочность сцепления массивов горных пород); 3) величину прочности сцепления и абсолютные значения эффективного давления и максимального касательного напряжения; 4) тектоническое давление в твердом скелете горных пород и флюидное давление в трещинно-поровом пространстве.

В случае геологических данных о зеркалах скольжения возможна реализация только первых двух этапов МКА, т.е. возможно определить ориентацию главных осей тензора напряжений и его вид, рассчитать нормированный тензор сеймотектонических деформаций, а также определить нормированные величины эффективного давления и максимального касательного.

6.1. Базисные положения метода

1. Положение о наличии дефектов в среде. В процессе деформирования преобразование части упругих деформаций в необратимые (остаточные), обуславливающие диссипацию механической энергии в соответствующем объеме геосреды, осуществляется по большей части за счет сдвигов по уже существующим поверхностям пониженной прочности – поверхности скола (рис. 6.1).

При этом, начиная с определенного уровня осреднения по времени (определяется числом разрывов) и пространству (определяется наиболее представительным линейным размером разрывов), образование нового или активизацию ранее возникшего скола можно рассматривать как микроакт (по времени) квазипластического деформирования. Объединяясь, множество микроактов формирует процесс квазипластического или катакластического течения массива горных пород [Ризниченко, 1965, 1977]. Таким образом, трещина в зависимости от масштаба

осреднения может рассматриваться и как акт разрушения, и как микроакт (по времени) катакластического деформирования, доставляющего в тензор сейсмо-тектонических деформаций определенный вклад:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{\bar{U}}{2L} (\ell_{ni}\ell_{uj} + \ell_{nj}\ell_{ui}), \quad (6.1)$$

где ℓ_{ni} и ℓ_{ui} – направляющие косинусы вектора нормали \mathbf{n} и вектора смещения \mathbf{u} вдоль плоскости трещины в произвольной ортогональной системе координат, \bar{U} – средняя величина подвижки, L – протяженность трещины.

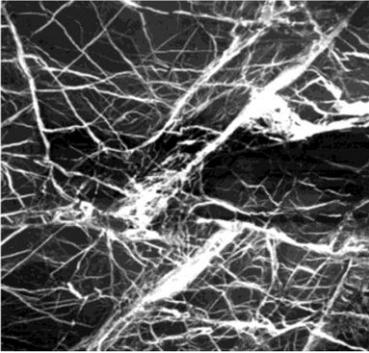


Рис. 6.1. Природный объект, показывающий близкое расположение множества существующих дефектов в виде минерализованных трещин

Важным отличительным положением МКА является заключение, что разрывные дефекты в геосреде расположены достаточно близко, что предопределяет *взаимное влияние трещин* (напомним, что в других подходах говорится об отсутствии такого влияния). При этом в ходе деформационного процесса, осуществляемого в условиях неизменного внешнего нагружения, происходит определенное сглаживание такого взаимного влияния.

2. Установившаяся фаза деформационного процесса. При стабильных во времени условиях нагружения и при неизменных свойствах геосреды процесс деформирования стремится к установившемуся. На этой стадии ориентация главных осей тензора приращений необратимых деформаций и вид эллипсоида этих деформаций остаются неизменными. При этом амплитуда суммарных необратимых деформаций увеличивается, также может увеличиваться интенсивность упругих деформаций и напряжений.

Квазипостоянство напряжений означает, что они могут меняться в короткие промежутки времени из-за произошедших актов хрупкого разрушения, но эти изменения носят закономерный характер. Множественные акты хрупкого разрушения определяют отклонения напряжений от некоторого среднего значения, которое на протяжении достаточно длительного интервала времени остается постоянным (рис. 6.2). Установившаяся фаза деформирования предопределяет подобие эллипсоида упругих деформаций и необратимых – трещинных. Если интенсивности приращений упругих деформаций за каждый последующих акт внешнего нагружения совпадает с интенсивностью тензора необратимых деформаций, то уровень напряжений для установившейся фазы деформирования постоянный. Если интенсивность приращений упругих деформаций за каждый по-

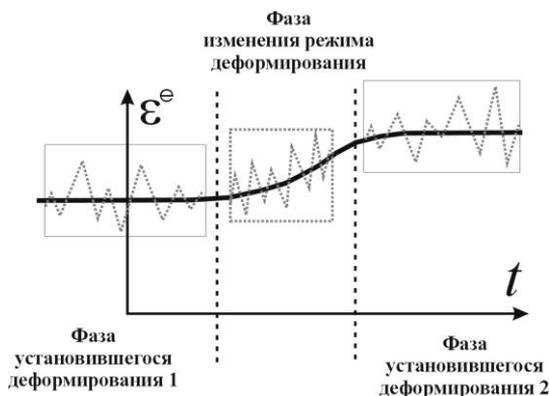


Рис. 6.2. Схема, иллюстрирующая различие между установившейся и неустойчивой фазами деформирования (t – время, ε^e – упругая деформация).

Прямой участок гладкой линии показывает, что вид эллипсоида полных (упругих и необратимых) деформаций и его ориентация постоянна. Тонкая ломаная линия показывает отклонения эллипсоида необратимых деформаций, образующихся в результате каждого акта хрупкого разрушения, от эллипсоида полных деформаций

следующий акт внешнего нагружения не совпадает с интенсивностью тензора необратимых деформаций, но их эллипсоиды подобны, то фаза деформирования остается установившейся, но для нее уровень напряжений возрастает во времени.

Неустойчивая фаза деформирования предполагает постоянные изменения ориентации осей главных напряжений или вида эллипсоида напряжений, происходящие с квазипостоянной или переменной скоростью.

Предположение об установившемся режиме деформирования является необходимым условием, позволяющим в рамках МКА определять параметры тензоров напряжений и приращений сеймотектонических деформаций. Т.е. расчет напряжений в некоторой области возможен, если критерии метода покажут, что напряженное состояние на исследуемом периоде времени в среднем неизменно. Требование установившегося режима деформирования заменяет постулат Уоллеса и Ботта о совпадении направления подвижки на поверхности скола с направлением касательных напряжений в методах дислокационного анализа.

В случае установившегося деформационного процесса тензор приращений катакластических деформаций, сформировавшийся за определенный интервал времени за счет трещинных деформаций, стремится быть подобным тензору упругих деформаций, усредненных за этот же интервал времени и в этом же объеме. Подобие тензоров означает, что оси их главных напряжений параллельны, а эллипсоиды тензоров одинаковы по форме. При этом главные оси тензора напряжений и его вид могут отличаться от параметров тензора упругих и приращений катакластических деформаций. В этом случае среда анизотропная (рис. 6.3).

Если в изотропной среде эллипсоид необратимых трещинных деформаций не будет подобным эллипсоиду упругих деформаций (например, нагружение близко к одноосному сжатию, а в среде существует активная система близпараллельных трещин), то режим деформирования не будет установившимся. Дополнительные упругие деформации, возникающие в результате внешнего нагружения, не снимаются полностью трещинным течением, и напряжения начинают изменяться во времени.

Алгоритм МКА для сейсмологических данных ориентирован на поиск таких временных фаз деформирования, для которых и выполняется поиск параметров напряжений. В случае использования для реконструкции напряжений сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений имеются данные о времени их возникновения. Специфика использования геологических индикаторов хрупкого разрушения – данных о зеркалах скольжения – определяет возможность наличия в выборке, собранной на одном обнажении, информации о нескольких фа-

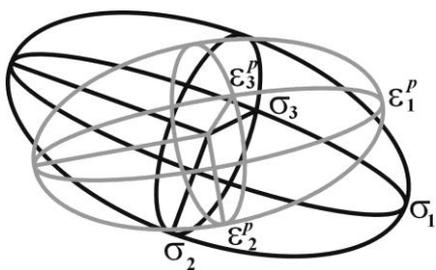


Рис. 6.3. Схема, показывающая случай несовпадения эллипсоида пластических деформаций и напряжений, отвечающий анизотропным свойствам среды

зах нагружения. Алгоритм МКА позволяет разделить такую неоднородную начальную выборку. Процедуры метода ориентированы на выделение минимального числа фаз нагружения при удовлетворении энергетических критериев метода и получении максимальных значений суммарной упругой энергии, выделяющейся на трещинах.

3. Область упругой разгрузки. В окрестности каждого скола в результате относительного перемещения его поверхностей (плоскостей) формируется область упругой разгрузки, в пределах которой существенно изменяется напряженное состояние. Согласно известным экспериментальным и теоретическим работам [Осокина, Цветкова, 1979а, б; Осокина, Фридман, 1987], вблизи окончания разрыва имеются участки повышения и понижения относительно исходного их значения (до начала скольжения бортов разрыва) интенсивности компонент тензора напряжений масштаба осреднения с линейным размером, много меньшим размера разрыва (рис. 6.4).

Несмотря на это, в целом в окрестности разрыва средний уровень напряжений уменьшается. Размер области упругой разгрузки зависит от состояния геосреды. В случае чисто упругого поведения радиус области упругой разгрузки можно принять равным 3-5 длинам разрыва. Этот радиус становится существенно больше в случае, когда среда находится в закритическом состоянии и в ней имеет место накопление необратимых деформаций за счет дефектов еще меньшего размера, чем исследуемое поле разрывных смещений. В этом случае радиус области упругой разгрузки может в 30-50 и более раз превышать размер самого разрыва. Размер области упругой разгрузки определяет площадь, с которой могут быть собраны разрывные смещения. Он очень важен для сейсмологических данных. В случае применения МКА для геологических индикаторов данное положение не используется.

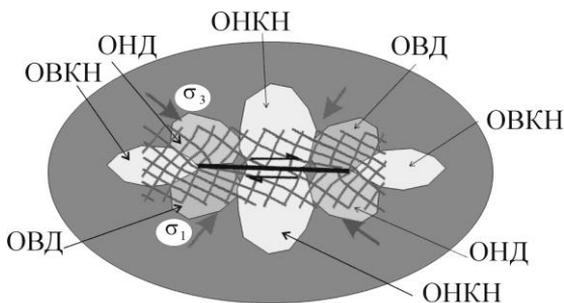


Рис. 6.4. Схема, иллюстрирующая неоднородность напряжений области упругой разгрузки вокруг трещины, для которой уменьшается упругая энергия (размер области условный). ОВД – области повышения всестороннего давления, ОНД – обл. понижения давления, ОВКН – обл. повышения касательных напряжений, ОНКН – обл. понижения касательных напряжений, линии серого цвета – траектории осей максимального и минимального сжатия

4. Тензор приращений необратимых катакластических деформаций. Каждая трещина представляет собой акт хрупкого разрушения. При этом она снимает часть упругих деформаций, переводя их в необратимые. Если K трещин сдвига реализовались в однородном поле напряжений (однородная выборка трещин), то для них согласно работе [Костров, 1975] имеет место выражение для расчета тензора приращений сейсмоструктурных деформаций (тензор приращений катакластических деформаций):

$$S_{ij} = 0.5 \sum_{k=1}^K \frac{\bar{U}^k}{L^k} \left(n_i^k u_j^k + n_j^k u_i^k \right) \text{ при } S_{ii} = 0. \quad (6.2)$$

Второе выражение в (6.2) определяет отсутствие изменения объема за счет неупругих деформаций.

Отметим, что работа [Костров, 1975] ориентирована на приложение к сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений, но полученные в ней выражения для тензора приращений сейсмоструктурных деформаций можно использовать и для тензора приращений необратимых трещинных деформаций.

Из теории трещин, развивающихся в упругой среде, следует, что соотношение между длиной трещины L^k и средним сдвиговым смещением \bar{U}^k по ней связано с величиной сброшенных на трещине касательных напряжений $\Delta\tau^k$ и модулем упругого сдвига G , который для плотных осадочных и кристаллических горных пород составляет $5 \cdot 10^{4-5}$ бар:

$$\bar{U}^k / L^k = \Delta\tau^k / G. \quad (6.3)$$

Это позволяет выражение для тензора приращений необратимых катакластических деформаций (6.2) переписать в виде:

$$S_{ij} = \frac{1}{2G} \sum_{k=1}^K \Delta\tau^k \left(n_i^k u_j^k + n_j^k u_i^k \right). \quad (6.4)$$

Значения сброшенных напряжений в сейсмологии могут быть получены на основе анализа сейсмограмм. Подобные расчеты не являются стандартными и обычно выполняются только для сильных землетрясений. Однако существует возможность дать прогноз относительной величины сброшенных напряжений на плоскости трещины. Он осуществляется с использованием диаграммы Мора, и для этого мы должны знать напряженное состояние для того объема, в котором создана однородная выборка трещин (см. рис. 6.5).

При оценке $\Delta\tau^k$ используется известное положение теории упругих трещин сдвига, согласно которому величина нормальных напряжений к плоскости трещин до и после ее активизации остается неизменной ($\sigma_{nn}^0 = \sigma_{nn}^1$). Величина $\Delta\tau^k$ (см. рис. 6.5) может быть определена при заданной прочности сцепления τ_f массивов горных пород, которая сильно зависит от масштаба. Поскольку τ_f нам неизвестна, то $\Delta\tau^k$, а, следовательно, и компоненты тензора S_{ij} определяется с точностью до нормировки на τ_f .

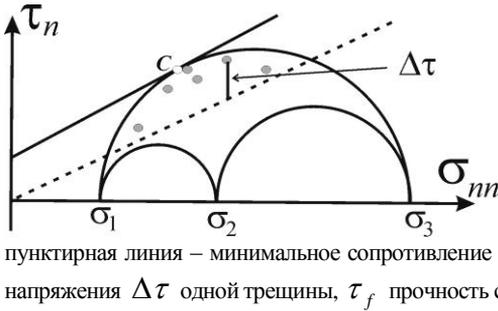


Рис. 6.5. Схема, иллюстрирующая возможность оценки относительного значения сброшенных напряжений на плоскостях трещин из однородной выборки. Точки с серой заливкой – напряженные состояния для зеркал скольжения из однородной выборки. Точка *C* – предел хрупкой прочности. Сплошная линия – предел хрупкой прочности, пунктирная линия – минимальное сопротивление сухого трения. Вертикальная линия – сброшенные напряжения $\Delta\tau$ одной трещины, τ_f – прочность сцепления

Вполне корректно допустить, что прочность сцепления в масштабе осреднения в первые километры (масштаб геологического обнажения) одинакова для области в первые сотни километров, т.е. для субрегиона. Таким образом, для всех обнажений субрегиона нормировка тензора сеймотектонических деформаций будет осуществляться на одну и ту же величину.

Заметим, что в предыдущей версии МКА расчет S_{ij} осуществлялся несколько иным способом. Он был основан на том факте [Касахара, 1985], что удельная по объему энергия, снимаемая в результате землетрясения, варьируется в небольших пределах (этот результат также распространяется и на тектонические трещины). Это позволяло в рамках МКА ввести гипотезу постоянства сброшенных напряжений для всех трещин из однородной выборки ($\Delta\tau^k = const$). Отсюда вместо (6.4) следует:

$$S_{ij} = 0.5 \frac{\Delta\bar{\tau}}{G} \sum_{k=1}^K \left(n_i^k u_j^k + n_j^k u_i^k \right), \quad (6.5)$$

где $\Delta\bar{\tau}$ – средняя величина касательных напряжений, сброшенных на совокупности трещин $k = 1, \dots, K$. В МКА тензор приращений необратимых деформаций (6.5) рассчитывается с точностью до нормировки на величину отношения $\Delta\bar{\tau} / G$.

5. Однородная выборка структурно-кинематических данных о сколах. В МКА существуют критерии, с помощью которых можно понять, насколько однороден в пространстве и времени процесс накопления необратимых деформаций. Главный из таких критериев опирается на положение теории пластичности, требующее упорядоченного распределения необратимых деформаций, формирующихся в результате разрывного смещения [Ивлев, Быковцев, 1971]:

$$d\varepsilon_{11}^k \geq d\varepsilon_{22}^k \geq d\varepsilon_{33}^k \text{ при } d\varepsilon_{11}^k + d\varepsilon_{22}^k + d\varepsilon_{33}^k = 0. \quad (6.6)$$

Здесь $d\varepsilon_{ii}^k$ – приращения деформаций вдоль искомым главных осей напряжений σ_i ($i = 1, 2, 3$). Поскольку трещины сдвига создают необратимую деформацию простого сдвига, для которого коэффициент Лодэ – Надаи ($\mu_\sigma = 0$), то для расчета приращения необратимых деформаций в (6.6) достаточно данных о направляющих косинусах нормали к плоскости трещины n_i^k и смещения вдоль нее s_i^k с главными осями σ_i ($i = 1, 2, 3$):

$$d\varepsilon_{ii}^k = n_i^k s_i^k. \quad (6.7)$$

которые создаются трещиной с номером k из выборки зеркал скольжения. Из критерия (6.6) следует:

$$n_i^k s_i^k \geq n_2^k s_2^k \geq n_3^k s_3^k. \quad (6.8)$$

Согласно неравенствам (6.8): а) вдоль оси алгебраически максимального главного напряжения σ_1 (ось максимального девиаторного растяжения) должны всегда формироваться необратимые деформации удлинения ($d\varepsilon_{11}^k > 0$); б) вдоль оси алгебраически минимального главного напряжения σ_3 (максимального сжатия) должны всегда формироваться необратимые деформации укорочения ($d\varepsilon_{33}^k < 0$); в) вдоль оси промежуточного главного напряжения σ_2 могут формироваться необратимые деформации как удлинения, так и укорочения, но их амплитуды должны быть меньшими, чем $d\varepsilon_{11}^k$ или $d\varepsilon_{33}^k$.

Из (6.5) и (6.6) следует:

$$n_1^k s_1^k > 0, \quad n_3^k s_3^k < 0. \quad (6.9)$$

Выражение (6.9) означает, что имеется угол между касательным напряжением на плоскости трещины для искомого тензора напряжений и реализовавшимся на трещине смещением. Т.е. выполнение (6.6) автоматически означает, что смещение вдоль трещины на искомом тензоре напряжений приводит к уменьшению упругой энергии среды.

Критерий (6.6) ограничивает возможные вариации ориентации осей главных напряжений для однородной выборки зеркал скольжения, что реализуется путем суммирования на полусферах областей возможного нахождения σ_1 и σ_3 (см. далее программный алгоритм МКА).

Проверка однородности выборки с зеркалами скольжения осуществляется путем суммирования областей, разрешенных для нахождения осей σ_1 и σ_3 , на нижней части единичной полусферы. Дело в том, что неравенства (6.9) определяют, что

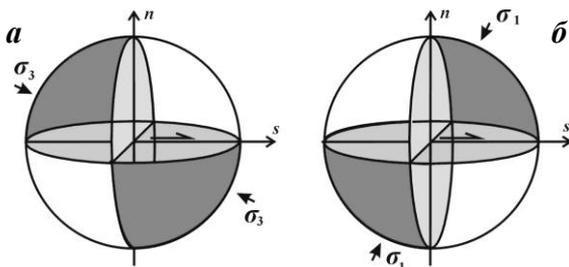


Рис. 6.6. Схемы, определяющие положения на верхней и нижней полусферах накрест лежащих квадрантов, в которых согласно (6.9) могут находиться оси максимального сжатия σ_3 (а) и алгебраически максимального главного напряжения σ_1 (б).

Темно серым цветом закрашены верхние задние и нижние передние стенки полусфер квадрантов для σ_3 и σ_1 соответственно. Плоскость трещины горизонтальна (ее нормаль n), закраска серая. Смещение верхнего борта трещины в положительном направлении оси s . Плоскость, нормальная к этой оси, является вертикальной разделительной плоскостью квадрантов – светло серая

для каждой трещины возможными областями нахождения этих осей являются соответствующие накрест лежащие квадранты (рис. 6.6).

Суммирование квадрантов, где могут находиться оси главных напряжений для двух сколовых трещин, показано на рис. 6.7, *а*. Взаимное пересечение областей темно-серого цвета дает область, где могут находиться оси главного напряжения σ_3 , а пересечение областей светло-серого цвета – области нахождения σ_1 . Там, где пересекаются области светло-серого и темно-серого цвета (зона шашечной заливки), не могут находиться обе оси главного напряжения.

Графическое правило реализации неравенств (6.5) более сложное и на практике выглядит так, как это показано на рис. 6.7, *б*. Дополнительное ограничение для оси промежуточного главного напряжения σ_2 приводит к тому, что в сравнении с рис. 6.7, *а* остроугольные окончания областей возможного нахождения главных напряжений переводятся в зоны, где не могут находиться оси главных напряжений.

В МКА существует также критерий, ограничивающий возможные вариации главных осей тензора приращений сейсмостектонических деформаций S_{ij} . Его можно получить из условия теории пластичности, определяющего связь между снимаемыми напряжениями и необратимыми деформациями. Это требование можно представить в виде:

$$n_i^k s_i^k > 0, n_3^k s_3^k < 0, \quad (6.10)$$

где нижний индекс в отличие от (6.9) определяет направляющие косинусы с осями приращений главных сейсмостектонических деформаций S_1 и S_3 соответственно.

Критерии (6.6) и (6.10) позволяют производить сепарацию исходных данных о зеркалах скольжения, собранных с одного обнажения на выборки, отвечающие разным временным стадиям установившегося деформирования – фазы нагружения горного массива. Сами исходные выборки именуется далее **начальными выборками зеркал скольжения (НВЗС)**, а выборки зеркал скольжения, отобранные для разных фаз напряженного состояния, именуется как **однородные (ОВЗС)**.

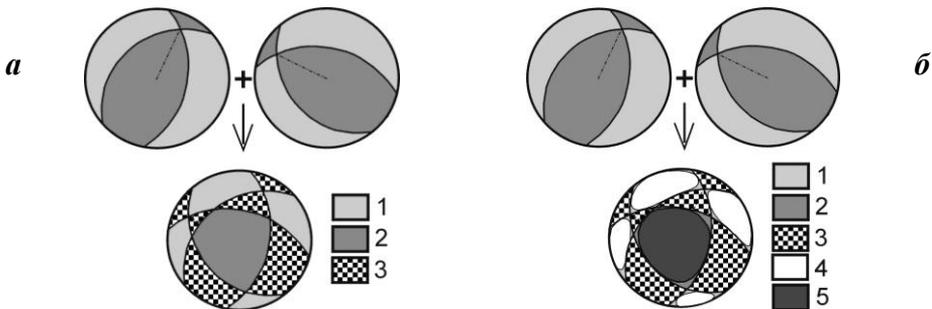


Рис. 6.7. Схемы, определяющие положения на верхней или нижней полусферах: *а*) накрест лежащие квадранты, в которых согласно (6.9) и (6.10) могут находиться оси главных напряжений σ_3 (1) и σ_1 (2), а также оси главных сейсмостектонических деформаций S_1 и S_3 ; *б*) зоны, в которых согласно (6.7) могут находиться оси главных напряжений σ_3 (4) и σ_1 (5)

6. Максимум диссипации внутренней упругой энергии для искомого тензора напряжений. Сформулированные выше принципы диссипации энергии для каждого скола из ОВЗС позволяют подобрать не противоречащие им (сколам) возможные напряженные состояния. В МКА расчет параметров тензора напряжений и приращений сейсмоструктурных деформаций осуществляется независимо по одному и тому же набору данных. Для согласования определяемых параметров тензоров приращений сейсмоструктурных деформаций и напряжений и для отыскания единственного из всех возможных напряженных состояний в МКА применяется положение, в определенном смысле подобное известному в теории пластичности максимальному принципу Мизеса [Mises, 1928; Ильющин, 1948]. Предлагается считать, что максимум диссипации удельной энергии упругих деформаций для ОВЗС достигается на тензоре искомого напряжений (рис. 6.8):

$$E = S_{ii} \sigma_i \rightarrow \max \text{ при } S_{ii} = 0. \quad (6.11)$$

Здесь верхний индекс при искомым главных напряжениях определяет необходимость выбора среди возможных ориентаций осей главных напряжений (α, θ – азимуты и углы погружения главных осей напряжений), определяемых критерием (6.6), и среди возможных значений коэффициента Лоде – Надаи

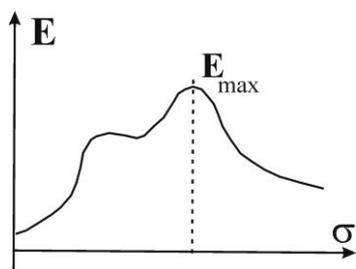


Рис. 6.8. Схема, иллюстрирующая нахождения единственных значений углов Эйлера и коэффициента Лоде – Надаи путем поиска максимального значения диссипации упругой энергии (6.11)

($-1 \leq \mu_\sigma \leq 1$) таких параметров, для которых значение удельной энергии E , рассеиваемой на необратимых деформациях, максимально. Следует отметить, что выражение (6.11) позволяет рассчитать величину энергии E с точностью до нормировки на величину прочности сцепления τ_f , т.к. и тензор сейсмоструктурных деформаций S_{ij} (6.4) рассчитан с точностью до нормировки на этот параметр.

7. Графический анализ однородных выборок на редуцированной диаграмме Мора. В МКА переход от данных о параметрах эллипсоида напряжений (ориентация главных осей напряжений и коэффициент Лоде – Надаи) осуществляется на основе использования анализа однородных выборок зеркал скольжения на диаграмме Мора. Для каждой трещины из такой выборки по данным о направляющих косинусах вектора нормали (полюс) \mathbf{n} и данным о параметрах эллипсоида напряжений можно рассчитать нормальную и касательные компоненты напряжений, действующих на ее поверхности. Эти компоненты можно записать следующим образом [Ребецкий, 2007]:

$$\begin{aligned}\sigma_{nn} &= -(p + 2\mu_\sigma \tau / 3) + \tau[(1 - \mu_\sigma)\ell_{n1}^2 - (1 + \mu_\sigma)\ell_{n3}^2], \\ \sigma_{ns} &= \tau[(1 - \mu_\sigma)\ell_{n1}\ell_{s1} - (1 + \mu_\sigma)\ell_{n3}\ell_{s3}], \\ \sigma_{np} &= \tau[(1 - \mu_\sigma)\ell_{n1}\ell_{p1} - (1 + \mu_\sigma)\ell_{n3}\ell_{p3}],\end{aligned}\tag{6.12}$$

где ℓ_{ki} – направляющие косинусы соответствующих векторов (n – полюс, s – простирание, p – падение для плоскости трещины: $r = n, s, p$) в системе координат, связанной с ориентацией главных осей тензора напряжений ($\sigma_i, i = 1, 2, 3$).

Поскольку первое слагаемое в выражении для нормального напряжения σ_{nn} есть, значение среднего напряжения σ_o [Ребецкий, 2007], то используя (6.12), можно перейти к редуцированным напряжениям (П.35) (см. Приложение):

$$\bar{\sigma}_{nn} = (\sigma_{nn} - \sigma_o) / \tau, \quad \bar{\sigma}_{ns} = \sigma_{ns} / \tau, \quad \bar{\sigma}_{np} = \sigma_{np} / \tau,\tag{6.13}$$

в которых содержатся только данные об эллипсоиде напряжений.

Эти выражения позволяют для трещин, смещения по которым возникли в одном стресс-состоянии (трещины из одной однородной выборки), производить графический анализ на редуцированной диаграмме Мора. При этом значение полного редуцированного касательного напряжения на плоскости каждой трещины $\bar{\tau}_n$ определяется векторным суммированием компонент касательных напряжений $\bar{\sigma}_{ns}$ и $\bar{\sigma}_{np}$. На рис. 6.9, *a* показан пример изображения на редуцированной диаграмме Мора данных о напряжениях на трещинах из однородной выборки.

Поскольку редуцированные напряжения не зависят от давления и максимального касательного напряжения, то на редуцированной диаграмме Мора возможен анализ совокупности однородных выборок зеркал скольжения, созданных для одного района наблюдений. В этом случае по облаку точек возможно определение усредненного коэффициента Лоде – Надаи для исследуемого района.

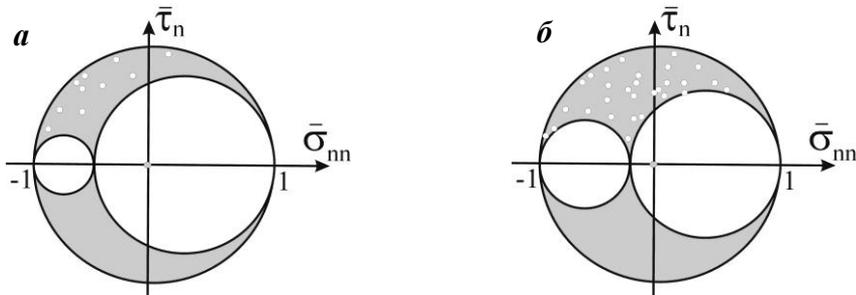


Рис. 6.9. Графический анализ данных о трещинах скалывания на редуцированной диаграмме Мора: *a*) одна однородная выборка зеркал скольжения; *б*) один локальный участок для совокупности однородных выборок зеркал скольжения. Точки белого цвета внутри большого и вне малых кругов Мора определяют напряженные состояния на произвольно ориентированных трещинах скалывания

8. Полоса хрупкого разрушения на диаграмме Мора. Результаты большого числа экспериментов по хрупкому разрушению образцов горных пород

обобщены в МКА представлением о том, что на диаграмме Мора все трещины должны иметь состояния, определяющие положения их точек внутри полосы, ограниченной системой неравенств, связанной с максимальным пределом прочности ненарушенных участков пород и минимальным сопротивлением сухого трения [Ребецкий, 2007]. Поскольку построение диаграммы Мора требует знания максимального касательного напряжения и эффективного давления, то для нахождения положения точек, характеризующих напряжения на плоскости трещины, в МКА переходят к редуцированным напряжениям (6.13). В этом случае отмеченные выше неравенства переписуются в следующем виде:

$$-k_f \bar{\sigma}_{nn}^* \leq \bar{\tau}_n \leq \tau_f / \tau - k_f \bar{\sigma}_{nn}^* \text{ при } \bar{\sigma}_{nn}^* \leq 0.$$

где σ_{nn}^* – эффективное (с учетом давления флюида) нормальное напряжение на плоскости образовавшегося или активизировавшегося скола, k_f – соответственно коэффициенты поверхностного трения, а τ_f – величина максимального внутреннего сцепления или предел прочности на сдвиг массивов горных пород.

В МКА условие (6.14), представленное на редуцированной диаграмме Мора, позволяет рассчитать уровень соотношения шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. Из рис. 6.10 видно, что разброс точек из однородных выборок на диаграмме Мора больше для состояния, величины напряжений которых имеют меньший уровень нормальных и касательных напряжений. Большой разброс точек на диаграмме Мора (большой угол створа области пересечения большого круга Мора с линией минимального сухого трения см. рис. 6.10) определяет и большую вариабельность в ориентации плоскостей зеркал скольжения.

Для определения отношения эффективного изотропного давления и максимального касательного напряжения на редуцированной диаграмме Мора выделяется точка (M на рис. 6.10) из однородной выборки зеркал скольжения, которая дает возможность провести линию минимального сухого трения, ближе всех отстоящую от центра большого круга Мора. По данным о редуцированных напряжениях этой точки определяется отношение этих компонент напряжений:

$$\frac{p^*}{\tau} = \frac{1}{k_f} (\bar{\tau}_n^M + k_f \bar{\sigma}_{nn}^M) - \mu_\sigma / 3. \quad (6.15)$$

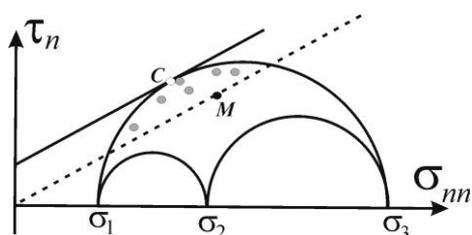


Рис. 6.10. Графические процедуры анализа в МКА соотношения эффективного давления и максимального касательного напряжения на диаграмме Мора.

Сплошная линия – предел прочности массивов горных пород, пунктирная линия – минимальное сопротивление сухого трения (h – расстояние от центра большого круга Мора до этой линии). Точка C – предел хрупкой прочности. Точки с серой заливкой отвечают напряжениям для зеркал скольжения из однородных выборок. Точка M с черной заливкой дает возможность провести линию минимального сопротивления сухого трения

В МКА при определении соотношения (6.16) априорно задается величина коэффициента поверхностного трения k_f . Большое число экспериментов и натуральных определений напряжений показало, что $0.5 \leq k_f \leq 0.7$. Обычно в программе *STRESSgeol*, созданной на основе алгоритма МКА, $k_f = 0.5$.

Величины τ и p^* можно определить с точностью до нормировки на неизвестное значение прочности сцепления массивов горных пород:

$$\left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle = \frac{1}{\cos \text{ec} 2\alpha_f - (\bar{\tau}_n^M + k_f \bar{\sigma}_{nn}^M)}, \quad (6.16)$$

$$\left\langle \frac{p^*}{\tau_f} \right\rangle = \frac{(\bar{\tau}_n^M + k_f \bar{\sigma}_{nn}^M) - k_f \mu_\sigma / 3}{k_f [\cos \text{ec} 2\alpha_f - (\bar{\tau}_n^M + k_f \bar{\sigma}_{nn}^M)]}, \quad \text{где } \alpha_f = 0.5 \arcc \tan k_f.$$

9. Критерий проверки ЗС на тип разрушения. В работе [Ребецкий, 2007] показано, что для макро- и микроскопических масштабов возможно формирование трещин сдвига не только в полосе хрупкого разрушения, но и в области диаграммы Мора, где оси максимального сжатия σ_3 ближе расположены к полюсу (нормали) трещины, чем оси главного напряжения минимального сжатия σ_1 . Если в первом случае трещины можно квалифицировать как хрупкие сколы, то во втором это скорее пластические сдвиги. Смещение бортов этих трещин может происходить при наличии только очень пластичных минералов, обеспечивающих резкое понижение сил трения. Такое расположение трещин по отношению к осям главных напряжений противоречит положениям методов структурного анализа и алгоритму МКА, применяемому для идентификации реализованного разрыва при использовании сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений.

В силу этого критерий МКА, определяющий выбор одной из нодальных плоскостей механизмов очагов землетрясений в качестве реализованного разрыва, можно использовать для разделения ЗС по их генезису: хрупкие, пластические сколы. В МКА существует критерий, основанный на анализе редуцированных кулоновых напряжений, отвечающих двум нодальным плоскостям одного землетрясения:

$$\left(\bar{\tau}_C^k \right)_n - \left(\bar{\tau}_C^k \right)_s > 0 \quad \text{при} \quad \left(\bar{\tau}_C^k \right)_n = \left(\bar{\tau}_n^k + k_f \bar{\sigma}_{nn}^k \right), \quad \left(\bar{\tau}_C^k \right)_s = \left(\bar{\tau}_s^k + k_f \bar{\sigma}_{ss}^k \right) > 0. \quad (6.17)$$

Здесь n – нормаль к нодальной плоскости, которая определяет положение сдвигового разрыва – очага землетрясения с номером k , а s – нормаль ко второй нодальной плоскости, которая разрывом не является.

Таким образом, критерий МКА (6.11) определяет, что в качестве реализованного разрыва выбирается та из нодальных плоскостей, для которой кулоновые напряжения имеют большие значения.

Примером использования критерия (6.11) является анализ субочагов Спитакского катастрофического землетрясения с $M = 6.9$ (по Рихтеру), произошедшего 7.12.1988 г. В таб. 6.1 приведены параметры субочагов и основного толчка (F). Механизм очага

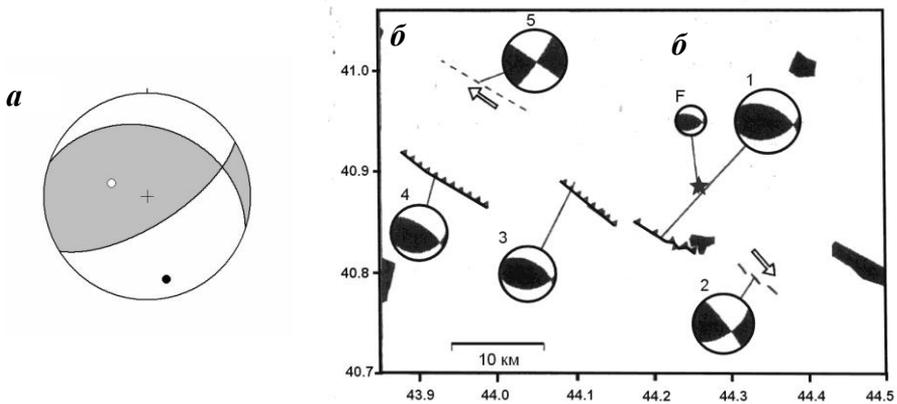


Рис. 6.11. Механизм очага Спитакского землетрясения (а) и карта разрывов и соответствующих им механизмов субочагов (б) (по работе [Арефьев, 2003]). Звездочка – эпицентр основного толчка

отличался от двойного диполя и имел коэффициент вида тензора момента центроида, равный 0.33. На рис. 6.11, а приведено наилучшее приближение СМТ-решения механизмом двойного диполя, а на рис. 6.11, б механизмы субочагов [Арефьев, 2003].

Результаты реконструкции позволили для данного района определить ориентацию главных осей тензора напряжений: азимут и угол погружения главного напряжения σ_1 – 252° и 6° , минимального σ_3 – 157° и 37° , а коэффициент вида тензора напряжений $\mu_\sigma \approx 0.3$. В соответствии с представленным здесь подходом механизмы субочагов были проанализированы на предмет выделения реализованной в них плоскости. В табл. 6.2 приведены результаты анализа при значении коэффициента поверхностного трения $k_s \approx 0.6$.

Таблица 6.1. Параметры субочагов Спитакского землетрясения [Арефьев, 2003]

N	Простираание	Погружение	Подвижка	$M_0, 10^{18}$ Нм
F	290	53	118	0.3
1	295	53	118	4.9
2	322	85	150	3.0
3	300	53	115	1.0
4	305	90	175	1.6
5	305	68	115	2.2

На рис. 6.12 результаты анализа реализованных плоскостей субочагов представлены на диаграмме Мора в виде редуцированных напряжений. Все плоскости, выделенные в качестве реализованных на основании анализа афтершоковых последовательностей [Арефьев, 2003], удовлетворяют критерию (6.17). Видно, что вектора редуцированных напряжений определяют положение точек вблизи большого круга Мора, а нодальные плоскости, являющиеся дополнительными к реализованным плоскостям, практически все, кроме N 4, тяготеют к центральной части диаграммы, что и определяет невозможность их реализации для данного поля напряжений.

Таблица 6.2. Редуцированные напряжения и критерий (6.17) для субочагов

k	$\bar{\sigma}_{nn}^k$	$\bar{\sigma}_{ss}^k$	$\bar{\tau}_n^k$	$\bar{\tau}_s^k$	Критерий (6.17)
F	-0.260	0.270	0.948	0.180	0.46
1	-0.261	0.277	0.962	0.182	0.39
2	0.828	0.182	0.522	0.520	0.15
3	-0.263	0.281	0.960	0.183	0.45
4	0.503	0.059	0.760	0.870	0.15
5	0.217	0.296	0.971	0.111	0.79

Приведенный пример показывает, что предлагаемый критерий выделения плоскости, реализованной в очаге землетрясения, работает хорошо, по крайней мере, для сильных землетрясений.

Заметим, что в работах [Никитин, Юнга, 1977; Gephard, Forsyth, 1984] предлагалось в качестве разлома выбирать ту из нодальных плоскостей, для которой проекция касательного напряжения на направление предполагаемого вектора скольжения максимальна (для нодальной плоскости с нормалью n это вектор скольжения – вектор s , а для нодальной плоскости с нормалью s вектор скольжения – вектор n). Фактически это означает, что выбирается та плоскость, для которой величина разности касательного напряжения, действующего на ней, и компоненты касательного напряжения в направлении скольжения имеют меньшее значение:

$$\Delta_n^k - \Delta_s^k > 0 \text{ при } \Delta_n^k = \bar{\tau}_n^k - \bar{\sigma}_{ns}^k, \Delta_s^k = \bar{\tau}_s^k - \bar{\sigma}_{ns}^k. \quad (6.18)$$

В рамках кинематического метода [Гущенко, Кузнецов, 1979] критерием выбора реализованной плоскости из однородной выборки служит выражение

$$\ell_{1r}^k \ell_{3r}^k \ell_{1m}^k \ell_{3m}^k > 0, r = n, s, \quad (6.19)$$

где ℓ_{in}^k и ℓ_{is}^k – направляющие косинусы векторов нормалей n и s к нодальным плоскостям, а ℓ_{mk}^k – направляющие косинусы вектора m , лежащего в плоскости скола и ортогонального вектору скольжения s , в системе координат, связанной с главными осями искомого тензора напряжений σ_i ($i = 1, 2, 3$).

На рис. 6.13 на редуцированных диаграммах Мора показаны распределения точек для реализованной плоскости в очаге при использовании критериев С.Л. Юнги – Дж. Гэфарда и О.И. Гущенко. Видно, что эти критерии приводят к выбору плоскостей, точки которых распределены по всей площади большого

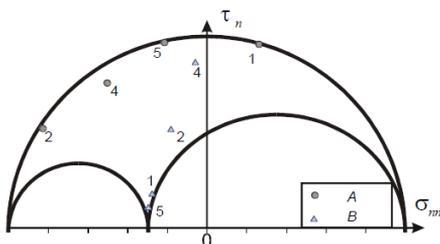


Рис. 6.12. Анализ реализованных плоскостей в субочагах Спитакского землетрясения на диаграмме Мора.

Кружки – точки для плоскостей, удовлетворяющих критерию (6.17); треугольники – точки для плоскостей, не удовлетворяющих критерию (6.17). F и 3 табл. 6.1 совпадают. Показана только верхняя половина диаграммы

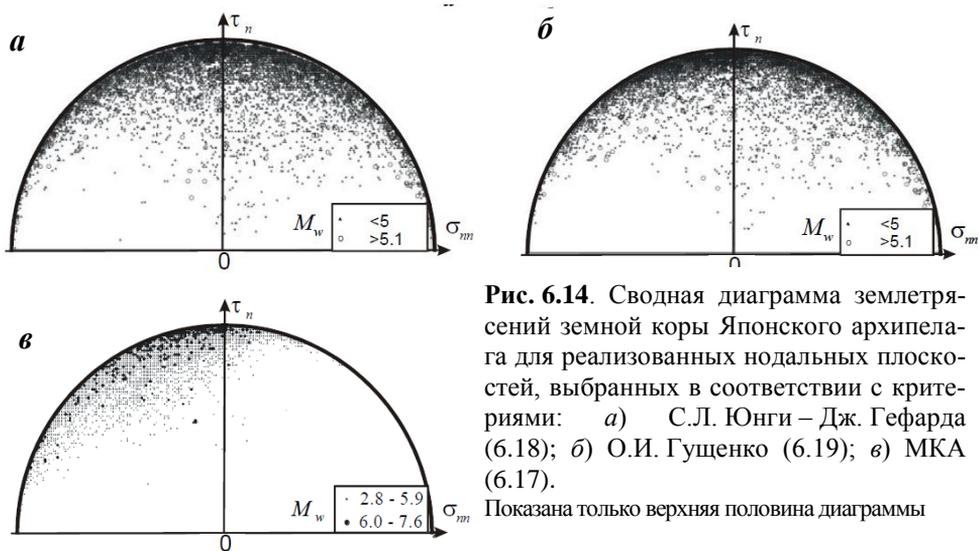


Рис. 6.14. Сводная диаграмма землетрясений земной коры Японского архипелага для реализованных нодальных плоскостей, выбранных в соответствии с критериями: а) С.Л. Юнги – Дж. Гефарда (6.18); б) О.И. Гущенко (6.19); в) МКА (6.17). Показана только верхняя половина диаграммы

круга, а часть землетрясений с большими магнитудами $M_w > 5$ попадают даже в центральную область диаграмм.

В табл. 6.3 в качестве примера приведены данные для трех однородных выборок, характеризующих три объема с различными значениями коэффициента Лоде – Надаи. Затемненные ячейки таблицы означают нодальные плоскости, которые будут выбраны согласно критериям С.Л. Юнги – Дж. Гефарда и О.И. Гущенко соответственно. В последней колонке таблицы затемненные ячейки определяют выбранную согласно критерию (6.17) плоскость в очаге землетрясения с нормалью n , светлые ячейки – с нормалью s .

Таблица 6.3. Сравнительная таблица результатов идентификации реализованной плоскости в очаге землетрясения согласно разным критериям для трех однородных выборок механизмов очагов землетрясений

k	μ_σ	$\bar{\sigma}_{nn}^k$	$\bar{\sigma}_{ss}^k$	$\bar{\sigma}_{ns}^k$	$\bar{\tau}_n^k$	$\bar{\tau}_s^k$	Критерий Юнги – Гефарда (6.18)		Критерий О.И. Гущенко (6.19)		Критерий (6.17)
							Δ_n^k	Δ_s^k	$I_{n1}^k I_{n3}^k I_{m1}^k I_{m3}^k$	$I_{s1}^k I_{s3}^k I_{m1}^k I_{m3}^k$	
1	-0.04	0.08	0.04	0.90	0.90	0.99	0.00	0.09	-0.42	0.35	-0.07
2	-0.04	0.16	-0.12	0.99	0.99	0.99	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.14
3	-0.04	0.42	-0.93	0.16	0.52	0.31	0.36	0.15	-0.18	0.04	0.88
4	-0.04	0.32	-0.29	0.95	0.95	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
5	-0.04	0.46	-0.42	0.88	0.88	0.90	0.00	0.02	-0.06	0.06	0.42
6	-0.04	0.10	-0.07	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
7	-0.04	0.46	-0.43	0.88	0.88	0.90	0.00	0.02	-0.08	0.08	0.42
8	-0.04	0.24	-0.22	0.94	0.94	0.97	0.00	0.03	-0.14	0.13	0.20
9	-0.04	0.13	-0.08	0.65	0.99	0.65	0.34	0.00	0.60	-1.41	0.45
10	-0.04	0.91	-0.94	0.22	0.34	0.28	0.12	0.06	-0.05	0.04	0.98
11	-0.04	0.91	-0.94	0.22	0.34	0.28	0.12	0.06	-0.05	0.04	0.98
1	0.62	0.26	-0.71	0.76	0.76	0.86	0.00	0.10	-0.48	0.33	0.39
2	0.62	0.26	-0.71	0.76	0.76	0.86	0.00	0.10	-0.48	0.33	0.39

3	0.62	0.28	-0.77	0.80	0.82	0.80	0.02	0.00	0.12	-0.13	0.54
4	0.62	0.28	-0.74	0.57	0.58	0.84	0.01	0.27	-1.04	0.40	0.25
5	0.62	0.12	-0.66	0.84	0.84	0.87	0.00	0.03	-0.18	0.17	0.37
6	0.62	0.25	-1.02	0.49	0.49	0.52	0.00	0.03	-0.09	0.03	0.60
7	0.62	0.31	-0.72	0.70	0.70	0.86	0.00	0.16	-0.68	0.45	0.35
8	0.62	-0.02	-0.43	0.96	0.96	0.96	0.00	0.00	-0.03	0.03	0.20
9	0.62	0.29	-0.83	0.74	0.75	0.76	0.01	0.02	-0.13	0.13	0.54
1	-0.59	0.45	0.06	0.89	0.94	0.89	0.05	0.00	0.3	-0.38	0.25
2	-0.59	0.61	-0.13	0.88	0.88	0.90	0.00	0.02	-0.14	0.13	0.34
3	-0.59	0.69	-0.25	0.85	0.85	0.87	0.00	0.02	-0.08	0.08	0.46
4	-0.59	0.80	-0.33	0.59	0.79	0.59	0.20	0.00	-0.81	0.38	0.77
5	-0.59	0.44	-0.11	0.91	0.97	0.92	0.06	0.01	0.20	-0.22	0.33
6	-0.59	0.26	0.09	0.98	0.99	0.99	0.01	0.01	0.04	-0.04	0.08
7	-0.59	0.47	0.12	0.86	0.91	0.86	0.05	0.00	0.25	-0.32	0.23
8	-0.59	0.29	0.16	0.92	0.92	0.98	0.00	0.06	0.32	-0.40	0.01
9	-0.59	0.32	0.1	0.94	0.94	0.98	0.00	0.04	-0.30	0.26	0.07
10	-0.59	0.31	0.23	0.93	0.93	0.94	0.00	0.01	-0.08	0.08	0.03
11	-0.59	0.42	0.13	0.91	0.92	0.92	0.01	0.01	0.00	0.00	0.14
12	-0.59	0.84	-0.31	0.74	0.74	0.76	0.00	0.02	0.06	-0.06	0.55

Здесь следует отметить, что при использовании критерия (6.17) в более чем 80% случаев выбор падает на плоскость, на которой действуют меньшие сжимающие напряжения. Как видно из данных таблицы, критерий (6.18) дает результаты более близкие к предлагаемому критерию, чем критерий (6.19), хотя различия в выборе не достигают 30%. Заметим, что в большом числе случаев критерий (6.18) трудно реализовать из-за близких значений Δ_n^k и Δ_s^k .

Для использования критерия (6.17) по отношению к данным о ЗС необходимо получить данные о дополнительной плоскости и векторе скольжения вдоль нее, аналогично тому, как это делается в сейсмологии. Полюс этой дополнительной плоскости будет совпадать с вектором смещений ЗС, а вектор смещения вдоль дополнительной плоскости будет совпадать с полюсом ЗС. Далее следует для этой дополнительной плоскости рассчитать редуцированные касательные и нормальные напряжения и получить значение редуцированного кулонового напряжения. Сопоставление этого кулонового напряжения с кулоновым напряжением для анализируемого ЗС (6.17) покажет, к какому типу следует его отнести.

6.2 Алгоритм и интерфейс программы, реализующей положения МКА

В этом разделе будет дано описание алгоритма реконструкции ориентации главных осей и коэффициента вида тензоров палеонапряжений и приращений сейсмотектонических деформаций, основанного на положениях МКА применительно к геологическим данным о сколовых трещинах. Первым важным отличием реконструкции палеонапряжений от реконструкции современных напряжений по сейсмологическим данным является то, что геологические данные о сколах определяют ориентацию в пространстве плоскости скола и направление относительного скольжения ее бортов (для сейсмологических данных обе нодальные плоскости равнозначно могут быть трещинами). Этот фактор практически не сказывается на алгоритме расчета, однако позволяет выполнять дополнительную интерпретацию результатов расчетов, которая отсутствует в случае использования сейсмологических данных.

Другое отличие связано с отсутствием в геологических данных привязки по времени для каждого зеркала скольжения. При этом встречаются случаи, когда на одной площадке сбора данных (в одном обнажении) встречаются плоскости сколов с несколькими направлениями зеркал скольжения (ЗС), характеризующими разные этапы эволюции напряженного состояния. Таким образом, в случае геологических данных о сколовых трещинах нет возможности применить подход, используемый при создании однородных выборок по сейсмологическим данным о механизмах очагов или решениям о тензоре момента центроида землетрясений, при котором события в начальной и однородной выборках просматриваются в соответствии с их расположением по шкале времени.

В разработанной компьютерной программе *STRESSgeol* принцип разделения ЗС на однородные выборки подчинен достижению максимальности суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых этапов напряженного состояния. Расчет ведется итерационным – циклическим методом. Стадии итерационного расчета именуются как *первая*, *вторая* и т.д. итерации. Далее первая итерация, в ходе которой идет выделение этапов напряженных состояний, иногда называется *начальной*.

В случае, когда программе удастся объединить все ЗС в одну однородную выборку и рассчитать для нее параметры тензора напряжений, работа программы заканчивается. Итерационный цикл не производится, весь расчет осуществляется за одну – начальную – итерацию и выделяется только один этап напряженного состояния.

Если программе на начальной итерации не удастся объединить все ЗС в одну однородную выборку, согласующуюся с рассчитанными значениями тензора напряжений, то программа будет пытаться сформировать из оставшихся ЗС еще одну однородную выборку. Если ЗС достаточно и такое их объединение возможно, то результатом первой итерации расчета будет создание двух и более ОВЗС с отвечающими им параметрами тензора напряжений. Далее в процессе итерационных циклов программа будет пытаться найти такое сочетание ЗС в двух и более однородных выборках, которому отвечают параметры тензора напряжений, доставляющие максимальное значение упругой энергии, выделяющейся при хрупком разрушении.

Следует отметить, что на второй и последующих итерациях уже невозможно увеличение числа этапов напряженных состояний, выделенных на первой итерации. Как правило, их число сохраняется до конца расчета. В некоторых случаях может происходить уменьшение числа этапов напряженных состояний, выделенных на первой итерации. Это происходит за счет того, что другие этапы постепенно забирают в свои однородные выборки ЗС исчезнувшего этапа.

Управление работой программы осуществляется на основе данных, помещаемых в файл *Stress.map*. Его параметры, а также параметры других входных и выходных файлов программы *STRESSgeol* будут описаны в следующих разделах.

Поскольку главные процедуры МКА выполняются на полусферах численным образом, они разделены на домены, между центрами которых приблизительно равные длины дуг, около 6° , при общем числе доменов 633. Для того, чтобы одинаково хорошо наблюдать за объектами в центральной и краевых частях полусферы, при изображении в окнах программы полусферы использовались проекции типа Шмидта. Эта проекция эквивалентна уплощению (вертикальному раздавливанию) полусферы до состояния «плоского блина», в котором радиаль-

ные расстояния между центрами доменов не изменяются, но увеличивается тангенциальное расстояние по мере удаления от центра.

После начала работы программы *STRESSgeol* в ней начинают появляться плавающие окна, в которых отражены результаты расчета. Вертикально удлиненные окна с изображением полусфер – это рабочие окна расчета напряженных состояний для выделяемых ОБЗК. Если данные, представленные во входном файле (см. далее), отвечают одному этапу напряженного состояния, то появится только одно такое окно. Если им отвечает несколько этапов напряженного состояния, то для начальной и последующих итераций расчета последовательно возникают окна нескольких этапов напряженного состояния.

1. Начальный расчет – первая итерация. Для начальной (первой) итерации все собранные с одной площадки (одного обнажения) ЗС рассматриваются как полная выборка. Из нее будут формироваться НВЗС для расчета напряженного состояния разных этапов. Если по результатам расчетов будет получен всего один этап напряженного состояния, то все данные о ЗС, содержащиеся в файле, и есть НВЗС.

В соответствии с принципами, изложенными в предыдущем разделе, программа осуществляет проверку на однородность данных из НВЗС. Для этого на двух нижних полусферах (они на рис. 6.15 расположены вверху друг под другом и для σ_1 имеют отметку справа *G1*, а для σ_3 – *G3*) выполняется суммирование квадрантов, допускающих попадание в них выходов главных осей напряжений σ_1 и σ_3 , что отвечает критерию диссипации (уменьшению) энергии упругих деформаций (6.9). На рис. 6.11 область, наилучшим образом удовлетворяющая (6.9) для вошедших в однородную выборку зеркал скольжения (ОБЗС), показана на нижней полусфере точками – доменами желтого цвета. В табл. 6.4 представлен пример записи данных о 20 зеркалах скольжения.

Таблица 6.4. Данные по выборке ЗС во входном файле расчета (см. далее рис. 6.15)

1	2	3	4
1	260	80	135
2	340	70	91
3	340	65	65
4	55	70	-3
5	330	80	-149
6	85	35	133
7	60	35	-61
8	90	50	-33
9	75	80	-139
10	70	30	-31

1	2	3	4
11	65	25	38
12	105	30	-57
13	90	55	-31
14	75	70	-163
15	70	80	-72
16	235	85	46
17	280	70	-131
18	110	35	-47
19	60	55	-31
20	40	30	-57

Примечание. В две колонки представлены:

- 1) номер ЗС,
- 2) азимут простирания,
- 3) угол погружения,
- 4) угол скольжения (см. рис. 2.4 – 2.6)

Для каждого домена двух полусфер рассчитывается целочисленный параметр K_d , отличное от нуля значение которого отражает факт невыполнения неравенств (6.9) для какого-то зеркала скольжения – трещины. Это рейтинг данного домена (вероятно, правильнее было бы назвать этот параметр антирейтингом). Нулевое значение рейтинга показывает, что данный домен удовлетворяет всем неравенствам МКА для всех ЗС в рассматриваемой выборке. Центр этого домена

может рассматриваться как положение на нижней полусфере точки возможного выхода соответствующей оси главного напряжения. Таким образом, после проверки каждой трещины домены, удовлетворяющие критерию (6.9), не меняют значения параметра K_d , а для неудовлетворяющих его значение увеличивается на одну единицу. Число уже проверенных трещин показывается в прямоугольнике вверху справа цифрами красного цвета. Эти цифры изменяются в процессе проверки трещин из НВЗС. Рядом слева (рис. 6.15, а) указывается общее число трещин в полной выборке ЗС, которые имеются во входном файле.

Для первого этапа начальной итерации полная выборка ЗС и есть НВЗС, и поэтому эти цифры по окончании проверки всех трещин совпадают. На рис. 6.15, а показано n 20 (черная) 20 (красная). Это означает, что полная выборка состоит из

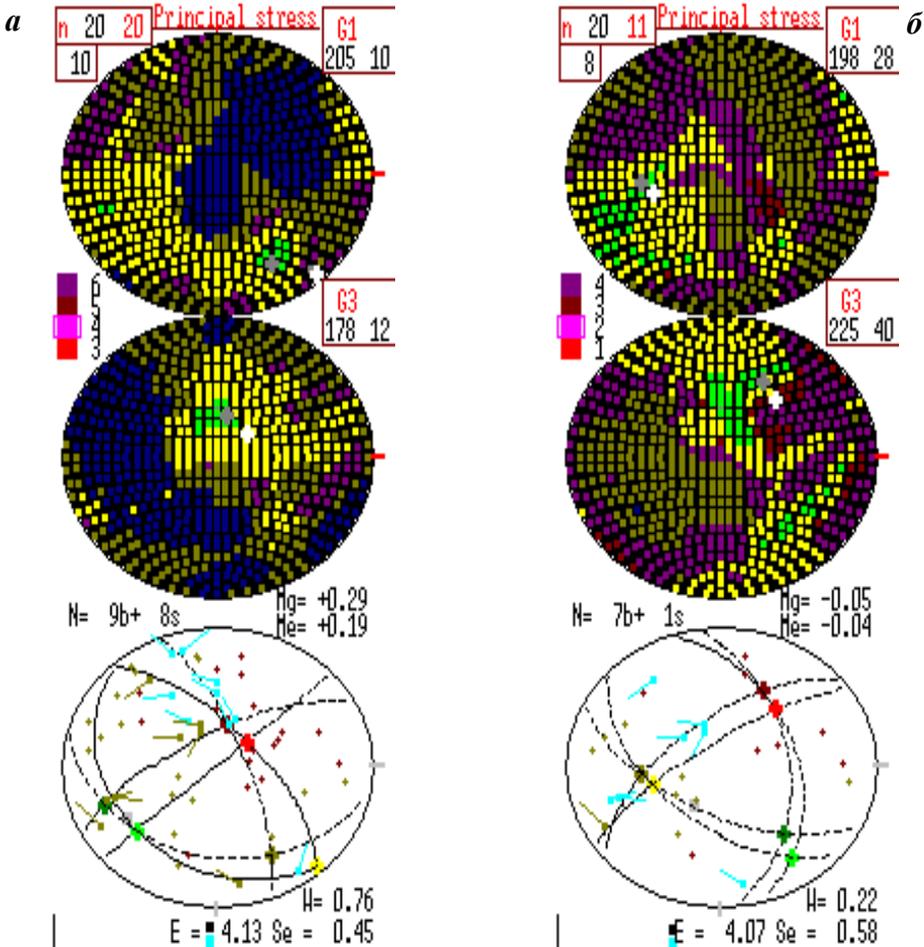


Рис. 6.15. Плавающие окна программы *STRESSgeol*, в которых отражаются графические процедуры МКА по расчету параметров эллипсоида напряжений (первый этап МКА): а) нулевая итерация, первый этап напряженного состояния; б) первая итерация, первый этап напряженного состояния.

Изображения результатов работы программы *STRESSgeol* даны на нижней полусфере. Пояснения в тексте

20-ти ЗС и 20 из них использовалось при создании ОВЗС данного расчета. Внизу под второй полусферой имеется надпись $N = 9b + 8s$. Это означает, что ОВЗС состоит из 17-ти трещин, из которых 9 полностью удовлетворяют критериям МКА, а 8 трещин условно (см. далее) удовлетворяют этим критериям.

Для второго этапа начальной итерации (рис. 6.15, б) на этой позиции стоят цифры 20 (черная) 11 (красная). Это означает, что полная выборка состоит из 20-ти ЗС и 11 из них использовано в качестве НВЗС для расчета этого этапа напряженного состояния. Число ЗС в этой начальной выборке получено путем удаление из полной выборки (20) 9-ти трещин, полностью удовлетворяющих критериям МКА. Внизу под второй полусферой имеется надпись $N = 7b + 1s$. Это означает, что ОВЗС состоит из 8-ми ЗС, из которых 7 полностью удовлетворяют критериям МКА, а 8 ЗС условно (см. далее) удовлетворяют этим критериям.

Поскольку после удаления из полной выборки ЗС (20) 9-ти и 7-ми ЗС остается 4 трещины (это меньше критически минимального их значения), то дальнейший поиск этапов напряженного состояния прекращается.

Выполнение критерия (6.7) – упорядоченности формирования необратимых деформаций – осуществляется на завершающей стадии расчета для всех трещин путем прямой проверки доменов, попавших в области пересечения одноименных квадрантов (рис. 6.15, а). Если после проверки в домене на неравенство (6.7) какой-то трещины он не выполняется, то рейтинг домена K_d повышается на единицу. Перезакраска доменов производится после проверки доменов на неравенства (6.7) для каждой трещины. При этом нулевому значению рейтинга (K_d) отвечает теплый светло-красный цвет, а с увеличением рейтинга цвет закрашки домена, переходя оттенки магнетика и светло-коричневого, становится более темный и холодный (оттенки синего).

Поскольку для начальной итерации проверку проходят все собранные с одного обнажения трещины, то очень часто, начиная с некоторого числа трещин, прошедших проверку, на полусферах не остается доменов с нулевым значением рейтинга. Это говорит о том, что НВЗС, вероятно, содержит информацию о двух и более фазах нагружения горного массива. На такой стадии расчета цвет домена (свето-красный) отвечает не нулевому, но минимальному значению рейтинга. Программа выделяет в особый массив домены с минимальным рейтингом (K_d^{\min}) и находит область, наилучшим образом удовлетворяющую неравенствам МКА для НВЗС. На рис. 6.15 слева вблизи контакта двух полусфер, на которых отыскиваются области выхода осей σ_1 и σ_3 , приводится легенда цветов доменов для четырех минимальных уровней рейтинга (цифры означают число ЗС, которые в домене соответствующей закрашки не прошли проверку на определяющие неравенства МКА). Для результатов расчета, представленных на рис. 6.15, а (начальная итерация, первый этап), минимальное значение рейтинга доменов $K_d^{\min} = 4$. На рис. 6.15, б (начальная итерация, второй этап), минимальное значение рейтинга доменов $K_d^{\min} = 1$.

Как выше уже было сказано, проверка неравенств (6.7) осуществляется после суммирования квадрантов для всех трещин (на начальной итерации вся НВЗС). На этой стадии на критерий (6.7) последовательно проверяется каждый домен

только для области с минимальным значением рейтинга (K_d^{\min}). Перед началом проверки все домены с минимальным рейтингом перекрашиваются в светло-желтый цвет. Справа вверху для каждой полусферы в квадратах $G1$ (σ_1) и $G3$ (σ_3) приведено число таких доменов (на рис. 6.15, *a*: 205 и 178 соответственно). После окончания проверки домены, удовлетворяющие неравенствам (6.7), закрашиваются в светло-зеленый цвет, и в квадратах $G1$ и $G3$ указывается их число (на рис. 6.15, *a*: 10 и 12 соответственно). Именно центры этих доменов будут далее считаться точками возможного выхода осей главных напряжений σ_1 и σ_3 . Домены, не прошедшие проверку неравенствами (6.7), остаются в желтой закраске.

Сравнение показывает, что области желтого цвета для первого этапа начальной итерации многократно превосходят аналогичные области для второго этапа начальной итерации (рис. 6.15) и первого этапа второй и последующих итераций (табл. 6.5).

На завершающей стадии расчета для первого этапа начальной итерации после проверки всех трещин те из них, которые не изменяют значение рейтинга хотя бы одного домена в области минимальных его значений, участвуют в расчете тензора приращений необратимых деформаций, отвечающего первому этапу. После расчета параметров тензора приращений необратимых деформаций на каждой из нижних полусфер появляется крестик темно-серого цвета, определяющий место выхода на полусферу соответствующей оси главной деформации S_1 и S_3 . Для них на основании (6.11) осуществляется расчет удельной энергии диссипации, нормированной на неизвестное значение максимального касательного напряжения:

$$E/\tau = (1 - \mu_\sigma)S_{11} - (1 + \mu_\sigma)S_{33}, \quad (6.20)$$

где S_{11} и S_{33} – компонента тензора приращений сейсмостектонических деформаций, рассчитанная в направлении осей σ_1 и σ_3 , выходы которых попадают в два ортогональных домена двух полусфер зеленой закраски (рис. 6.15, *a*).

Нахождение максимума нормированной величины удельной энергии (6.20) осуществляется в пределах зеленой области простым перебором всех доменов с учетом требования ортогональности осей главных напряжений. При этом в начале зеленая область перекрашивается в темно-серый цвет, и далее на ней появляются точки серого цвета, показывающие, что здесь проверка сделана, но максимума энергии (6.20) нет. Точки светло-серые – это точки, в которых идет проверка. Белым цветом закрашивается точка, в которой найден локальный максимум диссипации удельной энергии (6.20). Визуально это выглядит как перекраска серых точек на светло-серые с периодическим перескоком одной точки белого цвета на каждой полусфере. Найденное в пределах зеленых областей положение главных осей напряжений (последнее положение белой точки) маркируется белым крестиком.

При переборе точек, определяющих возможную ориентацию осей главных напряжений, варьируется и значение коэффициента Лоде – Надаи $-1 \leq \mu_\sigma \leq 1$.

Заметим, что если рассчитанные положения главных осей сейсмостектонических деформаций S_1 и S_3 попадут в область точек зеленой закраски, то это означает, что максимуму (6.20) отвечает ориентация главных осей напряжений, совпадающая с главными осями тензора сейсмостектонических деформаций. Также совпадут и значения коэффициента Лоде – Надаи этих двух тензоров.

Если в область точек зеленой закрашки попадет только одна из осей S_1 или S_3 , то такого совпадения не будет. Как видно в примере, изображенном на рис. 6.15, для первого этапа начальной итерации оси главных напряжений и приращений необратимых деформаций не совпали.

Согласно описанному алгоритму в начальной итерации и последующих итерациях расчета находится ориентация осей главных напряжений и значение коэффициента Лоде – Надаи для напряженного состояния первого этапа деформирования массива. Трещины, которые согласуются с данной ориентацией (критерий (6.7)), помещаются в отвечающую этим напряжениям ОВЗС.

Если после удаления из НВЗС трещин, вошедших в ОВЗС, в ней остается наперед заданное число трещин ($Mmin$ в файле Stress.map, обычно 6), то проводится новый расчет для получения данных о следующей фазе нагружения горного массива. Все процедуры повторяются вновь. В результате могут быть получены данные о новом напряженном состоянии и еще одной ОВЗС, которые относятся ко второму этапу расчета и так далее. Если на каком-то этапе начальной итерации ее завершить не удастся, то начальная итерация считается законченной и выделение новых этапов расчетов не проводится.

Здесь важно отметить, что номер этапа, выделенного в процессе создания однородных выборок и реконструкции напряженно-деформированного состояния, не определяет временную последовательность этапов нагружения. Расстановка выделенных этапов нагружения согласно временной шкале – отдельная задача, подразумевающая использование дополнительной информации геологического плана, и в настоящей работе не рассматривается.

Итак, в результате начальной итерации ($r = 0$) выделяется M этапов деформирования массива, каждому из которых отвечают данные об эллипсоиде напряжений, эллипсоиде приращений сейсмостектонических деформаций. По завершении каждого этапа начальной итерации производится расчет нормированной на τ удельной упругой энергии, диссипируемой каждой трещиной ($k = 1, \dots, K$) из НВЗС:

$$\left\langle \frac{dE^k}{\tau} \right\rangle^m = \langle d\bar{E}^k \rangle^m = (1 - \mu_\sigma) n_1^k s_1^k - (1 + \mu_\sigma) n_3^k s_3^k, \quad m = 1, \dots, M, \quad (6.21)$$

где произведение направляющих косинусов $n_i^k s_i^k$ ($i = 1, 3$) – нормированная компонента тензора приращений деформаций $d\varepsilon_i^k$ ($i = 1, 3$) от трещины номера k в направлении осей главных напряжений σ_1 и σ_3 . Кроме расчета нормированной величины энергии, выделяющейся на трещине, каждая из трещин для напряженного состояния каждого этапа m классифицируется по удовлетворению критериям МКА с помощью параметра качества $\langle Q^k \rangle^m$. В таблице 6.5 для трех итерационных стадий ($r = 0, 1, 2$) и соответственно двум этапам напряженного состояния ($m = 1, 2$), показан пример расчета параметра качества расчета $\langle Q^k \rangle^m$ и нормированной удельной энергии $\langle d\bar{E}^k \rangle^m$ и для каждой трещины из НВЗС.

Таблица 6.5. Результаты трех итерационных стадий ($r = 0, 1, 2$) расчета качества ($\langle Q^k \rangle^m$) и энергии ($\langle d\bar{E}^k \rangle^m$) для каждой трещины $k = 1, \dots, 26$ из двух НВЗС (два этапа напряженного состояния $m = 1, 2$)

0 итерация	1 этап	3	7	5	7	2	2	7	5	2	7	7	7	5
	2 этап	2	2	3	2	7	7	7	5	5	7	2	2	7
1 итерация	1 этап	-0.106	0.765	0.435	0.567	-0.124	-0.551	0.586	0.690	-0.418	0.869	0.687	0.067	0.702
	2 этап	-0.684	0.166	-0.039	-0.368	0.178	0.695	0.708	-0.214	-0.129	0.608	-0.450	0.384	0.602
2 итерация	1 этап	-2	7	5	7	-2	-2	7	7	-2	7	7	5	7
	2 этап	-2	-2	-3	-2	7	7	7	5	7	7	-2	-5	7
3 итерация	1 этап	-0.306	0.782	0.430	0.481	-0.077	-0.614	0.597	0.750	-0.557	0.864	0.544	0.147	0.762
	2 этап	-0.763	0.071	-0.133	-0.414	0.249	0.626	0.633	0.051	0.138	0.493	-0.499	0.456	0.421
4 итерация	1 этап	7	-2	-2	-5	-2	7	-2	-3	7	-3	-7	-2	-3
	2 этап	7	7	7	-2	-2	-5	-2	-2	-2	-2	-2	2	-2
5 итерация	1 этап	0.701	-0.157	0.035	0.173	-0.150	0.451	-0.244	-0.230	0.669	-0.297	0.444	-0.611	-0.154
	2 этап	0.322	0.828	0.696	-0.416	-0.572	0.241	-0.080	-0.756	-0.708	0.197	-0.370	-0.190	0.113
6 итерация	1 этап	-2	7	5	7	-2	-2	7	7	-2	7	7	5	7
	2 этап	-2	-2	-3	-2	7	7	7	5	7	7	-2	5	7
7 итерация	1 этап	-0.306	0.782	0.430	0.481	-0.077	-0.614	0.597	0.750	-0.557	0.864	0.544	0.147	0.762
	2 этап	-0.763	0.071	-0.133	-0.414	0.249	0.626	0.633	0.051	0.138	0.493	-0.499	0.456	0.421
8 итерация	1 этап	7	-2	-2	-5	-2	7	-2	-3	7	-3	-7	-2	-3
	2 этап	7	7	7	-2	-2	-5	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
9 итерация	1 этап	0.701	-0.157	0.035	0.173	-0.150	0.451	-0.244	-0.230	0.669	-0.297	0.444	-0.611	-0.154
	2 этап	0.322	0.828	0.696	-0.416	-0.572	0.241	-0.080	-0.756	-0.708	0.197	-0.370	-0.190	0.113

Примечание. В таблице для каждого этапа верхние две строки (в файле в записаны в одну строку) - показатель качества, нижние две строки – нормированная величина удельной энергии на трещине

Для параметра Q имеются следующие целочисленные значения: 7 – критерий (6.7) выполнен; 4-6 – выполнен только критерий (6.9); 0-3 – критерии (6.9) и (6.7) не выполнены. Минус перед значением Q означает, что на данной итерации трещина не участвовала в расчете компонент напряжений этого этапа. Трещины с отрицательными значениями Q в таблице 6.5 выделены маркером серого цвета. Поскольку для первого этапа нулевой итерации они все участвовали в создании ОВЗС, то здесь ни одна из трещин не выделена серым цветом.

Отметим, что в некоторых случаях при расчете удельной энергии $\langle d\bar{E}^k \rangle^m$ могут появляться небольшие отрицательные значения, хотя трещине присвоен знак качества больший 3, т.е. выполняются условия (6.9). Это связано с тем, что при суммировании квадрантов они увеличиваются в площади на 3° , что компенсирует точность наших измерений углов для зеркал скольжения.

По окончании расчета каждого этапа под двумя полусферами для главных напряжений помещается информация о числе трещин, попавших в ОВЗС. На рис. 6.15, a это $N = 9b + 8s$. Здесь общее число трещин в однородной выборке складывается из 12 с наилучшим качеством ($Q = 7$ – индекс b) и 3 со средним качеством ($Q = 4 - 6$ – индекс s). Рядом с этой строкой приводятся значения ко-

эффицентом Лоде – Надаи для тензоров напряжений и приращений необратимых деформаций $Mg(\mu_\sigma)$ и $Me(\mu_\sigma)$ соответственно.

Под этими информационными строками на третьей полусфере (нижняя ее половина) показываются большие дуги кругов, в пересечении которых помещаются крестики красного, желтого и зеленого цветов. Темные тона этих цветов отвечают осям главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 соответственно. Светлые тона этих цветов отвечают осям приращений необратимых деформаций S_1 , S_2 и S_3 соответственно. Здесь также в виде маленьких красных и желтых крестиков изображаются оси снимаемых напряжений сжатия и растяжения от каждой трещины, вошедшей в ОВЗС (оси, подобные осям P и T механизмов очагов землетрясений). Также показаны в виде векторов направления смещения на этих трещинах, построенные в их полюсах (нормалях). Цвет циан этих векторов отвечает трещинам с высшим качеством ($Q = 7$), а темно-желтый – среднему качеству ($Q = 5$). Синий цвет ($Q = 2, 3$) означает, что данное ЗС не участвовало в определении параметров тензора напряжений (оно не вошло в однородную выборку).

Заметим, что когда оси главных напряжений совпадают с осями главных необратимых деформаций, то это означает, что на масштабе исследуемых трещин свойства массива изотропны. Если оси не совпадают, то это может означать либо анизотропию упругих свойств, когда оси главных упругих деформаций не совпадают с главными осями напряжений (при этом режим деформирования может быть установившимся), либо то, что режим деформирования неустановившийся и оси приращений необратимых деформаций не успевают подстроиться и совпасть с осями упругих деформаций. В любом случае, далее такие состояния будут именоваться анизотропными. Сама возможность создания ОВЗС и получения данных о напряжениях показывает, что оба случая (изотропия и анизотропия свойств) отвечают установившейся фазе деформирования участка коры.

Еще несколько информационных строк помещается под этой третьей полусферой (рис. 6.15, а). Выводится значение суммарной удельной энергии $\sum_k^K d\bar{E}^k$, снятой на трещинах из ОВЗС первого этапа $E = 4.13$, значение интенсивности нормированного тензора приращений необратимых деформаций $Se = 0.45$

$$Se = \frac{G}{\Delta \bar{\epsilon}} I_s, \quad I_s = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \quad (6.22)$$

и относительной величины амплитуды тензора вращения $W = 0.76$:

$$W = \frac{|\pi|}{Se}, \quad |\pi| = \sqrt{\pi_1^2 + \pi_2^2 + \pi_3^2}, \quad \pi_i = 0.5 \sum_{k=1}^K (n_j^k s_j^k - n_r^k s_r^k), \quad i \neq j \neq r. \quad (6.23)$$

Такая же информация появляется в окнах второго и других этапов нулевой итерации.

2. Итерационный цикл расчета. После выполнения начальной итерации программа *STRESSgeol* приступает к улучшению качества определения напря-

женных состояний. Вторая итерация начинается с того, что ОВЗС, полученные на начальной итерации, несколько перестраиваются. Это делается для того, чтобы убрать преимущество первого этапа, для которого ОВЗС создавалась на основе всей НВЗС, в то время как для остальных этапов использовались остатки НВЗС. Коррекция ОВЗС осуществляется на основе данных о значениях $\langle d\bar{E}^k \rangle^m$ каждой трещины в каждом напряженном состоянии, рассчитанном после завершения нулевой итерации (колонки 2, 3 в таблице 6.5). Трещина на второй и последующих итерациях может участвовать только в одной выборке, где она должна удовлетворять критерию (6.7) и ее значение $\langle d\bar{E}^k \rangle^m$ максимально. Процедуры программы *STRESSgeol* схематично изображены на рис. 6.16 в виде блок-схемы. Проиллюстрируем ее результатами реконструкции напряжений таблицы 6.5.

В представленном в таблице 6.5 примере трещины № 10 и № 19 приняли участие в реконструкции первого этапа напряженного состояния с показателем среднего качества 5. Поскольку для напряжения второго этапа значения сбрасываемой на них удельной упругой энергии выше, то в ходе второй итерации они будут исключены из ОВЗС первого этапа и помещены в ОВЗС второго этапа.

Таким образом, для каждого напряженного состояния новые ОВЗС могут достаточно существенно отличаться от тех, которые были созданы после начальной итерации как по количеству событий в них, так и по конкретным номерам событий. Более того, возможны случаи, когда для какого-либо этапа напряженного состояния число сколов в отвечающей ему выборке станет меньше минимально допустимого значения (*Mmin*). Такой этап в этой и следующих итерациях более не рассматривается.

В программе *STRESSgeol* после создания фактически новых ОВЗС происходит пересчет параметров тензора напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций для всех этапов, выделенных после начальной итерации, кроме тех, которые были удалены из-за малого значения числа сколов в отвечающей им ОВЗС. При этом используются все те же процедуры, представленные в рамках описания начальной итерации. Здесь следует заметить, что поскольку трещины после их перераспределения уже прошли проверку на выполнение неравенств (6.7), то в областях допустимого выхода осей главных напряжений и приращений необратимых деформаций значение рейтинга точек будет нулевым (см. рис. 6.15, б).

Из данных рис. 6.15, б видно, насколько чище произошло формирование области, где могут находиться выходы осей главных напряжений σ_1 и σ_3 (домены зеленой заливки). Отмечаем, что после первой итерации несколько изменилась не только ориентация осей главных напряжений, но и значение коэффициента Лоде – Надаи. Несмотря на то, что число трещин в ОВЗС для второго этапа

меньше, чем для первого, значение суммарной удельной энергии $\sum_k^K d\bar{E}^k$ увели-

чилось. Это говорит о лучшем подборе трещины в ОВЗС и о том, что они в целом ближе расположены к плоскостям скалывания пород (касание большого круга Мора линии предела прочности). Следует также заметить, что если оси главных приращений необратимых деформаций попадают в область допустимого выхода осей главных напряжений согласно критерию (6.7), то данные оси будут

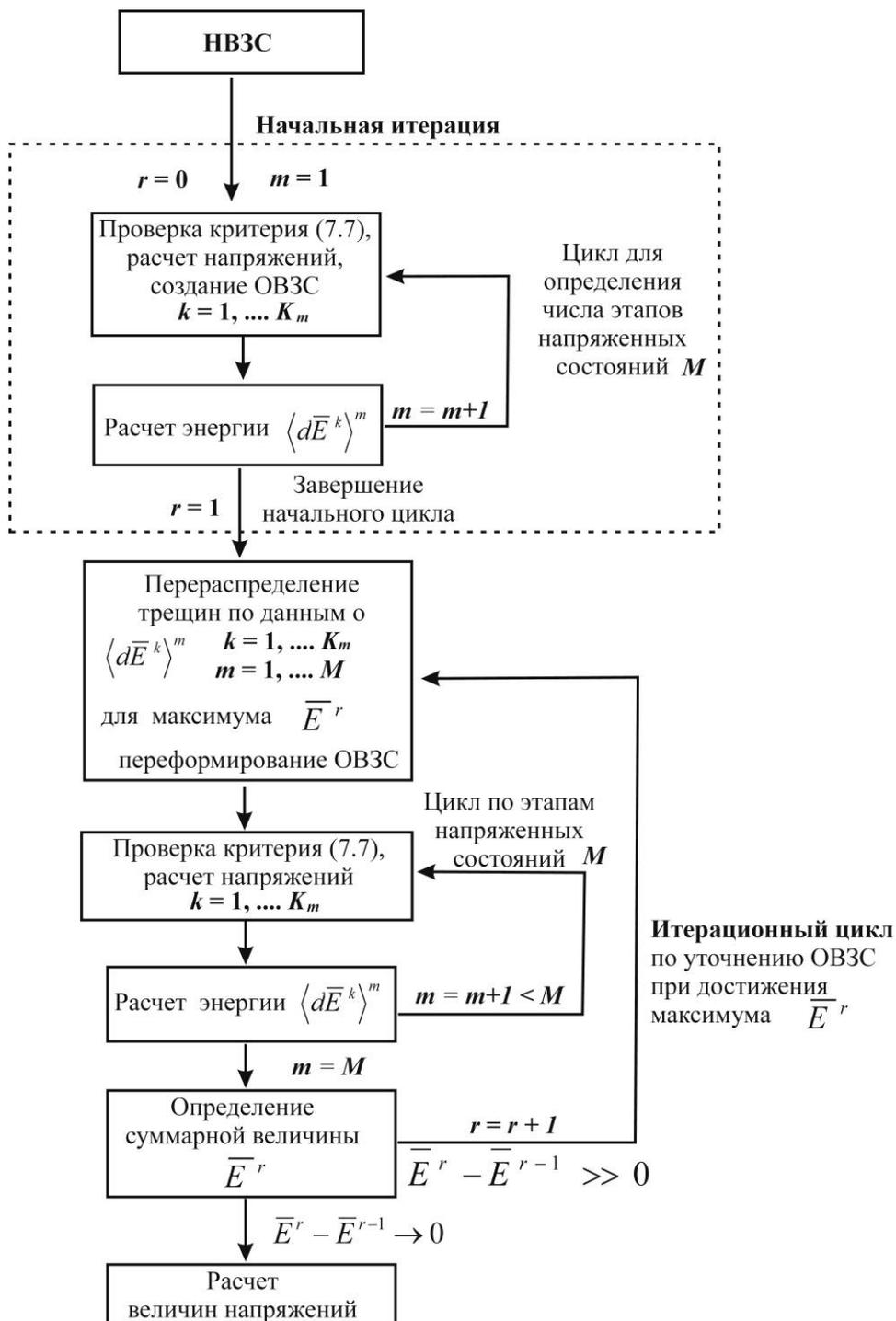


Рис. 6.16. Блок-схема организации процедур расчета параметров тензоров напряжений и приращений и необратимых деформаций, а также выделения этапов напряженного состояния в программе *STRESSgeol*

совпадать по ориентации. Так, на рис. 6.15, б видим только по одному белому кресту в каждой из зеленых областей двух полусфер.

Процедуры перераспределения ЗС и создания новых ОВЗС в соответствии со значениями величины $\langle d\bar{E}^k \rangle^m$, а также расчет параметров тензоров напряжений и приращений сеймотектонических деформаций для этих новых выборок вместе составляют один итерационный цикл (в данном случае, второй, идущий вслед за начальным). Поскольку весь алгоритм реконструкции направлен на определение напряженных состояний, для которых начальная выборка доставляет максимальное значение энергии диссипации, то в конце каждого итерационного цикла r подсчитывается величина

$$\bar{E}^r = \sum_{m=1}^M \sum_k^{K_m} d\bar{E}^k, \quad r = 0, \dots, R,$$

равная общей нормированной (на максимальное касательное напряжение) удельной энергии, выделившейся на совокупности сколов $k = 1, \dots, K_m$, для M этапов напряженных состояний ($m = 1, \dots, M$). Величина \bar{E}^r с каждым шагом итерации увеличивается. В конкретном примере таблицы 6.5 это увеличение составило более 40%. На рис. 6.17 показан график изменений сбрасываемой суммарной удельной энергии как функции номера итерации.

Такие итерационные циклы повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное значение *разности суммарной удельной энергии*, выделившейся при смещениях вдоль плоскостей сколов, между двумя последними итерациями.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (\bar{E}^r - \bar{E}^{r-1}) \rightarrow 0. \tag{6.25}$$

Опыт расчетов показывает, что уже после 3-4 итерации этапы имеют достаточно хорошие ОВЗС. Идет переброска между этапами единичных трещин. Для того, чтобы в программе не возникли такие однообразные взаимные переброски, общее число итераций ограничено шестью.

Информация о ходе расчетов удельной упругой энергии, сброшенной для каждого скола, представлена на диаграмме, расположенной ниже третьей полусферы

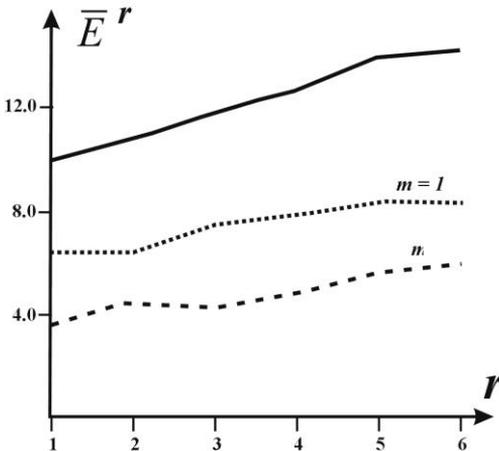


Рис. 6.17. Графики изменения в процессе итерационных циклов (r) суммарной нормированной удельной энергии для каждого этапа нагружения (пунктирные линии) и общей энергии обоих этапов (сплошная линия)

(см. таблицу 6.6). На диаграмме энергии тона закраски соответствуют качеству ЗС (см. выше), а высота - величине удельной энергии. Вверху в строке показана суммарная энергия диссипации (E) для сколов, участвовавших в определении тензоров с оценками отлично и хорошо, и среднее ее значение (Se) для однородной выборки ЗС.

Ниже этой диаграммы приведена диаграмма углов между направлением смещения по поверхности трещин и направлением касательного напряжения на этой же плоскости, для рассчитанного тензора напряжений. На диаграмме углов высота соответствует величине угла, в желтые тона закрашены ЗС, угол которых меньше средних значений, в темно красные – ЗС, угол которых больше средних значений. Среднее значение ($Amid$) приведено справа в строке выше диаграммы. ЗС, не состоявшие в начальной выборке, закрашены в темно-синий цвет.

После начала расчета все сколы обрабатываются совместно и подыскиваются такие параметры тензора напряжений, для которых в области возможных выходов осей главных напряжений достигается максимальное значение диссипирующей энергии. Поэтому при первой итерации при выделении первого этапа нагружения все сколы участвуют в расчете. Во всех остальных случаях (при выделении второго этапа или при второй итерации) в обработке и в расчетах тензоров участвует лишь часть из общей совокупности сколов. Нумерация фаз напряженных состояний условная, их порядок по времени следует определять после дополнительного анализа.

В таблице 6.6 показаны полные графические окна расчета напряжений для начальной выборки, данные для которой представлены в таблице 6.5.

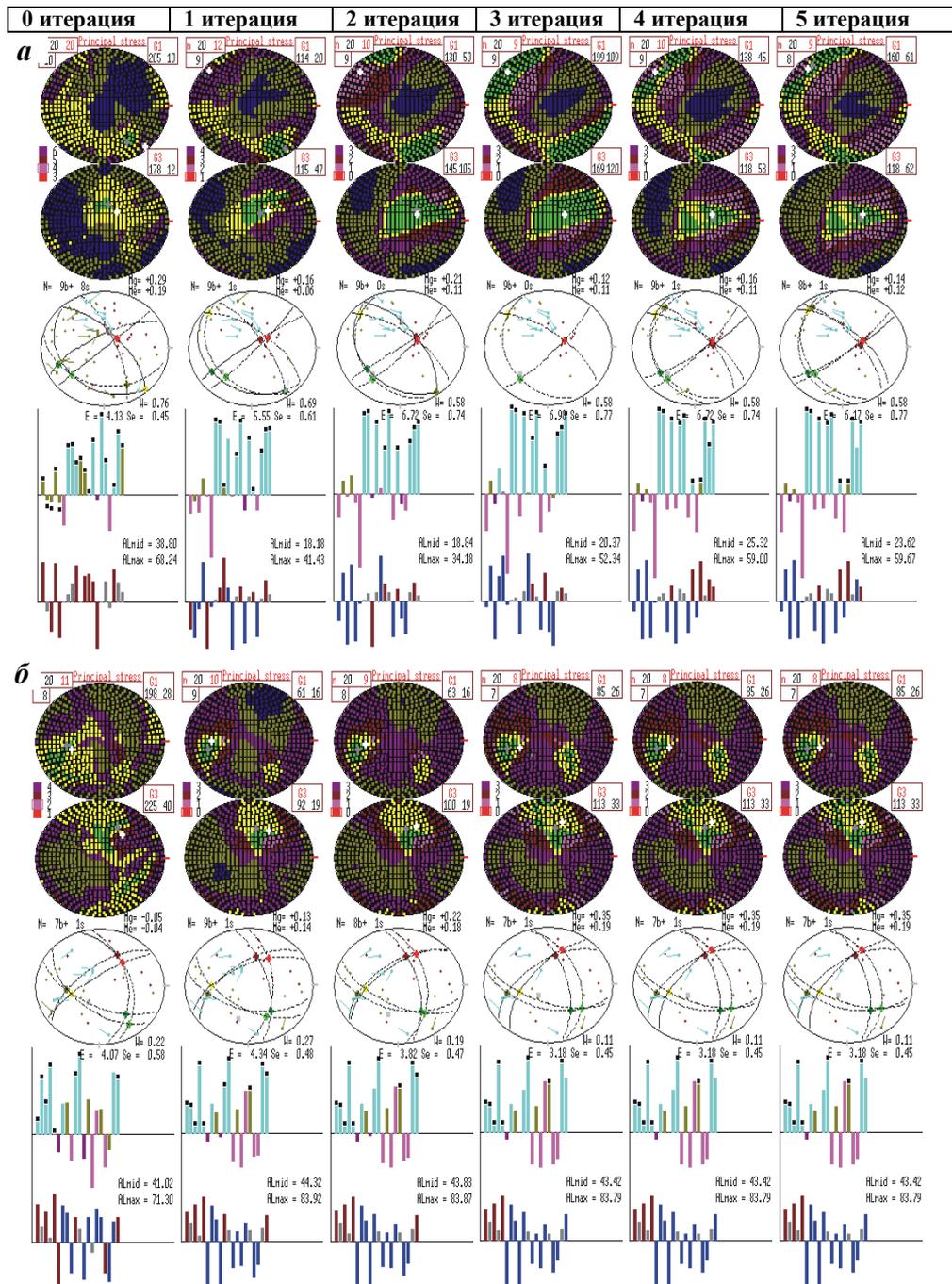
На первом итерационном цикле после выделения первой фазы напряженного состояния и создания отвечающей ему ОВЗС происходит отделение участвующих в этой выборке сколов из общей выборки. Далее оставшиеся после такого отделения ЗС также обрабатываются. Для них (если ЗС достаточное число) также определяются параметры тензоров напряжений и сеймотектонических деформаций. Трещины, которые удовлетворяют критериям МКА с надлежащим качеством, сформируют новую ОВЗС, отвечающую второй фазе напряженного состояния.

Так на первой итерации происходит выделение новых этапов напряженного состояния до тех пор, пока число сколов в остатке больше некоторого минимального значения ($Mmin$ задается в фале *Stress.map* см далее). Надо помнить, что последовательность нумерации выделенных фаз напряженных состояний не отвечает последовательности во времени.

По окончании первого цикла итерации (каждого цикла) существует набор параметров тензора напряжений, отвечающих выделенным этапам нагружения. Завершается первая и последующие итерации оценкой вклада каждого ЗС из начальной выборки в суммарное значение энергии диссипации для каждого из выделенных этапов нагружения. В случае, если был выделен только один этап, последующих итераций не производится и расчет завершается.

В случае выделения нескольких этапов, на основании данных о возможном энергетическом вкладе каждого ЗС в суммарную энергию диссипации каждого из этапов, производится пересмотр выборок ЗС. В случае если данное ЗС имеет оценку качества согласия в виде «отлично» или «хорошо» для нескольких этапов нагружения, он приписывается к тому из них, для которого его вклад в суммарную энергию диссипации наибольший.

Таблица 6.6. окна расчета напряжений на экране компьютера: *a* – расчет напряжений первого этапа; *б* - расчет напряжений второго этапа



Таким образом, после проверки возможно изменение состава выборок, определивших параметры тензоров напряжений для нескольких этапов. В этом случае

производится расчет для следующего итерационного цикла. Итерационный процесс прекращается, если не происходит переноса сколов из одной выборки в другую, после окончания предыдущей итерации (максимальное число итераций 6).

3. Краткое резюме о принципах организации итерационного цикла.

Принцип разделения выборок ЗС на фазы нагружения основан на определении минимального числа тензоров напряжений, для которых удастся произвести сепарацию сколов, доставляющих максимальное значение диссипации суммарной энергии упругих деформаций. При этом в остатке может находиться некоторое число ЗС, которые не были использованы ни для одной фазы полученных напряженных состояний.

4. Расчет редуцированных (нормированных) напряжений. После завершения всех итерационных циклов и формирования однородных выборок ЗС для каждого из выделенных этапов нагружения строятся завершающие окна. В нижней части этих окон на моровской плоскости выполняется анализ однородных выборок (рис. 6.18). На основе этого анализа рассчитываются относительные значения тензора напряжений.

При расчете редуцированных напряжений проведение линии минимального сопротивления сухого трения осуществляется через ЗС, имеющего минимальное значение редуцированного кулонового напряжения (точка *M* на рис. 6.10)

$$\bar{\tau}_C^M = \bar{\tau}_n^M + k_f \bar{\sigma}_{nn}^M. \quad (6.26)$$

При этом все ЗС проверяются на критерий МКА, используемых при анализе сейсмологических данных (6.17). Если ЗС удовлетворяет данному критерию, т.е. попадает в полосу хрупкого разрушения, то на редуцированной диаграмме Мора окно изображается точкой цветов красный – магнетик. Если не удовлетворяет, то точка закрашивается желтым цветом. Линия минимального сухого трения является нижней границей облака точек цветов красный – магнетик.

В предыдущих версиях программы при проведении линии минимального сухого трения не использовался критерий (6.17), хотя само разделение ЗС по их генезису производилось и на редуцированной диаграмме Мора присутствовали точки желтого цвета (пластические сколы).

В некоторых версиях программы проведение линии минимального сухого трения осуществлялось не через точку (ЗС) с минимальным редуцированным кулоновым напряжением, а через точку, имеющую следующее по минимальности значение этого параметра.

Окна программы STRESSgeol.exe. После запуска программы в ее главном окне возникают окна с информацией о ходе расчета. Первым появляется окно «Палеостресс реконструкция. Метод катакластического анализа». В нем после формирования рекламного графического изображения (рис. 6.19, *a*) может выводиться текстовая информация о входных данных и о ходе расчета параметров диаграммы Мора.

Сразу после этого окна открывается окно (рис. 6.18, *a*), в котором будет идти формирование первой ОБЗС (см. табл. 6.6). Заголовком окна будет являться индекс НВЗС, стоящий в первой строке входного файла *.gel (см. далее), номер итерации (в данном случае 1) и номер этапа напряженного состояния (в данном случае

1). Например: NS И1 Э1. Если после создания первой ОБЗС и расчета по этим данным параметров первого этапа напряженного состояния в НВЗС остается достаточное число ЗС, не вошедших в первую однородную выборку, то появится второе окно расчета с заголовком NS И1 Э2. Если после создания второй ОБЗС и расчета количества ЗС, не участвовавших в первых двух выборках меньше критического числа (*Mmin* см. далее), то программа перейдет к расчету второй итерации для выделенных двух этапов напряженного состояния. Будут появляться новые окна расчета с именами NS И2 Э1, NS И2 Э2, NS И3 Э1, NS И3 Э2 и т.д. Как выше уже было сказано, максимальное число итераций 6. Число этапов не ограничено.

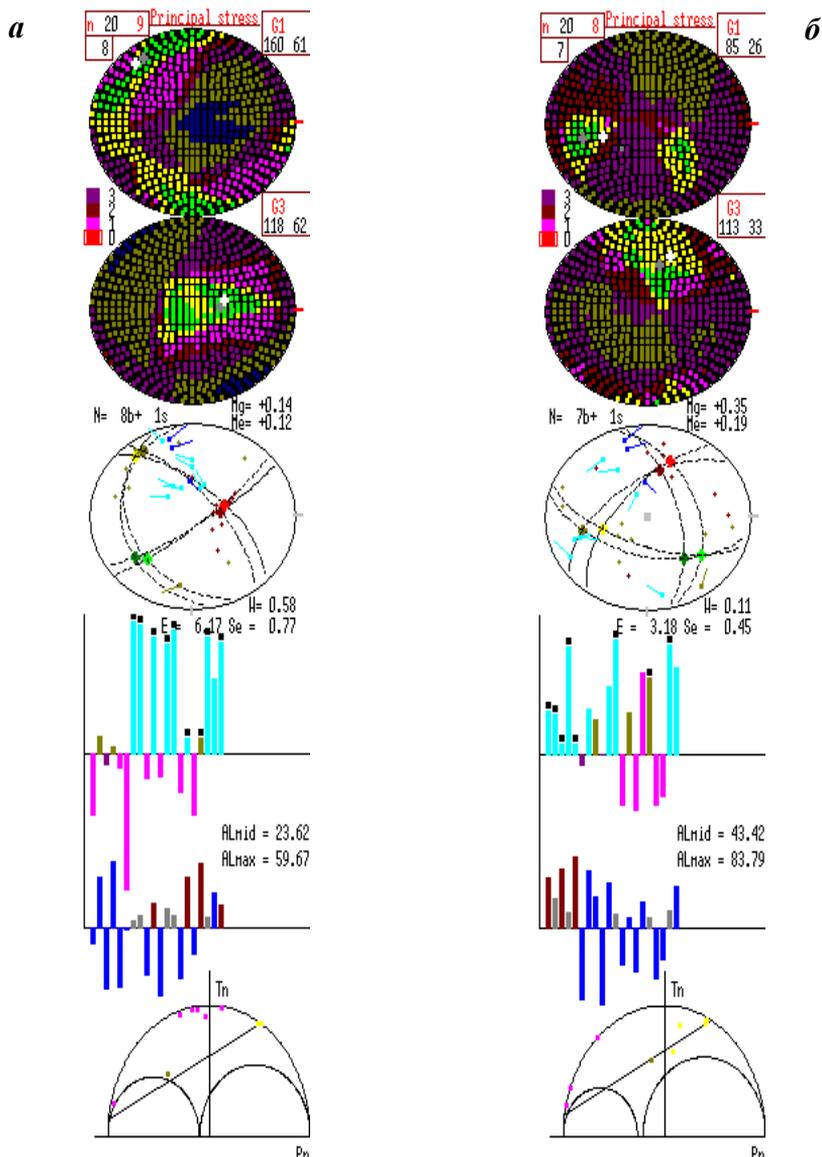


Рис. 6.18. Финальные расчетные окна программы *STRESSgeol* (случай двух этапов напряженного состояния *a* и *б*), в которых в нижней части показана диаграмма Мора

Следует отметить, что окна расчета для последней итерации будут содержать кроме трех полусфер с данными об ориентации главных осей напряжений (табл. 6.6) и редуцированную диаграмму Мора (рис. 6.18, а).

После завершения расчета всех этапов напряженных состояний в программе появятся два новые окна. В первом на редуцированную диаграмму Мора выносятся данные о напряженном состоянии всех, участвовавших в расчетах в разных однородных выборках (заголовок окна – «Диаграмма Мора»). Во втором на моровской плоскости будут показаны нормированные на прочность сцепления диаграммы Мора для всех выделенных этапов напряженных состояний с данными о напряжениях отвечающих им трещин (заголовок окна – «Мониторинг состояния точки»). В нижней части этого рисунка условно показано изменение во времени эффективного давления (P), максимального касательного напряжения (Tau).

Входные файлы. Главным входным файлом, определяющим сценарий расчета программы, является файл *Stress.map*. Ниже приведен пример такого файла. Он состоит из правой части, где указывается параметр и левой – комментарий. В «стандартной» версии программы в этот файл включено большое число параметров, управляющих ходом расчета. В «облегченной» версии в данном файле оставлен только один параметр – минимальное число ЗС в однородной выборке и имя файла, содержащего данные о НВЗС из одного обнажения.

Рекомендуется не делать минимальное число трещин в однородной выборке менее 5. Оптимально задавать минимальное число трещин в однородной выборке 6-8.

Таблица 6.7. Пример входного файла *Stress.map*

6	Mmin - минимальное число трещин в однородной выборке
Sich	<Name> - Имя файла, содержащего данные о зеркалах скольжения (не более 12 символов) *****.gel

Файл исходных геологических данных о сколах должен иметь расширение *.gel (число символов в имени не более 8), а выходной файл имеет расширение *.dat. Входными файлами являются также файлы *Orto13_3.dan* и *Sphera.dan*.

Sphera.dan – служебный файл, содержащий координаты точек, на которые разбита нижняя полусфера (640 точек). Используется при суммировании квадратов возможного выхода на полусферу осей главных напряжений.

Orto13_3.dan – служебный файл, используется для ускорения процедуры расчета в части нахождения ортогональных точек в областях локализации осей главных напряжений.

Все входные файлы должны располагаться в той же директории, что и исполняемый файл *STRESSgeol*.

Все этапы реконструкции в виде графических файлов с расширением *.BMP сохраняются в директории *CALC*. В имени создаваемых файлов (*.BMP) зашифрован номер площадки, номер итерационного цикла и номер этапа (фазы нагружения).

Файл геологических данных. Файл исходных данных *.gel организуется последовательной записью параметров ЗС. При этом в первой строке для каждой площадки указывается идентификатор площадки (начальной выборки ЗС) в виде номера или набора символов (не более шести позиций), далее отведено две позиции для ука-

зания координат площадки, и затем должно быть приведено число ЗС для этой площадки (рекомендуем разделять параметры первой строки запятыми). Заметим, что для широт и долгот *в качестве разделителя целых чисел и десятичных использовать запятую нельзя.*

В следующих строках приводятся порядковый номер ЗС и данные о положении плоскости трещины и реализованном смещении ее бортов. Данные для плоскости задаются для лежачего крыла в виде азимута вектора ее простирания (0-360 градусов) и угла падения (0-90 градусов), а кинематика смещения бортов определяется направлением движения висячего крыла (см. рис. 2.6). Такое задание плоскости и смещения по ней отвечает принятому у сейсмологов правилу задания фокальных механизмов землетрясений.

Вектор смещения задается углом в плоскости лежачего крыла ЗС, отсчитываемым от простирания плоскости (см. рис. 2.6). Положительные значения угла от 0° до +180° против часовой стрелки (восстание), отрицательные от 0° до -180° – по часовой стрелке (погружение). В табл. 6.8 (в таблице две колонки, в файле одна колонка) дан пример записи такого файла.

Таблица 6.8. Пример входного файла

NS , 41.123, 38.345, 40	(продолжение)
1 109 40 -53	21 19 51 122
2 176 87 -155	22 310 33 -119
3 184 77 -154	23 281 38 -141
4 144 70 -112	24 277 42 -148
5 344 82 0	25 278 31 -151
6 329 85 -180	26 22 71 -79
7 87 80 174	27 339 84 160
8 185 70 -103	28 13 80 168
9 346 81 -8	29 187 84 18
10 170 89 -15	30 184 72 -141
11 269 76 175	31 289 57 -106
12 253 78 -180	32 147 72 26
13 344 64 -16	33 183 64 -152
14 30 89 10	34 164 74 -158
15 340 80 0	35 192 70 -153
16 14 57 -131	36 169 78 -168
17 22 88 8	37 189 70 -180
18 279 79 -20	38 279 78 -38
19 293 82 168	39 230 77 139
20 254 88 15	40 189 75 -180

Важно отметить, что данные из файла читаются бесформатно (разделители могут быть пробелы, табуляция или запятая), а сама форма записи в виде набора трех углов относится к версиям программы STRESSgeol, созданным после 28.10.2015 года. Данные об углах обычно записываются с точностью до целых значений градусов, но можно их представлять и с десятичной точкой (повторим, что в качестве разделителя целых чисел и десятичных использовать запятую нельзя).

Файлы выходных данных. *.txt – файл окончательных результатов расчета параметров тензора напряжений σ и приращений сейсмоструктурных деформаций S . Он содержит только данные об указанных параметрах. Далее в табл. 6.9 представлен результат расчета для случая выделения одного этапа напряженного состояния (НС). Третья и четвертая строка файла содержат данные о параметрах тензора напряжений и сейсмоструктурных деформациях соответственно.

Таблица 6.9. Пример содержания файла *.txt

K-517	40.0000	30.0000	7.3408	26	4	13	1	2						
AZ1	PL1	AZ2	PL2	AZ3	PL3	I	Mu	P	Tau	Ie	Al			
293.6	39.5	168.3	35.0	53.4	31.0	5	0.110	0.36	1.08					σ
296.3	23.4	192.6	28.8	59.0	51.4	1	0.102			8.68	38.6			S

Здесь **K-517, 40.0000, 30.0000, 7.3408** – наименование выборки ЗС, координаты и редуцированное значение выделившейся упругой энергии, а **26, 4, 13, 1, 2** – число событий в выборке ЗС (26), число трещин, не участвовавших (4) и участвовавших (13) в расчете выборки ЗС K-517 из файла *.gel для первого этапа НС из двух (2) выделенных.

Таблица 6.10. Пример содержания файла *.txt

AZ1 – азимут главного напряжения σ_1 и главного приращения СД S_1
PL1 – угол погружения σ_1 и S_1
AZ2 – азимут σ_2 и S_2
PL2 – угол погружения σ_2 и S_2
AZ3 – азимут σ_3 и S_3
PL3 – угол погружения σ_3 и S_3
I – тип тензора напряжений и приращений СД
Mu – коэффициент Лоде – Надаи тензора напряжений и приращений СД
P – редуцированные значения эффективного давления
Tau – редуцированные значения максимального касательного напряжения
Ie – интенсивность редуцированного тензора приращений СД
Al – средний угол отклонения рассчитанного направления сдвига от борозды ЗС

*.dat – файл промежуточных результатов расчета параметров тензора напряжений σ и приращений сейсмоструктурных деформаций S , получаемых в результате последовательных итераций. Он кроме данных о параметрах напряжений и сейсмоструктурных деформаций, приводимых для каждого шага итерационного расчета для каждого выделенного этапа напряженного состояния, содержит и данные о качестве и снимаемой упругой энергии каждого ЗС. Далее табл. 6.10 дается разбор типовой части файла, отвечающей первой итерации для случая выделения двух этапов НС. Здесь так же как и для файла *.txt под заголовками «AZ1 PL1 AZ2 PL2 AZ3 PL3...», идут две строки данных, первая из которых отвечает параметрам тензора напряжений, а вторая – сейсмоструктурным деформациям.

Ранее уже было сказано, что точка на нижней полусфере считается не согласующейся со сколом, если не выполняется одно из неравенств метода. В этом случае ей присваивается качество «плохо», и индекс несогласия увеличивается на единицу. Если определяющие неравенства метода выполняются с учетом точности определений пространственной ориентации сколов, то присваивается

оценка качества «хорошо». При выполнении всех неравенств метода присваивается оценка качества «отлично». Параметр точности расчетов в «облегченной» версии задается непосредственно в программе путем расширения угла квадрантов, где могут находиться оси алгебраически максимального и минимального напряжения на 3 гр.

Таблица 6.11. Пример содержания файла *.dat с комментариями

Name	Lon	Lat	E_{max}	MM	Mt	Md	k	l		- заголовок - первая итерация (l=1)
K-517	0.0000	0.0000	6.3336	26	5	11	1	1		- первый этап НС (k=1)
AZ1	PL1	AZ2	PL2	AZ3	PL3	I	Mu	Ie		- заголовок см. предыдущий слайд
278.1	41.7	162.3	26.0	50.6	37.2	0	0.120			- параметры тензора напряжений
289.6	22.8	188.5	24.5	57.1	55.4	0	0.097	7.51		- параметры тензора приращений СД
AZ_w	PL_w	W/Ie								- тензор вращения - азимут и угол погружения
37.5	-42.4	0.400								- оси вращения и отношение W/Ie
Quality (1-7)	Em ,	ALm ,	Tm							- заголовок качества расчета 1 этапа
3	7	5	7	2	2	7	5	2	- качество расчета: плохо 2 и 3, хорошо 5 и 7
-0.106	0.765	0.435	0.567	-0.124	-0.551	0.586	0.690	-0.418	- величина выделившейся энергии на трещине
Name	Lon	Lat	E_{max}	MM	Mt	Md	k	l		- заголовок - первая итерация (l=1)
K-517	0.0000	0.0000	3.0813	26	2	7	2	1		- второй этап НС (k=2)
AZ1	PL1	AZ2	PL2	AZ3	PL3	I	Mu	Ie		- заголовок см. предыдущий слайд
151.0	40.1	253.4	14.4	359.1	46.4	0	0.120			- параметры тензора напряжений
165.8	39.9	258.4	3.1	352.1	49.9	0	0.065	0.317E+01		- параметры тензор приращений СД
AZ_w	PL_w	W/Ie								- тензор вращения - азимут и угол погружения
65.8	-8.6	0.558								- оси вращения и отношение W/Ie
Quality (1-7)	Em ,	ALm ,	Tm							- заголовок качества расчета 2 этапа
7	5	2	-5	3	7	-5	7	7	- качество расчета: плохо 2 и 3, хорошо 5 и 7
0.440	0.029	0.081	0.335	-0.078	0.181	0.036	0.125	0.426	- величина выделившейся энергии
??										- разделитель
3	7	5	7	2	2	7	5	2	7	- качество расчета: плохо 2 и 3, хорошо 5 и 7
-5	2	-5	3	7	-7	7	2	-5	2	если < 0, то трещина в расчете данного этапа не участвует
??										- разделитель

Morh.dat – файл с данными для построения на диаграмме Мора. В таблице 6.11 приведены параметры, рассчитываемые после завершения формирования однородных выборок. В приведенном примере таких выборок две. Каждая трещинка имеет в этой таблице свои данные о нормальных, касательных напряжениях, кулоновых, сброшенных напряжениях.

Таблица 6.12. Пример содержания файла *Morh.dat*

Name	StNum	Mu	Tn	Ts	Gns	Gnn	Gss	GU_n	GU_s	Morh	Hi	P	Tau	DTAU_i	DTAU_{max}		
K-517	1	2	0.11	0.93	0.78	0.78	0.17	-0.43	-0.54	0.39	0.45	0.92	0.36	1.08	0.854	0.920	2
K-517	1	3	0.11	0.88	0.56	0.43	0.30	-0.37	-1.44	0.19	0.65	0.93	0.36	1.08	0.852	0.920	-3
K-517	1	4	0.11	0.52	0.74	0.48	0.65	-0.64	0.29	-0.58	0.42	0.77	0.36	1.08	0.619	0.920	4
K-517	1	7	0.11	0.84	0.68	0.60	0.50	-0.23	-0.87	0.44	0.53	0.99	0.36	1.08	0.903	0.920	7
K-517	1	8	0.11	0.96	0.75	0.75	-0.14	-0.17	-0.90	0.53	0.23	0.82	0.36	1.08	0.761	0.920	8
K-517	1	10	0.11	0.93	0.90	0.87	0.31	-0.25	-0.27	0.24	0.32	0.99	0.36	1.08	0.919	0.920	10
K-517	1	11	0.11	0.90	0.61	0.55	0.35	-0.30	-1.31	0.44	0.62	0.98	0.36	1.08	0.904	0.920	11
K-517	1	12	0.11	0.96	0.21	0.15	-0.28	0.12	-2.24	0.02	0.56	0.75	0.36	1.08	0.698	0.920	12
K-517	1	13	0.11	0.94	0.77	0.76	-0.15	-0.24	-0.68	0.44	0.21	0.79	0.36	1.08	0.725	0.920	13
K-517	1	18	0.11	0.92	0.28	0.25	-0.43	0.14	-1.94	0.14	0.35	0.65	0.36	1.08	0.584	0.920	18
K-517	1	19	0.11	0.71	0.63	0.63	0.60	-0.78	-0.14	0.12	0.77	0.92	0.36	1.08	0.804	0.920	19

K-517	1	20	0.11	0.66	0.76	0.63	0.69	-0.53	-0.01	0.01	0.51	0.92	0.36	1.08	0.789	0.920	20
K-517	1	21	0.11	0.57	0.21	0.05	-0.55	0.92	-0.10	-0.06	-0.38	0.28	0.36	1.08	0.153	0.920	21
K-517	1	22	0.11	0.53	0.14	0.14	-0.69	0.95	-0.01	0.01	-0.43	0.18	0.36	1.08	0.056	0.920	22
K-517	1	23	0.11	0.52	0.58	0.49	0.82	-0.78	-0.05	0.05	0.73	0.84	0.36	1.08	0.689	0.920	23
K-517	1	25	0.11	0.46	0.58	0.46	-0.84	0.05	0.05	-0.07	-0.57	0.05	0.36	1.08	-0.084	0.920	25
K-517	1	26	0.11	0.59	0.53	0.42	-0.84	0.57	-0.40	0.21	-0.65	0.17	0.36	1.08	0.055	0.920	26
K-517	2	1	0.47	0.93	0.81	0.73	0.18	-0.30	-0.99	0.53	0.36	0.98	1.01	1.45	0.955	0.965	1
K-517	2	6	0.47	0.47	0.54	0.47	-1.02	0.54	0.05	-0.06	-0.85	0.03	1.01	1.45	-0.413	0.965	6
K-517	2	9	0.47	0.93	0.70	0.69	-0.52	0.18	-1.04	0.53	-0.11	0.67	1.01	1.45	0.550	0.965	9
K-517	2	14	0.47	0.75	0.33	0.33	-0.81	0.28	-1.19	0.16	-0.12	0.38	1.01	1.45	0.124	0.965	14
K-517	2	15	0.47	0.93	0.86	0.86	-0.53	0.23	-0.30	0.26	-0.31	0.66	1.01	1.45	0.537	0.965	15
K-517	2	16	0.47	0.96	0.78	0.72	-0.02	-0.24	-1.22	0.52	0.29	0.92	1.01	1.45	0.884	0.965	16

Примечание.

Name St Num – наименование выборки ЗС, этап НС, номер ЗС в выборке.

Mu P Tau – инварианты напряжений для данной выборки и этапа НС.

Tn Ts – редуцированные на Tmax касательные напряжения (Tn) на плоскости трещины (нормаль n) и касательное напряжение (Ts) на сопряженной с ней дополнительной плоскости с нормалью s (вектор ЗС).

Gns – редуцированное на Tmax касательное напряжение на плоскости трещины и в направлении вектора s.

Gnn Gs0s – редуцированные на Tmax девиаторные нормальные напряжения на трещине и на доп. плоскости.

Morh – разница редуцированных кулоновых напряжений на трещине и на доп. плоскости.

DTAUi – редуцированные на прочность сцепления (Tf) сброшенные напряжения на трещине.

ГЛАВА 7. Структурно-геоморфологический метод Л.А.Сим

7.1. Обоснование метода

Структурно-геоморфологический метод (СГ метод) основан на анализе оперяющих трещин – разрывов в зоне динамического влияния разломов сдвигового типа (геол.). В основу метода положено предположение о преобладающих сдвиговых перемещениях по разломам фундамента платформ в новейший этап, приводящих к следующим следствиям: разломы в осадочном чехле формируются (прорываются на дневную поверхность) в виде крутопадающих плоскостей; на дневной поверхности, сложенной молодыми отложениями, формируются хорошо дешифрирующиеся мелкие прямолинейные элементы (мегатрещины). Таким образом, СГ метод можно применять к данным о линеаментах, полученным на основе дешифрирования аэро- и космоснимков, а также имеющих в настоящее время высокое разрешение карт *Google* или *Yandex*.

Обоснование СГ метода базируется на следующих положениях:

1 – повсеместное развитие крутопадающих плоскостей разломов в осадочном чехле платформ, которые могли сформироваться только в поле напряжений горизонтального сдвига (при вертикальной оси сжатия или растяжения плоскости разломов должны быть наклонены под углом $45^\circ \pm \alpha$, где α – угол скальвания);

2 – в верхних частях осадочного чехла мало, а вблизи дневной поверхности практически отсутствует литостатическое давление, что должно приводить к горизонтальному положению оси сжатия;

3 – данные физического [Михайлова, 2007] и математического [Ребецкий, 1987] моделирования показывают, что в осадочном чехле над сдвигом в фундаменте образуется два максимума касательных напряжений. Основной максимум приурочен к самой нижней части чехла, далее в средней части проявлено незначительное повышение их уровня, а второй максимум наблюдается у дневной поверхности (рис. 7.1).

Здесь так же, как и в главе 6, под осью сжатия понимается ось главного напряжения максимального сжатия, а под осью растяжения понимается ось главного напряжения минимального сжатия, т.е. максимального девиаторного растяжения.

Технология СГ метода требует дешифрирования мелких прямолинейных элементов рельефа, названных мегатрещинами, вблизи крупного линеамента – предполагаемого разлома. Если взаимная ориентация мегатрещин между собой и по отношению к разлому соответствует ориентировке оперяющих разрывов в зоне сдвига, то принимается, что линеамент и мегатрещины обусловлены сдвиговым смещением по разлому в фундаменте. Сдвиговое перемещение по нему приводит к формированию зоны повышенной трещиноватости в осадочном чехле и на дневной поверхности. Поскольку для этой стадии развития сдвигового нарушения осадочного чехла разлом еще не стал единой структурой по глубине, то выделяемый линеамент может и не смещать на фотоснимке (карте) характерные формы рельефа.

Взаимные ориентировки оперяющих разрывов в зоне сдвига и их ориентация по отношению к основному разлому были обобщены М.В. Гзовским [1975]. На рис. 7.2 отражены четыре возможных варианта взаимной ориентировки плос-

кости сдвига и триады систем оперяющих трещин при правом сдвиге: при трехосном напряженном состоянии, когда все три оси главных нормальных напряжений (оси сжатия, растяжения и промежуточная не равны между собой) (а, б). Данное обобщение далее именуется «палетка Гзовского». При этом вариант (а) показан для случая, когда угол скальвания $\alpha = 0$, б – для случая максимального угла скальвания (около 22°). Третий вариант (в) показан для сдвигов, формирующихся в обстановке растяжения, четвертый вариант (г) – сжатия. На последних двух вариантах видно, как в зависимости от геодинамической обстановки формирования сдвигов все три системы трещин оперения вместе с осью сжатия и растяжения разворачиваются относительно плоскости разлома.

При левом сдвиге все перечисленные варианты должны иметь зеркальное отражение. Если анализ ориентации мегатрещин между собой и их ориентировка по отношению к предполагаемому разлому (линеаменту) соответствуют одному из вариантов, приведенному на рис. 7.2, принимается, что линеамент и мегатрещины имеют разломную природу. Сколы, перемещение по которым совпадает с направлением смещения по разлому, именуется синтетическими, а противоположные по знаку перемещения – антитетическими разрывами.

Триада мегатрещин, отдешифрированная вблизи линеамента и соответствующая одному из вариантов ориентировок оперяющих разрывов и разлома на «палетке Гзовского», дает возможность:

- реконструировать ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости;
- определять направление сдвигового перемещения по разлому (правый или левый сдвиг);
- оценивать относительный уровень сжатия нормального к сдвиговому разлому (угол оси σ_3 с простиранием разлома меньше 45° , отвечает обстановке дополнительного растяжения, а больше 45° – дополнительного сжатия рис. 7.2.).

7.2. Реконструкция сдвиговых перемещений СГ методом

На рис. 7.3 показаны результаты определения сдвигового перемещения по линеаменту СВ простирания: все мегатрещины, отдешифрированные вблизи линеамента, образуют две триады, совпадающие по своим ориентировкам между собой и по отношению к линеаменту с вариантами А (ориентировка оси сжатия В) и Г (ориентировка оси сжатия А) на рис. 7.2 («палетка Гзовского»). Линеамент является разломом, сопровождающимся оперяющими разрывами, закономерно ориентированными относительно друг друга и по отношению к разлому; разлом является левым сдвигом, формирующимся в обстановке дополнительного растяжения – транстенсии.

В отдельных случаях допускается, что одна из восстановленных СГ методом осей («растяжения» или «сжатия») может быть промежуточной осью σ_2 , например, когда оси σ_2 и σ_3 близки по величине. В таких случаях в горизонтальной плоскости разность в абсолютных величинах напряжений между осью «растяжения» и промежуточной осью, близкие к разности величин между крутой осью «сжатия» и горизонтальной – «растяжения» могут способствовать формирова-

нию мегатрещин сдвигового типа. Проверка наименования осей главных нормальных напряжений требует привлечения дополнительных данных.

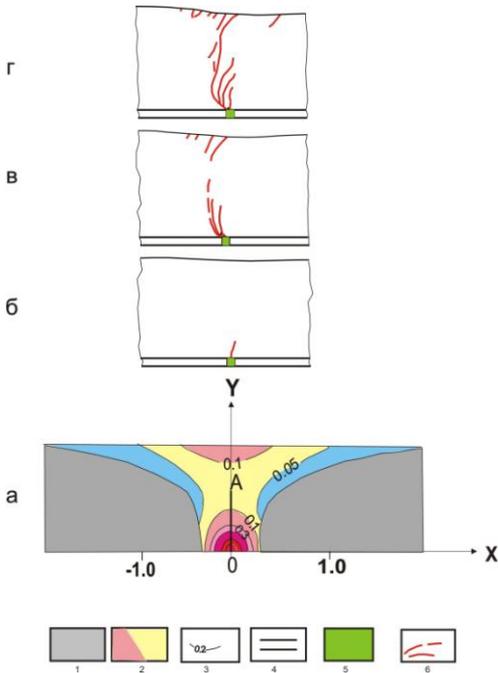


Рис. 7.1. Разрушение слоя над сдвигом в его основании: а – расчетные эквивалентные напряжения, ответственные за разрушение [Ребецкий, 1987]; б, в, г – последовательные стадии развития разрывов [Михайлова, 2007]: б – зарождение разрыва в слое над областью сдвига в основании; в – развитие разрывов двумя группами – снизу и сверху, г – объединение обеих групп разрывов. Условные обозначения: 1 – область двустороннего сжатия, область отсутствия разрывов; 2 – область «скальвания»: максимальные нормальные напряжения положительны, минимальные – отрицательны; 3 – изолинии эквивалентных напряжений; 4 – блоки фундамента в основании; 5 – зона сдвига в фундаменте; 6 – разрывы (в разрезе)

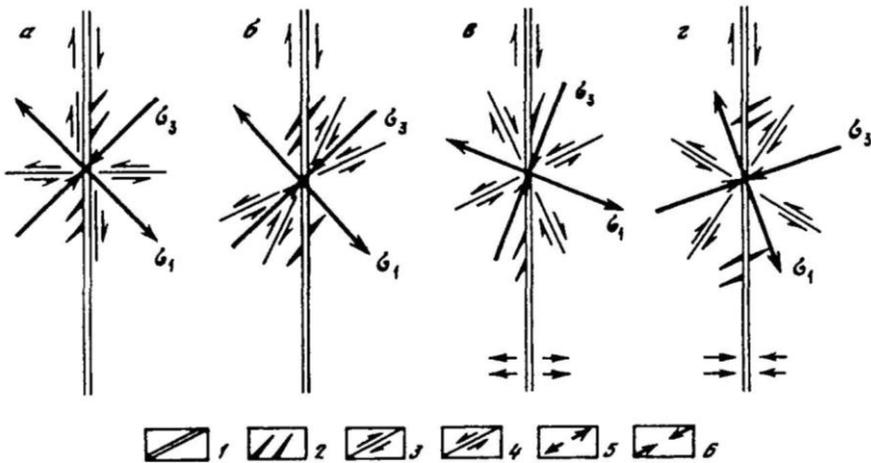


Рис. 7.2. Парагенезис оперяющих трещин в зоне сдвига [Гзовский, 1975] или «палетка Гзовского».

Варианты напряженного состояния при углах скальвания близких к 45° (а), $<45^\circ$ (б), обстановки дополнительного растяжения (в) и сжатия (г). 1 – разлом; 2 – трещина отрыва; 3, 4 – сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 – ориентация осей растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости

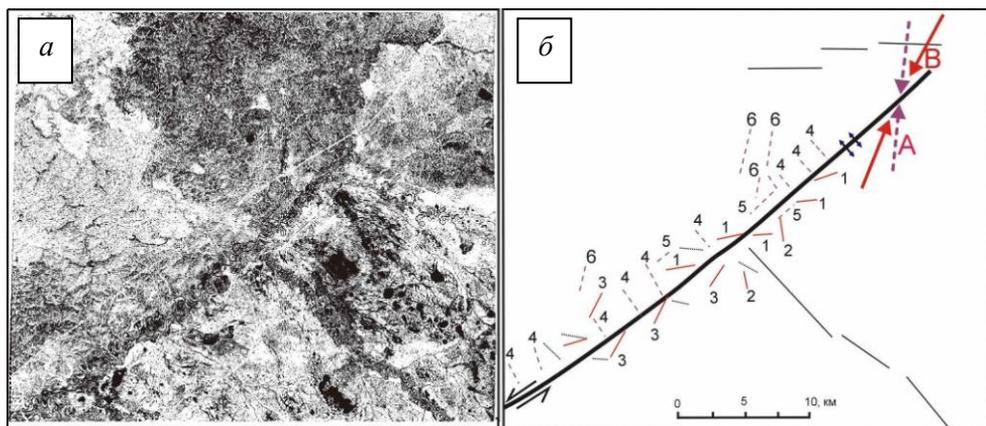


Рис. 7.3. Определение ориентировок осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости СГ методом.

Вариант оси сжатия *a* – мегатрещины №№ 4 - антитетические, 5 – синтетические сколы, 6 – отрывы. Вариант оси сжатия *b* – мегатрещины №№ 1 – синтетические, 2 – антитетические сколы, 3 - отрывы. Верховья р. Пур, Западная Сибирь

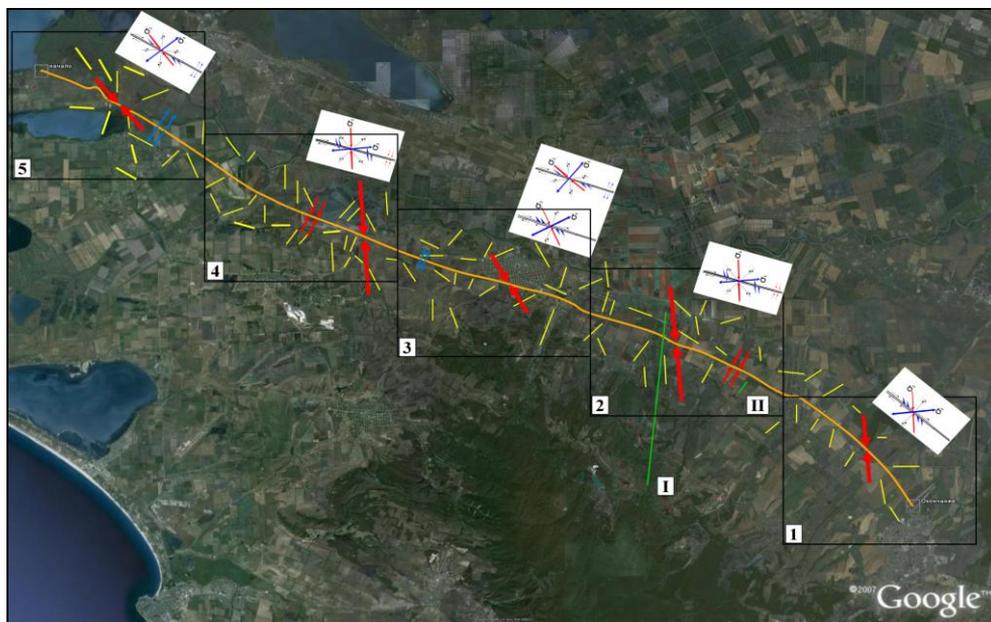


Рис. 7.4. Реконструкция неотектонических напряжений СГ методом вдоль Ахтырского разлома (Северо-Западный Кавказ).

Мегатрещины показаны желтым цветом, 1-4 – номера отрезков с разной геодинамической обстановкой формирования разлома. Зеленые линии и римские цифры I-II – линии поперечных профилей (по: [Smaglichenko et al., 2014])

Особый интерес представляет определение ориентировок осей главных нормальных напряжений с помощью СГ метода по космическим снимкам высокого разрешения. На рис. 7.4 показана реконструкция тектонических напряжений вдоль Ахтырского разлома, разбитого на 5 отрезков (1-5); ориентировка

мегатрещин относительно разлома меняется от отрезка к отрезку. Весь разлом является правым сдвигом, но на разных его отрезках восстановлены обстановки с разным уровнем сжатия, нормального к разлому.

На восток – юго-восточном окончании разлома (отрезок 1) восстановлено трехосное напряженное состояние, в то время как на отрезках 2 и 4 восстановлены обстановки дополнительного сжатия, а на отрезках 3 и 5 – дополнительное растяжение. Такое волнообразное изменение обстановки представляет определенный интерес, т.к. на участках разлома с разной обстановкой будут развиваться разные современные геологические процессы. В обстановке растяжения можно предположить развитие карстовых процессов и обводненность, на участках сжатия – более глубокое расчленение рельефа и т.д. Возможная взаимосвязь современных процессов с обстановкой формирования разломов требует специальных исследований.

При дешифрировании удастся распознать сколовые и отрывные мегатрещины (рис. 7.5): сколы в большинстве случаев прямолинейны, а отрывы дешифрируются по сильно меандрирующим в пределах мегатрещины водотокам, по удлиненным озерцам в русле речек, по прямолинейным границам болот и озер. Поскольку фактическим материалом для этого метода служат данные дешифрирования элементов рельефа, то возраст восстановленных СГ методом стресс-состояний принимается за новейший.

Наличие вертикальной составляющей новейших перемещений по сдвигам определяется по разнице абсолютных отметок рельефа в разных крыльях отде-

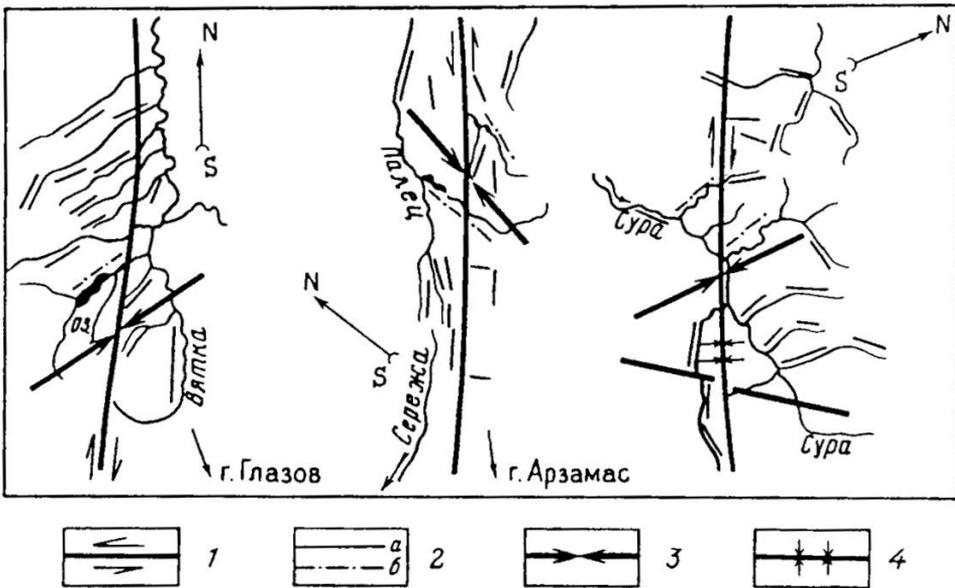


Рис. 7.5. Выраженность сколов и отрывов на топографической карте.

Примеры по долинам рек Вятка, Серезжа и Сура (направление на север указано стрелками для каждого примера): 1 – сдвиги; 2 – оперяющие разрывы (мегатрещины): а – сколы, б – отрывы; 3 – ориентировка оси сжатия в горизонтальной плоскости; 4 – обстановка дополнительного сжатия, нормальная к плоскости сдвига

шифрованного сдвига либо по данным геологического строения новейших отложений. Если удастся определить какие крылья анализируемого сдвига приподнятые или опущенные, то делается вывод о слабо наклонном (субгоризонтальном) положении реконструированных осей «сжатия» и «растяжения», что и приводит к возникновению вертикальной компоненты смещений по разлому. Если есть данные (например, геофизические) о наклоне сместителя, то можно говорить о сбросо- или взбросо-сдвиге; в любом случае сдвиговая компонента перемещения должна преобладать.

ГЛАВА 8. Метод структурно-парагенетического анализа разрывов и тектонической трещиноватости

Л.М. Расцветаева

Одним из методов, позволяющим геологам получать информацию об ориентации осей главных напряжений, типе напряженного состояния и характере разрывообразования является структурно-парагенетический метод (СП метод), который применительно к анализу тектонической трещиноватости, мелких разрывных нарушений и других типов малых структурных форм получил подробное описание в работах Л.М. Расцветаева [1982; 1987а, б; 2002]. В основу методики структурно-парагенетического анализа тектонической трещиноватости положено представление о квазипластическом деформировании массива горных пород, обуславливающим энергетическую эффективность смещений по ранее образованным нарушениям. В отличие от рассматриваемого в методе катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого трещинного течения за счет простых сдвигов СП метод предполагает использование всех основных типов геологических индикаторов напряжений, характеризующих единый пространственно-временной ряд квазипластического деформирования массива горных пород.

Изучение таких структурных сообществ часто оказывается более информативным, чем изучение отдельных разрывно-трещинных структур. Тесно связанные временными и пространственными характеристиками геологические индикаторы напряжений образуют часто повторяющиеся структурные рисунки и могут быть объединены в парагенетические ассоциации или структурные парагенезисы (парагенезы). Основные положения разрабатываемого с середины прошлого века учения о структурных рисунках и парагенезах изложены в работах А.В. Лукьянова и его последователей [Лукьянов, 1963; 1965, 1980, 1991; Расцветаев, 1969, 1973, 1987а, б, 2002; Трифионов, 1967, 1976, 1983; и др.]. В данной главе мы не анализируем структурные парагенезы крупных разрывных структур, выявляемых при геологическом картировании и геофизических исследованиях, а делаем акцент на той части СП метода, которая направлена на анализ геологических индикаторов палеонапряжений (тектонической трещиноватости).

8.1. Базовые положения метода

СП метод включает в себя три основных этапа исследования. На первом этапе (морфологическая стадия) проводятся полевые исследования структурных форм с целью установления особенностей их строения, конфигурации, размеров, пространственной ориентировки, взаиморасположения и относительной последовательности образования. Задействованные в методе основные типы геологических индикаторов напряжений рассмотрены в главе 3.1, а используемая при этом система фиксации этих индикаторов на стадии полевых работ приведена в главе 4.1.

На втором этапе (парагенетическая стадия) исследованные структурные формы объединяются в парагенетические ассоциации. Для получения корректных данных необходимо, чтобы группируемые дизъюнктивы были: 1) геологически одновозрастные и близкорасположенные, то есть отвечали единому тектонодеформационному циклу, при этом располагаясь внутри ограниченного объема

(обычно это площадка наблюдения в пределах одного обнажения); 2) соизмеримы по величине; 3) продиагностированы в отношении кинематического типа нарушения (характера относительного перемещения его бортов). При обработке полевых материалов на первичные круговые диаграммы (обычно в полярной стереографической проекции на сетке Болдырева) наносятся полюса всех измеренных трещин или только несущих кинематическую информацию, если их достаточное количество. Все построения на круговых диаграммах выполняются в стереографической проекции на верхнюю полусферу (в работах сейсмологической направленности и в западной литературе по структурной геологии чаще используется проекция на нижнюю полусферу).

Правила и практические рекомендации по нанесению полюсов структурных форм изложены в главе 3. Для отображения полюсов всех измеренных геологических индикаторов используются специальные значки (см. таблицу №1). Форма этих значков указывает на кинематический тип нарушения, а закрашка свидетельствует об их достоверности. Для статистической обработки составляется серия диаграмм распределения полюсов трещин в изолиниях их плотностей (по палетке Пронина). Наиболее детальной обработке подвергаются зеркала скольжения, особенно в тех случаях, когда их набор достаточно представительен. Для них отстраивается *общая диаграмма*, характеризующая распределение всех зеркал скольжения в данной точке независимо от характера смещения по ним (рис. 8.1), и *частные кинематические диаграммы*, где отдельно анализируются распределение взбросов, сбросов, сдвигов – правых и левых (рис. 8.2), а при неясности направления движения – специальные диаграммы для изображения трещин с субвертикальным ($\beta > 45^\circ$) и субгоризонтальным ($\beta < 45^\circ$) характером следов скольжения. Для более подробного анализа в полюсах зеркал скольжения наносятся вектора перемещений, измеренных на плоскостях этих зеркал.

Заметим, что частные кинематические диаграммы строятся при большом количестве собранных полевых данных. В случае малого количества сделанных в точке наблюдения замеров вся информация хорошо находит отражение в единой общей диаграмме (рис. 8.1). При наличии трещин отрыва, сплющивания или стилолитов строится специальная частная кинематическая диаграмма, отражающая статистическое распределение этих структурных форм (рис. 8.3). Сопоставление общей и частных диаграмм распределения плотностей трещин позволяет наметить основные пространственно-кинематические системы трещиноватости и установить геолого-геометрические соотношения между ними [Расцветаев, 1987а, б; 2002]. Отметим, что использование программных средств обработки геологических индикаторов позволяет находить плотностные максимумы их распределения и определять углы между ними.

Третий этап исследований (геомеханическая стадия) предполагает построение систем, сопоставляющих формирование структурных форм и их парагенезов с определенным типом напряженно-деформированного состояния, а также с характером его внешнего нагружения и реологического поведения в процессе деформации. Проще говоря, для конкретных структурно-геологических моделей, выявленных при полевом исследовании геологических индикаторов, подбираются некоторые эталонные модели геомеханических семейств структур разрушения. На основании изучения природных, экспериментальных и теоретических

Таблица 8.1. Обозначения полюсов основных типов дизъюнктивов и элементов залегания слоистости на круговых диаграммах (по [Расцветаев, 1987а, б], с дополнениями и изменениями)

По типу нарушения: 1) Зеркала скольжения и зоны сдвиговых деформаций

Значок полюса	Геолого-кинематический тип нарушения	$\angle\beta$
	взброс, надвиг	$> 60^\circ$
	сдвиго-взброс (а-левый, б-правый)	46-60°
	сброс	$> 60^\circ$
	сдвиго-сброс (а-левый, б-правый)	46-60°
	правый сдвиг	$< 30^\circ$
	правый взбросо-сдвиг (а) и сбросо-сдвиг (б)	30-45°
	левый сдвиг	$< 30^\circ$
	левый взбросо-сдвиг (а) и сбросо-сдвиг (б)	30-45°
	смещение по или против падения (dip slip fault)	$> 60^\circ$
	смещение по или против падения со сдвиговой компонентой	46-60°
	смещение преимущественно по простиранию	$< 30^\circ$
	смещение преимущественно по простиранию с существенно взбросовой или сбросовой составляющей	30-45°

Примечание: $\angle\beta$ - измеряемый в плоскости сместителя (зеркала скольжения) угол между линией простирания этой плоскости и линией (бороздой скольжения), по которой происходило относительное смещение блоков (см. рис. 2.2 в главе 2).

	2) <u>Отрывы, раздвиги</u>
	3) <u>Жилы</u>
	4) <u>Стилолитовые швы</u>
	5) <u>Системы трещиноватости</u> (цифрой обозначена плотность системы, представляющая среднее количество трещин её образующих на погонный метр)
	6) <u>Залегание поверхностей слоистости:</u> нормальное (а), опрокинутое (б).

По достоверности определения кинематического типа:

			низкая (а), средняя (б), высокая (в)
--	--	--	--------------------------------------

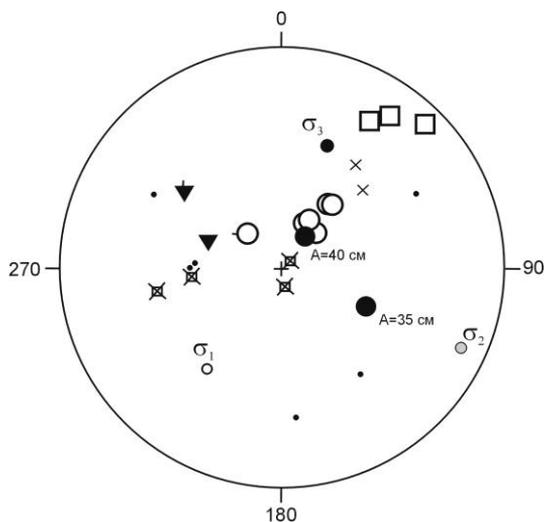


Рис. 8.1. Пример общей диаграммы (стереографическая проекция на верхнюю полусферу), на которой показано распределение всех зеркал скольжения в точке наблюдения независимо от характера смещения по ним (долина р. Сочи, Северо-Западный Кавказ).

Обозначения полюсов основных типов дизъюнктивов и элементов залегания слоистости приведено в табл. 1.

Положение осей главных напряжений реконструировано с помощью МКА

моделей разрушения к настоящему времени выявлены типовые структурные рисунки различных эталонных геомеханических семейств, соответствующие разным моделям дизъюнктивной тектонической деформации элементарных объемов. На рис. 8.3 приводятся некоторые случаи возможной локализации полюсов разрывных нарушений разного кинематического типа при разных типах напряженного состояния (горизонтального сдвига, горизонтального сжатия и горизонтального растяжения)

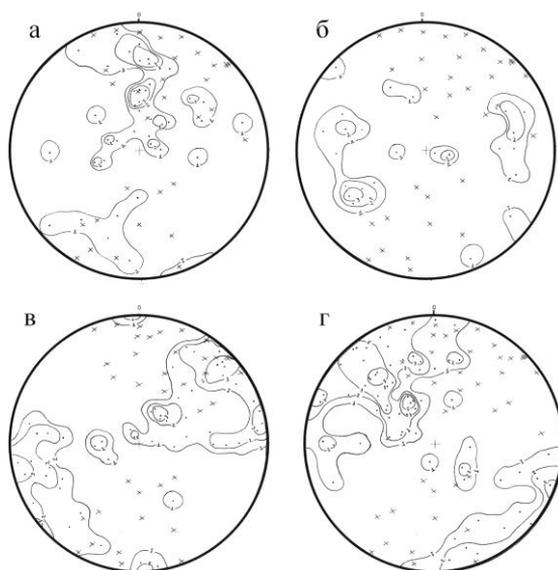


Рис. 8.2. Пример частных кинематических диаграмм по разным кинематическим типам нарушений с характером преимущественного смещения: а – взбросового, б – сбросового, в – правосдвигового, г – левосдвигового.

Для построения использованы данные тектодинамического отряда МГУ – замеры Т.Ю. Тверитиновой в долине р. Елизаветка, Гойтхский антиклинорий Северо-Западного Кавказа

Исторически эти типы напряженного состояния назывались по наиболее проявленным в данном напряженном состоянии кинематическом типе нарушения. Соответственно им назывались и геологические типы напряженного состояния (сдвиговый, взбросовый и сбросовый). Подробная схема разных вариантов стереографических рисунков приведена в работах [Расцветаев, 1987а, б; 2002]. Используя приведенные типовые рисунки как эталонные, возможно подобрать наиболее близкий вариант к полученному в результате первых двух этапов структурно-парагенетического анализа варианту. При этом определяются ориентировка осей главных напряжений (в эталонном варианте она показана для осей максимальных и промежуточных сжимающих напряжений меридионального направления) и геодинамический тип напряженного состояния.

Точность определения азимутов и углов погружения осей главных напряжений определяется точностью локализации полюсов тектонических трещин со следами смещений. В методе не были предусмотрены точные графические решения при определении ориентировок осей главных напряжений. Однако при необходимости, с использованием палеток (или программ) для локализации плотностей полюсов разных типов геологических индикаторов и сетки Вульфа можно провести точное определение положения этих осей.

Парагенетические ассоциации дизъюнктивов состоят из одной, нескольких или множества пространственно-кинематических систем. Устойчивое проявление в изученном объеме одной системы трещин раздвижения (отрывы, жилы),

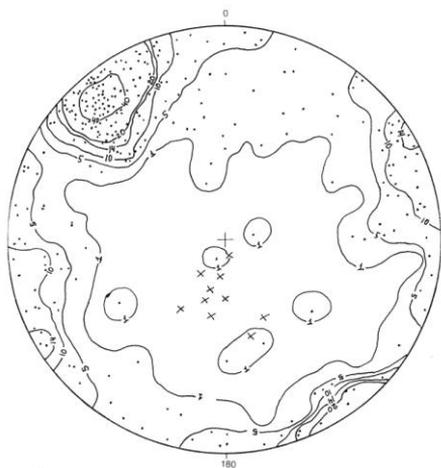


Рис. 8.3. Пример частной кинематической диаграммы по нарушениям отрывного типа, построенной по данным 247 замеров на юго-западном крыле Семисамской антиклинали (Северо-Западный Кавказ)

или скольжения (сдвиги, надвиги сбросы), или содвижения (кливаж, стилолиты, трещины сплющивания) свидетельствует о воздействии на данный объем определенным образом ориентированных анизотропных напряжений. Более широкое распространение имеют парагенетические сочетания из нескольких систем трещин разного кинематического типа, в том числе: 1) две сопряженные системы трещин скальвания (разноименные сдвиги, надвиги или сбросы); 2) две взаимно перпендикулярные системы трещин (система раздвижения и система содвижения; обычно это сочетание отрывов и трещин или стилолитов); 3) четыре сопряженные системы сколов (разноименные сбросы или надвиги и диагональные к ним сдвиги); 4) сочетание одной или двух пар сопряженных систем скальвания с одной или двумя системами отрывов и трещин сплющивания.

Часто встречаются неполные структурные рисунки, в которых представлена только часть из перечисленных выше наборов дизъюнктивных систем. Причиной такой неполноты служит изначальная неоднородность деформируемых объемов. При парагенетическом сочетании дизъюнктивов соблюдается определенная геолого-геометрическая упорядоченность между ориентировкой дизъюнктивных плоскостей и характером смещения по ним. Упорядоченность геолого-геометрических соотношений внутри каждого дизъюнктивного парагенеза позволяет не только выделять различные парагенетические ассоциации природных дизъюнктивов по свойственным им структурным рисункам, но и предлагать их механико-генетическую (тектоническую, кинематическую и палеореологическую) интерпретацию [Расцветаев, 1987а, б].

Сложным вопросом при анализе тектонической трещиноватости и мелких разрывных нарушений является вопрос возраста формирования и взаимоотношений различных структурных парагенезов. Доступных методов определения абсо-

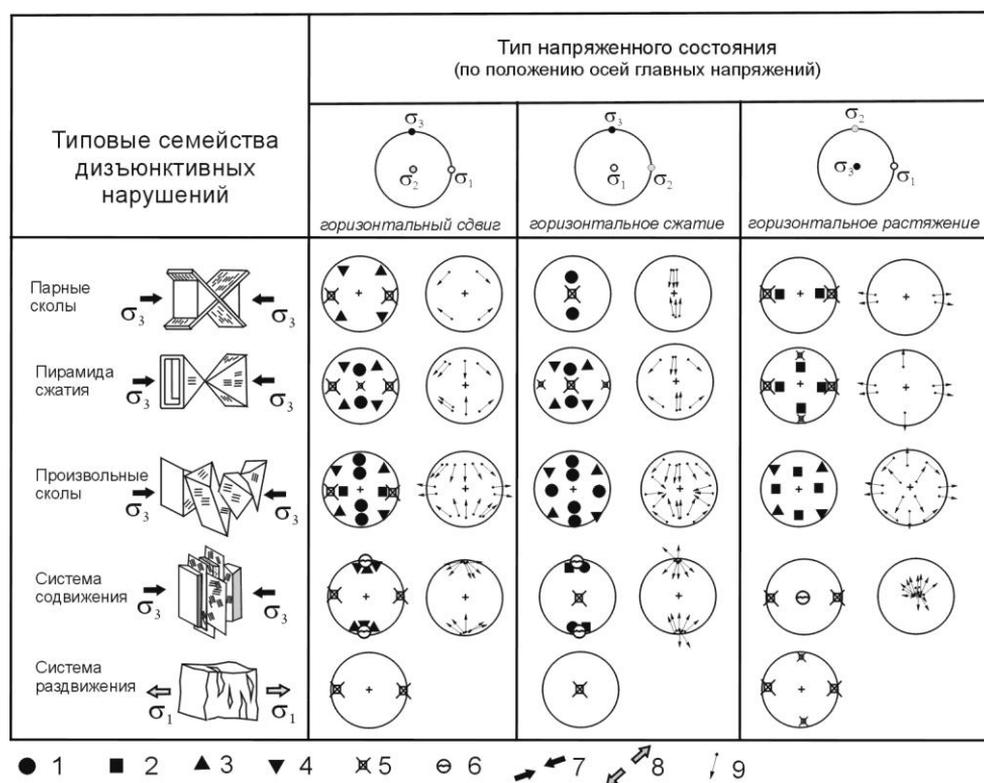


Рис. 8.4. Структурные рисунки типовых парагенетических семейств дизъюнктивных нарушений (по [Расцветаев, 1987а, б; 2002] с изменениями). Круговые диаграммы приведены в стереографической (равноугольной) проекции на верхнюю полусферу.

Условные обозначения: 1-6 – полюса зеркал скольжения (тектонических трещин) с преимущественным типом перемещений: 1 – взбросы, 2 – сбросы, 3 – правые сдвиги, 4 – левые сдвиги, 5 – отрывы, 6 – стресс-стилолиты; 7-8 – ориентировка осей главных нормальных напряжений: 7 – максимальных (сжатие), 8 – минимальных (растяжение); 9 – направление относительного перемещения висячего блока, показанное в полюсе плоскости зеркала скольжения (тектонической трещины)

лютного возраста зеркал скольжения или стилолитов в настоящий момент не существует. Относительную геологическую привязку времени формирования структурных парагенезов можно дать в следующих случаях: 1) нарушение «запечатывается» более молодыми отложениями или интрузивными/вулканическими образованиями; 2) существуют данные о взаимоотношениях дизъюнктивных парагенезов между собой и элементами складчатой структуры. Это позволяет говорить о доскладчатом, ранне- или соскладчатом и постскладчатом времени формирования различных структурных парагенезов. При исследованиях соотношений выделенных структурных парагенезов в пределах всего складчатого пояса мы подходим к более сложной задаче по определению последовательности действовавших здесь напряжений, что определяется следующими факторами: 1) сложной блоковой структурой подвижных поясов, внутри которых по-разному ориентированы вторичные напряжения, часто отличающиеся от направления генерального стресса; 2) возможностью практически мгновенной по геологическим меркам сменой направления и ориентации осей главных напряжений (о чем свидетельствуют решения очагов землетрясений).

Однако в пределах небольшой площадки измерений, на которой мы не видим неоспоримых свидетельств одновременного образования разных геологических индикаторов палеонапряжений, а также все измеренные и нанесенные на диаграммы индикаторы образуют единый структурный парагенез, мы можем сделать следующее предположение (допущение). В случае нахождения в массиве горных пород свидетельств, связанных только с одной тектодинамической обстановкой, обусловившей его квазипластическое деформирование по совокупности структурных форм единого парагенетического ряда, мы можем говорить о едином (возможно растянутом во времени) этапе деформирования для данной площадки (точки) измерений. Этот этап будет и последним из проявившихся в данном массиве горных пород.

8.2. Примеры практического использования СП метода

К настоящему времени накоплен большой фактический материал по типовым структурным парагенезам, сформированным в складчатых и субплатформенных областях Северного Кавказа. В серии работ рассмотрены как парагенезы наблюдаемые на уровне малых структурных форм (тектонической трещиноватости), так и на уровне региональных дизъюнктивных систем [Расцветаев, 1977; Милановский и др., 1989; Маринин, Расцветаев, 2008; Расцветаев и др., 2010]. На рис. 8.5 – 8.7 приведены диаграммы некоторых таких структурных парагенезов, где соответствующими значками показаны максимумы выявленных при полевых исследованиях систем мелких нарушений (трещин, зеркал скольжения и небольших разрывов) определенного кинематического типа.

Для каждого парагенеза показано положение осей максимальных и минимальных сжимающих напряжений (при субгоризонтальном их положении показано простирание). Рядом (справа) для сравнения показано положение осей главных напряжений, рассчитанное с помощью программы *STRESSgeol* по алгоритму метода катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого [2007]. На рис. 8.5 представлена обстановка горизонтального сдвига с северо-восточной ориентировкой оси максимальных сжимающих напряжений. Определение осей главных напряжений

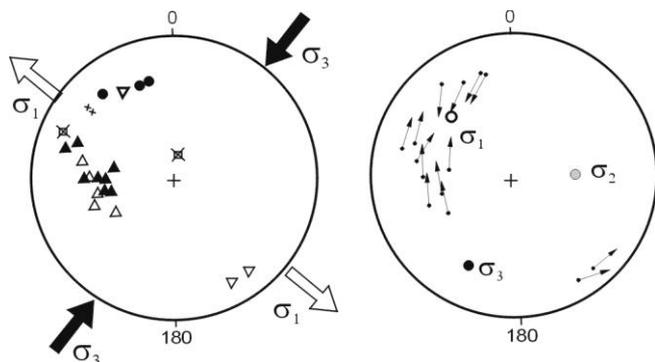


Рис. 8.5. Структурный парагенез северо-восточного сжатия в палеоценовых отложениях вблизи мыса Кадош (Северо-Западный Кавказ).

Тип напряженного состояния – горизонтальный сдвиг. Круговые диаграммы приведены в стереографической (равноугольной) проекции на верхнюю полусферу. Условные обозначения см. рис. 8.4

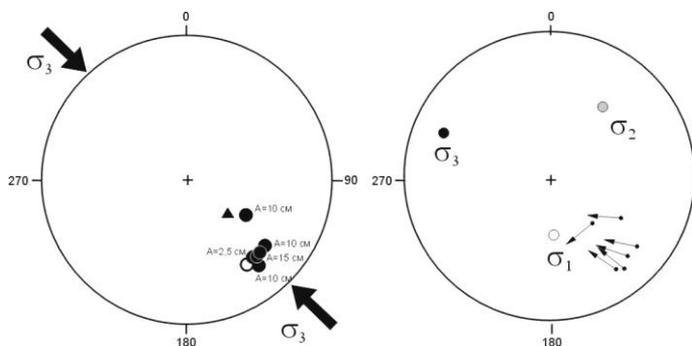


Рис. 8.6. Структурный парагенез северо-западного сжатия в верхнемеловых отложениях вблизи сел. Михайловский перевал (Северо-Западный Кавказ).

Тип напряженного состояния – горизонтальное сжатие. Круговые диаграммы приведены в стереографической (равноугольной) проекции на верхнюю полусферу. Условные обозначения см. рис. 8.4

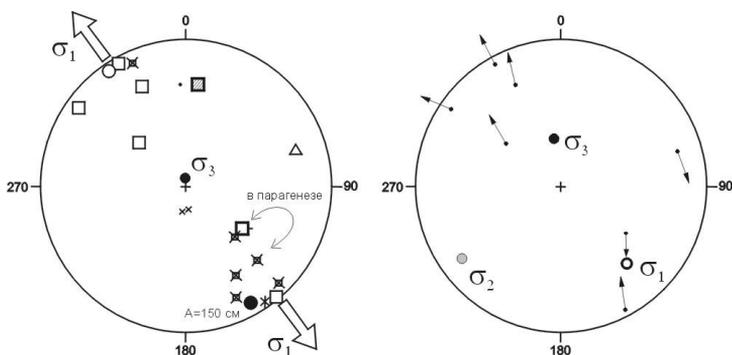


Рис. 8.7. Структурный парагенез субвертикального сжатия и северо-западного растяжения в верхнемеловых отложениях на юго-западном крыле Семисамской антиклинали (Северо-Западный Кавказ).

Тип напряженного состояния – горизонтальное растяжение. Круговые диаграммы приведены в стереографической (равноугольной) проекции на верхнюю полусферу. Условные обозначения см. рис. 8.4

проведено по локализации полюсов правых и левых сдвигов, а также отрывных систем. На рис. 8.6 показана обстановка горизонтального сжатия с северо-западным направлением действия оси максимального сжатия. Ось максимального сжатия уверенно определяется по максимуму взбросо-надвиговых нарушений северо-восточного простирания.

Обстановка горизонтального растяжения с субвертикальной осью максимальных сжимающих напряжений приведена на рис. 8.7. Ось минимального сжимающего напряжения (или девиаторного растяжения) имеет северо-западную ориентацию и хорошо определяется по сбросово-отрывным системам северо-восточного простирания.

В заключении можно сделать вывод, что использование структурно-парагенетического анализа применительно к анализу тектонической трещиноватости, зеркал скольжения, мелких разрывных нарушений и других типов малых структурных форм позволяет геологам непосредственно в поле получать первоначальные данные о напряженном состоянии изучаемого массива горных пород, устанавливать направление систем разрывных нарушений и преобладающие кинематические типы перемещений в них. Важно также и установление прямых свидетельств структурно-парагенетической ассоциации дизъюнктивных нарушений, которое помогает реконструкции тектонической истории изучаемого региона.

ГЛАВА 9. Применение результатов реконструкции тектонических напряжений полевыми методами

Необходимость реконструкции тектонических напряжений исторически была обусловлена работами по поиску и разведке месторождений полезных ископаемых, а также инженерно-геологическими изысканиями при строительстве крупных строительных объектов. В настоящее время получение информации о напряженно-деформированном состоянии массивов горных пород, отдельных тектонических структур или же целых регионов помогает решать как фундаментальные проблемы (генезис складчатых и разрывных деформаций, изменение напряженного состояния в зоне разлома и т.д.), так и практические задачи (определение перспективных участков добычи рудных месторождений, углеводородного сырья, оценка сейсмической опасности и т.д.) [Сим и др., 1987, 2005, 2008].

9.1. Совместное исследование складчатых и разрывных деформаций

Исследование складчатых и разрывных деформаций рассмотрено на примере механизма формирования *Воронцовского покрова* Северо-Западного Кавказа [Яковлев и др., 2008]. Вопрос его формирования вызывал значительный интерес и дискуссии у нескольких поколений геологов. Мезокайнозойские структуры Северо-Западного Кавказа на меридиане г. Сочи располагаются между двумя крупными граничными глубинными разломами. На севере ограничением служит Главный Кавказский разлом, который проходит по южному подножью г. Фишт, сложенному верхнеюрскими известняками, а на юге – шовная зона Ахцу, сложенная также преимущественно верхнеюрскими известняками. Накопление мощной толщи терригенных и карбонатных толщ верхней юры-эоцена между этими шовными зонами завершилось в конце эоцена – начале олигоцена позднеальпийским складкообразованием. Южнее зоны Ахцу расположена Абхазская зона, испытавшая в конце палеогена – неогене существенное погружение с накоплением мощных глинистых толщ олигоцена. Отложения зоны слабо деформированы и относятся уже к структурам Закавказского массива. Воронцовский покров расположен на границе складчатого сооружения Северо-Западного Кавказа и северного края Завкавказского массива. Во фронтальной части в междуречье рек Сочи и Мамайка палеоцен-эоценовые отложения Чвежипсинской зоны по пологому нарушению (с северными падениями сместителя) надвинуты на олигоценовые отложения Абхазской зоны (рис. 9.1).

Общая мощность толщи палеогеновых отложений покрова составляет 1.3–1.6 км, а минимальная амплитуда перемещения на юг равна 15 км. В нижней части покрова, вскрытой горной выработкой, отмечены многочисленные мелкие складки и зоны дробления с падением осевых поверхностей на СВ (рис. 9.2).

Реконструкция тектонических напряжений произведена кинематическим методом О.И. Гущенко. Восстановленные 15 локальных стресс-состояний в разных частях тела покрова как с дневной поверхности, так и в горной выработке дали возможность определить общее поле напряжений с субгоризонтальной осью

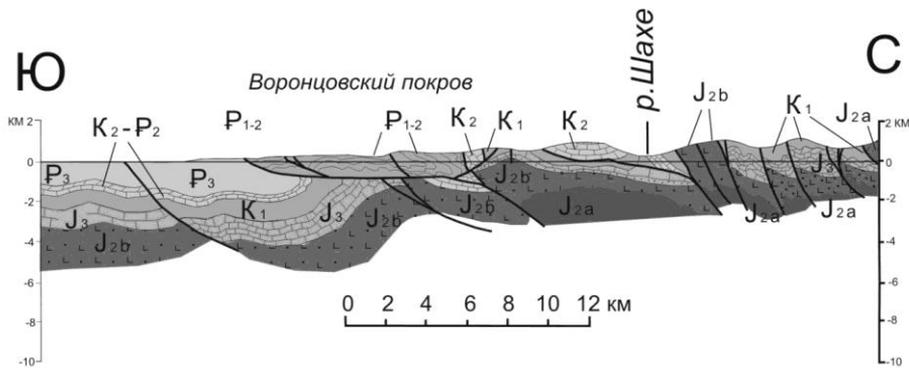


Рис. 9.1. Схематический геологический разрез через структуры Воронцовского покрова в районе г. Сочи (составлен с учетом данных В.А. Лаврищева и др. [2000])

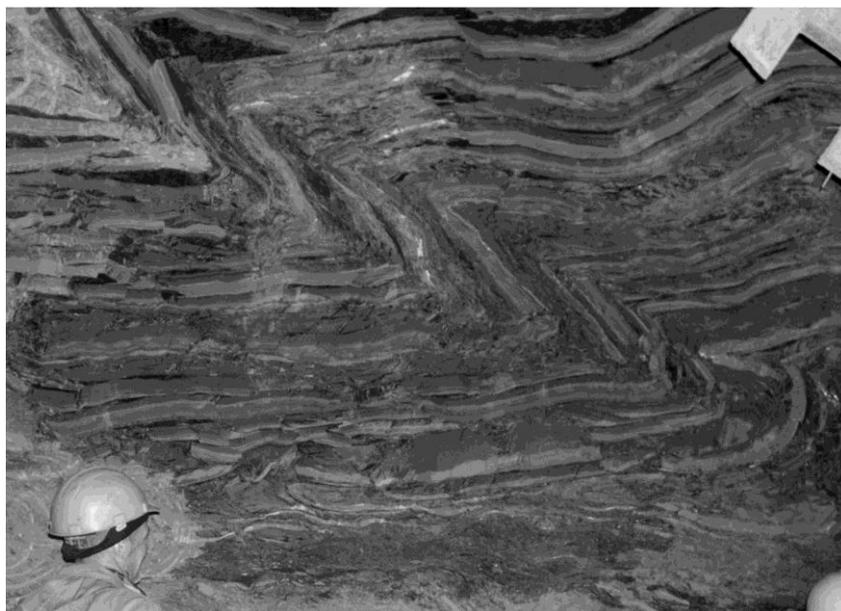


Рис. 9.2. Характер складок в detachменте Воронцовского покрова (север справа)

сжатия, погружающейся на ЮЗ под углом 20° и субвертикальной осью растяжения (рис. 9.3). Таким образом, здесь преобладает обстановка горизонтального сжатия, в которой формируются преимущественно взбросовые и надвиговые системы разрывных нарушений.

Отметим, что в этом разделе, так же как и в предыдущих, под осью сжатия понимается направление действия оси главного напряжения максимального сжатия, а под осью растяжения – направление действия оси главного напряжения минимального сжатия или максимального девиаторного растяжения.

Морфология складок в целом согласуется с восстановленным общим полем напряжений по совпадению шарниров складок и промежуточных осей локальных стресс-состояний. При этом вопрос о генезисе складок оставался открытым: в восстановленном поле напряжений формирование покрова могло быть как тектониче-

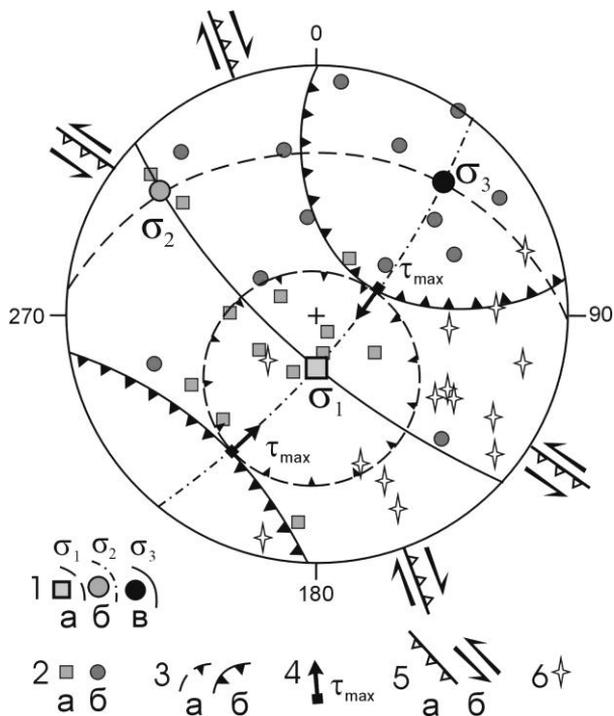


Рис. 9.3. Стереодиаграмма напряженного состояния массива горных пород Воронцовского покрова (сетка Вульфа, верхняя полусфера). Условные обозначения: 1 – оси: а – минимальных (растяжения), б – промежуточных, в – максимальных сжимающих главных нормальных напряжений общего поля и плоскости их действия; 2 – оси: а – минимальных (растяжения), б – максимальных сжимающих главных нормальных напряжений локального уровня; 3 – общее поле напряжений: конусы растяжения (а) и сжатия (б); 4 – полюсы плоскостей действия максимальных касательных напряжений; 5 – типы перемещений по плоскостям действия максимальных касательных напряжений: взбросы, сдвиги; 6 – положение шарниров складок

ским с поперечным укорочением (чистый сдвиг, модельный наклон оси сжатия 0°), так и гравитационным с удлинением слоев (простой сдвиг, модельные наклоны осей сжатия 45°), которому не противоречит наклон оси сжатия в 20° .

Численные параметры складчатых деформаций, измеренные и проанализированные Ф.Л. Яковлевым (наклон осевых поверхностей складок и величина сокращения) показали, что механизм формирования этих складок является простым сдвигом вдоль плоскости подошвы покрова, что говорит в пользу его гравитационного происхождения [Яковлев и др., 2008]. Таким образом, для успешного решения вопроса о механизме формирования покрова необходимо комплексное тектонофизическое изучение деформаций и напряжений, а также исследование деформационных состояний вообще в сложных складчатых структурах.

9.2. Особенности тектонических напряжений в зонах разрывов

Исследование тектонических напряжений в зонах разломов геологическими методами подтверждает данные моделирования тектонических напряжений в этих зонах. Как известно из теоретического моделирования напряжений, связанных со смещением по разломам, вблизи зон сдвигов ориентировки осей напряжений внешнего поля (собственно, обуславливающего смещение) вдоль сдвигов плавно изменяются, достигая предельной переориентации на концах разлома. Во фронтальной (близконцевой) части движущегося крыла ориентировка оси сжатия почти параллельна, а оси растяжения – почти перпендикулярна плоскости сдвига; в тыльной части противоположного крыла, наоборот, ось растяжения параллельна, а ось сжатия перпендикулярна плоскости сдвига [Осокина, 2000].

Особо следует отметить, что такое прямое сопоставление природного объекта с результатами теоретических тектонофизических исследований возможно для регионов, напряженное состояния которых близко к горизонтальному сдвигу, т.е. когда оси сжатия и растяжения субгоризонтальны. Именно в этом случае смещения имеют сдвиг вдоль простирания разломов, что отвечает постановке теоретических задач, рассмотренных в работах Д.Н. Осокиной и других авторов.

В отдельных случаях данные о природных напряжениях, восстановленных полевыми методами, полностью согласуются с теоретически предсказываемыми. Примером такого соответствия полевых и теоретических тектонофизических данных служат локальные стресс-состояния на концах небольшого разлома на руднике «Центральный» (Хибинский массив). Точки 10 и 13 расположены в лежачем и висячем крыльях этого пологого разлома. На рис. 9.4 видно, что оси сжатия и растяжения практически лежат в плоскости разлома. При этом они ориентированы субперпендикулярно и параллельно вектору перемещения с переиндексацией в разных крыльях.

Для Хибинского массива по данным о локальных стресс-состояниях, восстановленных на трех рудниках, было определено общее для массива поле напряжений взбросового типа, оси сжатия и растяжения которого нанесены на рис. 9.4.

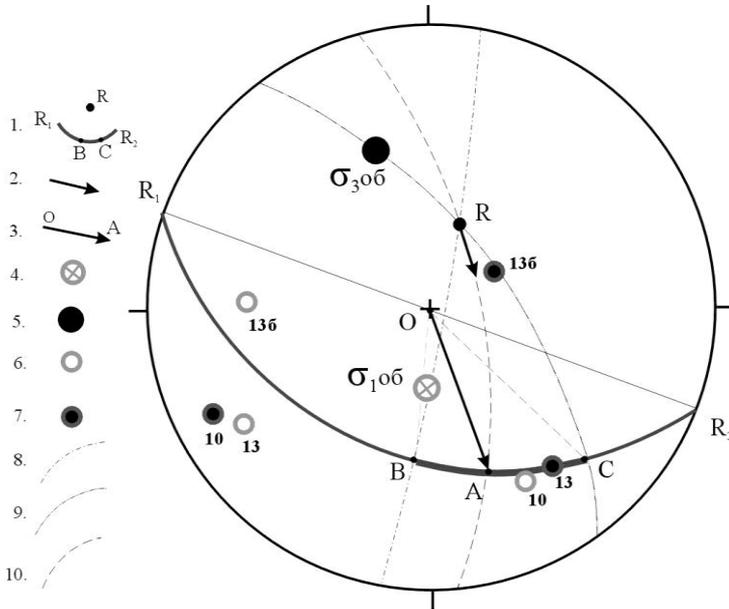


Рис. 9.4. Связь перемещений и осей главных нормальных напряжений вблизи разлома на руднике «Центральный»:

1 – полюс (R) и плоскость разлома $R_1 R_2$, на которой BC – интервал возможного выхода векторов перемещений по разлому в общем поле напряжений Хибин при разном виде напряженного состояния («Центральный», горизонты +835 и +745); 2-3 – вектор перемещения по разлому: в точке полюса (2), на плоскости разлома (3); 4-5 – оси минимальных – растяжения (4) и максимальных – сжатия (5) сжимающих главных нормальных напряжений общего поля Хибин; 6-7 – оси минимальных – растяжения (6) и максимальных – сжатия (7) сжимающих главных нормальных напряжений локальных стресс-состояний; цифрами даны номера точек наблюдений; 8-10 – дуги больших кругов, соединяющих полюс разлома и ось растяжения (8), ось сжатия общего поля (9) и вектор перемещения по разлому (10)

Вектор OA на плоскости разлома фиксирует измеренное перемещение по разлому, а дуги больших кругов, соединяющие оси сжатия и растяжения общего поля Хибин с полюсом разлома, ограничивают отрезок разлома BC . Только в пределах этого отрезка в данном общем поле может лежать вектор перемещения (OB – при одноосном растяжении, а OC – при одноосном сжатии, кинематический тип должен быть правым взбросо-сдвигом). Измеренный вектор OA близок к биссектрисе угла BOC , что дает основание качественно оценить вид напряженного состояния (характеризуемый коэффициентом Лоде – Надаи μ_σ) Хибин как близкий к трехосному. Таким образом, анализ особенностей распределения локальных стресс-состояний в крыльях данного разлома дает возможность получить представление о таком важном параметре напряженного состояния Хибин, как коэффициент Лоде – Надаи μ_σ .

Изменение локальных стресс-состояний в разных крыльях разломов, обнаруженное при полевых тектонофизических исследованиях, в сочетании с опубликованными теоретическими и экспериментальными данными, позволило использовать такое изменение как признак активности новейших разломов, имеющих важное практическое значение. В зонах сложно построенных разломов картируются резкие различия в локальных стресс-состояниях в разных неоднородностях, участвующих в строении тела разлома (рис. 9.5).

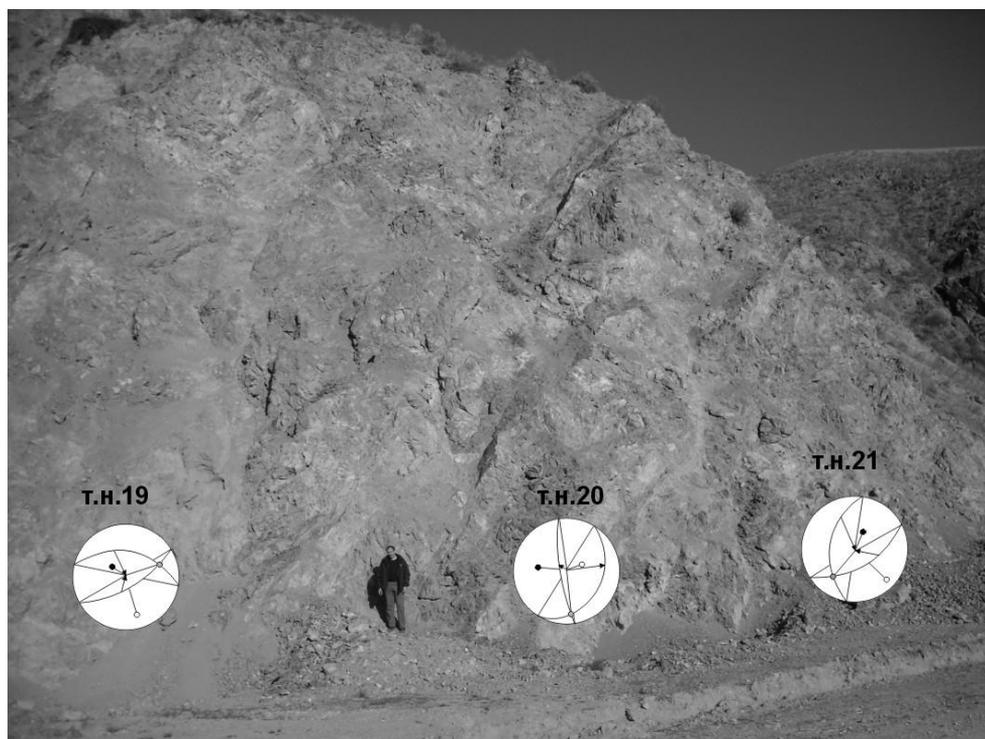


Рис. 9.5. Локальные стресс-состояния в зоне Шамси-Тюндюкского разлома (Северный Тянь-Шань).

На стереограммах кружки с заливкой – оси максимальных (сжатия), полые – оси минимальных (растяжения) сжимающих главных нормальных напряжений

В зоне Шамси-Тюндюкского разлома (Северный Тянь-Шань) на небольшом расстоянии восстановлено 3 объема с разной ориентацией осей главных нормальных напряжений. Все 3 определения не противоречат нахождению общего поля напряжений исследованной части Северного Тянь-Шаня, которое позволило установить механизм горизонтального сжатия (взбросы), обусловивший формирование новейшей структуры при субвертикальной оси растяжения и субмеридиональной пологой оси сжатия [Сим и др., 2014].

Полученный геодинамический тип горизонтального сжатия по данным общего поля напряжений не противоречит известным геологическим данным о новейших структурах этого региона. Информация об изменчивости тектонических напряжений в зоне разлома может служить одним из натуральных данных для теоретических расчетов делимости горных пород и роли неоднородностей в распределении локальных стресс-состояний, с которыми могут быть связаны разные механизмы афтершоковых землетрясений.

9.3. Прогноз условий разработки нефтяных месторождений

Выделение активных разломов нефтегазоносных районов платформенных территорий можно производить по изменчивости ориентировок осей главных нормальных напряжений, восстановленных кинематическим методом в разных крыльях разломов [Сим, 2011]. Такие регионы, как Тимано-Печорская и Западно-Сибирская нефтегазоносные провинции, отличаются развитием мощных рыхлых отложений на дневной поверхности и отсутствием возможности исследований кинематическим методом. В подобных регионах активность разломов определяется по наличию в зонах их динамического влияния, дешифрирующихся на космо- и фотоснимках, закономерно ориентированных мелких прямолинейных элементов рельефа. В перечисленных районах достаточно продуктивна реконструкция новейших тектонических напряжений структурно-геоморфологическим методом (СГ), дающая возможность определения активизации разломов и направлений сдвиговых подвижек по ним [Сим, 2000].

Использование тектонофизических методов изучения напряжений в нефтегазовой геологии показало:

1) активное влияние новейших разломов на концентрацию и сохранность месторождений углеводородов;

2) высокую значимость геодинамической обстановки для условий добычи нефти.

Важным критерием условий как размещения, так и добычи нефти является определение участков локального сжатия и растяжения на пересечении разнонаправленных (левых и правых) сдвигов (рис. 9.6). Смещения по двум взаимопересекающимся разломам создают два накрест лежащих сектора, в которые происходит горизонтальное нагнетание вещества – сектора локального сжатия, и два накрест лежащих сектора, для которых наблюдается горизонтальное растекание вещества – сектора локального растяжения.

Представленная интерпретация разрывной тектоники относится к случаю геодинамического типа напряженного состояния в виде горизонтального сдвига, когда смещения по разломам строго сдвиговые вдоль простирания. В принципе такая же интерпретация возможна и при смещениях вдоль простирания разрывов с малыми углами погружения/восстания (менее 30-35°).

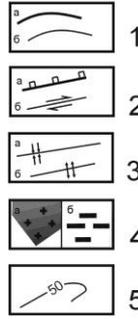
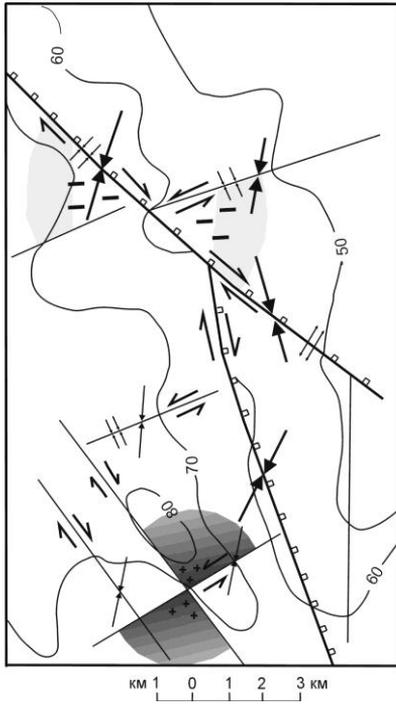


Рис. 9.6. Сектора сжатия и растяжения на участках пересечения разнонаправленных сдвигов (Западная Сибирь, верховья бассейна р. Пур):

1 – отдешифрованные разломы 1-го порядка (а) и 2-го порядка (б);
 2 – кинематические типы разломов: а – сбросы (взбросы?), б – сдвиги;
 3 – геодинамическая обстановка формирования сдвига: а – сжатия, б – растяжения;
 4 – участки локального сжатия (а) и растяжения (б), обусловленные разнонаправленными сдвиговыми перемещениями;
 5 – изогипсы рельефа подошвы четвертичных отложений

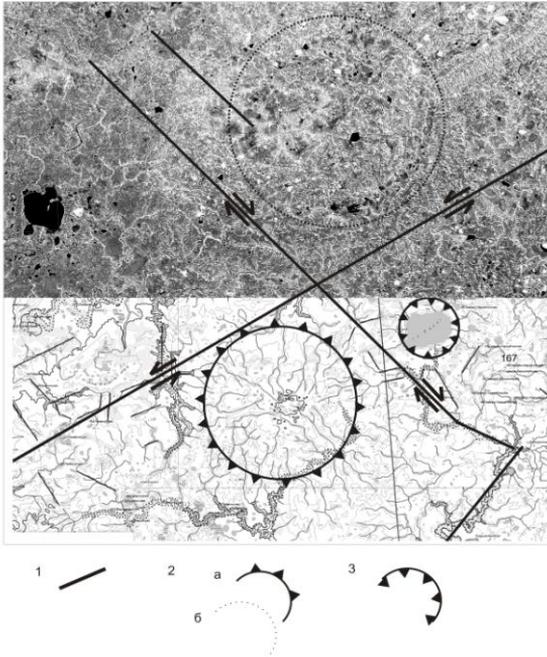


Рис. 9.7. Геодинамические обстановки формирования разломов и локальные обстановки сжатия и растяжения на пересечении разнонаправленных сдвигов. Печоро-Колвинский вал, Тимано-Печорская плита.

Неотектонические структуры: 1 – разломы, 2 – поднятия, выделенные: а – по топографической карте, б – по фотоснимку, 3 – впадины, выделенные по топографической карте. (по А.Б. Рапопорту, из [Сим и др., 2008])

На рис. 9.7 показаны отдешифрованные А.Б. Рапопортом положительные структуры в северном и южном секторах локального сжатия и отрицательная – в восточном секторе растяжения, которые подтверждают восстановленные СГ методом направления сдвиговых смещений по активизированным разломам [Сим и др., 2008]

др., 2008]. На участках локального растяжения дебит нефти в скважинах существенно более высокий, чем на участках локального сжатия [Сим, 2011].

При доминирующей субмеридиональной ориентировке оси сжатия сектора на местах пересечения левых сдвигов СЗ и ССЗ простирания и правых сдвигов ВСВ простирания сектора, раскрытые на север и юг, будут испытывать дополнительное растяжение, а раскрытые на запад и восток – дополнительное сжатие.

В Тимано-Печорской, Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской нефтегазоносных провинциях неоднократно показано, что при прочих равных геологических условиях дебиты нефти в секторах растяжения в десятки раз больше, чем в секторах сжатия, в которых часто пробуренные скважины оказываются непродуктивными и даже сухими. При доминирующей субмеридиональной ориентировке оси сжатия сектора на местах пересечения левых сдвигов СЗ и ССЗ простирания и правых сдвигов ВСВ простирания сектора, раскрытые на север и юг, будут испытывать дополнительное растяжение, а раскрытые на запад и восток – дополнительное сжатие.

9.4. Прогноз устойчивости гражданских сооружений

Информация о секторах сжатия и растяжения, образующихся в зонах взаимопересечения разломов, чрезвычайно важна при изучении причин обрушения и аварийных ситуаций в гражданских сооружениях.

Нижнеокский полигон. В устье р. Оки в г. Дзержинске получили широкое развитие провалы домов в карстовые воронки. Тектонофизические исследования СГ методом показали, что город расположен в секторе локального растяжения, открытом на запад, на пересечении разнонаправленных сдвигов (рис. 9.8 а). Детальные исследования подтвердили обстановку растяжения (рис. 9.8 б), т.к. мелкие разломы вблизи города формируются также в обстановке растяжения, в то время как в секторе локального сжатия, раскрытом на юг, мелкие разломы формируются в обстановке сжатия [Сим, 2011]. Обстановка растяжения, благоприятная для циркуляции поверхностных вод, благоприятна для повышенного выщелачивания гипсов и ангидритов и способствует развитию карста.

Смоленский полигон. Влияние активных разломов на устойчивость железнодорожного полотна исследовано на участке 390-411 км железной дороги Москва-Смоленск, на котором вблизи Смоленска возникают постоянные проблемы с продактами путей. В таблице 9.1 приведены данные путеизмерителя в условных единицах отражающие оценку состояния пути; значения выше 121 (белые клетки) характерны для нормального, 115-120 (светло-серые,) – среднего, 95-114 (темно-серые,) – неудовлетворительного состояния путей. Наверху показаны даты прохождения путеизмерителя. Из таблицы видно, что ремонта требуют отрезки путей между: I – 391-393 км, II – 396 км, III – 401 км, IV – 403 км, V – 406-411 км.

Восстановленные СГ методом тектонические напряжения в горизонтальной плоскости характеризуются субмеридиональным сжатием и субширотным растяжением (рис. 9.9). Признаком локального растяжения являются параллельные разлому мегатрещины сбросовой кинематики, которые позволили отнести самый западный меридиональный разлом, а также субмеридиональный, проходящий через 400-й км пути разлом к сбросам. По обоим разломам сдвиговая компонента не устанавливается.

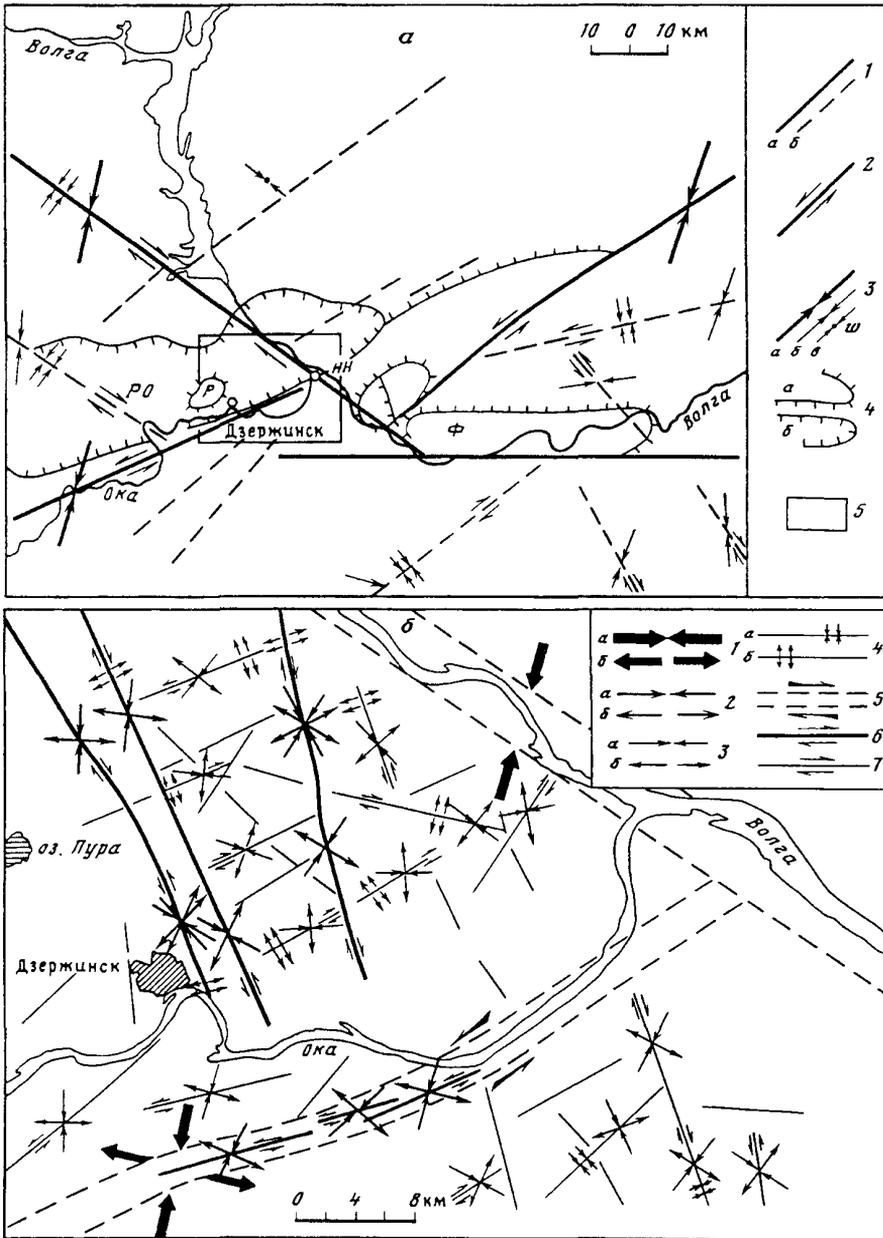


Рис. 9.8. Неотектонические напряжения Нижнеокского полигона. *а:* 1 – разломы (а – I, б – II и более высоких рангов); 2 – сдвиги; 3 – ориентировка оси сжатия в горизонтальной плоскости (а – I, б – II и более высоких рангов, в – современного сжатия в Воротиловской скважине [Huber et al., 1997]); 4 – новейшие структуры (по В.И. Макарову): а – поднятия (Ф – Фадеевское, Р – Решетихинское), б – впадины (РО – Нижнеокская); 5 – участок детальных исследований; НН – Нижний Новгород. *б:* 1-3 – оси тектонических напряжений в горизонтальной плоскости: 1 – I, 2 – II, 3 – III рангов (а – сжатия, б – растяжения); 4-7 – сдвиги: 4 – I, 5 – II, 6 – III рангов; 7 – III рангов; 8 – разломы (а – I, б – II, в – III рангов)

Таблица 9.1. Показатели железнодорожного путеизмерителя

КМ	14.04.1999	13.06.1999	10.11.1999	14.04.2000
390	140	139	184	179
391	117	120	150	137
392	106	108	157	138
393	117	114	136	127
394	129	125	142	137
395	130	125	155	143
396	126	120	141	138
397	127	122	164	153
398	126	121	156	145
399	130	125	155	145
400	131	127	146	136
401	97	100	100	99
402	128	131	130	127
403	115	125	122	119
404	124	121	123	125
405	136	130	135	134
406	101	101	124	124
407	104	99	109	110
408	107	107	111	116
409	122	119	121	124
410	106	102	105	110
411	104	136	129	120

Все неблагоприятные участки железнодорожных путей находятся в секторах локального растяжения на пересечении разнонаправленных сдвигов, при этом участки I (390-392 км) и II (396-397 км) находятся вблизи сдвигов, формирующихся в обстановке растяжения, что способствует более интенсивной циркуляции поверхностных вод вдоль этих разломов и, соответственно, ухудшению инженерно-геологических условий. Участок IV (средние показатели состояния путей 10.04.1999 и 14.04.2000) находится в не нарушенном разломами пространстве, поэтому можно предположить, что на нем причины ухудшения состояния дороги не связаны с разломной тектоникой.

Наиболее проблематичный с точки зрения устойчивости железнодорожных путей участок V расположен вблизи пересечения двух разломов I-го ранга (субмеридионального, частично разработанного долиной р. Днепр, и субширотного, возможно, являющегося составной частью регионального Гжатского разлома). Кроме крупных разломов через анализируемый участок проходят еще три мелких разлома, на пересечении с которыми образуются свои участки локального растяжения, также влияющие негативно на состояние путей. Таким образом, проведенные тектонофизические исследования показали приуроченность большинства неблагоприятных участков вдоль железнодорожного полотна к обстановке растяжения, вызванной разнонаправленными новейшими и современными

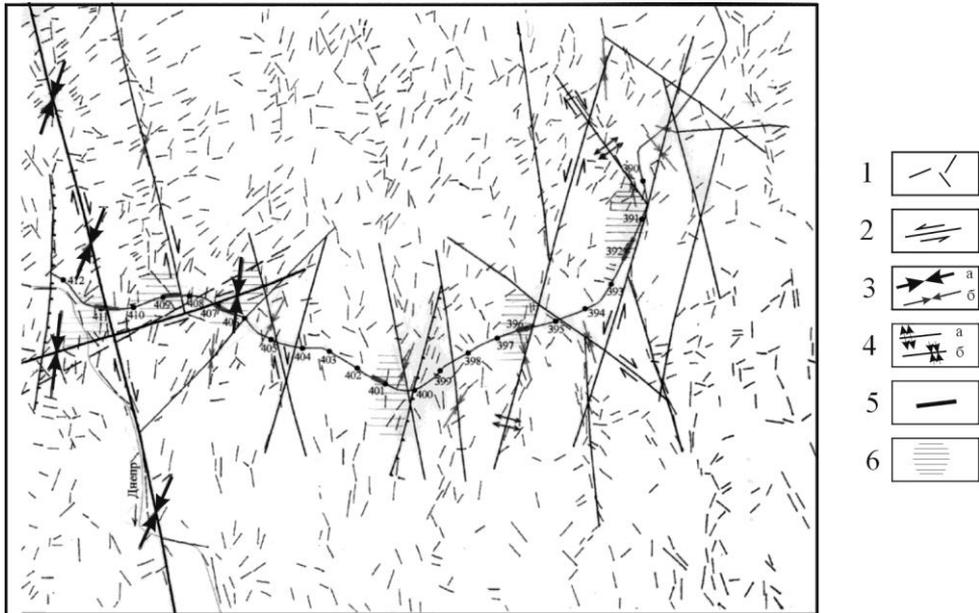


Рис. 9.9. Неотектонические напряжения и разломная тектоника участка Московско-Варшавской железной дороги:

1 – мегатрещины, 2 – новейшие сдвиги, 3 – ориентировки максимального сжатия в горизонтальной плоскости: а – I-го, б – II-го и более мелких рангов (ранги разломов соответствуют рангам напряжений), 4 – геодинамические обстановки формирования разломов: а – растяжения, б – сжатия, 5 – участки с неблагоприятным состоянием путей

смещениями по разломам, причем крупные разломы вызывают и более мощное «возмущение» в устойчивости путей.

Приведенные примеры характеризуют успешное применение полевых тектонофизических исследований в решении теоретических и практических задач. Формирующиеся при пересечении и блокировке разнонаправленных сдвигов участки локального растяжения и сжатия играют важную роль при прогнозе нестабильных участков земной коры и условий разработки месторождений полезных ископаемых.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Базисные термины механики в геодинамике и тектонофизике

В этом разделе будут представлены основные положения и термины механики, которые необходимо знать геологам, геофизикам, сейсмологам, и горнякам, решившимся в своих исследованиях использовать методы полевой тектонофизики.

Конечно, не все эти положения и термины могут быть быстро и качественно восприняты. Начинать надо с освоения некоторого базиса: что такое напряжения, почему мы говорим о тензоре напряжений, когда можно говорить о векторе напряжений, в чем состоит взаимосвязь напряжений в объеме среды и напряжений на разломе, что такое главные напряжения. Считаем также обязательным освоение такого важного положения механики, как диаграмма Мора, которая позволяет зрительно увидеть суть того, что напряжение есть тензор. Далее постепенно по мере вовлечения исследователя в проблему изучения напряженного состояния земных недр необходимо расширять свои знания в области механики.

Параллельно с базисными положениями механики в этом же разделе будут объясняться термины геодинамики, используемые при анализе напряжений: фиксация в пространстве положения плоскости разлома; кинематические типы разломов; геодинамический тип напряженного состояния.

П.1. Напряжения

В курсе механики сплошной среды Л.И. Седова [1983] на стр. 21 можно прочитать «В телах с дискретным молекулярным строением внутренние напряжения являются статистическим средними, обусловленными как непосредственными силами взаимодействия между молекулами, расположенными по разные стороны от рассматриваемого сечения, так и переносом макроскопического теплового движения молекул». Упрощая, можно сказать, что под напряжением принимается величина силы F , деленная на единицу площади S , вдоль которой эта сила приложена, при устремлении линейного размера площадки к нулю:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{при } S \rightarrow 0. \quad (\text{П.1})$$

В этом случае говорят о напряжениях в “точке среды”. При анализе состояния неоднородных, многофазных на микроскопическом уровне сред переходят к более общему понятию напряжений, отбрасывая положение о бесконечной малости площадки осреднения. В этом случае под точкой, для которой рассчитываются параметры напряженного состояния, понимается центр объема осреднения параметров макроскопического масштаба. Таким образом, понятие “напряжения” неразрывно связано с линейным размером площадки, для которой эти напряжения рассчитываются.

В приложении к реально решаемым тектонофизикой задачам масштабы усреднения напряжений составляют от десятков и сотен метров (палеостресс по данным геологических индикаторов), до десятков и сотен километров (современные напряжения по данным о механизмах очагов землетрясений). При этом объем, к которому будут отнесены полученные результаты оценки напряжений, содержит множество трещин и разрывов, данные о которых собственно и позволяют эти напряжения получить.

С другой стороны, в механике, когда дается определение напряжений, считается, что площадка, на которой действуют напряжений не разделена трещинами. Таким образом, данное определение напряжений не очень подходит к решаемой в тектонофизике задаче. В заключительной части этой монографии будет дано другое определение напряжений, учитывающее проблему деформирования исходно трещиноватого массива.

Существуют два основных типа компонент напряжений, различающихся по способу приложения силы к площадке среды: нормальные и касательные. В первом случае сила приложена перпендикулярно площадке, а во втором по касательной к ней (рис. П.1). Нормальные напряжения так называются, потому что они параллельны нормали к плоскости, на которой они действуют. Эти напряжения вызывают удлинение и укорочение в направлении их действия, потому их также иногда (в сопряате) называют продольными напряжениями. Касательные к плоскости, на которой они действуют, направлены по касательной. Эти напряжения создают деформации сдвига – перекашивания в плоскости, содержащей нормаль к площадке и направление действия касательного напряжения.

Повторяющийся нижний индекс для σ_{nn} указывает, что напряжение действует на площадки с нормалью n и направленно параллельно нормали. Вместо τ_n можно использовать обозначение σ_{ns} , которое определяет, что данное напряжение действует на плоскости (площадке) с нормалью n и направлено параллельно вектору (оси) s , лежащему в этой плоскости (рис. П.1).

Тензор напряжений. В механике напряженное состояние в «точке» в произвольной системе координат XYZ полностью описывается тензором напряжений T_σ (stress tensor) второго ранга, компоненты напряжений σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) этого

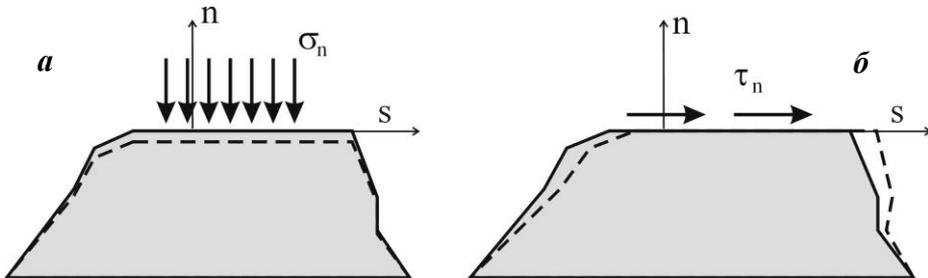


Рис. П.1. Два типа напряжений, действующих на площадке среды с нормалью n : нормальные σ_{nn} (а) и касательные τ_n (б)

тензора действуют на гранях куба, мысленно выделенного в деформированном объеме среды и связанного с некоторой системой координат (рис. П.2).

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}. \quad (\text{П.2})$$

Здесь первый нижний индекс при напряжениях σ_{ij} идентифицирует нормаль к плоскости, на которой действует компонента напряжений, а второй определяет направление, в котором ориентировано данное напряжение. На рис. П.2 компоненты напряжений показаны только для видимых граней куба. Каждая грань куба имеет грань ей параллельную. Из условия равновесия импульса сил в любом из трех ортогональных направлений (сумма напряжений равна нулю) следует, что на параллельных гранях действуют тождественные по величине, но противоположно направленные компоненты напряжений.

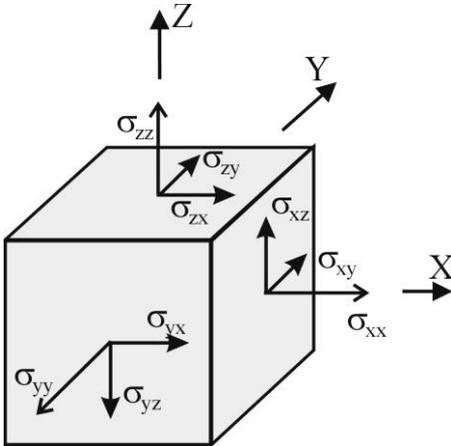


Рис. П.2. Ориентация компонент тензора напряжений σ_{ij} ($i, j = x, y, z$): на трех видимых взаимно ортогональных гранях куба. Компоненты напряжений, действующие на невидимых гранях куба, здесь не показаны

Таким образом, понятие тензор напряжений означает совокупность из шести параметров – компонент, определяющих величину напряжений на трех взаимно ортогональных плоскостях.

В силу того, что пара нормальных напряжений действует на обе параллельные грани куба в противоположном друг другу направлении, в механике существует термин ось – направление действия напряжений. До тех пор пока мы с помощью нормали не определили конкретное положение плоскости, для которой идентифицируется нормальное напряжение, нельзя говорить о векторе напряжений (см. далее).

Нормальные и касательные напряжения. Компоненты напряжений с повторяющимися индексами (σ_{ii}) называют продольными (elongation) напряжениями, вызывающими в среде удлинение (extension) или укорочения (shortening) вдоль направления их действия. Эти напряжения также принято называть нормальными напряжениями, т.е. напряжениями, действующими по нормали к гра-

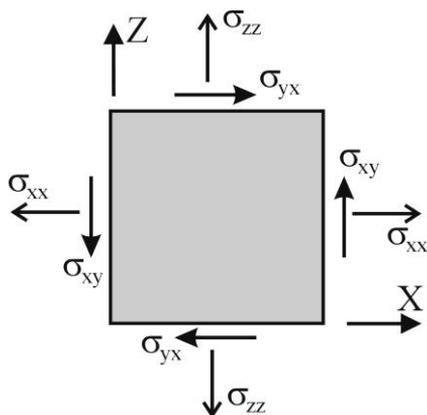


Рис. П.3. Ориентация напряжений, действующих на парах параллельных и ортогональных граней куба и лежащих в плоскости, ортогональной всем этим граням (плоскость с нормалью Y). Направления действия касательных напряжений отвечают положительным их значениям согласно принятому для них правилу знаков

ням куба. Стрелка продольной компоненты напряжений (σ_{ii}) на рис. П.2 характеризует только его ориентацию в пространстве, но не определяет знак напряжений: сжатие (compression) или растяжение (tension). Каждая компонента нормальных напряжений, действующих на одной грани куба, взаимно уравновешена такой же по величине интенсивностью напряжений, действующих на противоположной параллельной грани куба (рис. П.3). Поэтому стрелки, отвечающие нормальным напряжениям на параллельных гранях куба, ориентированы в противоположном направлении.

Компоненты напряжений с неодинаковыми индексами (σ_{ij} при $i \neq j$) имеют касательными напряжениями (shear stresses), т.к. они действуют вдоль плоскости грани куба. Касательное напряжение на одной грани куба уравновешено другим касательным напряжением, действующим на параллельной грани (рис. П.3). Касательные напряжения с индексами, сменившими порядок расположения, действуют на гранях куба, ортогональных друг другу. В классической механике считается, что они равны друг другу $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$. Это требование означает, что момент вращения от двух пар касательных напряжений на ортогональных гранях куба взаимно уравновешивается. Из этого постулата следует отсутствие внутренних независимых моментов вращения (безмоментная теория деформаций) и, таким образом, для описания деформаций среды достаточно знать поле приращений перемещений, вызванных каким-либо внешним или внутренним источником нагружения.

Напряжения в классической механике всегда обозначают символом σ , разделяя нормальные и касательные напряжения повторяющимися и не повторяющимися индексами. Иногда можно встретить обозначение касательных напряжений не σ_{ij} , а τ_{ij} . Также при переходе к девиаторным компонентам тензора напряжений (см. далее) для нормальной и касательной компонент используют обозначение s_{ij} .

Правило знаков для напряжений. Знак нормальных напряжений в классической механике связан с характером продольных деформаций, формирующихся под действием этих напряжений. Если в результате деформирования вдоль данного направления имеет место удлинение, то знак соответствующих продольных деформаций и напряжений принимается

положительным. Если имеет место укорочение, то знак продольных деформаций и напряжений принимается отрицательным. Таким образом, в классической механике [Работнов, 1979] напряжения растяжения определяются как положительные, а напряжения сжатия как отрицательные (рис. П.4).

Отметим, что в горном деле [Гудман, 1987] и в зарубежной тектонофизике [Angelier, 1984] иное правило знаков нормальных напряжений. Здесь положительными считаются напряжения сжатия. Принятое в горном деле правило знаков связано с тем фактом, что горняки имеют дело с породами в глубине земли, где их собственный вес практически повсеместно создает сжимающие напряжения. Поскольку в момент становления этого научного направления (19-ый и начало 20 века) горные инженеры оперировали только параметрами напряжений и практически не использовали закон Гука, отражающий взаимосвязь напряжений и упругих деформаций, то было удобным в качестве положительных принимать сжимающие напряжения. На самом деле принятие укорочения в качестве положительной меры деформации расходится с принятым в физике правилом знаков физических величин (уменьшение чего-то отрицательно, а увеличение – положительно). В настоящее время в горном деле кроме методов экспериментальной оценки напряжений (измерение напряжений в породном массиве – in-situ), также используются математические методы расчета напряжений, базирующиеся на всем комплексе определяющих соотношений механики (закон Гука, соотношение Коши, уравнения равновесия) и опирающиеся на стандартные пакеты прикладных программ, в которых применяется правило знаков классической механики.

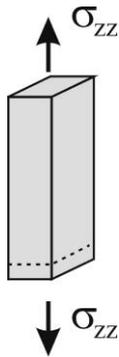


Рис. П.4. Определение знака нормальных напряжений в классической механике на основе характера деформаций продольных деформаций (растяжение положительно). Пунктиром показана первоначальная длина стержня, сплошными линиями форма стержня после растяжения

В отличие от нормальных напряжений знак касательных напряжений зависит от их ориентации в выбранной системе координат. Для площадки, нормаль к которой совпадает с положительным направлением оси координат, положительный знак касательного напряжения принимается при совпадении его ориентации с положительным направлением другой оси координат (см. рис. П.3). Для площадки, нормаль к которой совпадает с отрицательным направлением оси координат, положительный знак касательного напряжения принимается при совпадении его ориентации с отрицательным направлением другой оси координат. Такой выбор знаков связан с правилом уменьшения в процессе деформирования угла между волокнами, направленными вдоль соответствующих осей координат при положительном сдвиге [Новожилов, 1948]. На рис. П.2 все компоненты касательных напряжений показаны как имеющие положительные значения.

Вектор полных касательных напряжений и вектор напряжений, действующих на плоскости. Если указать положение плоскости, то от представлений о напряжениях, действующих в каком-то направлении (вдоль оси), можно перейти к понятию вектора напряжений. Для касательных напряжений, действующих на одной плоскости (компоненты напряжения, имеющие одноименный первый нижний индекс), применимо правило суммирования векторов. На рис. П.5, *a* показана полная компонента касательных напряжений τ_x – вектор касательных напряжений, действующий на одной из граней куба с нормалью X , изображенного на рис. П.2.

Векторная сумма полного касательного напряжения τ_x и нормальной компоненты напряжений σ_{xx} , дает полный вектор напряжений σ_x , действующий на плоскости с нормалью X . Вектор напряжений σ_{xx} ортогонален плоскости только в частном случае ориентировки этой плоскости (плоскость действия главных напряжений – см. далее).

В геологии и тектонофизике часто необходимо знать, в каком направлении действуют касательные напряжения на плоскости разрыва. Этому случаю более подходит рис. П.5, *б*, на котором плоскость анализа напряжений ориентирована наклонно. Здесь в качестве системы координат приняты оси, связанные с плоскостью разлома и часто используемые в геологии и сейсмологии: *strike* и *plunge* – вектора простирания и погружения плоскости соответственно.

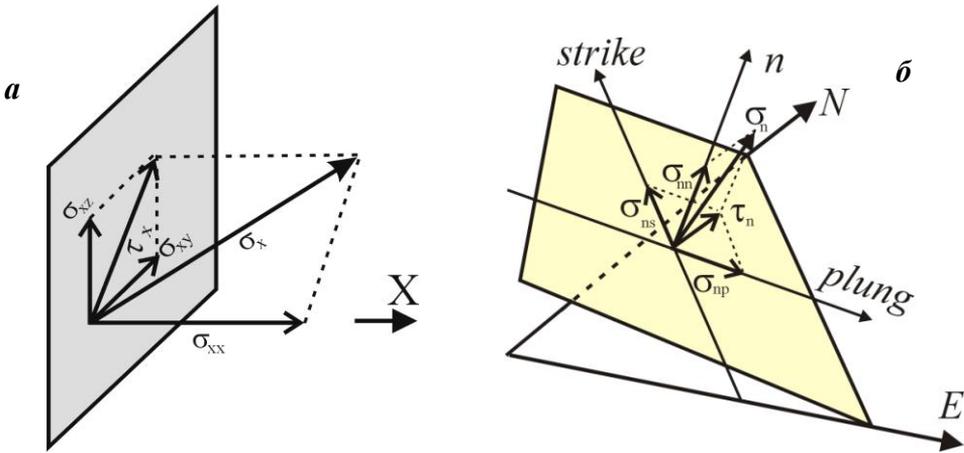


Рис. П.5. Векторы напряжений, действующие на определенной плоскости: *a*) Вертикальная грань куба (рис. П.2), заданная ориентацией нормали x . Вектор касательных напряжений на плоскости τ_x определяется векторной суммой компонент касательных напряжений, действующих в направлении осей y и z . Вектор полных напряжений σ_x – векторная сумма τ_x и σ_{xx} ; *б*) Плоскость разрыва, нормалью к которому является вектор n (пояснения в тексте). Такое же, как и для «*a*», правило нахождения полного касательного напряжения τ_n и полного вектора напряжений σ_n .

Для определения вектора простирания плоскости и вектора погружения используется топоцентрическая система координат (см. далее) с направлениями на север (N) и восток (E)

Таким образом, понятие вектора напряжений может применяться только тогда, когда указывается положение площадки (плоскости), которой и соответствует вектор касательных напряжений, вектор нормальных напряжений и полный вектор напряжений. При описании напряженного состояния удельного объема среды следует говорить о тензоре напряжений, который характеризует совокупность из трех пар векторов полных напряжений на гранях шестигранного прямоугольника.

Соотношения напряжений в разных ортогональных системах координат. На рис. П.2 были показаны компоненты тензора напряжений в произвольной ортогональной системе координат x, y, z . Поскольку приводимые ниже выражения для напряжений будут использоваться в тектонофизике, геологии, сейсмологии и геодинамике, то далее в качестве базовой системы координат примем топоцентрическую (рис. П.6), опирающуюся на ортогональную правую тройку векторов N, E, Z в данной точке на поверхности Земли. Здесь N – вектор на север, E – вектор на восток, Z – вектор к центру Земли (противоположен по направлению вектору на зенит). Пространственное положение этих векторов зависит от точки на сфере Земли и определяется широтой и долготой, задаваемой в географической системе координат.

На рис. П.7, *a* изображены компоненты напряжений, действующие на четырех гранях скошенной треугольной пирамиды. Три грани этой пирамиды в качестве нормалей имеют вектора N, E, Z (следовательно, эти грани ортогональны друг другу). Считаем, что напряжения, действующие на этих гранях, нам известны, т.е. известен тензор напряжений (П.2) в системе координат NEZ . Нам необходимо узнать величины напряжений, действующих на скошенной грани.

Такая проблема часто имеет место в тектонофизике, когда известны параметры тензора напряжений в некотором объеме геосреды и требуется узнать направления касательных напряжений на плоскости разлома, рассекающего данный объем. В данном случае на рис. П.7, *a* изображена плоскость «лежачего» крыла разлома (лежачего блока массива), для которой вектора n, p, s образуют ортогональную тройку, при этом вектор s направлен по простиранию плоскости с нормалью n , а вектор p в направлении ее погружения (восстания), и компоненты касательных напряжений показаны в направлениях простирания и погружения этой грани. «Висячее» крыло разлома, которое находится сверху над «лежачим» на рис. П.7, *a*, не изображено.

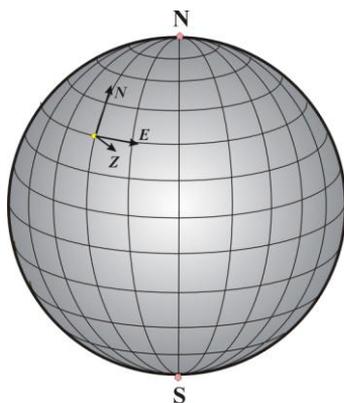


Рис. П.6. Топоцентрическая система координат, используемая для определения параметров напряжений в науках о Земле. Вектор N направлен на северный полюс, вектор E – на восток, вектор Z – к центру Земли

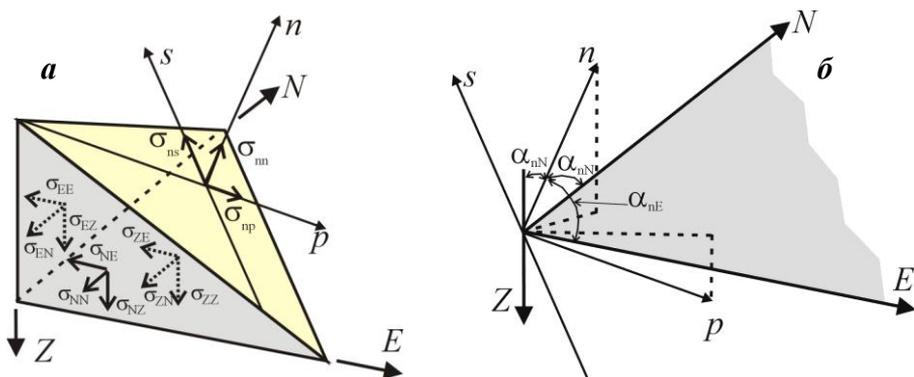


Рис. П.7. Соотношения между разными системами координат: *а*) Напряжения на наклонной площадке с нормалью n скошенной треугольной пирамиды, имеющей три ортогональные грани. Пунктиром показаны компоненты напряжений на невидимых для нас гранях. Компоненты касательных напряжений построены для случая их положительных значений (см. рис. П.3). *б*) Углы направляющих косинусов для векторов системы координат, связанной с наклонной плоскостью (площадкой, разрывом), в топоцентрической системе координат (пример углов дан для вектора n)

Напряжения на скошенной грани пирамиды (рис. П.7, *а*) можно определить через известные компоненты тензора напряжений в системе координат NEZ . Для этого используется закон равенства нулю суммы сил, действующих в каждом из трех ортогональных направлений для векторов N, E, Z :

вдоль оси N

$$\sigma_{NN}\Omega_N + \sigma_{EN}\Omega_E + \sigma_{ZN}\Omega_Z - (\sigma_{nn}\ell_{nN} + \sigma_{ns}\ell_{sN} + \sigma_{np}\ell_{pN})\Omega_n = 0,$$

вдоль оси E

$$\sigma_{EE}\Omega_E + \sigma_{NE}\Omega_N + \sigma_{ZE}\Omega_Z - (\sigma_{nn}\ell_{nE} + \sigma_{ns}\ell_{sE} + \sigma_{np}\ell_{pE})\Omega_n = 0, \quad (\text{П.3})$$

вдоль оси Z

$$\sigma_{ZZ}\Omega_Z + \sigma_{NZ}\Omega_N + \sigma_{EZ}\Omega_E - (\sigma_{nn}\ell_{nZ} + \sigma_{ns}\ell_{sZ} + \sigma_{np}\ell_{pZ})\Omega_n = 0.$$

Здесь Ω_i – площадь треугольника с нормалью $i = N, E, Z, n$ соответственно, а

$$\ell_{ni} = \cos \alpha_{ni} \text{ при } i = N, E, Z \quad (\text{П.4})$$

направляющий косинусы оси n по отношению к осям N, E, Z , где α_{ni} – угол между соответствующими осями и осью n (рис. П.7. *б*).

Поскольку площади Ω_i для трех ортогональных граней пирамиды ($i = N, E, Z$) можно выразить через площадь скошенной грани Ω_n и три на-

правляющих косинуса (П.4), то соотношения (П.3) окончательно выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{nn} &= \sigma_{NN} \ell_{nN}^2 + \sigma_{EE} \ell_{nE}^2 + \sigma_{ZZ} \ell_{nZ}^2 + 2\sigma_{EN} \ell_{nN} \ell_{nE} + 2\sigma_{ZN} \ell_{nN} \ell_{nZ} + 2\sigma_{ZE} \ell_{nZ} \ell_{nE}, \\
 \sigma_{ns} &= \sigma_{NN} \ell_{nN} \ell_{sN} + \sigma_{EE} \ell_{nE} \ell_{sE} + \sigma_{ZZ} \ell_{nZ} \ell_{sZ} + \\
 &+ \sigma_{EN} (\ell_{nN} \ell_{sE} + \ell_{nE} \ell_{sN}) + \sigma_{ZN} (\ell_{nZ} \ell_{sN} + \ell_{nN} \ell_{sZ}) + \sigma_{ZE} (\ell_{nZ} \ell_{sE} + \ell_{nE} \ell_{sZ}), \quad (\text{П.5}) \\
 \sigma_{np} &= \sigma_{NN} \ell_{nN} \ell_{pN} + \sigma_{EE} \ell_{nE} \ell_{pE} + \sigma_{ZZ} \ell_{nZ} \ell_{pZ} + \\
 &+ \sigma_{EN} (\ell_{nN} \ell_{pE} + \ell_{nE} \ell_{pN}) + \sigma_{ZN} (\ell_{nZ} \ell_{pN} + \ell_{nN} \ell_{pZ}) + \sigma_{ZE} (\ell_{nZ} \ell_{pE} + \ell_{nE} \ell_{pZ}).
 \end{aligned}$$

Выражения (П.5) определяют напряжения на наклонной площадке с нормалью \mathbf{n} по данным о компонентах напряжений в системе ортогональных координат NEZ . Выражения имеют сложный вид, т.к. значения напряжений на произвольной площадке должны быть связаны со всеми компонентами тензора напряжений какой-либо ортогональной системы координат.

Главные оси тензора напряжений. В силу произвола выбора наклонной площадки (рис. П.7, а), можно подобрать такие углы α_{ni} , связывающие нормаль площадки с осями x, y, z , чтобы значения касательных напряжений в выражениях (П.5) были равны нулю. На такой площадке будет действовать только нормальное напряжение, которое называют главным.

Соотношения (П.5) определяют возможность наличия только трех подобных площадок, которые будут ортогональны друг другу. Таким образом, существуют три главных напряжения (рис. П.8). Площадки, на которых отсутствуют касательные напряжения, называют площадками действия главных напряжений.

Для главных напряжений существует правило присвоения номера нижнего индекса:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \quad (\text{П.6})$$

т.е. σ_1 это алгебраически наибольшее из главных напряжений, а σ_3 – алгебраически наименьшее из главных. Главное напряжение σ_2 именуют промежуточным главным напряжением.

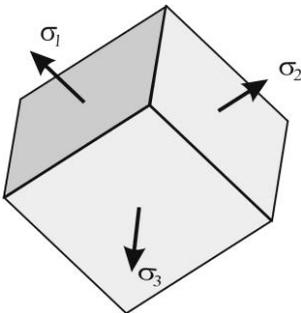


Рис. П.8. Ориентация куба с площадками действия трех главных напряжений σ_i ($i = 1, 2, 3$)

Можно показать, что σ_1 является алгебраически наибольшим напряжением из всех нормальных напряжений, рассчитанных по формуле (П.5) по любому из направлений в данной точке пространства. Соответственно, σ_3 является алгебраически наименьшим напряжением из всех нормальных напряжений, рассчитанных по (П.5) для любого из направлений в данной точке пространства.

Для принятого знака нормальных напряжений (растягивающие напряжения положительны) σ_1 может быть либо наибольшим растягивающим или наименьшим сжимающим напряжением. Соответственно, σ_3 может быть либо наибольшим сжимающим или наименьшим растягивающим напряжением.

В системе координат, связанной с осями трех главных напряжений, тензор напряжений имеет вид:

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}. \quad (\text{П.7})$$

Следует помнить, что для перехода от тензора напряжений в форме (П.7) к тензору напряжений, записанному в произвольной ортогональной системе координат (П.2), кроме самих значений главных напряжений необходимо также знать ориентацию осей главных напряжений.

Главные оси тензора напряжений в топоцентрической системе координат. Ориентация произвольного вектора \mathbf{n} может быть задана двумя углами, один из которых α определяет азимут его простираения – угол от проекции вектора на горизонтальную плоскость до направления на север, отсчитываемый против часовой стрелки, а другой (β) – угол между вектором \mathbf{n} и его проекцией на горизонтальную плоскость. Для вектора \mathbf{n} , ориентированного в направлении погружения, так как это показано на рис. П.9, а, в правой координатной системе NEZ (север, восток, к центру Земли) имеем следующие соотношения для направляющих косинусов:

$$\ell_{Nn} = \cos \alpha \cos \beta, \quad \ell_{En} = \sin \alpha \cos \beta, \quad \ell_{zn} = \sin \beta. \quad (\text{П.8})$$

Каждая из осей главных напряжений, так же как и вектор \mathbf{n} на рис. П.9, а, может быть задана своим азимутом его простираения и углом погружения (восстания). Таким образом, ориентация трех главных осей напряжений σ_i ($i = 1, 2, 3$) может быть определена тремя группами углов α_i и β_i :

$$\ell_{Ni} = \cos \alpha_i \cos \beta_i, \quad \ell_{Ei} = \sin \alpha_i \cos \beta_i, \quad \ell_{zi} = \sin \beta_i \quad (\text{П.9})$$

при $i = 1, 2, 3$.

Между направляющими косинусами осей главных напряжений существуют три соотношения, являющиеся следствием ортогональности этих осей:

$$l_{Ni}l_{Nj} + l_{Ei}l_{Ej} + l_{Zi}l_{Zj} = 0 \text{ при } (i \neq j = 1, 2, 3). \quad (\text{П.10})$$

Надо также помнить, что существует правило нормировки единичных векторов, которые определяют направляющие косинусы:

$$(l_{Ni})^2 + (l_{Ei})^2 + (l_{Zi})^2 = 1 \text{ при } (i = 1, 2, 3). \quad (\text{П.11})$$

Это показывает, что шесть углов α_i и β_i ($i = 1, 2, 3$) переизбыточно определяют ориентацию осей главных напряжений. На самом деле достаточно трех углов (углы Эйлера см. рис. П.9, б) для того, чтобы задать ориентацию трех ортогональных друг к другу осей [Ребецкий, 2007]. Таким образом, три значения главных напряжений и *три угла Эйлера*, определяющие ориентацию трех главных осей, эквивалентно заданию шести компонент тензора напряжений в какой-либо системе координат.

При определении ориентации осей главных напряжений из натурных измерений существует возможность недостаточно точного нахождения значений углов α_i и β_i каждой из осей главных напряжений. В этом случае выражения (П.10) и (П.11) будут выполняться не точно и, возможно, с большими ошибками. Также ошибки выполнения (П.10) и (П.11) возникают из-за того, что углы α_i и β_i указываются с точностью до целых значений. В силу этого при математических (в компьютерной программе) расчетах необходимо «подправлять» данные, так, чтобы оси главных напряжений становились ортогональными.

Подобное округление значений углов также применяется и при задании осей главных напряжений с помощью эйлеровых углов α, β, φ , но в этом случае выражения (П.10) и (П.11) выполняются автоматически.

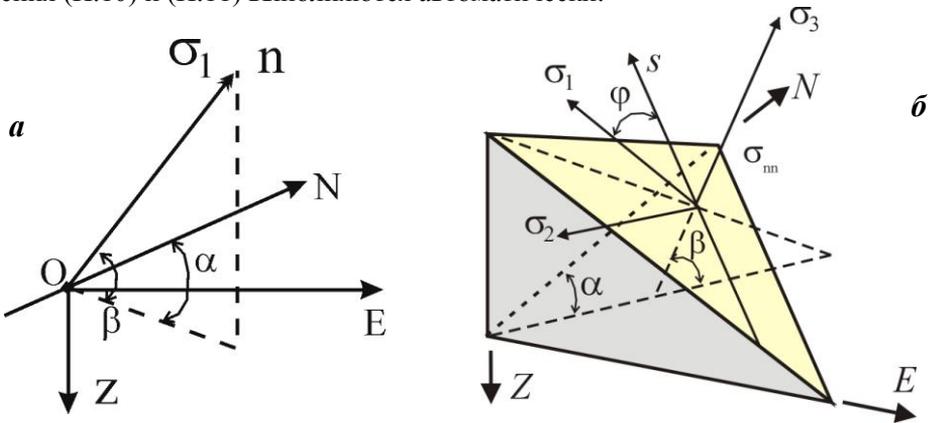


Рис. П.9. Схема, определяющая ориентацию осей главных напряжений в системе координат NEZ : а) азимут простирания α_i и погружения β_i определяется для каждой оси главного напряжения σ_i , $i = 1, 2, 3$ (так же как определяется для вектора n); б) три угла Эйлера α, β, φ

Заметим, что округление углов также применяется и при задании полюса плоскости трещины (разрыва) ее простираения и угла погружения (восстания). В случае, когда они задаются парами углов α_i и β_i , или еще каким-либо способом с избыточным значением углов (более трех), также возможно невыполнение условий (П.10).

Расчет напряжений в различных системах координат на основе данных о главных напряжениях. Если известна ориентация главных осей напряжений в топоцентрической системе координат, то можно получить выражения для компонент тензора напряжений в системе координат *NEZ* (рис. П.7, а):

$$\begin{aligned} \sigma_{NN} &= \sigma_1 \ell_{N1}^2 + \sigma_2 \ell_{N2}^2 + \sigma_3 \ell_{N3}^2, \\ \sigma_{NE} &= \sigma_1 \ell_{N1} \ell_{E1} + \sigma_2 \ell_{N2} \ell_{E2} + \sigma_3 \ell_{N3} \ell_{E3}, \\ \sigma_{ZZ} &= \sigma_1 \ell_{Z1}^2 + \sigma_2 \ell_{Z2}^2 + \sigma_3 \ell_{Z3}^2, \\ \sigma_{NZ} &= \sigma_1 \ell_{N1} \ell_{Z1} + \sigma_2 \ell_{N2} \ell_{Z2} + \sigma_3 \ell_{N3} \ell_{Z3}, \\ \sigma_{EE} &= \sigma_1 \ell_{E1}^2 + \sigma_2 \ell_{E2}^2 + \sigma_3 \ell_{E3}^2, \\ \sigma_{EZ} &= \sigma_1 \ell_{E1} \ell_{Z1} + \sigma_2 \ell_{E2} \ell_{Z2} + \sigma_3 \ell_{E3} \ell_{Z3}. \end{aligned} \tag{П.12}$$

Используя (П.12) и (П.5), можно получить выражения для напряжений на любой наклонной площадке. Если известны направляющие косинусы векторов нормали \mathbf{n} к площадке, а также ее простираения \mathbf{s} и погружения \mathbf{p} с осями главных напряжений (рис. П.10), то выражения для компонент напряжений, действующих на этой площадке, станут существенно проще, чем соотношения (П.5):

$$\begin{aligned} \sigma_{nn} &= \sigma_1 \ell_{n1}^2 + \sigma_2 \ell_{n2}^2 + \sigma_3 \ell_{n3}^2, \\ \sigma_{ns} &= \sigma_1 \ell_{n1} \ell_{s1} + \sigma_2 \ell_{n2} \ell_{s2} + \sigma_3 \ell_{n3} \ell_{s3}, \\ \sigma_{np} &= \sigma_1 \ell_{n1} \ell_{p1} + \sigma_2 \ell_{n2} \ell_{p2} + \sigma_3 \ell_{n3} \ell_{p3}. \end{aligned} \tag{П.13}$$

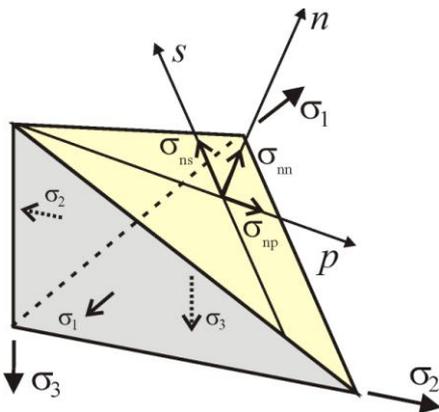


Рис. П.10. Напряжения на наклонной площадке (плоскости разлома) с нормалью \mathbf{n} для скошенной треугольной пирамиды, имеющей три ортогональные грани, нормальными к которым являются оси главных напряжений.

Пунктиром показаны компоненты напряжений на невидимых для нас гранях. Выбор ориентации осей главных напряжений связан с желанием получить возможность расчета углов Эйлера для ортогональной системы координат *nps* подобно тому, как это делалось в топоцентрической системе координат (рис. П.7, а)

Выражения (П.13) существенно проще выражений (П.5), но на самом деле переход от направляющих косинусов главных напряжений в топоцентрической системе координат к их направляющим косинусам в системе координат nsp будет содержать выражения такой же сложности, что и (П.5).

Постулат Вэлласа и Ботта и смещения вдоль разлома. Ориентация касательных напряжений на плоскости, совпадающей с разломом, позволяет высказать предположение о характере смещения вдоль него. Эта возможность основана на гипотезе, высказанной в работах [Wallace, 1951; Bott, 1959]: направления касательных напряжений (рис. П.10), действующих на плоскости разрыва, совпадают с направлением смещения по нему.

Если нам известно напряженное состояние, действующее в геологическом объеме и в пределах этого объема имеется разрыв с нормалью n , то, рассчитав компоненты касательных напряжений σ_{ns} , σ_{np} и просуммировав их по правилу векторов, можно найти направление полного касательного напряжения τ_n на данной плоскости разрыва (рис. П.5, *a*). Далее, используя постулат Вэлласа и Ботта, можно считать, что направление действия касательного напряжения и есть направление смещения всякого крыла разрыва по лежачему. Соотношение между величинами касательных напряжений на плоскости разлома $|\sigma_{ns}|$ и $|\sigma_{np}|$ определяет нам и соотношение между взбросо-сбросовой и сдвиговой компонентами смещения по разрыву.

Заметим, что гипотеза Вэлласа и Ботта предполагает изотропные прочностные свойства на разломе, т.е. при сдвиге одного крыла разлома по другому прочность сцепления и силы трения не зависят от направления сдвига. Это не всегда выполняется. Примером здесь могут являться два положенных друг на друга волнистых листа кровельного шифера. Наименьшие усилия по сдвиганию таких листов будут иметь место в случае приложения усилия, параллельного простиранию волн. Его величина будет определяться только силами трения между листами.

При приложении сдвигающих усилий в других направлениях смещения листов будут все равно идти вдоль простирания волн, но при этом прилагаемые усилия окажутся большими по величине. Так, будет продолжаться до тех пор, пока мы не преодолеем собственную прочность листа на разрушение.

Похожие структурные особенности могут существовать и на плоскости разлома, создавая анизотропию прочности. Это приведет к отклонению направления смещения бортов разрыва от направления действия касательных напряжений. Если бы гипотеза Вэлласа и Ботта выполнялась строго, то было бы достаточно иметь четыре разноориентированные трещины с данными о зеркалах скольжения для определения ориентации главных напряжений.

Геодинамический тип напряженного состояния. Данные об ориентации главных осей напряжений играют важную роль в геодинамике. По ним можно выполнить классификацию геодинамического режима деформирования. Различают три основных геодинамических типа напряженного состояния: горизонтального сжатия, растяжения и сдвига.

Считается, что если ось алгебраически максимального главного напряжения ориентирована субвертикально, то действующее в субгоризонтальном направле-

нии напряжение максимального сжатия σ_3 создаст вдоль своей оси максимальные деформации продольного укорочения. Такой режим принято называть горизонтальным сжатием (horizontal compression).

В случае, когда в субвертикальном направлении ориентирована ось максимального сжатия σ_3 , то вдоль действующего в субгоризонтальном направлении напряжения минимального сжатия (максимального растяжения) σ_1 возникнут наибольшие деформации удлинения. Такой режим принято называть горизонтальное сжатие (horizontal extension). Важно отметить, что при этом само главное напряжение σ_1 будет сжимающим. Появление истинно растягивающего главного напряжения возможно только в особых поверхностных условиях деформирования (оползни) и на небольших глубинах (до первых сотен метров).

Третий основной тип геодинамического режима определяет субвертикальную ориентацию оси промежуточного главного напряжения σ_2 . В этом случае два других главных напряжения σ_1 и σ_3 будут действовать в субгоризонтальном направлении. Такая их ориентация способствует формированию в горизонтальной плоскости максимальной деформации сдвига. Такой режим принято называть горизонтальным сдвигом (horizontal shear).

На рис. П.11, а показаны сектора, на которые делится октант, построенный на осях главных напряжений, в случае, когда используется деление всех возможных ориентаций осей главных напряжений только на три главных геодинамических типа. Считается, что каждому из этих типов напряженного состояния отвечает свой преимущественный тип разрывообразования. В зонах горизонтального сжатия в основном должны формироваться разрывы типа взбросов и надвигов (*inversion faults*), в зонах горизонтального растяжения – разрывы типа сбросов (*normal faults*), а в зонах горизонтального сжатия – сдвиги вдоль простирания (*strike shear*).

Практика использования такого подхода к районированию коры показывает, что наряду с этими типами разрывов в каждой из подобных зон будут встречать разрывы, сочетающие в себе разный тип смещения. Так в зонах горизонтального растяжения будут встречаться сдвиго-сбросы, в зонах горизонтального сжатия – сдвиго-взбросы, а в зонах горизонтального сдвига взбросо-сдвиги и сбросо-сдвиги. Более того, существуют определенные углы погружения разломов (см. далее), для которых в обстановке горизонтально сжатия может реализоваться сброс, а в обстановке горизонтального растяжения – сброс.

Для учета возможности сочетания разных типов преимущественного движения на разломе удобнее использовать деление напряженного состояния на шесть геодинамических типов, предусматривающее три дополнительных промежуточных состояния (рис. П.11, б).

Два из этих дополнительных состояний отвечают сочетанию горизонтального сдвига с горизонтальным сжатием или с горизонтальным растяжением. Их соответственно и называют «горизонтальное сжатие со сдвигом» или «горизонтальное растяжение со сдвигом». Иногда, чтобы выделить преимущество компоненты сдвига, говорят: «горизонтальный сдвиг со сжатием», или «сдвиг с растяжением».

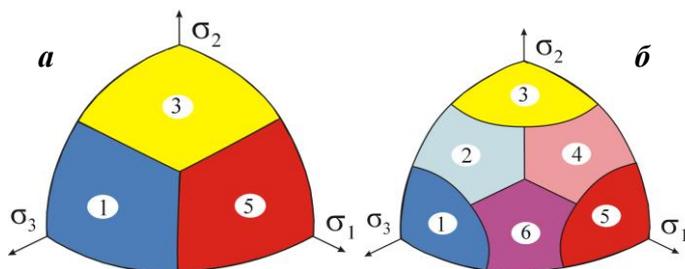


Рис. П.11. Схемы геодинамического районирования при делении на три (а) и шесть (б) типов напряженного состояния.

Тип напряженного состояния определяется в зависимости от попадания оси на зенит в одну из областей на поверхности октанта, построенного на осях главных напряжений. 1 – горизонтальное растяжение, 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом, 3 – горизонтальный сдвиг, 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом, 5 – горизонтальное сжатие, вертикальный сдвиг

Третье дополнительное состояние на рис. П.1, б расположено между горизонтальным растяжением и горизонтальным сжатием. Этому состоянию отвечает субгоризонтальная ориентация оси промежуточного главного напряжения σ_2 при наклонном к горизонту положении осей σ_1 и σ_3 (близком 45°). Такая ориентация главных осей главных напряжений создает максимальную деформацию сдвига в вертикальной плоскости, содержащей оси σ_1 и σ_3 (см. врезку рис. П.11, б). Этому состоянию соответствует термин – вертикальный сдвиг.

Для каждого из этих геодинамических типов напряженного состояния существуют разрывы типичного кинематического типа. К таким разрывам относят те из них, которые образуются вблизи плоскости скалывания (см. далее), т.е. их плоскость лежит в диапазоне углов $25-45^\circ$ от оси максимально сжатия σ_3 . Такие разрывы в случае горизонтального сжатия будут взбросами, в случае горизонтального растяжения будут сбросами, а в случае горизонтального сдвига будут сдвигами по простиранию. Соответственно для остановки горизонтального сжатия со сдвигом преимущественно возникают разрывы типа взброса-сдвига и сдвига-взброса, для обстановки горизонтального растяжения со сдвигом – разрывы типа сбросо-сдвигов и сдвига-сбросов, а для обстановки вертикального сдвига – взрезы и пологие надвиги.

Заметим, что и в случае деления на шесть типов напряженного состояния также возможны определенные углы погружения плоскостей разрывов, для которых может наблюдаться совершенно не свойственный кинематический тип смещения. Но диапазон таких углов значительно уже, чем в случае деления на три типа напряженного состояния (рис. П.11, а)

В работах западных ученых часто используется разделение напряженных состояний на основе сопоставления напряжений максимального горизонтального сжатия S_H и напряжение минимального горизонтального сжатия S_h , с литостатическим давлением или вертикальными напряжениями S_v [M.-L. Zoback et al., 1989]. Подобный подход используется и в работах некоторых российских ученых [Парфеев, Саньков, 2006]. При этом в зависимости от соотношения уровня

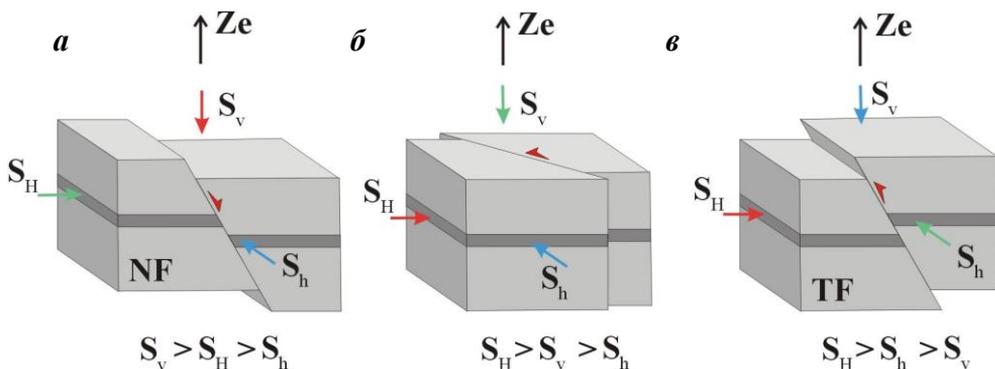


Рис. П.12. Схемы геодинамического районирования по М.-Л. Zoback [Zoback et al., 1989]: а) режим формирования сбросов, б) режим формирования сдвигов, в) режим формирования взбросов и надвигов. Положительными значениями S_H , S_h , S_v принимаются напряжения сжатия

сжатия для этих напряжений тип напряженного состояния именуется взбросовым, сбросовым, сдвиговым (рис. П.12) или сочетанием этих терминов.

Для нахождения ориентации осей напряжений максимального и минимального сжатия необходимо положить горизонтальную компоненту касательного напряжения (см. рис. П.13), действующего на вертикальных гранях кубика σ_{Hh} равной нулю. Используя (П.12) можно записать:

$$\sigma_{Hh} = \sigma_1 \ell_{H1} \ell_{h1} + \sigma_2 \ell_{H2} \ell_{h2} + \sigma_3 \ell_{H3} \ell_{h3} = 0. \quad (\text{П.14})$$

Выражение (П.14) позволяет найти направление действия (т.е. направляющие косинусы ℓ_{Hi} и ℓ_{hi} , $i = 1, 2, 3$) наибольшего и наименьшего горизонтального сжимающего напряжения, если известны величины главных напряжений и направления их осей.

Используя (П.12), запишем выражения для наибольшего и наименьшего сжимающих горизонтальных напряжений:

$$\begin{aligned} S_H &= -\sigma_{HH} = (\sigma_1 \ell_{H1}^2 + \sigma_2 \ell_{H2}^2 + \sigma_3 \ell_{H3}^2), \\ S_h &= -\sigma_{hh} = (\sigma_1 \ell_{h1}^2 + \sigma_2 \ell_{h2}^2 + \sigma_3 \ell_{h3}^2), \\ S_v &= -\sigma_{zz} = (\sigma_1 \ell_{z1_v}^2 + \sigma_2 \ell_{z2}^2 + \sigma_3 \ell_{z3}^2). \end{aligned} \quad (\text{П.15})$$

Здесь произведена смена знака, т.к. положительными значениями S_H , S_h , S_v в работах западных ученых принимаются напряжения сжатия.

Следует отметить, что равенство нулю одной из компонент касательных напряжений на вертикальных плоскостях не означает, что по нормальям к этим плоскостям действуют главные напряжения. Как видно из рис. П.13, другая компонента касательного напряжения на этих плоскостях (σ_{hv} и σ_{Hv}) может быть

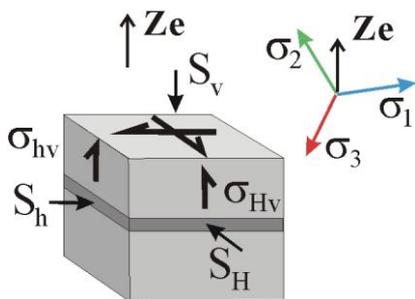


Рис. П.13. Схема, иллюстрирующая напряженное состояние для вертикальных граней, для которых рассчитываются напряжения максимального и минимального горизонтального сжатия. Пояснения в тексте

не нулевой и это означает, что для вертикальной плоскости разлома может наблюдаться взрез, а для пологой плоскости – подвиг (пододвигание по пологой наклоненной плоскости). Об этом работах М.Л. Зобак ничего не говорится.

Замечание по используемой терминологии. В силу отмеченной взаимосвязи ориентации главных напряжений с кинематическим типом наиболее часто встречающихся разрывов иногда (как правило, геологи) при районировании заменяют термин горизонтальное сжатие на взбросовый тип напряженного состояния [Парфеевец, Саньков, 2006; Копп и др., 2014; и др.], имея в виду, что для данного участка коры характерны разрывы со взбросовой кинематикой. Соответственно, для «горизонтального растяжения» и «горизонтального сдвига» используют термины «сбросовый» и «сдвиговый» типы напряженных состояний.

В зарубежной литературе часть терминов, представленных в предыдущем разделе, имеют близкие в переводе аналоги: горизонтальное растяжение – extension, горизонтальное сжатие – compression. Однако можно найти normal (сброс) и inversion (взброс) режимы. Сочетание сжатия / растяжения со сдвигом (*strike-slip with compression / extension*) иногда определяют как transtension / transpression (транстензию / транспрессию). Для термина «горизонтальный сдвиг» используется strike-slip, а термин вертикальный сдвиг вообще отсутствует.

В этих терминах геодинамический тип напряженного состояния связывается с индикаторами, на основе которых это напряженное состояние определено. Но ведь методики определения параметров природного напряженного состояния могут базироваться на разных принципах (например, методы разгрузки или тензометрия в горном деле). Тогда, если следовать такому подходу и использовать мелкие структурные формы, появятся термины: напряженное состояние отрывообразования, будинирования слоя, складчатости и др. Таким образом, подобную замену терминов следует признать неудачной.

Обратим внимание на то, что геологическая среда имеет множество дефектов прочности в виде разрывов, возникших в прошлые эпохи деформирования. Плоскости этих разрывов могут сколь угодно далеко отклоняться от углов скалывания горных пород (см. далее). Это приводит к тому, что при горизонтальном растяжении возможно появление разрывов сдвиговой и даже взбросовой (взрезовой) кинематики (рис. П.14, а, з). Соответственно, при горизонтальном сжатии возможно появление разрывов сдвиговой и даже сбросовой (взрезовой) кинематики (рис. П.14, б, в). Все зависит от угла наклона главных осей и плоскости разрыва.

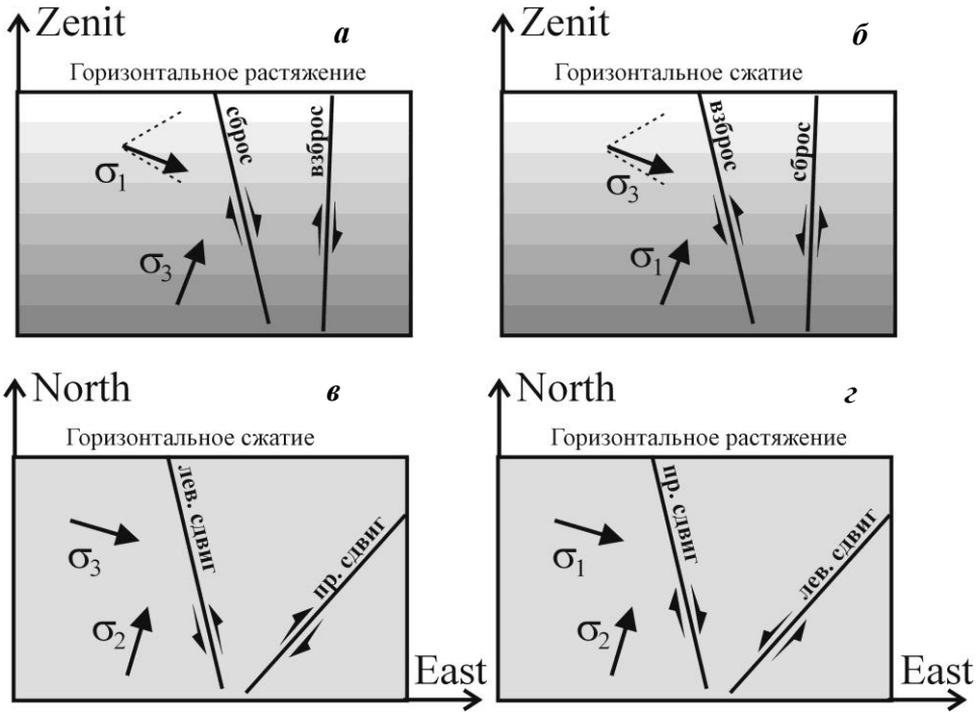


Рис. П.14. Иллюстрация возможного появления разрывов типа: а) взброса для режима горизонтального растяжения (верт. разрез), б) сброса для режима горизонтального сжатия (верт. разрез), в) сдвига по простиранию для режима горизонтального сжатия (план), г) сдвига по простиранию для режима горизонтального растяжения (план).

Для (а) и (б) соответствующие субвертикальные оси главного напряжения σ_3 и σ_1 лежат в плоскости разрывов

Достаточно часто при употреблении этих терминов слова «горизонтальное», «горизонтальный» опускают и говорят: сжатие, растяжение сдвиг. Это неправильно, т.к. существуют характеристики тензора напряжений (см. далее вид тензора напряжений) с близкой терминологией, что приводит к недопониманию.

Также практически всегда при употреблении терминов сжатие, растяжение и сдвиг говорится, что это характеризует тип напряженного состояния. Однако классификация типа напряженного состояния по взаимосвязи осей главных напряжений и оси на зенит в механике не производится. В механике в качестве характеристики напряженного состояния используется параметр вида тензора напряжений (коэффициент Лодэ – Надаи – см. далее). Поэтому данный термин по районированию должен включать в себя слова, связывающие его геодинамикой.

Всестороннее давление и девиаторные напряжения. В горном деле большое внимание уделяется всестороннему (изотропному) давлению p (isotropic pressure), которое равно среднему напряжению (mean stress) σ_0 , взятому со знаком минус:

$$p = -\sigma_0 = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3. \quad (\text{П.16})$$

Следует иметь в виду, что в горном деле иногда используется понятие направленного давления, т.е. давления вдоль определенного направления, которое эквивалентно (с точностью до знака) понятию нормальное или продольное напряжение.

В механике существует понятие *девиаторное напряжение (deviation stress)*. Его можно получить, если из компонент тензора для нормальных напряжений вычесть среднее напряжение:

$$s_{ii} = \sigma_{ii} - \sigma_0 \quad (i = x, y, z), \quad s_{ij} = \sigma_{ij} \quad (i \neq j). \quad (\text{П.17})$$

Таким образом, девиаторные напряжения определяют отклонения нормальных напряжений от значений среднего напряжения (давления с обратным знаком). Девиаторные напряжения также представляют собой тензор:

$$\mathbf{T}_s = \begin{vmatrix} s_{xx} & s_{xy} & s_{xz} \\ s_{yx} & s_{yy} & s_{yz} \\ s_{zx} & s_{zy} & s_{zz} \end{vmatrix}. \quad (\text{П.18})$$

Если среднее напряжение или давление определяют изменение объема среды, то девиаторные напряжения создают деформации, изменяющие форму (квадрат становится ромбом или параллелограммом, куб – призмой).

Главные девиаторные напряжения могут быть рассчитаны по формуле:

$$s_i = \sigma_i - \sigma_0 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (\text{П.19})$$

Как следует из (П.19) главные оси девиатора и тензора напряжений совпадают.

На больших глубинах собственный вес породного массива создает сжатие, действующее во всех направлениях. Но это сжатие разное в разном направлении. Если из таких напряжений вычесть среднее (изотропное) напряжение, то в каких-то направлениях девиаторные напряжения также будут сжимающими, а в каких-то они станут растягивающими. В том случае, когда наибольшее из растягивающих девиаторных напряжений действует в горизонтальном направлении можно говорить, что имеет место режим горизонтального растяжения.

Поскольку в тектонофизических исследованиях часто идет интерпретация закономерности пространственного распределения осей главных напряжений, то часто вместо «максимальное сжимающее напряжение» (σ_3) пишут/говорят сжатие, а вместо «минимальное сжимающее напряжение» (σ_1) пишут/говорят растяжение. Для правильности понимания необходимо в начале статьи или доклада расшифровать, что именно имеет в виду автор, т.к. у механиков, не работающих в этой области, такая подмена вызывает раздражение.

Поскольку девиаторные напряжения характеризуют отклонение напряженного состояния от изотропного, когда во всех направлениях нормальные напряжения одинаковые, то иногда в геофизических статьях можно встретить термин

анизотропия напряжений. Авторы таких статей имеют в виду именно то, что в среде имеются девиаторные напряжения.

Параметры тензора напряжений, инвариантные к выбору системы координат. Как видно из выражения (П.5), в зависимости от выбора системы координат компоненты тензора напряжений изменяются. Однако существуют параметры тензора напряжений, которые характеризуют интенсивность напряжений, соотношение между различными компонентами напряжений, но при этом они не зависят от выбора системы координат. Эти параметры очень важны для понимания состояния геосреды и в геодинамике и тектонофизике достаточно часто используются. Один из таких параметров выше уже был представлен. Это среднее напряжение σ_0 (П.16).

Другим параметром, инвариантным к выбору системы координат, является максимальное касательное напряжение. Выше мы показали, что существуют площадки, вдоль которых касательные напряжения отсутствуют. Здесь действуют алгебраически наибольшие и наименьшие из нормальных напряжений (главные напряжения). Также можно найти площадки, на которых действуют экстремальные касательные напряжения. Наибольшие значения таких касательных напряжений действуют на паре ортогональных между собой площадок, которые проходят через ось промежуточного главного напряжения и делят угол между двумя другими главными напряжениями пополам (рис. П.15). Их называют максимальными касательными напряжениями (maximum shear stresses).

Величина максимальных касательных напряжений определяется значениями алгебраически максимального и минимального из главных напряжений:

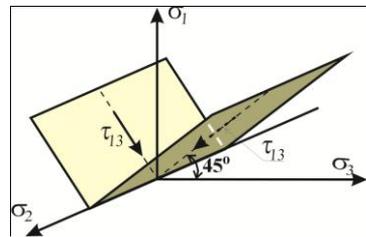
$$\tau = \pm(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \pm(s_1 - s_3)/2. \quad (\text{П.20})$$

Здесь знак данного касательного напряжения определяется выбором системы координат на плоскости его действия. В силу произвольности выбора системы координат вместо (П.19) удобнее использовать выражение

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \quad (\text{П.21})$$

Заметим, что ранее, в экспериментальной геомеханике, использовался параметр, именуемый дифференциальное напряжение. Его величина определялась как удвоенное максимальное касательное напряжение $\Delta = 2\tau$.

Рис. П.15. Сопряженные площадки действия максимальных касательных напряжений по отношению к системе координат, связанной с главными осями напряжений (необходимо выбрать одно из направлений действия оси главного напряжения за положительное, например, по восстанию или по погружению оси). Направления касательных напряжений отвечают плоскостям площадок, имеющим в своем створе положительное направление оси σ_1



Если среднее напряжение (изотропное давление с обратным знаком) определяет интенсивность деформаций изменения объема, то максимальное касательное напряжение определяет интенсивность деформаций сдвига или интенсивность деформаций изменения формы. Каким образом меняется форма первоначального куба (до деформирования), мысленно выделенного из среды, можно определить с помощью коэффициента Лоде – Надаи, характеризующего вид тензора напряжений (*shape of stress tensor*) – соотношение главных значений тензора напряжений:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (\text{П.22})$$

Вид тензора напряжений эквивалентен понятию эллипсоида напряжений, который показывает, как при нагружении меняется форма первоначального шара. В случае, когда девиаторные напряжения (нормальные и касательные) равны нулю, форма шара не изменяется. Если девиаторные напряжения отличны от нуля, то форма деформируемого шара может меняться от вытянутого эллипсоида, подобного регбийному мячу, до сплюснутого эллипсоида в виде диска (рис. П.16).

Согласно (П.22) коэффициент Лоде – Надаи может изменяться в ограниченном диапазоне от -1 для +1. При этом значение $\mu_\sigma = -1$ отвечает одноосному растяжению (рис. П.16, б), а $\mu_\sigma = 1$ отвечает одноосному сжатию (рис. П.16, а). Следует особо отметить, что термин одноосное растяжение (uniaxial extension) или одноосное сжатие (uniaxial compression) не означает, что напряжения будут нулевыми вдоль двух других осей главных напряжений. Эти напряжения могут отличаться от нуля и быть либо сжимающими, либо растягивающими. В западной литературе такие состояния иногда определяет как осесимметрическое (triaxial) [Mas, Chemenda, 2015].

Еще одна важная форма эллипсоида напряжений не представлена на рис. П.16. Это напряженное состояние, отвечающее сдвигу $\mu_\sigma = 0$ (рис. П.17), возникающему тогда, когда $\sigma_2 = \sigma_0$ и $|\sigma_1 - \sigma_0| = |\sigma_3 - \sigma_0|$. Это состояние удобнее формализовать в девиаторных напряжениях $s_2 = 0$ и $s_1 = -s_3$. Т.е. сдвиг характеризуется одинаковыми по величине, но противоположными по знаку алгебраически максимальным и минимальным девиаторными напряжениями.

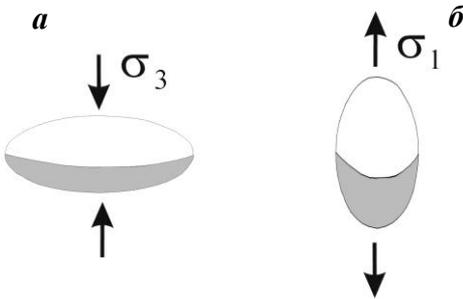


Рис. П.16. Две экстремально противоположные формы эллипсоида напряжений: диск (а) и вытянутый эллипсоид (б).

Нормальные напряжения, действующие в различных направлениях в плоскости ортогональной оси σ_3 (а) и оси σ_1 (б) одинаковые, т.е. для (а) $\sigma_2 = \sigma_1$, для (б) $\sigma_2 = \sigma_3$

На рис. П.17, *a* внутри квадрата, нагруженного напряжениями по его граням, нарисован еще один квадрат (тонкие линии), ориентированный к первому по 45° . При деформировании этот внутренний квадрат превращается в ромб. При этом диагонали ромба и исходного для него квадрата (соответственно, штрих-пунктир на рис. П.17, *a*) не поворачиваются. Это означает, что нагружаемый квадрат не испытал вращения. Именно поэтому такое нагружение именуется чистым сдвигом (pure shear).

Существует еще один способ формирования сдвига для напряженного состояния с $s_2 = 0$ и $s_1 = -s_3$, показанный на рис. П.17, *a*. Здесь мы видим, что при одинаковом внешнем нагружении, характер закреплении нижней грани (отсутствие поворота) определяет плоскопараллельное смещение горизонтальных волокон квадрата и поворот вертикальных. При этом диагонали квадрата и формирующегося при деформировании ромба (соответственно штрих-пунктир и тонкие линии на рис. П.17, *b*) уже не совпадают друг с другом. В этом случае квадрат испытывает не нулевое среднее вращение. Такое нагружение именуется простым сдвигом (simple shear). Различие в деформировании от чистого сдвига связано с разными условиями закрепления исходных квадратов.

Далее говоря о виде тензора напряжений, мы будем часто использовать термин чистый сдвиг в случаях, когда коэффициент Лодэ – Надаи близок к нулю. При этом следует помнить, что на самом деле здесь имеется в виду только соотношение величин главных напряжений. Таким образом, при этом значении коэффициента Лодэ – Надаи может реализоваться и простой сдвиг. Все зависит от условий, ограничивающих возможности деформирования (поворота).

Представленные выше параметры p , τ и μ_σ полностью определяют значения главных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -p + \tau(1 - \mu_\sigma / 3) , \\ \sigma_2 &= -p + 2\tau\mu_\sigma / 3 , \\ \sigma_3 &= -p - \tau(1 + \mu_\sigma / 3) . \end{aligned} \tag{П.23}$$

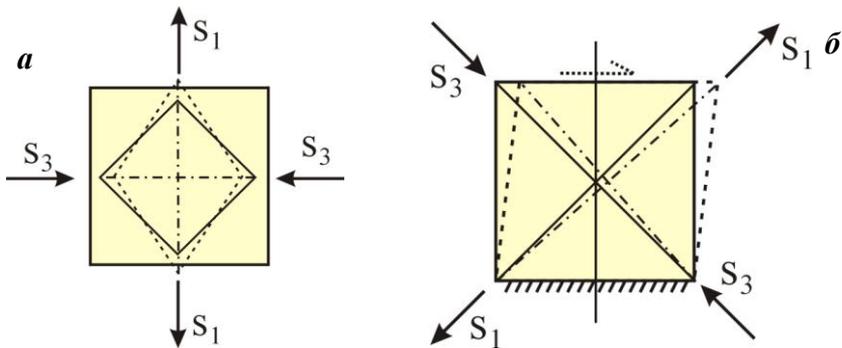


Рис. П.17. Напряженное состояние сдвига в представлении через главные девиаторные напряжения: *a*) чистый сдвиг (среднее вращение квадрата отсутствует); *b*) простой сдвиг (среднее ненулевое). Пояснения в тексте

Таким образом, три угла Эйлера (α, β, φ) и три значения параметров p, τ и μ_σ являются альтернативой компонентам тензора напряжений σ_{ij} ($i, j = x, y, z$), записанным в какой-либо заданной системе координат. Это очень важный вывод, поскольку в натуральных наблюдениях методами тектонофизики мы не можем рассчитывать компоненты напряжений (так, как это решается математическими методами механики). Тектонофизические методы, базируясь только на наблюдаемых разрывных смещениях, позволяют определять направления действия осей главных напряжений и оценивать соотношения между значениями главных напряжений.

Замечание по используемой классификации тензора напряжений. В зарубежной научной литературе, посвященной реконструкции тектонических напряжений, вместо коэффициента Лоде – Надаи используют параметр Φ , именуемый "ratio". Между Φ и μ_σ имеется простая связь:

$$\mu_\sigma = 1 - 2\Phi. \quad (\text{П.24})$$

Как видно из (П.24), параметр Φ изменяется от 0 до 1. В работе [Delvaux et al., 1997] состояния, отвечающие $\Phi=0$ ($\mu_\sigma = 1$) и $\Phi=1$ ($\mu_\sigma = -1$), именуются как чистое сжатия и чистое растяжение. Эти термины отличаются от одноосного сжатия и одноосного растяжения, введенного в классической работе [Надаи, 1936]. Параметры Φ и μ_σ являются равноправными по использованию параметрами.

Следует отметить, что часто, когда говорят об экстремальных значениях μ_σ (± 1), то вообще опускают слова «одноосное» или «чистый». В этом случае данный параметр можно перепутать с параметром, характеризующим геодинамический тип напряженного состояния. Это две совершенно разные характеристики, одна из которых введена в механике (коэффициент Лоде – Надаи) и определяет вид эллипсоида напряжений, а вторая – в геодинамике и определяет, как ориентированы главные оси этого эллипсоида по отношению к оси на зенит.

В работах [Delvaux et al., 1997; Simpson, 1997] было предложено определение напряженного состояния, базирующееся одновременно на его геодинамическом типе и виде тензора напряжений (рис. П.18). В этом случае каждый из трех основных геодинамических типов напряженного состояния (рис. П.11, а) дробился на три подтипа: одноосное растяжение ($\mu_\sigma \leq -0.5$), чистый сдвиг $|\mu_\sigma| \leq 0.5$ и одноосное сжатие ($\mu_\sigma \geq 0.5$). Таким образом, напряженное состояние имеет 7 вариантов интерпретации.

Специально следует отметить следующий факт. Схема рис. П.18 как бы подталкивает нас к тому, что именно таким образом происходит переход от одного геодинамического типа напряженного состояния к другому. Т.е. происходит смена индекса главных напряжений для трех основных геодинамических режимов (рис. П.11, а) путем постепенной трансформации вида тензора напряжений до одного из экстремальных его значений ($\mu_\sigma = \pm 1$). На самом деле, в природных объектах переход от одного геодинамического режима к другому во времени или

в пространстве может соответствовать последовательной смене состояний, показанной на рис. П.18, а может происходить скачком, например, при переходе через активный разлом.

Другим примером смены геодинамического режима является постепенное изменение ориентации главных напряжений, т.е. формирование промежуточных геодинамических режимов согласно рис. П.11, б. Но промежуточные геодинамические типы напряженного состояния: сжатие со сдвигом, растяжение со сдвигом, а также сдвиг в вертикальной плоскости, – отсутствуют на схеме рис. П.18. Эти важные типы состояний для геологии сложно включить в схему, предлагаемую в работах [Delvaux et al., 1997; Simpson, 1997].



Рис. П.18. Классификация напряженного состояния, использующая ориентацию главных осей напряжений и вид тензора напряжений по [Delvaux et al., 1997; Simpson, 1997]

Отсутствие этих геодинамических режимов может приводить к тому, что практически на больших площадях мы будем видеть мозаичный набор определенных, относящихся к разным, не смежным колонкам схемы рис. П.18. Это будет подталкивать нас к мысли, что в данном регионе существовало два временных этапа нагружения с разным типом геодинамического режима. На самом деле этого нет, а в коре существует промежуточный режим напряженного состояния с изменяющимся в пространстве видом тензора напряжений.

Мы считаем, что, избегая получения артефактов, следует отдельно характеризовать геодинамический тип напряженного состояния с делением на шесть подтипов, как это показано на рис. П.11, б, и отдельно характеризовать вид тензора напряжения с дроблением значений коэффициента Лоде – Надаи на пять диапазонов: 1) близкое к одноосному сжатию ($\mu_\sigma \geq 0.6$); трехосное в области одноосного сжатия ($0.6 > \mu_\sigma > 0.2$); чистый сдвиг ($0.2 \geq \mu_\sigma \geq -0.2$); трехосное в области одноосного растяжения ($-0.2 > \mu_\sigma > -0.6$); близкое к одноосному растяжению ($-0.6 \geq \mu_\sigma$).

Отметим, что использование представления величин главных напряжений через параметры тензора p , τ и μ_σ (П.23) позволяет переписать соотношение (П.15), определяющее значения наибольших и наименьших горизонтальных напряжений и вертикальное напряжение. Поскольку в настоящее время часто эти напряжения определяют из данных о положении осей главных напряжений, полученных из механизмов очагов землетрясений, запишем эти напряжения в девиаторных компонентах $\bar{S}_i = S_i - p$ ($i = H, h, v$):

$$\begin{aligned}
\bar{S}_H &= -\tau[(1 - \mu_\sigma)\ell_{H1}^2 - (1 + \mu_\sigma)\ell_{H3}^2 + 2\mu_\sigma/3], \\
\bar{S}_h &= -\tau[(1 - \mu_\sigma)\ell_{h1}^2 - (1 + \mu_\sigma)\ell_{h3}^2 + 2\mu_\sigma/3], \\
\bar{S}_v &= -\tau[(1 - \mu_\sigma)\ell_{v1}^2 - (1 + \mu_\sigma)\ell_{v3}^2 + 2\mu_\sigma/3].
\end{aligned}
\tag{П.25}$$

Здесь значения \bar{S}_H , \bar{S}_h , \bar{S}_v положительные при сжатии (как это ранее было обговорено), а отсутствие направляющих косинусов с осью промежуточного главного напряжения связано с использованием условия $\ell_{i1}^2 + \ell_{i2}^2 + \ell_{i3}^2 = 1$. Соответственно оси H и h выбираются так, что бы выполнялось условие $\bar{S}_H \geq \bar{S}_h$.

Следует обратить внимание читателей на тот факт, что для правильного перехода от рассчитанных значений осей главных напряжений к значениям девиаторных компонент (П.25) требуются данные о значении коэффициента Лоде – Надаи, что в методах М.-Л. Зобак, В.Д. Парфенова (см. главу 4) получить не удастся.

В методе М.-Л. Зобак при переходе от главных напряжений к напряжениям, действующим в горизонтальной плоскости, фактически используется гипотеза о равенстве нулю коэффициента Лоде – Надаи. В громадном большинстве случаев эта гипотеза неверна (см. ссылки в главе 4). Читатель может самостоятельно проверить это, положив: ориентацию оси промежуточного главного напряжения σ_2 горизонтальной, погружение оси максимального сжатия σ_3 равной 55° и $\mu_\sigma = \pm 1$. Сравнив эти результаты с подходом Л.-М. Зобак, в котором следует принимать $\mu_\sigma = 0$, увидим возможные ошибки в определении положений \bar{S}_H , \bar{S}_h , \bar{S}_v .

Круговая диаграмма Мора. О. Мор [Mohr, 1900] предложил для графического описания напряженного состояния на произвольных площадках использовать круговую двумерную диаграмму, для которой вдоль горизонтальной оси откладываются нормальные напряжения, а вдоль вертикальной – касательные напряжения, действующие на произвольно ориентированных площадках (рис. П.19). Исторически сложилось, что диаграмма Мора создавалась для решения проблем горной механики, и поэтому в терминологии классической механики направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений. Мы будем использовать такое же правило создания диаграмм Мора. Отметим, что в силу симметрии нижняя часть диаграмм Мора подобна верхней, и поэтому часто нижняя часть этой диаграмм не изображается.

Пространство, отсекаемое внутри большого круга Мора малыми кругами, определяет геометрическое место точек, характеризующих нормальные и касательные напряжения на соответствующей наклонной площадке. Точки 12, 13, 23 (рис. П.19) определяют положение площадок, нормальными к которым являются соответственно биссектриса угла между главными осями напряжений σ_1 , σ_2 ; σ_1 , σ_3 (площадка действия максимальных касательных напряжений); σ_2 , σ_3 .

Касательные напряжения, которые действуют на этих площадках, определяются выражениями:

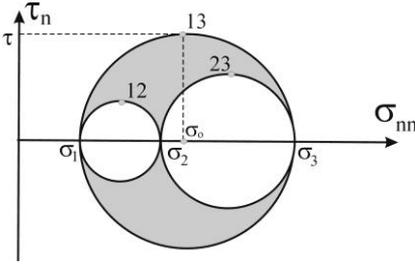


Рис. П.19. Диаграмма Мора, большие и малые круги Мора. По горизонтальной оси направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений

$$\tau_{13} = \pm(\sigma_1 - \sigma_3)/2, \quad \tau_{12} = \pm(\sigma_1 - \sigma_2)/2, \quad \tau_{23} = \pm(\sigma_2 - \sigma_3)/2. \quad (\text{П.26})$$

Знак \pm в (П.26) показывает, что площадка действия данного касательного напряжения имеет сопряженную к ней под углом 90° площадку, и точки, им отвечающие, попадают в верхнюю и нижнюю части диаграммы Мора.

Замечаем, что в (П.23) τ_{13} является максимальным касательным напряжением (τ). Нормальное напряжение, действующее на этой площадке, определится как:

$$\sigma_{13} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2, \quad \sigma_{12} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2, \quad \sigma_{23} = (\sigma_2 + \sigma_3)/2. \quad (\text{П.27})$$

Здесь нижние индексы тождественны номерам точек, изображенным на рис. П.19. Для нормального напряжения, действующего на плоскости максимальных касательных напряжений, принято обозначение σ_o ($\sigma_o = \sigma_{13}$). Используя (П.23) для него, получим:

$$\sigma_o = -(p + \tau\mu_\sigma/3). \quad (\text{П.28})$$

Важно отметить, что точки, лежащие внутри большого круга Мора, но вне двух малых кругов, определяют значения касательных (τ_n) и нормальных (σ_{nn}) напряжений на произвольно ориентированных площадках.

На рис. П.18 показаны большие и малые круги Мора для трех важных типов тензора напряжений: вблизи одноосного сжатия, вблизи одноосного растяжения, а также чистый сдвиг. Видно, что наибольшее разнообразие соотношений между нормальными и касательными напряжениями на всевозможных площадках наблюдается для состояния чистого сдвига (рис. П.20, б).

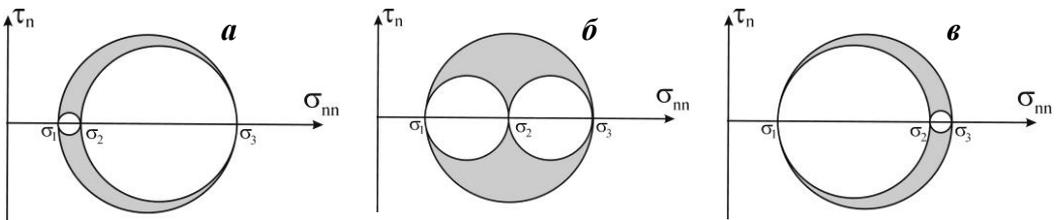


Рис. П.20. Состояния, близкие к одноосному сжатию $\mu_\sigma \approx 1$ (а), одноосному растяжению $\mu_\sigma \approx -1$ (в) и чистому сдвигу $\mu_\sigma = 0$ (б)

Построение точек на диаграмме Мора. Положение точек на диаграмме Мора, отвечающих плоскостям главных напряжений σ_i и площадкам действия τ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), получить наиболее просто (см. рис. П.21). Получение других точек, попадающих на большой и малый круги Мора, также не представляет особых проблем, т.к. в этом случае нормаль к площадке, для которой следует рассчитать нормальные и касательные напряжения, ортогональна одной из осей главных напряжений и лежит в плоскости, которую образуют оси двух других главных напряжений. Примером тут может являться плоскость для касательного напряжения τ_{ij} , изображенная на рис. П.21.

Для такой плоскости нормальные и полные касательные напряжения рассчитываются достаточно просто:

n – лежит в плоскости σ_1 и σ_3

$$\sigma_{nn} = -p + \tau \left(\cos 2\alpha_{n1} - \frac{1}{3} \mu_\sigma \right), \quad \tau_n = \pm \tau \sin 2\alpha_{n1}, \quad (\text{П.29})$$

n – лежит в плоскости σ_1 и σ_2

$$\sigma_{nn} = -p + \tau \left[(1 - \mu_\sigma) \cos^2 \alpha_{n1} + \frac{2}{3} \mu_\sigma \right], \quad \tau_n = \pm 0.5\tau(1 - \mu_\sigma) \sin 2\alpha_{n1}, \quad (\text{П.30})$$

n – лежит в плоскости σ_3 и σ_2

$$\sigma_{nn} = -p + \tau \left[-(1 + \mu_\sigma) \cos^2 \alpha_{n3} + \frac{2}{3} \mu_\sigma \right], \quad \tau_n = \pm 0.5\tau(1 + \mu_\sigma) \sin 2\alpha_{n3}. \quad (\text{П.31})$$

Здесь α_{ni} ($i = 1, 3$) – угол между вектором нормали n и осями σ_1 и σ_3 .

Существует взаимосвязь между углами α_{ni} в декартовой системе координат и углами, откладываемыми в моровской плоскости внутри малых и большого кругов Мора. В каждом из случаев (П.29) – (П.31) углы откладываются внутри соответствующего круга Мора (рис. П.21) при отсчете угла по часовой стрелке для α_{n1} и против часовой стрелки для α_{n3} .

В случае, когда нормаль к площадке (плоскости) не ортогональна ни одной из осей главных напряжений, точки, ей отвечающие, лежат внутри большого и за

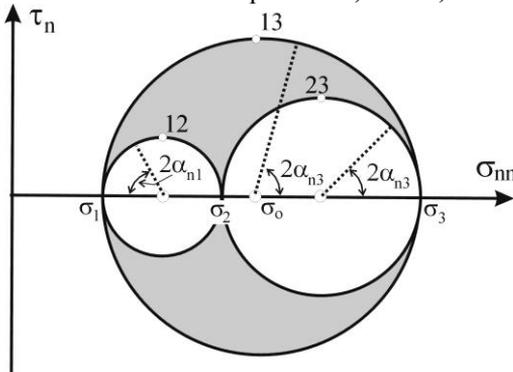


Рис. П.21. Построение на диаграмме Мора точек, отвечающих напряженным состояниям с нормальными, ортогональными одной из осей главных напряжений. Объяснение см. в тексте

пределами малых кругов Мора (серая область рис. П.19 – П.21). Нормальные и касательные напряжения на таких произвольно ориентированных площадках с нормалью \mathbf{n} согласно (П.13) и (П.21) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{ni} = -p\delta_{ni} + \tau \left[(1 - \mu_\sigma)\ell_{n1}\ell_{i1} - (1 + \mu_\sigma)\ell_{n3}\ell_{i3} + \delta_{ni}\frac{2}{3}\mu_\sigma \right], \quad (\text{П.32})$$

при $i = n, t, m$, где \mathbf{n} , \mathbf{t} и \mathbf{m} – образуют ортогональную тройку векторов (рис. П.21), ℓ_{ik} – направляющие косинусы соответствующих векторов ($i = n, t, m$) в системе координат, связанной с ориентацией главных осей тензора напряжений ($k = 1, 2, 3$), а $\delta_{ni} = 0$ при $n \neq i$ и $\delta_{ni} = 1$ при $n = i$.

Выражение (П.32) можно использовать для получения положения точки на диаграмме Мора, рассчитав нормальное напряжение σ_{nn} и две компоненты касательного напряжения σ_{nt} , σ_{nm} . Величина полного касательного напряжения, действующего на площадке с нормалью \mathbf{n} , определится по правилу суммирования ортогональных векторов:

$$\tau_n = \pm \sqrt{(\sigma_{nt})^2 + (\sigma_{nm})^2}, \quad i = n, t, m, \quad (\text{П.33})$$

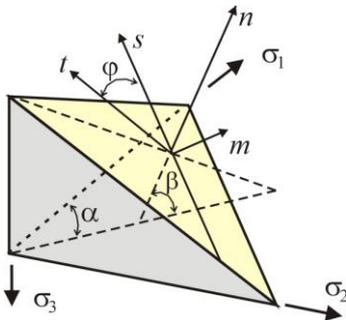


Рис. П.22. Схема, иллюстрирующая несовпадение на плоскости скола вектора смещения вдоль трещины и направления касательных напряжений искомого тензора напряжений

В случае, если вектор \mathbf{t} совпадает с направлением действия полных касательных напряжений на площадке с нормалью \mathbf{n} , то в направлении вектора \mathbf{m} величина компоненты касательного напряжения σ_{nm} будет равна нулю:

$$\sigma_{nm} = \tau \left[(1 - \mu_\sigma)\ell_{n1}\ell_{m1} - (1 + \mu_\sigma)\ell_{n3}\ell_{m3} \right] = 0. \quad (\text{П.34})$$

Данное выражение позволяет определить угол, связывающий вектор \mathbf{t} с вектором простираия \mathbf{s} площадки.

Редуцированная диаграмма Мора. В методе катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 2007], позволяющем получать данные о редуцированных компонентах природных напряжений, используется нормированная диаграмма Мора. Для перехода к этим редуцированным напряжениям используется значение нормального напряжения в центре большого круга Мора σ_o (см.

рис. П.19, точка o). Если из нормальных напряжений (П.32) вычесть σ_o и нормировать нормальные и касательные напряжения на τ , то получим приведенные напряжения, которые будут в дальнейшем именоваться редуцированными напряжениями:

$$\bar{\sigma}_{ni} = (1 - \mu_\sigma) \ell_{n1} \ell_{i1} - (1 + \mu_\sigma) \ell_{n3} \ell_{i3} + 2\delta_{ni} \mu_\sigma / 3, \quad i = n, t. \quad (\text{П.35})$$

Здесь положение вектора t определяется согласно выражению (П.32).

Редуцированные напряжения позволяют построить круги Мора для разных напряженных состояний, совмещенных по центру, и с внешним большим кругом Мора одинакового единичного радиуса (рис. П.23).

В этом случае $\bar{\sigma}_1 = 1$, $\bar{\sigma}_1 = -1$, а $\bar{\sigma}_2 = \mu_\sigma$. Такое представление диаграммы Мора (в редуцированных напряжениях) будет в дальнейшем использоваться при определении геометрического множества точек на кругах Мора, характеризующих процесс хрупкого разрушения множества квазиоднородно деформирующихся участков земной коры с разными параметрами тензора напряжений.

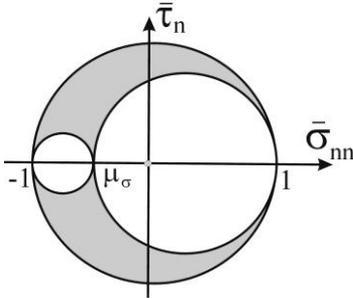


Рис. П.23. Редуцированная диаграмма Мора, большие и малые круги Мора

П.2. Деформации

Продольные и сдвиговые деформации. Деформации характеризуют относительные изменения длин и углов и разделяют на деформации удлинения или укорочения вдоль данного направления и деформации сдвига между двумя ортогональными направлениями. Выделим в любом направлении малый отрезок длины ℓ_0 (рис. П.24, a). Если в результате действия напряжений его длина изменилась (ℓ) на малую величину $\Delta\ell$, то деформации удлинения или укорочения выделенного элемента определяются как

$$e = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \text{при} \quad \Delta\ell = \ell - \ell_0. \quad (\text{П.36})$$

В механике продольные деформации, отвечающие удлинениям ($\Delta\ell > 0$), положительны, а укорочениям ($\Delta\ell < 0$) – отрицательны.

Термин “деформации сдвига” определяет компоненту, характеризующую величину изменения угла между двумя ортогональными до деформирования направлениями. Если прямоугольный элемент в результате приложения внешних

воздействий испытывает малые деформации простого сдвига, связанные с плоскопараллельным смещением одной из его сторон (рис. П.24, б), деформация сдвига в системе координат xOy определится как отношение

$$\gamma = \frac{du_x}{dy}. \quad (\text{П.37})$$

Если имеют место деформации чистого сдвига с симметричным поворотом граней квадрата (рис. П.24, в), то деформация сдвига определится как отношение

$$\gamma = \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx}. \quad (\text{П.38})$$

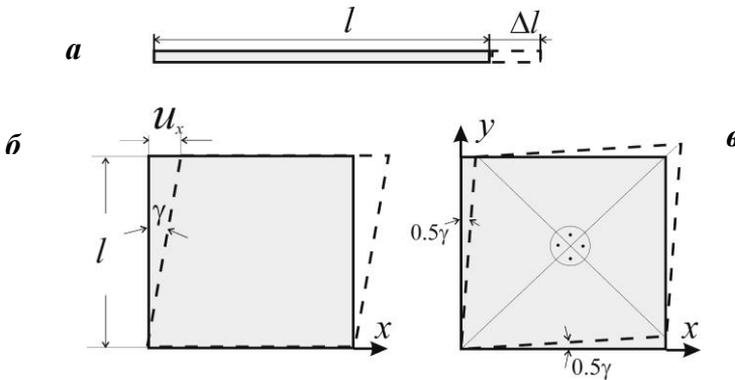


Рис. П.24. Компоненты продольной (а) и сдвиговой (простой сдвиг – б, чистый сдвиг – в) деформации

Правило знаков для деформации сдвига тождественно правилу знаков для касательных напряжений (см. рис. П.3).

Большие деформации. Упругие деформации твердых тел и горных пород не превышают 0.1-0.2%. Это малые деформации, при которых выражения (П.37), (П.38) для компонент деформаций сохраняют свойство аддитивности. Т.е., если выполнять измерения деформаций стержня в процессе его удлинения, то полную деформацию стержня можно получить, суммируя деформации, отвечающие последовательным интервалам времени. В горных породах также имеют место неупругие деформации, формирующиеся за счет пластических и вязких свойств. Полная деформация складывается из всех этих компонент:

$$e = e^e + e^p + e^v. \quad (\text{П.39})$$

Такие деформации уже могут быть большими. Для них нарушается свойство аддитивности. В этом случае переходят к логарифмическим деформациям:

$$\bar{e} = \ln \frac{\ell}{\ell_0} = \ln(1+e) \text{ при } e = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0}. \quad (\text{П.40})$$

При малых деформациях $e \approx \bar{e}$, а при больших сохраняет свойство аддитивности:

$$\bar{e} = \bar{e}_1 + \bar{e}_2 = \ln \frac{\ell_1}{\ell_0} + \ln \frac{\ell_2}{\ell_1} = \ln \frac{\ell_2}{\ell_0}. \quad (\text{П.41})$$

Тензор деформаций. Продольные и сдвиговые деформации, так же как и в случае напряжений, образуют тензор деформаций (см. рис. П.2).

$$\mathbf{T}_\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}. \quad (\text{П.42})$$

Так же как и для тензора напряжений, для тензора деформаций можно найти такую систему трех ортогональных направлений, для которых тензор деформации будет иметь ненулевые значения только вдоль главной диагонали (П.7). Эти направления отвечают главным осям тензора деформаций, т.е. осям главных деформаций. Эти оси совпадают с осями действия главных напряжений для упругого изотропного тела. Для анизотропного упругого тела этого совпадения нет. Также могут не совпадать оси главных деформаций и оси главных напряжений для стадии упруго-пластического деформирования пород, если минералы имеют асимметрию кристаллов. Соответственно и для стадии трещинного деформирования возможно несовпадение этих осей, если трещины имеют преимущественную ориентацию.

Так же как для тензора напряжений вид тензора деформаций (форму эллипсоида деформаций) можно определять значением коэффициента Лоде – Надаи μ_ε . Сумма трех продольных деформаций вдоль ортогональных направлений определяет деформацию изменения объема θ (утроенное значение средней продольной деформации ε_0). Часто упругую деформацию, приводящую к увеличению объема, называют дилатацией (dilatation). Максимальное значение девиаторных деформаций определяется компонентой максимального сдвига, которая составляет половину от деформации максимального сдвига γ .

Вращение. В механике континуума, зная компоненты тензора деформаций, можно рассчитать угол поворота, который испытывает в процессе деформирования какое-либо направление – прямолинейный линеймент (рис. П.25, а):

$$\operatorname{tg} \psi_z = \frac{\pi_z + 0.5\varepsilon_{xy} \cos 2\theta + 0.5(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}) \sin 2\theta}{1 + \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta + 0.5\varepsilon_{xy} \sin 2\theta}. \quad (\text{П.43})$$

Здесь π_z – среднее вращение макрообъема вокруг оси z , а ψ_z – поворот линеймента в плоскости xOz . Среднее вращение макрообъема в какой-либо плоскости можно определить, замерив (рассчитав) углы поворота двух линейментов (ψ_z^1 , ψ_z^2), которые до деформации были ортогональны друг другу (см. рис. П.25, б):

$$\pi_z = 0.5(\psi_z^1 + \psi_z^2). \quad (\text{П.44})$$

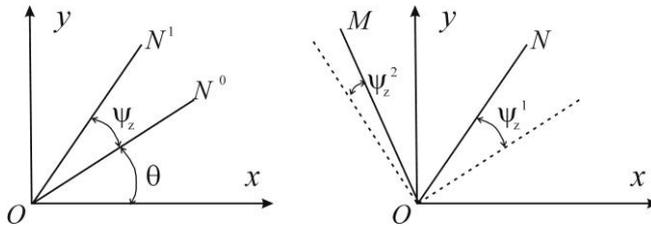


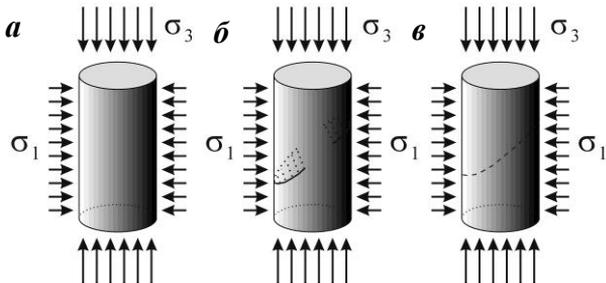
Рис. П.25. К расчету угла поворота линеймента (а) и среднего вращения макрообъема (б). а) ON^0 – начальное положение, ON^1 – после деформирования, ψ_z – угол поворота в плоскости xOy (вокруг оси z). б) пунктирные линии – начальное положение ортогональных отрезков ON, OM , сплошные линии – после деформаций

Заметим, что из (П.43) следует, что если мы знаем, что в начальный момент (до деформирования) два направления в породе были ортогональны, а после деформирования маркеры, характеризующие эти направления, стали не ортогональны, то эти данные можно использовать для оценки уровня деформаций.

П.3. Прочность хрупких горных пород

Закон прочности по Кулону в приложении к хрупкому разрушению горных пород – закон Дж. Байерли. Эксперименты по деформированию образцов горных пород вплоть до разрушения осуществлялись в условиях осевого нагружения и бокового обжима (рис. П.26) [Mogi, 1964; Byerlee, 1967, 1968, 1978; Handin, 1969; Stesky, 1978; Rummel et al., 1978; Ставрогин, Протосеня, 1992; и др.]. При этом образцы были трех типов: сплошные, без видимых дефектов; с предварительными надрезами; с дефектами прочности, созданными в результате другого

Рис. П.26. Одноосное нагружение в лабораторных экспериментах на трех типах образцов горных пород: а) целый образец, б) образец с предварительно нанесенными надрезами, в) образец, предварительно подвергавшийся нагружению до начала образования внутренних дефектов прочности (микротрещин)



предварительно проведенного эксперимента. Результаты экспериментов позволили выявить зависимость типа разрушения от условий и параметров нагружения.

Признаком хрупкого разрушения после достижения критически высокого уровня дифференциальных напряжений является резкий спад этих напряжений. В случае, когда закритическое деформирование осуществляется пластическим образом, резкого спада дифференциальных напряжений нет. По результатам экспериментов на изначально целых образцах установлено, что при низких величинах бокового обжима разрушение образцов является хрупким, а при увеличении обжима наблюдается постепенный переход к пластическому разрушению (рис. П.27).

Эксперименты по изучению хрупкого разрушения различных образцов горных пород, выполненные в рамках инженерных (промышленных и гражданских) [Цытович, 1979], а также специальных геомеханических экспериментах в представленные выше работах, тоже показали, что закон Кулона достаточно хорошо описывает стадию перехода от состояния покоя к относительному движению бортов трещин скола, ранее уже существовавших в образцах горных пород или образующихся в процессе их деформирования:

$$\tau_n \leq \tau_f - k_f \sigma_{nn}. \tag{П.45}$$

Здесь k_f – коэффициент внутреннего трения, τ_f – предел внутренней прочности (прочность сцепления), а $\tau_n > 0$ и $\sigma_{nn} < 0$ – соответственно, касательное и нормальное напряжения на плоскости разрыва с нормалью n . Заметим, что коэффициент внутреннего трения ничего общего не имеет с вязким трением. Этот коэффициент в определенной степени подобен сухому трению, возникающему между двумя плоскими площадками, сжатыми нормальными напряжениями и скользящими друг относительно друга.

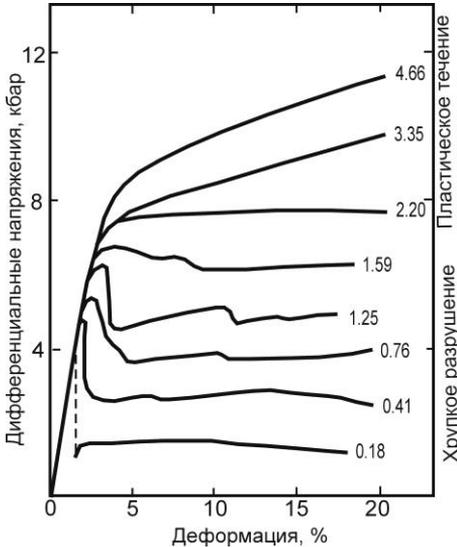


Рис. П.27. Результаты лабораторных экспериментов по разрушению образцов горных пород при высоких давлениях (рисунок из работы [Byerlee, 1967]).

В конце каждой кривой показано значение обжимного давления в кбар (1000 кг/см^2). Дифференциальные напряжения – разность осевой нагрузки и нагрузки бокового обжима

Напряжения τ_n и σ_{nn} рассчитываются на плоскости трещины по данным об обжимающем давлении ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -p_H$) и осевом напряжении (σ_{zz}) на основе выражений (П.5). Для этого замеряется угол, который трещина составляет с осевым напряжением, и далее, используя (П.23), (П.32) и (П.45), рассчитываются направляющие косинусы нормали с главными осями напряжений и компоненты напряжений на плоскости трещины ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_1 = \sigma_2, \sigma_{zz} = \sigma_3$).

Устойчивому состоянию на плоскости будущей трещины сдвига (разрыва) отвечает знак неравенства в законе Кулона (П.44), а хрупкому разрушению – знак равенства. Для формирования хрупкого скола касательные напряжения должны преодолеть не только прочность зацепов (τ_f), но и сухое трение ($k_f; \sigma_{nn}$). Прочность сцепления изначально целых образцов одних и тех же пород наибольшая. Поскольку прочность образцов с дефектами ниже, чем целых, то на диаграмме Мора для одного и того же типа пород при одном и том же уровне обжимающих напряжений существует разброс уровня осевой нагрузки, определяющий развитие хрупкой трещины (рис. П.28). Разные типы кристаллических пород коры эту ситуацию еще более усиливают.

Таким образом, на диаграмме Мора вместо предельной поверхности, которой обычно изображают достижение предела хрупкой прочности, был получен разброс точек, отвечающий предельному соотношению нормальных и касательных напряжений. Было установлено, что вид облака точек на диаграмме Мора меняется с изменением нормальных напряжений на трещине.

Дж. Байерли [Byerlee, 1978] предложил ввести закон связи между нормальными и касательными напряжениями, определяющим предельное их соотношение, на основе проведения на диаграмме Мора линий через середину облака экспериментальных точек. Им предложено два таких соотношения для двух диапазонов напряжения, нормального к трещине в образце (разлому):

$$\tau_n = 0.85|\sigma_{nn}| \quad \text{при } |\sigma_{nn}| \leq 2 \text{ кбар}; \quad (\text{П.46})$$

$$\tau_n = 0.5 \text{ кбар} + 0.6|\sigma_{nn}| \quad \text{при } 2 \text{ кбар} \leq |\sigma_{nn}| \leq 20 \text{ кбар}. \quad (\text{П.47})$$

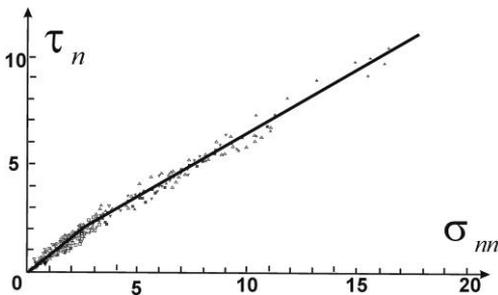


Рис. П.28. Результаты лабораторных экспериментов по разрушению образцов горных пород при высоких давлениях [Byerlee, 1978].

Точки определяют касательные и нормальные напряжения на плоскости трещин, возникших в образце при его разрушении. Ломаная линия, проходящая через центр облака экспериментальных точек, определяет соотношение между нормальными и касательными напряжениями в законе Байерли (П.46-П.47). Направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений (напряжения в кбар)

Соотношение (П.46) характеризует горные породы как раздробленный материал с нулевым сцеплением τ_c на поверхностях скольжения и коэффициентом трения $k_f = 0.85$ или углом трения $\varphi_f \approx 40.5^\circ$ ($\text{tg } \varphi_f = k_f$), а соотношение (П.47) – определяет их как связанные материалы с величиной сцепления $\tau_f = 0.5$ кбар и $k_f = 0.6$ ($\varphi_f \approx 31^\circ$).

Угол между плоскостью скалывания горных пород и плоскостью максимального касательного напряжения равен половине угла φ_f . Он отличается от 45° . Это говорит о том, что горные породы в отличие от металлов разрушаются не по площадкам максимальных касательных напряжений (точка *A* на рис. П.29), а по *плоскостям (площадкам) скалывания* горных пород, которым отвечает точка *C* на рис. П.29. Поскольку на диаграмме Мора углы между осями главных напряжений увеличиваются вдвое, то соответственно угол оси σ_3 , с нормалью к плоскости трещины составит $0.5(90 + \varphi_f)$, а с плоскостью трещины – $0.5(90 - \varphi_f)$.

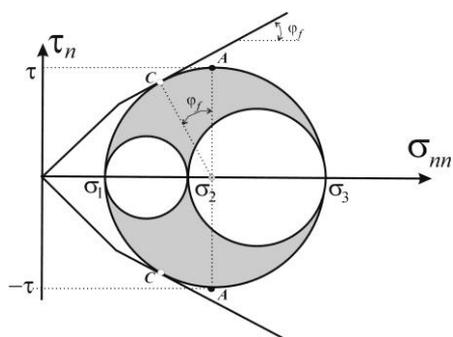


Рис. П.29. Положение на круге Мора напряженных состояний, отвечающих плоскостям скалывания горных пород *C* и плоскостям действия максимальных касательных напряжений *A*. Направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений

Соотношения (П.46) и (П.47) принято называть законом Дж. Байерли. Отличие этого закона от предела прочности по Кулону состоит в определении конкретных параметров прочности для кристаллических горных пород.

Закон Байерли является критическим соотношением между нормальными и касательными напряжениями на плоскости трещины. Это значит, что предельным напряженным состоянием является такое, у которого большой круг Мора касается ломаной линии закона Байерли (рис. П.30). Ниже ломаной линии находятся допустимые напряженные состояния. Ни один большой круг Мора какого-либо напряженного состояния не должен пересечь ломаную линию закона Байерли.

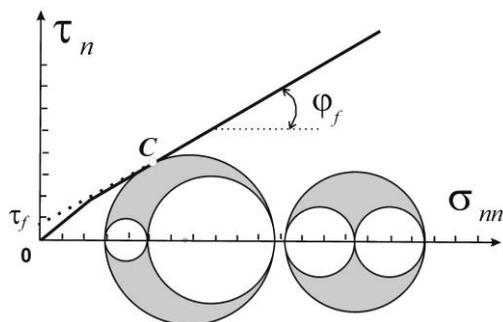


Рис. П.30. Предельное напряженное состояния (круги Мора слева) – большой круг Мора касается предельных линий Байерли.

Чисто упругие напряженные состояния находятся ниже этих линий (пример, круги Мора справа). Точка *C* определяет напряженное состояние на плоскости скалывания. Предел прочности показан только в верхней части диаграммы

На самом деле выдвинутое требование не совсем удовлетворяет результатам экспериментов (см. рис. П.30). Фактически это означает, что часть напряженных состояний, для которых в эксперименте получены трещины скальвания, по Дж. Байерли считаются недостижимыми. Далее мы покажем, как более корректно следует интерпретировать результаты экспериментов по разрушению образцов горных пород.

Диапазон прочности трещин в горных породах – полоса хрупкого разрушения. Результаты экспериментов по разрушению образцов горных пород при высоком давлении обладают существенно большей информацией, чем та, которую использовал Дж. Байерли при построении теории хрупкого разрушения горных массивов – выражения (П.46) и (П.47). В этом разделе будут сформулированы положения, которые составляют основу метода катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 2007] в части расчета величин тектонических напряжений. Эти положения являются прямым следствием экспериментов по хрупкому разрушению трещиноватых образцов и отмечались авторами экспериментов.

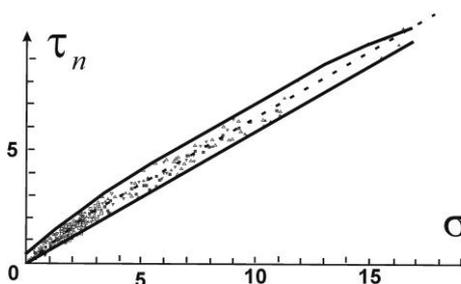
Эксперименты над образцами, обладающими дефектами, показали, что в реальных горных массивах, содержащих трещины и поверхности пониженной прочности, разрушение может происходить не только с образованием новых поверхностей разрывов, но и путем активизации уже существующих. При этом прочность ненарушенных участков определяется внутренней прочностью горных пород, а возможность активизации старых разрывов зависит от значения их поверхностного сопротивления сдвигу – прочностью сдвига (*strength shear*), определяемого поверхностным сцеплением – прочностью сцепления (*cohesion*) и коэффициентом сухого трения. Заметим, что прочность сцепления вдоль уже существующих разрывов может с течением времени как увеличиваться (залечивание разрыва при пониженном уровне напряжений), так и падать до некоторого минимального значения при длительном действии высоких напряжений (длительная прочность) [Гзовский, 1960, 1975].

Возвращаясь к данным, приведенным в работе [Byerlee, 1978], дадим новую интерпретацию результатов этих экспериментов [Ребецкий, 2003б]. Проведем для данных рис. П.28 две предельные линии, ограничивающие сверху и снизу основное облако точек (рис. П.31). Видно, что верхняя ограничивающая линия представляет собой ломаную линию, а нижняя – прямую, проходящую в начало координат.

В области, заключенной между предельными линиями рис. П.31, возникают трещины скальвания, вне этой области трещин скальвания (сдвига) не образуется. Далее в этом разделе данное положение будет уточнено. Выделенную на рис. П.31 область можно назвать зоной хрупкого разрушения. Дополнительные исследования [Ставрогин, Протосения; 1992] показали, что на микроскопическом уровне в этой области формируется система трещин сдвига и отрывов, что приводит к увеличению объема деформируемых образцов – дилатансии (*dilatancy*). Отметим, что это изменение объема может происходить в условиях, когда среднее напряжение сжимающее – всестороннее сжатие. Таким образом, явление дилатансии по деформационному эффекту прямо противоположно эффекту дилатации (см. раздел).

Поскольку наиболее протяженный участок верхней ограничивающей линии параллелен нижней, то, упрощенно, уравнения этих линий могут быть представлены двумя параллельными прямыми линиями (рис. П.31):

Рис. П.31. Линии, огибающие облако экспериментальных точек: предел прочности сплошных образцов – верхняя огибающая, минимальное сопротивление сухого трения – нижняя огибающая. Линия закона Байерли показана пунктиром. Область между этими линиями – зона хрупкого разрушения



$$\text{для верхней огибающей } \tau_n + 0.6\sigma_{nn} = 1 \text{ кбар,} \quad (\text{П.48})$$

$$\text{для участка нижней линии } \tau_n + 0.6\sigma_{nn} = 0. \quad (\text{П.49})$$

Таким образом, от зоны хрупкого разрушения мы перешли к полосе хрупкого разрушения, понятие которой имеет критически важное значение в методе катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого [2007] реконструкции природных напряжений

Для верхней огибающей 1 кбар – величина средней прочности сцепления для образцов кристаллических горных пород. Забегая вперед, отметим, что прочность сцепления горных пород зависит от размера образцов. С увеличением размера прочность падает. В соответствии с результатами экспериментов, представленных на рис. П.31, соотношение (П.48) определяет верхнее предельное касательное напряжение для данного значения давления на поверхности возникшей трещины – предел прочности ненарушенных хрупких горных пород [Byerlee, 1967]. Для любых тщательно отобранных (бездефектных) образцов горных пород не могут быть достигнуты значения касательных напряжений на поверхности скола большие, чем это требует выражение (П.48).

Выражение (П.49) характеризует нижний предел соотношения между нормальными и касательными напряжениями, после достижения которого вдоль бортов образовавшихся трещин могут происходить смещения с сухим трением. Эти соотношения определяют *минимальное сопротивление сухого* (поверхностного) *трения* для существующих в горных породах трещин.

Поскольку реальная порода всегда имеет дефекты прочности, то трещины будут возникать и для напряженных состояний, большой круг Мора которых пересек линию минимального сопротивления сухого трения (нижняя линия рис. П.32), но еще не достиг предела прочности бездефектных горных пород (верхняя линия рис. П.32) и даже ниже предельной линии Байерли (пунктирная линия рис. П.32). Для напряженного состояния, коснувшегося внешней огибающей, кроме трещин, возникающих вдоль площадок с дефектами прочности, будут формировать новые трещины с ориентацией, отвечающей плоскости скалывания. Напряженное состояние, большой круг Мора которого находится ниже нижней огибающей линии, не может активизировать ранее существующие дефекты прочности из-за того, что касательные напряжения на плоскостях с любой их ориентацией не могут преодолеть силы поверхностного трения.

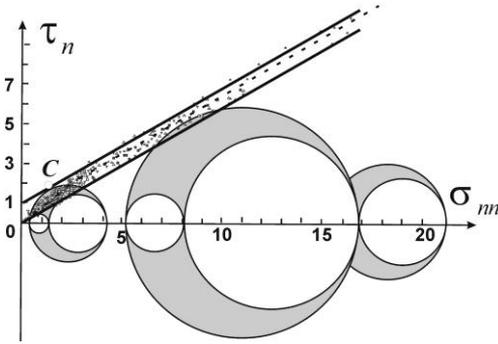


Рис. П.32. Полоса хрупкого разрушения на диаграмме Мора в виде двух параллельных прямых линий (показана только в верхней части диаграммы). Разным напряженным состояниям отвечают разные возможности формирования трещин. Пояснения в тексте

Скольжение вдоль берегов всех трещин реализуется с трением по закону Кулона при одинаковом значении коэффициента поверхностного трения. Для напряженных состояний с $\sigma_{nn} = const$ различие в предельных состояниях на берегах уже существующих трещин, имеющих разное значение τ_n , заключается в разном значении величины поверхностного сцепления τ_s на их бортах (см. рис. П.33). Причем верхний предел значения τ_s определяется значением внутренней прочности сцепления ненарушенных пород τ_f :

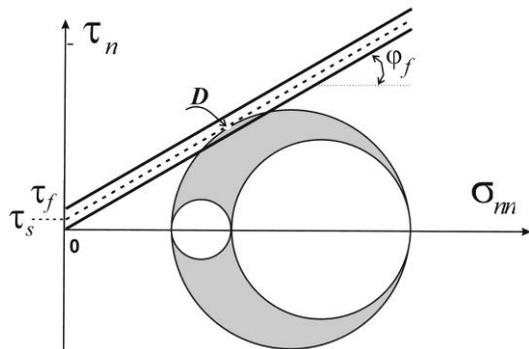
$$\tau_n + k_s \sigma_{nn} = \tau_s \text{ при } |\sigma_{nn}| \leq 0 \text{ при } 0 \leq \tau_s \leq \tau_f. \quad (\text{П.50})$$

Серия экспериментов по исследованию хрупкого разрушения образцов горных пород при наличии порового давления флюида [Byerlee, 1967; Handin, 1972; Stesky, 1978; Ставрогин, Протосеня, 1992] показала снижение прочности пород с увеличением порового давления. В работах К. Терцаги [1961] было показано, что давление флюида можно учитывать путем вычитания из нормального давления, действующего на поверхности скольжения.

В этом случае предельное соотношение Кулона (П.48) может быть переписано в следующем виде:

$$\tau_n = \tau_s - k_c \sigma_{nn}^*, \quad \sigma_{nn}^* = \sigma_{nn} + p_{fl} \quad (\text{П.51})$$

Рис. П.33. Полоса разрушения на диаграмме Мора в виде двух параллельных прямых линий (показана только в верхней части диаграммы). Разным напряженным состояниям отвечают разные возможности формирования трещин. Пояснения в тексте



при $\sigma_{nn}^* \leq 0$, $\tau_n \geq 0$, $p_{fl} \geq 0$, $0 \leq \tau_s \leq \tau_f$ где σ_{nn}^* - эффективное нормальное напряжение. Таким образом, уровень сжатия на трещине уменьшается на величину флюидного давления в трещинно-поровом пространстве пород. Важно заметить, что выражения (П.51) верны до тех пор, пока нормальное эффективное давление на трещине сжимающее.

Связь между диаграммой Мора и палеткой Вульфа. В геологии для изображения положения трещины и направления смещения на ней часто используется палетка Вульфа. Покажем, что существует взаимосвязь распределения на диаграмме Мора точек, характеризующих напряженное состояние на плоскости активной трещины, распределение точек на палетке Вульфа, определяющих ориентацию плоскости трещины. На рис. П.34 в верхнем ряду (I) показаны три состояния, касающиеся внешней линии предела хрупкой прочности, с разным типом тензора напряжений: а) вблизи чистого; б) вблизи одноосного сжатия; вблизи одноосного растяжения. В следующих трех рядах для каждого из этих состояний на верхней полусфере ряда (I) показаны три состояния, касающиеся внешней линии предела хрупкой прочности, с разным типом тензора напряжений: а) вблизи показаны семейства полюсов трещин для случая, когда одна из главных осей тензора напряжений ориентирована на зенит ($\sigma_i = \sigma_{zz}$, $i = 1, 2, 3$): II – $\sigma_1 = \sigma_{zz}$; III – $\sigma_3 = \sigma_{zz}$; IV – $\sigma_2 = \sigma_{zz}$, т.е. для режимов горизонтального сжатия, растяжения и сдвига соответственно.

Если бы горные массивы не имели дефектов прочности, то трещины сколов образовывались вблизи плоскости скалывания – точка С на диаграммах Мора и на верхних полусферах. Это были бы сопряженные пары трещин сдвига.

Поскольку в природных горных массивах множество дефектов в виде ранее существовавших и частично залеченных трещин, то в реальности трещины на диаграмме Мора попадают в полосу хрупкого разрушения. На полусферах они образуют семейства точек в виде областей, охватывающих одну из главных осей напряжений.

Как видно из рис. П.34 разброс полюсов трещин в виде конуса вокруг оси имеет место для состояний IIa, IIIa, IVa, IIIв, IVв. При этом только IIIв, IVв действительно является одноосным растяжением. Точно так же и конус полюсов трещин вокруг оси σ_3 имеет место для состояний IIб, IIIб. Эти состояния действительно являются одноосным сжатием. Таким образом, данных о распределении полюсов трещин на стереографической сетке хватает для определения осей главных напряжений, но их не достаточно для оценки вида тензора деформаций или напряжений [Расцветаев, 1987а, б].

Разрушение от растяжения и сжатия. Хорошо известно, что кроме трещин скалывания в горных породах существуют и трещины отрыва. Известно, что прочность горных пород на растяжения в десятки и даже сотни раз ниже прочности на сдвиг. Из-за этого существуют сложности даже в осуществлении экспериментов на выяснение предельных растягивающих напряжений, которые способна выдержать горная порода. Применяются различные ухищрения в виде

«бразильского способа» создания напряжений растяжения в цилиндрическом образце при его сжатии вдоль радиуса.

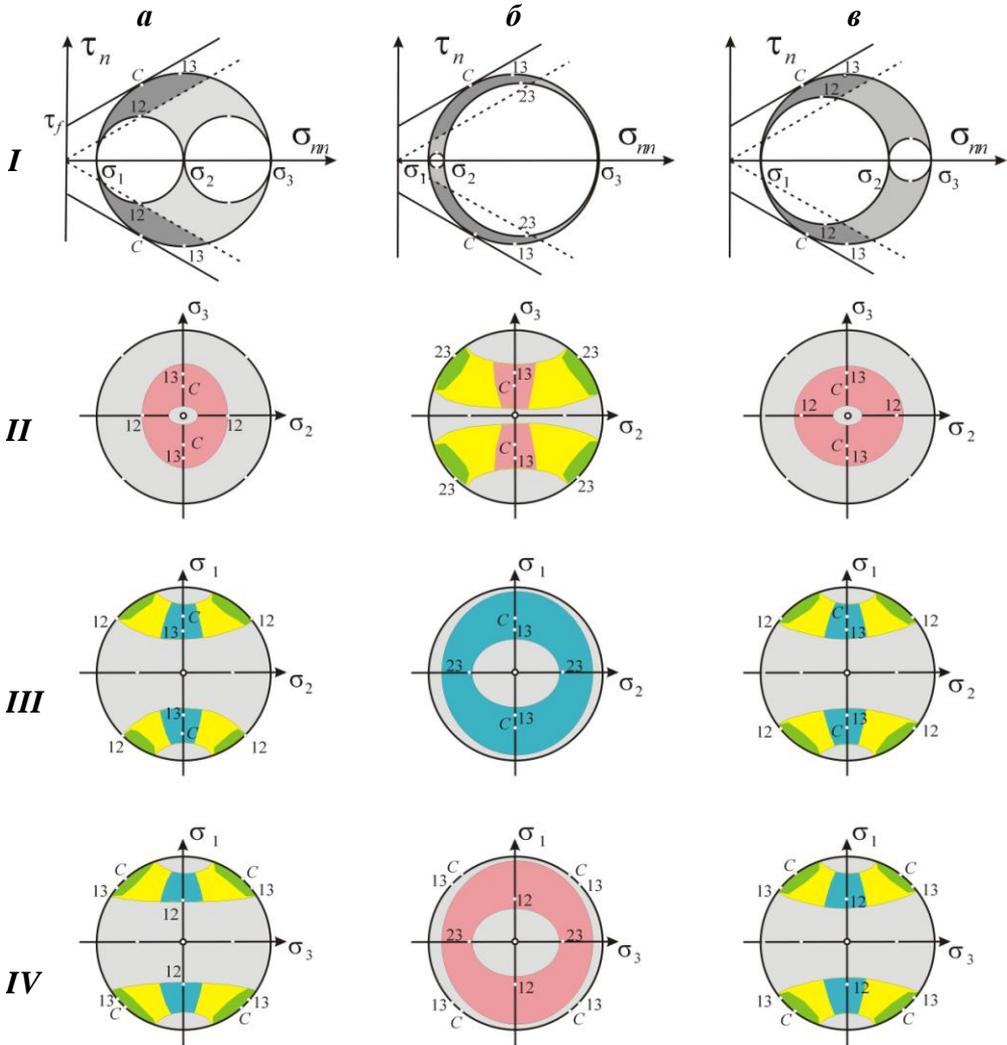


Рис. П.34. Взаимосвязь напряженных состояний, попадающих в полосу разрушения на диаграмме Мора (*I*) для трех разных видов тензора напряжений ($\mu_\sigma \rightarrow 0$, $\mu_\sigma \rightarrow +1$, $\mu_\sigma \rightarrow -1$), с расположением полюсов плоскостей, им отвечающих, на верхней полусфере.

Рассмотрены три варианта вертикальной ориентации осей одного из главных напряжений: *II* – вертикально σ_3 , *III* – вертикально σ_1 , *IV* – вертикально σ_2 . На полусферах области, где силы трения не дают возможности реализоваться сдвигу на трещине (области ниже пунктирной линии на диаграмме Мора – *I*) показаны светло-серой заливкой. Светло-красной заливкой выделены участки, где на трещинах реализуются взбросы, светло-синей – сбросы, светло-зеленой – сдвиги. Желтому цвету отвечают сочетания разных кинематических типов. На верхних полусферах показаны характерные точки 12, 13, 23, *C*, изображаемые на диаграмме Мора

В экспериментах по разрушению горных пород подобные трещины можно получить не только при приложении реально растягивающих напряжений. При создании в образце чистого сдвига возникают трещины, сочетающие сдвиг с компонентой отрыва. Также трещины отрыва возникают и при одноосном сжатии. При этом плоскость трещины отрыва параллельна осевой нагрузке (см. рис. П.35).

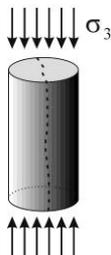


Рис. П.35. Формирование трещины отрыва (показана на видимой стороне образца) в эксперименте на одноосное сжатие без бокового обжатия

В совокупности эксперименты на растяжение, чистый сдвиг и одноосное сжатие позволяют на диаграмме Мора получить предельную поверхность вдоль участка горизонтальной оси, отвечающего положительным (растягивающим) напряжениям на плоскости формирующейся трещины (рис. П.36).

Из школьного курса физики мы вынесли представление, что конструкционные материалы (бетон, дерево, металлы) при обычном уровне всестороннего давления не разрушаются. Перенос этих представлений на горные породы оказывается неправильным. Все горные породы коры (осадочные, метаморфические, магматические) разрушаются при всестороннем давлении, и уровень этого давления вполне достижимо в условиях коры. Подобное поведение горных пород связано с их макро- и микроскопической неоднородностью, наличием внутренних пор и прочностных дефектов. Разрушение происходит в основном по границам зерен, по их угловым частям. В породе возникают зоны дробления, что способствует ее уплотнению.

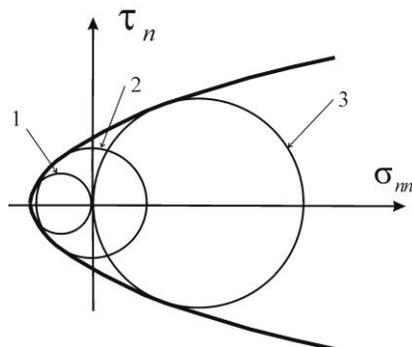


Рис. П.36. Предельная поверхность хрупкого разрушения, получаемая из экспериментов на одноосное растяжение (1), чистый сдвиг (2) и одноосное сжатие (3)

Разрушение горных пород, сопровождающееся уплотнением, требует повышенного уровня обжатия или высокой степени трещинно-порового разуплотнения. Наличие девиаторной компоненты напряжений обеспечивает возможность уплотнения при меньшем уровне всестороннего обжатия, что предопределяет соответствующий наклон предельной поверхности, отвечающей началу уплотнения – компакти (compaction), представленной на рис. П.37. Здесь диаграмма Мора изображена в виде параметрической плоскости для максимального касательного напряжения и эффективного (с учетом флюида)

всестороннего давления. Предельная поверхность хрупкой прочности для такой параметрической области именуется критерием Кулона – Мора.

Поскольку явление компакции в породах может происходить при наличии девиаторной компоненты тензора напряжений, то отмечено, что полосы компакции, как правило, возникают ортогонально оси максимального сжимающего напряжения.

Опыт изучения природной трещиноватости методами тектонофизики показал, что иногда встречаются локальные объемы горных пород, в которых формируется достаточно большое число зеркал скольжения, полюса которых субпараллельны оси максимального сжатия [Сим и др., 1987]. Это означает, что напряженные состояния плоскостей таких трещин попадают не в полосу дилатансии (хрупкого разрушения), а в полосу компакции (рис. П.37). Можно *предположить*, что механизм разрушения этих трещин несколько отличается от механизма, формирующего трещины скалывания в зоне дилатансии. Формирование таких трещин *возможно* при наличии в составе горных пород минералов, облегчающих скольжение, поэтому такие трещины, вероятно, следует отнести к трещинам пластического сдвига.

После завершения компакции геологическая среда достигает повышенной прочности и способна переходить в истинное пластическое состояние, когда необратимые деформации в большей части достигаются за счет образования и движения внутрикристаллических дислокаций. Зона активного уплотнения вместе с зоной дилатансии – это области трещинного деформирования геосреды, осуществляющиеся в разных масштабных уровнях.

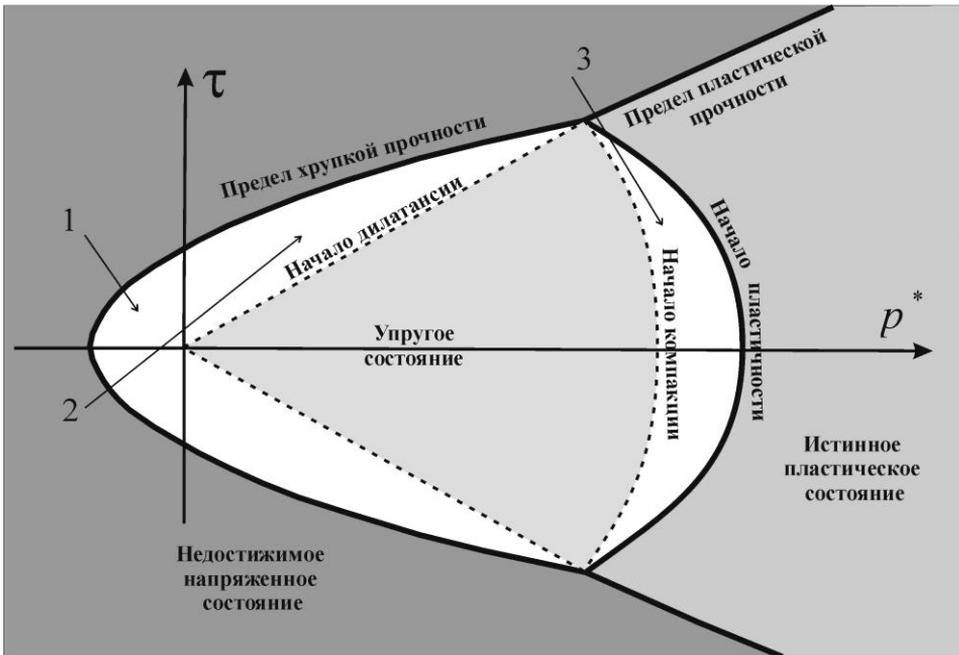


Рис. П.37. Предельные поверхности прочности, начала дилатансии, компакции и истинной пластичности. 1) область отрывного разрушения; 2) область дилатансии (макро- и мегатрещины – разрывы); 3) область компакции (микро и макроскопические трещины)

Предельная поверхность хрупкой прочности вместе с предельной поверхностью на стадии истинной пластичности ограничивают возможные напряженные состояния, которые могут существовать в геосреде.

П.4. Основные положения теории пластичности

Пластичность металлов. Изучение закономерностей связей между деформациями и напряжениями в процессе упругопластического деформирования металлов было начато в середине XIX века Треска и затем осуществлялось в большом числе экспериментальных работ. Эксперименты по деформированию при больших пластических деформациях легли в основу созданной в начале XX века теории пластичности. Основы теории первоначально создавались для объяснения пластических деформаций в металлах. В теории пластичности деформация рассматривается как макроскопически однородная, хотя она и ограничивается узкими полосами локализации – линиями скольжения.

Уравнения состояния. Изучение закономерностей развития необратимых деформаций и течения вязких и вязко-пластических материалов в их взаимосвязи с действующими напряжениями осуществляется в рамках реологии [Рейнер, 1962; Качанов, 1948, 1969; Работнов, 1979], формализованные соотношения, связывающие динамические (напряжения) и кинематические параметры (деформации, скорости деформаций), именуется уравнениями состояния.

Характер соотношения между компонентами тензоров напряжений и деформаций или приращений деформаций определяется не только интенсивностью напряженно-деформированного состояния, но и масштабом и диапазоном времени рассмотрения явления – деформационного процесса. Это связано с тем, что остаточные деформации могут формироваться не только за счет пластической составляющей (теория пластичности), представляющей мгновенную реакцию среды на приложенные выше предела упругости напряжения, но и за счет "ползучей" составляющей (теория ползучести), когда в среде возникают остаточные деформации за счет длительного действия напряжений, не превышающих предел упругости.

Надо иметь в виду, что истинной пластической именуется деформация, возникающие за счет движений вакансий и дислокаций в кристаллах. Накопление необратимых деформаций из-за микро- и макроскопических трещин в геомеханике связывают с псевдопластичностью (*semiplastic*). В тектонофизике трещинные деформации макро- и мегаскопического масштаба именуют катакластическими (*cataclastic*). Существует также термин квазипластическое деформирование (*semiplastic*), под которым понимают не только трещинные деформации, но и другие типы структур: кливаж, будинаж, стилолиты..... Говорят о трещинном катакластическом течении и о квазипластическом течении пород.

При решении задач механики в зависимости от необходимости могут использоваться различные модели состояний – от линейно-упругого и идеально пластического твердого тела до нелинейного упруго-вязкого. В наиболее общем виде зависимость между тензором напряжений и тензором деформаций для упругого тела (закон Гука) можно представить в виде

$$\varepsilon_{ij} = E_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (\text{П.52})$$

где E_{ijkl} – симметричный тензор упругих модулей, который в самом общем случае анизотропии упругих свойств имеет 21 компоненту.

В случае изотропного тела закон Гука принимает наиболее простую форму

$$\varepsilon_{ii} = \frac{1+\nu}{E} \left(\sigma_{ij} - \frac{3\nu}{1+\nu} \delta_{ij} \sigma \right), \quad \delta_{ij} = 0 \text{ при } i \neq j \text{ и } \delta_{ij} = 1 \text{ при } i = j. \quad (\text{П.53})$$

Здесь E , ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые определяют два важнейших для геофизики упругих модуля – сдвига и объемной упругости:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (\text{П.54})$$

Обычно для изотропного состояния указывают значения либо модулей упругости сдвига G и объема K , либо модуля продольной упругости E и коэффициента Пуассона ν .

Диаграмма упругопластического нагружения. В рамках современной теории пластичности для представления процесса упругопластического деформирования графически изображают зависимость между накапливающимися в процессе нагружения образца деформациями и действующими в этот момент напряжениями. Деформации при этом состоят из упругой и неупругой (пластической) частей. Данную диаграмму называют диаграммой деформирования или нагружения (рис. П.38).

На диаграмме нагружения выделяются три основных стадии: I стадия – упругого деформирования, не вызывающая остаточных деформаций после разгрузки (соотношения между напряжениями и деформациями для изотропного тела определяются выражениями (П.52)). II стадия – устойчивого упругопластического деформирования практически без упрочнения с упрочнением. На этой стадии идет накопление необратимых – остаточных деформаций при незначительном повышении или даже при стабильном уровне напряжений. Остаточными они именуются потому, что после разгрузки образец уже не принимает первоначальную форму.

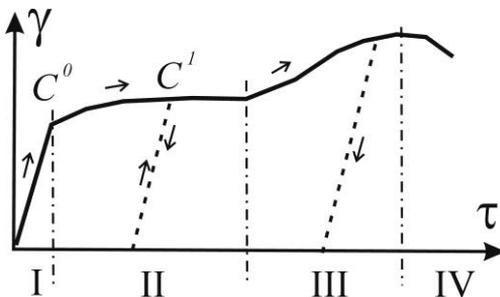


Рис. П.38. Диаграмма деформирования/нагружения (теор.) с упрочнением после достижения предела текучести, построенная для касательных напряжений и деформации сдвига.

Штрих-пунктир с точкой разделяет диаграмму на 4 зоны (см. текст). Стрелки показывают пути нагружения (сплошная линия) и разгрузки (пунктир). C^0 – начальный предел упругости (текучести), C^1 – предел упругости после разгрузки

Переход от стадии упругого деформирования к упруго-пластическому определяется достижением напряжениями предельных значений, определяемых выражением для условия (критерия) начала текучести. III стадия – устойчивого упругопластического деформирования с упрочнением. На этой стадии накопление остаточных деформаций происходит в условиях роста напряжений. IV стадия – локализация пластических деформаций, характеризуемая как стадия неустойчивости и сопровождающаяся падением напряжений при росте пластических деформаций (состояние пластической разгрузки).

Уменьшение величины активного напряжения (напряжения, определяющего характер деформационного процесса) на первой и второй стадиях деформирования, сопровождающееся уменьшением соответствующих деформаций, представляет собой состояние упругой разгрузки. Соответственно, состояние, в ходе которого происходит увеличение напряжений при одновременном увеличении деформаций, называют нагружением.

Если после разгрузки на II или III стадии произвести повторное нагружение, то оно будет идти вдоль линии разгрузки до уровня напряжений (точка C^1), где начался процесс разгрузки. Таким образом, закритическое деформирование приводит к повышению упругой стадии нагружения ($C^1 > C^0$).

Условие текучести и поверхность текучести. Наиболее известными условием текучести для металлов являются критерий Треска, определяющий в качестве предельных напряжений максимальные касательные напряжения:

$$\tau \leq \tau_c. \quad (\text{П.55})$$

Для грунтов, осадочных и кристаллических горных пород в качестве критерия перехода от упругого к упругопластическому поведению используется критерий текучести Кулон – Мора, связывающий между собой всестороннее давление и максимальные касательные напряжения:

$$\tau - k_c p \leq \tau_c \text{ при } p > 0, \quad (\text{П.56})$$

где k_c – скалярный коэффициент (коэффициент внутреннего трения в пластичности), а p – изотропное давление (П.16).

В соответствии с критерием (П.4) диаграммы деформирования, подобные рис. П.38, построенные для разных уровней всестороннего давления, имеют

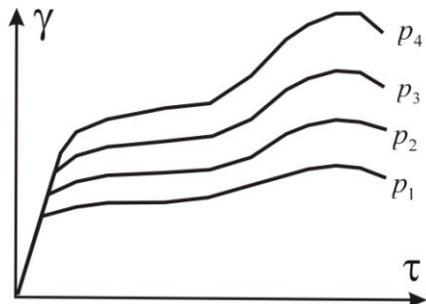


Рис. П.39. Диаграммы деформирования (теор.) образцов одной и той же породы, но при разных уровнях всестороннего давления $p_4 > p_3 > p_2 > p_1$

разные пределы текучести. С повышением всестороннего давления повышается уровень максимальных касательных напряжений, которые способна выдержать порода (рис. П.39).

Напряженные состояния участков тела, находящихся в области упругого состояния, на диаграмме Мора будут лежать ниже предельной линии (рис. П.37). Напряженные состояния, точки которых лежат на предельной линии, отвечают упруго-пластическому поведению горных пород, т.е. для них в породе формируются необратимые деформации. В случае упрочнения линии предела текучести будут перемещаться параллельно, расширяя зону упругого состояния.

Важные для тектонофизики энергетические критерии теории пластичности. В теории пластичности существует принцип положительности рассеяния – диссипации механической энергии в процессе упругопластического течения. В работах [Ребецкий, 1999, 2007] было показано, что из этого принципа следует:

$$d\varepsilon_{11}^p \geq 0 \quad , \quad d\varepsilon_{33}^p \leq 0. \quad (\text{П.57})$$

Из (П.56) следует, что необратимые деформации, возникающие в пластической среде, создают в направлении оси наибольшего сжатия σ_3 только укорочения, а в направлении алгебраически максимального главного напряжения σ_1 только деформации удлинения.

Если распространить это условие и на трещиноватую среду, полагая, что множество актов трещинных сдвигов создает катакластическое течение, подобное пластическому, то (П.57) определяет для каждой трещины сдвига направления возможной ориентации главных осей σ_1 и σ_3 (рис. П.40).

Условие (П.57) используется в ряде методов тектонофизической реконструкции природных напряжений (кинематический метод О.И. Гущенко, метод правых квадрантов Ж. Анжелье, МКА Ю.Л. Ребецкого).

В пластичности существует принцип максимума Мизеса, определяющий, что из всех возможных напряженных состояний, определяющих тензор напряжений, истинным будет тот, для которого имеет место максимальная диссипация (уменьшение) энергии упругих деформаций. В работе [Черных, 1988] показано, что фактическим следствием этого принципа является условие упорядоченности упруго-пластического деформирования:

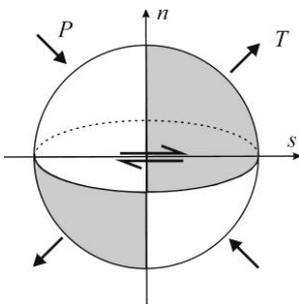


Рис. П.40. Накрест лежащие квадранты для трещины сдвига с нормалью n , в которых могут находиться оси главных напряжений.

В квадрантах серой заливки вдоль всех направлений, проведенных из центра сферы, в результате формирования трещины сдвига возникают необратимые деформации только удлинения. Поэтому согласно (П.57) здесь могут находиться оси σ_1 . В квадрантах белой заливки в подобных направлениях имеет место только укорочение, Здесь могут находиться оси σ_3 .

В сейсмологии плоскости с нормальми n и s – называют нодальными плоскостями механизма очага землетрясения, а оси, проходящие через центры квадрантов, осями сжатия P и растяжения T

$$(\sigma_i - \sigma_j)(d\varepsilon_{ii}^p - d\varepsilon_{jj}^p) \geq 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (\text{П.58})$$

Здесь σ_i – величины главных напряжений, а $d\varepsilon_{ii}^p$ – приращения пластических продольных деформаций в направлении осей главных напряжений ($i = 1, 2, 3$).

Условие (П.58) говорит о том, что, если в среде действует закритическое напряженное состояние, определяющее увеличение необратимых – пластических деформаций, то в направлении действия оси максимального сжатия σ_3 должны формироваться только деформации укорочения, а в направлении оси σ_1 – деформации удлинения. В направлении промежуточной оси σ_2 могут быть как деформации удлинения, так и деформации укорочения, но при этом должно выполняться правило:

$$d\varepsilon_{11}^p \geq d\varepsilon_{22}^p \geq d\varepsilon_{33}^p. \quad (\text{П.59})$$

Это крайне важное условие используется в МКА, при этом считается, что каждый акт хрупкого разрушения формирует приращение необратимых катакластических деформаций. Замечаем, что условия (П.59) включают в себя (П.57). При этом условие (П.59) накладывает большее ограничение на соотношение между ориентацией главных напряжений и параметрами единичного скола.

П.5. Теория поля в континуальной механике

Уравнения сохранения импульса силы (равновесия). До сих пор, описывая параметры тензора напряжений, мы использовали представление о напряженном состоянии в бесконечно малом объеме среды – точке. В случае неоднородного деформирования некоторого объема среды каждой точке отвечает свое напряженное состояние. Набор данных о напряженном состоянии соседних точек среды определяется как поле напряжений.

В тектонофизике часто ошибочно именуют полем напряжений данные о главных напряжениях, полученные для одного обнажения – макрообъема. Это неправильно. В случае наличия данных в одной точке их следует именовать как «стресс-состояние». Еще более неправильно употребление термина «поля напряжений» по отношению к набору данных о стресс-состояниях, полученных для совокупности обнажений. В этом случае можно употребить понятие поле напряжений к совокупности стресс-состояний, если они удовлетворяют базисным положениям механики – уравнениям равновесия.

Для сплошных сред устанавливается требование сохранения импульса сил в каждой точке пространства [Седов, 1983]. В ортогональной декартовой системе координат для квазистатического состояния деформирования, пренебрегая инерционными компонентами, можно записать три уравнения равновесия, связывающие шесть компонент тензора напряжений

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + F_z &= 0.
\end{aligned}
\tag{П.60}$$

где F_i – массовые силы в соответствующем направлении.

Если для выделенного объема среды компоненты тензора напряжений, записанные в одной ортогональной системе координат, удовлетворяют уравнениям равновесия, то это значит, что эти напряжения удовлетворяют понятию единого поля напряжений (stress field).

Иногда для локального участка коры (региона) тектонофизическими методами устанавливается, что здесь имело место несколько фаз напряженного состояния, для которых имеются совокупности данных о стресс-состояниях в разных обнажениях. В этом случае можно говорить, что для данного участка имеются данные о полях напряжений. В случае изображения на рисунках распределения по площади различных компонент напряженного состояния, например, осей главных напряжений, коэффициента Лоде – Надаи и др., следует говорить, что имеются карты полей компонент напряжений.

Поскольку одной из главных практических задач тектонофизики является определение ориентации главных осей напряжений, то заметим, что уравнения равновесия можно записывать не только в ортогональной прямоугольной системе координат. Если по данным об ориентации главных осей напряжений создать поле трех семейств траекторий (поле кривых линий, параллельных этим осям рис. П.41), то мы получим ортогональную криволинейную систему координат. В этой системе координат также можно записать уравнения равновесия [Новожилов, 1948]

$$\left[\sigma_{i,i} + \frac{H_{k,i}}{H_k} (\sigma_i - \sigma_k) \right] / H_i + F_i = 0, \quad i=1, 2, 3,
\tag{П.61}$$

где H_i – коэффициенты Ламе, характеризуют геометрию координатной сетки в криволинейной системе координат (нижний индекс после запятой показывает знак дифференцирования по соответствующей криволинейной координате, например, $H_{x,y} = \frac{\partial H_x}{\partial y}$).

Анализ уравнений равновесия, записанных в форме (П.61), показывает, что движение вдоль траектории главных напряжений, при котором расстояние между соседними траекториями увеличивается, определяет переход в участки коры с пониженным уровнем напряжений. Наоборот, сгущение траекторий главных напряжений определяет области повышенного уровня напряжений.

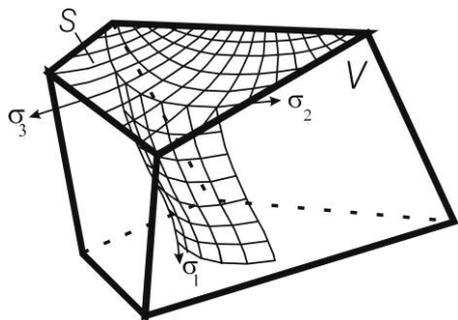


Рис. П.41. Пример построения в приповерхностном объеме коры (V) трехмерного поля траекторий главных осей напряжений, которые можно использовать при записи уравнений равновесия в криволинейной ортогональной системе координат – (П.60). S – поверхность коры

Таким образом, уравнения равновесия позволяют по имеющимся данным о параметрах эллипсоида напряжений (ориентация его главных осей и соотношение главных напряжений – коэффициент Лоде – Надаи μ_σ) оценить важные для геодинамики и физики очага землетрясения величины: изотропное давление p и максимальное касательное напряжение τ . В этом случае имеем три дифференциальных уравнения в частных производных для определения двух неизвестных величин. Задача является некорректной, но переизбыточность определяющих соотношений позволяет ставить задачу по нахождению оптимального решения. Такой подход позволяет уменьшить ошибку, вызываемую дифференцированием наблюдаемых данных, имеющих в свою очередь также некоторую ошибку определения.

Специально отметим, что *впервые использовать понятие поле напряжений* и его следствия (уравнения равновесия) для реконструкции величин напряжений было предложено в работе [Ребецкий, 1991].

В методе катакластического анализа разрывных смещений (см. главу 6) используется только одно из уравнений (П.61), определяющее сохранение импульса силы в вертикальном направлении [Ребецкий, 2003, 2007]. Это уравнение, вероятно, следует рассматривать как дающее наибольший вклад в напряженное состояние и стабилизирующее результаты расчета.

Идя вслед за этой работой [Ребецкий, 1991] в работах [Мухамедиев, 1991; Mukhamediev, Galybin, 2007] для определения величин напряжений также были привлечены уравнения равновесия. При этом считалось, что данные о значениях коэффициента Лоде – Надаи, получаемые по результатам реконструкции напряжений, недостоверны и поэтому из трех уравнений равновесия необходимо определить три параметра напряженного состояния: p , τ и μ_σ . Таким образом, в получаемом решении нет возможности сгладить ошибки определения исходных данных об ориентации осей главных напряжений, что привело авторов такого подхода к упрощению всей решаемой проблемы.

В работах этих авторов (см., например, [Мухамедиев, Галыбин, 2004]) стали рассматриваться плоские, двумерные задачи механики, т.е. считалось, что две оси главных напряжений идеально горизонтальны. В довершении серии примитизации обратной задачи сформулированной в работах [Ребецкий, 1991, 2003, 2007], по оценке величин напряжений А.Н. Галыбин в качестве исходных данных об ориентации осей главных напряжений использует данные об осях P и T механизмов очагов землетрясений так, как это делается в

работах М.-Л. Zoback. Заметим, что даже в этом случае определяются не сам величины напряжений, а их относительные значения.

В четвертой главе и в этой главе ранее мы разбирали ошибки такого подхода. Напомним главные из них: 1) считается, что горные породы разрушаются как металлы по площадкам действия максимальных касательных напряжений; 2) при переходе от трехмерно-ориентированных осей главных напряжений к определению направлений действия максимального и минимального горизонтального сжатия значение коэффициента Лоде – Надаи полагается равным нулю (тензор напряжений чистого сдвига). Таким образом, подход, развиваемый в работах А.Н. Галыбина, приводит к систематическим ошибкам в определении поля относительных значений p и τ .

Соотношения Коши для расчета деформаций. В механике для описания деформаций также используется понятие симметричного тензора второго ранга:

$$\varepsilon_{ii,jj} + \varepsilon_{jj,ii} - 2\varepsilon_{ij,ij} = 0 \text{ при } \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \text{ (} i, j = x, y, z \text{)}. \quad (\text{П.62})$$

Здесь ε_{ij} – компоненты тензора деформаций.

При малых деформациях для определения компонент тензора деформаций через перемещения используются соотношения Коши

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (\text{П.63})$$

$$\varepsilon_{xy} = 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{xz} = 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{yz} = 0.5 \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right). \quad (\text{П.64})$$

Здесь u_i ($i = x, y, z$) – компоненты вектора перемещений, рассчитанные в результате решения задач механики, или замеренные инструментальными методами в эксперименте (лабораторном или природном).

Следует иметь в виду, что компоненты тензора ε_{ii} ($i = x, y, z$) представляют собой продольные деформации в соответствующих направлениях. Три другие компоненты тензора деформаций ε_{ij} связаны с деформациями сдвига γ_{ij} ($i \neq j$) следующими простыми соотношениями:

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}, \quad \gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz}, \quad \gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz}. \quad (\text{П.65})$$

В разделе П.2 было показано, как определить среднее вращение макрообъема π_z (в данном случае вращение в плоскости ортогональной оси z) по данным об углах поворота двух взаимно ортогональных (до начала деформирования) линий, см. выражение (П.44). Если известно поле вектора перемещений, то компоненты тензора вращения

$$\boldsymbol{\pi} = \begin{vmatrix} \pi_z & 0 & 0 \\ 0 & \pi_z & 0 \\ 0 & 0 & \pi_z \end{vmatrix} \quad (\text{П.66})$$

определяются следующим образом:

$$\pi_x = 0.5 \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial y} \right), \quad \pi_y = 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right), \quad \pi_z = 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right). \quad (\text{П.67})$$

Здесь π_i ($i = x, y, z$) – компоненты вектора (тензора) вращения $\boldsymbol{\pi}$.

Модуль (амплитуда) вращения макрообъема определится из выражения:

$$|\boldsymbol{\pi}| = \sqrt{\pi_x^2 + \pi_y^2 + \pi_z^2}, \quad (\text{П.68})$$

Таким образом, существует два способа расчета среднего вращения: по данным о поле смещений и по данным о поворотах прямолинейных линейментов.

Уравнения неразрывности деформаций. Для сплошных сред устанавливается требование сохранения неразрывности деформирования, выражающееся в выполнении следующих трех дифференциальных уравнений второго порядка [Седов, 1983]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} &= 0, \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial x \partial z} &= 0, \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (\text{П.69})$$

Последние уравнения называют также уравнениями совместности деформаций. Они не выполняются вблизи разрыва (дифференцирование через разрыв). Если подставить (П.63) в (П.65), легко увидеть, что уравнения неразрывности деформаций выполняются тождественно. Таким образом, в решениях задач механики уравнения (П.65) выполняются автоматически.

В геофизике с использованием различных инструментов получают данные о латеральных деформациях на поверхности. Для того, чтобы совокупность этих отдельных измерений удовлетворяла понятию поля деформаций, необходимо выполнение уравнения неразрывности латеральных деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

- Aki K. Scaling law of earthquake source time-function // *Geophys. J. MNRAS*. 1972. N 31. P. 3-25.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting. *Trans. Edinburgh, Geol.* 1951. Sec (8). P. 387-402.
- Angelier J. Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites failles: l'utilite d'une confrontation entre les methods dynamiques et cinematiques // *Bull/Soc. Geol. France*. 1975a. V. 281. P. 1805-1808.
- Angelier J. Sur un apport de l'informatique a l'analyse structurale; Exemple de la tectonique cassante // *Revue de Geogr. Phys. Et de Geol. Dyn.* 1975b. V. XVII. Fasc. 2. P. 137-146.
- Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets // *Geophys. Res.* 1984. N 89. B7. P. 5835-5848.
- Angelier J., Goustchenko O.I., Rebetsky Y.L., Saino A., Ilyin A., Vassiliev N., Malutin S. Relationships between stress fields and deformation along a compressive strike-slip belt: Caucasus and Crimea (Russia and Ukraine) // *C. R. Acad. Sci. Paris*. 1994. V. 319, S. II. P. 341-348.
- Angelier J., Mechler P. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisable en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits // *Bul. Soc. Geol. France*. 1977. V. XIX, N 6. P. 1309-1318.
- Angelier J., Tarantola A., Valette B., Manoussis S. Inversion field data in fault tectonics to obtain the regional stress - I. Single phase fault populations: a new method of computing the stress tensor // *Geophys. J. Res. astr. Soc.* 1982. V. 69. P. 607-621.
- Arthaud F. Methode de determination graphique des directions de raccourcissement, d'allogement et intermediaire d'une population de failles // *Bul. Soc. geol. Fr.* 1969. V. 7, XI. P. 729-737.
- Bankwitz P. über Klüfte. 2. Die Bildung der Klüftflaeche und eine systematische ihrer Strukturen // *Geologie*. 1966. Bd. 15. S. 896-941.
- Bankwitz P., Bankwitz E. Die Symmetrie von Klüftoberflaechen und ihre Nutzung für eine Palaeospannunganalyse // *Ztschr. Geol. Wiss.* 1984. Bd.12. S. 305-334.
- Becker G.F. Finite homogeneous strain flow and rupture of rocks // *Bull. Geol. Soc. America*. 1893. V. 4.
- Bott M.H.P. The mechanics of oblique slip faulting // *Geol. Mag.* 1959. N 96. P. 109-117.
- Brace W.F. Volume changes during fracture and frictional sliding // *A Rev. Pure and Applied geoph.* 1978. V. 116. P. 603-614.
- Brune J. Seismic moment, seismicity and rate slip along major fault zones // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73, N 2. P. 777-784.
- Byerlee J.D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72, N 14. P. 3639-3648.
- Byerlee J.D. Friction of Rocks // *Pure and applied geophys.* 1978. V. 116. P. 615-626.
- Carey E., Bruneier B. Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles // *C. R. Acad. Sci. Paris. D.* 1974. V. 279. P. 891-894.
- Carey-Gailhardis E., Mercier J.L. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan

- teleseismic and microseismicity of Southern Peru // *Earth and Plan. Sci. Let.* 1987. V. 82. P. 165-179.
- Cloos H. Zur experimentellen Tektonik. Methodik und Beispiele. *Naturwissenschaften*, Jahrg. 1930. 18, H. 34. P. 741-747.
- Devaluxe D., Moyes R., Stapel G. et al. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // *Tectonophysics*. 1997. V. 282. P. 1-38.
- 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, N B11. P. 9305-9320.
- Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // *J. Struct. Geol.* 1985. V. 7, No. 3/4. P. 437-457.
- Handin J. On the Colombo – Morh failure criterion // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74, No 22. P. 5343-5348.
- Hardebeck J.L., Hauksson E. Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N B10. P. 21859-21882.
- Huber K., Fuchs K., Palmer J. et al. Analysis of borehole televiewer measurements in the Vorotilov drillhole, Russia – first results // *Tectonophysics*. 1995. 997. V. 275, Is. 1-3. P. 261-272.
- Hung Q., Angelier J. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress - II. Using conjugate fault sets within heterogeneous families for computing paleostress axes // *Geophys. J.* 1989. No 96. P. 139-149.
- Lisle R. Principal stress orientation from faults: an additional constrain // *Ann. Tectonicae*. 1987. No 1. P. 155-158.
- Lisle R. New method of estimating regional stress orientations: application to focal mechanism data of recent British earthquakes // *Geoph. J. Int.* 1992. V. 110. P. 276-282.
- Marrett R., Allmendinger R. 1990. Kinematic analysis of fault-slip data // *Journal of Structural Geology*. V. 12. P. 973-986.
- Mas D., Chemenda A.I. An experimentally constrained constitutive model for geomaterials with simple friction dilatancy relation in brittle to ductile domains // *Int. J. Rock Mech.&Min. Sci.* 2015. V. 77. P. 257-264.
- McKenzie Dan P. The relation between fault plane solutions for earthquakes and directions of the principal stresses // *Bull. of the Seism.Society of America*. 1969. V. 59, No 2. P. 591-601.
- Mercier J., Carey E., Philip H., Sorel D. La neotectonique de l'arc egeen externe et de la mer Egee et ses relations avec la seismicite // *Bul. Soc. Geol .France*. 1976a. V. XVIII, No 2. P. 355-372.
- Mercier J., Vergely P., Delibassis N. Comparison entre les deformations deduites de l'analyse des failles recentes et des mecanismes au foyer des seismes (un exemple: la region de Paphos, Chypre) // *Tectonophysics*. 1976b. V. 19. P. 315-332.
- Mises R. von Z. *Angew // Math. Mech.* 1928. V. 8. P. 161-185.
- Mogi K. Deformation and fracture of rocks under confining pressure (2) compression test on dry rock sample // *Bul. Earth. Res. In. Univ. Tokyo*. 1964. V. 42, Part 3. P. 491-514.
- Mohr O.Z. *Ver. Deut. Ingr.* 1900. V. 44. P. 1524-1530.

- Mukhamediev Sh.A., Galybin A.N. Determination of Stresses from the Stress Trajectory Pattern in a Plane Elastic Domain // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2007. V. 12. P. 75-106.
- Rebetsky Yu.L. I. Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations // *Journal of earthquake prediction research*. Beijing, China. 1996. V. 5, No 4. P. 557-573.
- Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rosanova G.V., Fursova E.V. II. Stress-monitoring: The modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deforming of fractured media // *Journal of earthquake prediction research*. Beijing, China. 1997. V. 6, No 1. P. 11-36.
- Rebetsky Yu. Methodical problems and techniques of reconstruction of tectonic stresses and seismotectonic deformations using the slip fault analysis // *Annales Geophysicae*. 1998. V. 16, Part 1, Supl. 1. P. 28.
- 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.
- Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K. The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Tectonophysics*. 2016. V. 685. P. 60-76.
- Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // *Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol. Abt. B*. 30. 1929. S. 354-368.
- Rummel F., Alheid H.J., Frohn C. Dilatancy and fracture Induced velocity changes in rock and their relation to friction sliding // *Pure and App. Geophys.* 1978. V. 116. P. 743-764.
- Simpson R.W. Quantifying Anderson' fault types // *JGR*. 1997. V. 102, No B8. P. 17,909-17,919.
- Smaglichenko A.V., Sim L.A., Gorbatikov A.V. A complexity of the displacement along segments of the Akhtyrskiy fault // *Emergency, Complexity, Computations*. Book series. Verlag Berlin Heidelberg. Springer Publisher. 2014. V. 8. P. 395-400.
- Stesky R.M. Rock friction-effect of confining pressure, temperature, and pore pressure // *Pure App. Geophys.* 1978. V. 116. P. 691-704.
- Sylvester G. Strike-slip faults // *Geol. Soc. Am. Bull.*. 1988. V. 100, No 31. P. 1666-1703.
- Tchalenko J.S. The influence of shear and consolidation on the microscopic structure of some clays. Ph. D. Thesis. Lond. Univ. 1967.
- Wallace R.E. Geometry of shearing stress and relation to faulting // *J. Geol.* 1951. No 59. P. 18-130.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bul. Seism. Soc. Amer.* 1994. V. 84, No 4. P. 974-1002.
- Xu Z., Suyun W., Yurui H., Ajia G. Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquake // *J. Geophys. Res.* 1992 V. 97, N B8. P. 11867-11878.
- Zoback M.-L., Zoback M.D., Adams J. Global patterns of tectonic stress nature // *Nature*. 1989. V. 341, No 6240. P. 211-215.
- Zobak M.-L. First- and second modern pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97, No B8. P. 11703-11728.
- Ажгирей Г.Д. Структурная геология. М.: МГУ. 1956. 493 с.

- Аптекман Ж.Я., Захарова А.И., Кронрод Т.Л., Чепкунас Л.С. Представление данных о механизме очагов землетрясений. Введение международного формата. Землетрясения в СССР в 1985 г. М.: Наука. 1988. С. 11-15.
- Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: Академкнига. 2003. 374 с.
- Балакина Л.М. Общие закономерности в направлениях главных напряжений, действующих в очагах землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Изв. АН СССР, Сер. геофиз. 1962. № 1. С. 1471-1483.
- Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева И.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука. 1972. 192 с.
- Банквитц П. Интерпретация следов разрушения на поверхностях трещин в связи с реконструкцией палеонапряжений // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 266-281.
- Батдорф С.Б., Будянский Б. Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения. Изд. Ин.лит. Механика. 1961. Т. 171, № 1. С.24-29.
- Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М.: Госгеолтехиздат. 1954. 606 с.
- Бокун А.Н. Некоторые закономерности образования разрывных зон в осадочном чехле при погружении блоков фундамента (по результатам физического моделирования) // Эксперим. тектон. и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка. 1991. С. 112-120.
- Бокун А.Н. Закономерности образования и особенности строения зон горизонтального сдвига (по результатам физического моделирования // Физика Земли. 2009. № 11. С. 69-78.
- Борняков С.А. Моделирование сдвиговых зон на упруговязких моделях // Геология и геофизика. 1980. № 11. С. 75-84.
- Борняков С.А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруго-вязкой модели. В кн.: Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука. 1981.
- Борняков С.А. Динамика развития деструктивных зон межплитных границ (результаты моделирования) // Геология и геофизика. 1988. № 6. С. 3-10.
- Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Иностран. Лит. 1955. 444 с.
- Введенская А.В. К дискуссии по поводу теоретической модели очага землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 2. С. 261-263.
- Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука. 1969. 136 с.
- Вистелиус А.Б. Структурные диаграммы. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1958. 158 с.
- Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ. 2012.
- Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР, Сер. геофиз. 1954. № 5. С. 390-410.
- Гзовский М.В. Моделирование тектонических процессов // Проблемы тектонофизики. М.: Госгеолтехиздат. 1960. С. 315-344.
- Гзовский М.В. Математика в геотектонике. М.: Недра. 1971. 240 с.
- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.

- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс. 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б., Исая В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов // Геофиз. журн. 1984а. Т. 6, № 3. С. 3-10.
- Гинтов О.Б., Исая В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов. // Геофиз. журнал. 1984б. Т. 6, № 4. С. 3-14.
- Гинтов О.Б., Исая В.М. Методы морфокинематического анализа разломов // Геофиз. журн. 1986. Т. 8, № 1. С. 53-61.
- Гудман Р. Механика скальных пород. М.: Стройиздат. 1987. 232 с.
- Гущенко О.И. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // ДАН СССР. 1973. Т. 210, № 2. С. 331-334.
- Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. 1975. Т. 225, № 3. С. 557-560.
- Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 7-25.
- Гущенко О.И. Кинематический метод определения параметров напряжений и характеристика их связей с тектоническими движениями по разрывам разных структурных уровней // Автореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. М.: 1981. 21 с.
- Гущенко О.И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения (в связи с прогнозом сейсмической опасности) // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Апатиты: 1982. С. 35-52.
- Гущенко О.И. Сейсотектонический стресс-мониторинг литосферы (структурно-кинематический принцип и основные элементы алгоритма) // Доклады РАН. 1996. Т. 346, № 3. С. 399-402.
- Гущенко О.И. Кинематический принцип относительной хронологии палеонапряжений (основной алгоритм тектонического стресс-мониторинга литосферы) // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. Тр. ГИН РАН. 1999. Вып. 515. С. 108-125.
- Гущенко О.И., Сим Л.А. Обоснование метода реконструкции напряженного состояния земной коры по ориентировкам сдвиговых тектонических смещений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Механика литосферы, тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ., 23-25 октября 1974. Л.-М.: 1974. С. 5-8.
- Гущенко О.И., Степанов В.В., Сим Л.А. Направления действия современных мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей юга Евразии // ДАН СССР. 1977. Т. 234, № 3. С. 556-559.
- Гущенко О.И., Кузнецов В.А. Определение ориентаций и соотношения величин главных напряжений по совокупности направлений сдвиговых тектонических смещений // Поля напряжений в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 60-66.
- Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. М.: Наука. 1971. 231 с.
- Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Гос. Техн. Изд-во. 1948. 375 с.

- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 260 с.
- Качанов Л. М. Механика пластических сред. ОГИЗ Гос. Изд. Тех.-Теор. Лит. Л.: М.: 1948. 215 с.
- Качанов Л. М. Некоторые вопросы теории ползучести. ОГИЗ Гос. Изд. Тех.-Теор. Лит. Л.: М.: 1948. 215 с.
- Кирмасов А.Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир. 2011. 368 с.
- Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука. 1975. 176 с.
- Кочарян Г.Г. Масштабный эффект в сеймотектонике // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, Вып. 2. С. 353–385.
- Кузнецова К.И., Багманова Н.Х., Матасова Л.М., Михайлова Р.С., Муралиев А.М., Сейдузова С.С., Соболева О.В. Совокупность сейсмологических параметров и современные тектонические движения в Альпийском складчатом поясе. Части I, II // Изв. РАН, Физика Земли. 1995. № 10. С. 26-46.
- Лаврищев В.А., Греков И.И., Башкиров А.Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Кавказская, лист К-37-IV. Объяснительная записка. СПб: 1999. 105 с.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Коряжского (Хаилинского) землетрясения 8 марта 1991 г. в контексте проблемы существования современной плиты Берингии // Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып. 1. М.: 1993. С. 74-88.
- Лобацкая Р.М. Зоны динамического влияния разломов по анализу сопутствующих разрывов // Геология и геофизика. 1983. № 6. С. 53-61.
- Лобацкая Р.М. Дискретная зональность внутренней структуры разрывных нарушений. // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука. 1985. С. 266-275.
- Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. М.: Недра. 1987. 127 с.
- Лукк А.А., Юнга С.Л. Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Дониш. 1988. 230 с.
- Лукиянов А.В. Горизонтальные движения по разломам, происходящие при современных катастрофических землетрясениях // Разломы и горизонтальные движения земной коры. М.: Изд-во АН СССР. 1963. С. 34-113.
- Лукиянов А.В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. Тр. ГИН АН СССР. Вып. 136. М.: Наука. 1965. 212 с.
- Лукиянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение горных пород литосферы // В кн. «Тектоническая расслоенность литосферы». Тр. ГИН АН СССР, Вып. 343. М.: Наука. 1980. С. 105-146.
- Лукиянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М.: Наука. 1991. 144 с.
- Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ. 2008. С. 191-224.
- Милановский Е.Е., Расцветаев Л.М., Кухмазов С.У., Бирман А.С., Курдин Н.Н., Симако В.Г. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской зоны Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Недра. 1989. С. 99-105.

- Михайлова А.В. Геодинамические характеристики структур, образовавшихся в слое над активными разломами фундамента (по данным тектонофизического моделирования) // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сб. Трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского, 2-4 марта 2006, Москва. М.: ИНТЕК-ГЕОН, ГЕРС. 2007. С. 111-118.
- Михайлова А.В. Геодинамические характеристики структур, образовавшихся в слое над активными разломами фундамента (по данным тектонофизического моделирования) // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сб. Трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского, 2-4 марта 2006, Москва. М.: ИНТЕК-ГЕОН, ГЕРС. 2007. С. 111-118.
- Мишарина Л.А., Солоненко Н.В., Леонтьева Л.Р. Локальные тектонические напряжения в Байкальской рифтовой зоне по наблюдениям групп слабых землетрясений. // Байкальский рифт. Новосибирск: Наука. 1975. С. 9-21.
- Мухамедиев Ш.А. К проблеме восстановления поля тензора напряжений в блоках земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 5. С. 29-38.
- Мухамедиев Ш.А. Реконструкция тектонических напряжений по разрывным сдвиговым смещениям: математические и физические ограничения // Доклады РАН. 1993. Т. 331, № 4. С. 500-503.
- Мухамедиев Ш.А., Галыбин А.Н. Решение плоской задачи теории упругости при заданных траекториях главных напряжений // Доклады РАН. 2004. Т. 396, № 1. С. 56-59.
- Надаи А. Пластичность. М.-Л.: Мир. 1936. 280 с.
- Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир. 1969. Т. 2. 863 с.
- Никитин Л.В., Юнга С.Л. Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1977. № 11. С. 54-67.
- Николаев П.Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений // Изв. ВУЗов. Геология и разв. 1977. № 12. С. 103-115.
- Николаев Н.П. Возможные пути использования системного подхода в геотектонике // История и методология естественных наук. Вып XXXIII. Геологи. М.: Изд. МГУ. 1987. С. 27-35.
- Николаев П.Н. Методика тектоно-динамического анализа. М.: Недра. 1992. 295 с.
- Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. М.-Л.: 1948. 211 с.
- Оберт Л. Хрупкое разрушение горных пород. В кн. Разрушение. Т 7. М.: Мир. 1976. С. 59-128.
- 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. 1987а. С. 120-135.
- Осокина Д.Н. Об иерархических свойствах тектонического поля напряжений // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987б. С. 135-151.
- Осокина Д.Н. Исследование механизмов деформирования массива в зоне разрыва на основе изучения трехмерного поля напряжений (математическое моделирование) // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 220-245.
- Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 74-119.

- Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Изучение локального поля напряжений и прогноз вторичных нарушений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений с учетом третьего главного напряжения // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979а. С. 163-184.
- Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Метод моделирования локальных полей напряжений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979б. С. 139-162.
- Очеретенко И.А., Трощенко В.В. Стереографические проекции в структурной геологии. Л.: Недра. 1978. 135 с.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика Юго-Западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Гео. 2006. 149 с.
- Парфенов В.Д. Анализ напряженного состояния в ангидритовых тектонитах // ДАН СССР. 1981. Т. 260, № 3. С. 695-698.
- Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. №1, С. 60-72.
- Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. 744 с.
- Расцветаев Л.М. Опыт палеодинамического анализа Келятской антиклинали (Восточный Копетдаг) // Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ. 1969. С. 40-59.
- Расцветаев Л.М. Некоторые особенности позднеальпийской структуры орогенических областей юга СССР и тектонические напряжения новейшего времени // Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ. 1973. С. 57-107.
- Расцветаев Л.М. Горный Крым и Северное Причерноморье // Разломы и горизонтальные движения горных сооружений СССР. М.: Наука. 1977. С. 95-112.
- Расцветаев Л.М. Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация // ДАН СССР. 1982. Т. 267, № 4. С. 904-909.
- Расцветаев Л.М. Некоторые общие модели дизъюнктивной тектонической деформации // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука. 1985. С. 118-127.
- Расцветаев Л.М. Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений и деформаций земной коры // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987а. С. 171-181.
- Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР. 1987б. Ч. 2. С. 173-235.
- Расцветаев Л.М. Содвиговые парагенезы в ансамбле коллизионных структур. В кн.: Структурные парагенезы и их ансамбли. М.: ГЕОС. 1997. С. 136-140.
- Расцветаев Л.М. Некоторые актуальные проблемы структурной геологии и тектонофизики. В кн.: Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 333-373.
- 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. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: 1987. С. 41-56.

- Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном сдвиге // Известия АН СССР. Физика Земли. 1988. № 9. С. 29-35.
- Ребецкий Ю.Л. Восстановление величин главных напряжений в земной коре по полю их траекторий // Известия АН СССР, Физика Земли. 1991. № 5. С. 24-25.
- Ребецкий Ю.Л. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии Океании // ДАН. 1997. Т. 354, № 1. С. 101-104.
- Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // ДАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392-395.
- Ребецкий Ю.Л. Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 227-243.
- Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин // Дис. док. физ.мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ. 2003а. 455 с.
- Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. 2003б. Т 400, № 3. С. 237-241.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига. 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л. Разлом – особое геофизическое тело земной коры // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В.Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы Всероссийской конференции 13-17 октября 2008 г. М.: Изд. ИФЗ РАН. 2009. Т. 2. С. 123-131.
- Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 70-84.
- Ребецкий Ю.Л. Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, Вып. 4. С. 437-466.
- Ребецкий Ю.Л., Фурсова Е.В. Современное напряженное состояние Юго-Восточной Азии и Океании: метод квазипластического анализа // Тезисы докладов “Структура верхней мантии Земли”. М.: ГЕОС. 1997. С. 83.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 // Доклады РАН. 2006а. Т. 407, № 1. С. 106-110.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006б. Т. 47, № 11. С. 1192-1206.
- Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В. Роль сил гравитации на формирование структур разрушения в глубине зон сдвига // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т 2, Вып. 1. С. 46-67.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 2. С. 271-291.

- 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., Михайлова А.В. Глубинная неоднородность напряженного состояния зон горизонтального сдвига // Физика Земли. 2014. № 6. 108-123.
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика 2014. Т. 5, Вып. 2. С. 469-506.
- Ребецкий Ю.Л., Лермонтова А.С. О масштабируемости трещин сдвига в геологической среде // Материалы конференции «Триггерные эффекты в геосистемах». М.: 2015. С. 174-181.
- 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 КНЕТ // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 3. С. 496-520.
- Рейнер М. Феменологическая макрогеология. В книге Реология. М. Изд. иностр. лит. 1962. С. 22-85.
- Ризниченко Ю.В. О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры. М.: Наука. 1965. С. 56-63.
- Ризниченко Ю.В. Расчет скоростей деформаций при сейсмическом течении горных масс // Изв. АН СССР, Физика Земли. № 10. 1977. С. 34-47.
- Родыгин А.И. Методы стрейн-анализа. Учебное пособие. Томск, Томский университет, 1996. 170 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.
- Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука. 1983. Т. 1. 528 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Новосибир.: Изд. СО РАН филиал Гео. 2003. 242 с.
- Сим Л.А. Выявление новейших активизированных разломов в условиях слабообнаженных районов (на примере зоны сочленения Мезенской синеклизы и Среднего Тимана). Атореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. М.: 1980. 24 с.
- Сим Л.А. Определение регионального поля напряжений по данным о локальных полях напряжений на отдельных участках (на примере зоны сочленения Мезенской синеклизы и Среднего Тимана) // Изв. ВУЗов. Геол. и разв. 1982. № 4. С. 35-40.
- Сим Л.А., Васильев Н.Ю., Корчемагин В.А., Емец В.С. Поля напряжений и формирование структур рудных полей. В сб. «Поля напряжений и деформаций в земной коре». М.: Наука. 1987. С. 159-163.
- Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3-22.
- Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 326-350.
- Сим Л.А. Полевые методы реконструкции тектонических напряжений // Современная тектонофизика. Методы и результаты. М-лы 1-й молодежной тектонофизической школы-семинара, 21-24 сент. 2009, ИФЗ РАН, Москва. М.: ИФЗ РАН. 2009. С. 277-287.

- Сим Л.А. Применение полевых методов реконструкции тектонических напряжений по данным о разрывах для решения теоретических и практических задач // Современная тектонофизика. Методы и результаты. М-лы Второй молодежной тектонофиз. школы-семинара 17-21 окт. 2011г., ИФЗ РАН, г. Москва. М.: ИФЗ РАН. 2011. Т. 2, Лекции. С. 156-171.
- Сим Л.А., Корчемагин В.А., Рапопорт А.Б. Значение тектонофизических исследований в решении практических задач // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. М-лы конф., г. Москва, 7-10 окт. 2008. М.: 2008. С. 277-281.
- Сим Л.А., Маринин А.В. Методы полевой тектонофизики по определению палеонапряжений // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ. 2015. Т. 2. С. 47-76.
- Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Маринин А.В. Особенности палео- и современных напряжений Северного Тянь-Шаня // Физика Земли. 2014. № 3. С. 127-141.
- Сим Л.А., Юрченко О.С., Сироткина О.А. Тектонические напряжения северных частей Урала // Геофизический журнал. 2005. Т. 27, № 1. С. 110-120.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра. 1992. 223 с.
- Степанов В.В. Количественная оценка тектонических деформаций // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 67-71.
- Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра. 1977. 144 с.
- Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат. 1961. 507 с.
- Трифонов В.Г. Позднеальпийская структура Северного Прибалашья и её происхождение. Тр. ГИН АН СССР, Вып. 175. М.: Наука. 1967.
- Трифонов В.Г. Позднечетвертичные разрывные нарушения Западной и Центральной Азии по данным дешифрирования аэрокосмических снимков и наземным наблюдениям. Изв. ВУЗ, геол. и разв. 1976. № 1.
- Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука. 1983. 224 с.
- Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС. 2002. 224 с.
- Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука. 1978. 256 с.
- Чиков БМ. Основы методологии тектонического районирования. Новосибирск: Наука. Сиб.отд. 1985. 166 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А. Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосиб.: СО Наука. 1983. 112 с.
- Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука. 1977. 102 с.
- Штейнберг В.В. О параметрах очагов и сейсмическом эффекте землетрясений // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1983. № 7. С. 49-63.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высш. шк. 1979. 271 с.
- Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1979. С. 14-23.

- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука. 1990. 190 с.
- Яковлев Ф.Л., Маринин А.В., Сим Л.А., Гордеев П.П. Поля тектонических напряжений и поля деформаций Воронцовского покрова (Северо-Западный Кавказ) // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ. 2008. С. 319-333.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Разрывы и геологические индикаторы тектонических напряжений (классификация)	9
1.1. Разрывы	9
1.1.1. Элементы разрыва	10
1.1.2. Основные параметры разрыва	13
1.2. Геологические индикаторы тектонических напряжений	25
1.2.1. Геологические индикаторы сдвига (мех.)	26
1.2.2. Геологические индикаторы растяжения	29
1.2.3. Геологические индикаторы сжатия	32
Глава 2. Измерение и создание базы данных геологических индикаторов тектонических напряжений (обзор истории вопроса)	36
2.1. Обзор способов полевой документации зеркал скольжения	36
2.1.1. Система измерений и записи в кинематическом методе	36
2.1.2. Система записи в структурно-парагенетическом методе	38
2.1.3. Другие системы записи	40
2.2. Полевая документация зеркал скольжения	40
2.2.1. Основные сведения при полевом изучении зеркал скольжения ..	40
2.2.2. Дополнительные сведения при изучении зеркал скольжения ..	43
2.3. Создание базы данных по геологическим индикаторам напряжений ..	44
Глава 3. Анализ полевых данных	46
3.1. Основные способы графического представления данных	46
3.2. Сферические проекции в структурной геологии	48
3.2.1. Стереографическая (равноугольная проекция)	48
3.2.2. Равновеликая (равноплощадная) проекция	54
3.3. Статистические круговые диаграммы	55
3.4. Практические занятия по нанесению и обработке полевых данных на стереографических сетках (палетках)	56
3.4.1. Построение проекции прямой линии по сетке Вульфа	56
3.4.2. Построение проекции прямой линии по сетке Болдырева	57
3.4.3. Построение проекции плоскости по сетке Вульфа	58
3.4.4. Построение проекции полюса плоскости по сетке Вульфа	59
3.4.5. Построение проекции полюса плоскости по сетке Болдырева ..	60
3.4.6. Построение проекции линейных элементов плоскостей (векторов перемещений на плоскостях зеркал скольжения) по сетке Вульфа	61
3.5. Представление полевых геологических данных и результатов реконструкции тектонических напряжений	62

Глава 4. Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и катакластических деформаций по совокупностям сколовых трещин.	66
4.1. Методы структурного анализа.	66
4.2. Методы квазипластического анализа.	78
Глава 5. Кинематический метод реконструкции палеонапряжений	
О.И. Гущенко	91
5.1. Основные положения метода.	91
5.2. Практические приемы использования кинематического метода для реконструкции палеотектонических напряжений.	92
5.2.1. Нанесение векторов перемещений на стереограммы палеотектонических напряжений	92
5.2.2. Определение параметров главных напряжений.	96
5.3. Определение общего поля напряжений по данным локальных стресс-состояний.	101
Глава 6. Метод катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого	107
6.1. Базисные положения метода	108
6.2. Алгоритм и интерфейс программы, реализующей положения МКА	122
Глава 7. Структурно-геоморфологический (СГ) метод Л.А. Сим.	143
7.1. Основные положения метода.	143
7.2. Реконструкция сдвиговых перемещений СГ методом.	144
Глава 8. Структурно-парагенетический метод Л.М. Расцветаева.	149
8.1. Базовые положения метода.	149
8.2. Примеры практического использования СП метода	155
Глава 9. Применение результатов реконструкции тектонических напряжений полевыми методами	158
9.1. Совместное исследование складчатых и разрывных деформаций.	158
9.2. Особенности тектонических напряжений в зонах разрывов.	160
9.3. Прогноз условий разработки нефтяных месторождений.	163
9.4. Прогноз устойчивости гражданских сооружений.	165
Приложение: Базисные термины механики в приложении к проблемам геодинамики и тектонофизики	169
П.1. Напряжения.	169
П.2. Деформации.	197
П.3. Прогноз условий разработки нефтяных месторождений.	200
П.4. Основные положения теории пластичности.	211
П.5. Теория поля в континуальной механике.	215
Литература	220

Научное издание

Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим, А.В. Маринин

**ОТ ЗЕРКАЛ СКОЛЬЖЕНИЯ
К ТЕКТОНИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЯМ.
МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМЫ**

Ответственный редактор
академик РАН *Ю.Г. Леонов*

Редактор издательства *Л.В. Филиппова*
Макет *Ю.Л. Ребецкий*

Подписано к печати 14.06.2017.
Формат 70x100 1/16. Бумага офсет № 1, 80 г/м².
Печать офсетная. Уч.-изд. 23,0 п.л. Тираж 300 экз.

ООО “Издательство ГЕОС”
125315, Москва, 1-й Амбулаторный пр., 7/3-114.
Тел./факс: (495) 959-35-16, тел. 8-926-222-30-91
E-mail: geos-books@yandex.ru, www.geos-books.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в ОАО “Альянс “Югполиграфиздат”
ООО “Т-Пресс” 400001, г.Волгоград, ул. КИМ, 6.