

Краткое содержание

Изучение закономерностей пространственного распределения и изменения во времени тектонических напряжений является одной из важнейших задач в целом ряде дисциплин наук о Земле. В геодинамике – это задача объяснения механизма формирования тектонических структур различного масштабного уровня; в сейсмологии – изучение механизма формирования очаговой области на стадии, предшествовавшей землетрясению, и развития процесса постсейсмической релаксации на афтершоковой стадии; в полевой геологии – взаимосвязь условий формирования складчатых, разрывных и других деформационных структур с залежами полезных ископаемых. Методы изучения этих закономерностей могут быть разделены на методы моделирования полей напряжений и деформаций (физическое и математическое моделирование) и методы экспериментального изучения тектонических напряжений в условиях естественного залегания горных пород.

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 данном определении ключевыми факторами, требующими добавления к понятию “напряжения” слова тектонические, являются масштаб объектов исследования (первые 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, возникающие 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 макроскопическом (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. Заметим, что использованная 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 макроскопическим масштабами. В противоположность этому задача исследования тектонических напряжений в массивах горных пород отвечает мегаскопическому – региональному масштабу осреднения (структуры с линейным размером от десятков и сотен метров до десятков и сотен километров).

В тектонофизике созданы методы экспериментального изучения (реконструкции) параметров тектонических напряжений и приращений сейсмотектонических 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 книге представлен метод катакластического анализа разрывных нарушений для расчета тектонических напряжений и отвечающих им квазипластических деформаций массивов горных пород. Этот метод включает в себя определение всех компонентов тензоров напряжений и приращений квазипластических (трещинных) деформаций, а также определение параметров прочности хрупких массивов горных пород масштабного уровня, отвечающего наиболее представительному размеру используемых для реконструкции разрывных нарушений. Основной акцент в методе делается на различие в поведении при деформировании сплошных образцов и природных массивов, обладающих множеством дефектов в виде поверхностей пониженной прочности.

Данный метод следует рассматривать как развитие методологии изучения природных полей тектонических напряжений, основу которой составляют методы реконструкции ориентации осей главных напряжений и сейсмотектонических деформаций, создававшиеся работами Е.Андерсона, М.В.Гзовского, Ю.В.Ризниченко, Дж.Брюна, Е.Кэри, Ж.Анжелье, О.И.Гущенко, С.Л.Юнги, П.Н.Николаева, В.В.Степанова, Дж. Гефарда, В.Д.Парфенова, Л.М.Расцветаева, Л.А.Сим, С.И.Шермана и др., методы оценки прочности (величин напряжений) участков земной коры, развивавшиеся в работах Р.Сибсона, Дж.Ренелли, Д.Мерфи и др., а также результаты лабораторных испытаний образцов горных пород, представленные в работах К.Моги, Дж.Байерли, Дж.Хэндина, Р.Стески, Ф.Руммеля, А.Н.Ставрогина и др. Метод катакластического анализа единственный из всех методов, алгоритм которого опирается на энергетические представления механики пластичности и положения теории предельного состояния, вытекающие из развития разрушения в

трещиноватых горных массивах, и позволяет выполнять оценки величин напряжений и параметров эффективной прочности массивов горных пород.

Метод состоит из трех этапов реконструкции напряжений, позволяющих в зависимости от качества исходных данных о хрупких разрывах (данные о механизмах очагов землетрясения или о зеркалах и данные о бороздах скольжения трещин) и возможности привлечения дополнительной информации определять большее число параметров тензора напряжений.

Основу алгоритма расчета параметров напряженно-деформированного состояния составили подходы, следующие из ряда фундаментальных положений механики континуума и механики разрушения. Эти подходы позволили сформулировать энергетические критерии, определившие сами понятия обобщенных напряжений, ответственных за активизацию старых и возникновение новых разрывов, и снимаемых обобщенных деформаций, формирующихся в геосреде за счет разрывных (трещинных) смещений. В своей совокупности эти критерии характеризуют стадию установившегося квазипластического течения, для которой в процессе деформирования на относительно длительных временах остаются неизменными условия нагружения и напряжения, действующие в природных массивах. Энергетические критерии составили основу метода катакластического анализа и позволили формализовать принципы создания однородных выборок структурно-кинематических данных о совокупностях сколов (механизмов очагов землетрясений).

В методе катакластического анализа на первой стадии, на основе энергетических положений континуальной механики, осуществляется формирование однородных выборок СКДТ и рассчитываются параметры, характеризующие эллипсоиды напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций: ориентация главных полуосей (главных напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций) и их

соотношение (коэффициент Лоде-Надаи). Важнейшим результатом первого этапа реконструкции является формирование однородных выборок СКДТ, характеризующих квазиоднородную стадию деформирования отдельных доменов земной коры.

На втором этапе расчетов узловым моментом для оценки современных напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений является предложенный в работе способ определения плоскости разрыва в очаге землетрясения. Этот способ основывается на использовании в рамках теории предельных состояний критерия Кулона для выбора одной из двух нодальных плоскостей, реализованной в виде разрыва в очаге землетрясения. Согласно предложенному способу выбирается та из нодальных плоскостей, для которой достигается наибольший сброс касательных напряжений. Эффективность подобного способа выделения реализованной плоскости проверена на сильнейших землетрясениях – Спитакском 1988 г. и Шикотанском 1994 г.

Данные об ориентации осей главных напряжений, значение коэффициента Лоде – Надаи и созданные однородные выборки СКДТ (результаты первого этапа реконструкции) являются основой для определения относительных величин напряжений (с точностью до нормировки на неизвестное значение прочности внутреннего сцепления), выполняемой на втором этапе реконструкции. Здесь используются принципы анализа напряженных состояний на диаграмме Мора, вытекающие из теории предельного состояния Кулона, уточненной положениями о возможности активизации ранее существовавших разрывов в изначально трещиноватых горных массивах.

Важно отметить, что формулировка условий разрушения природных массивов (создание новых разрывов и активизации ранее существовавших) в методе катакластического анализа принимается в общем виде, отвечающем результатам экспериментов по разрушению образцов горных

пород. Определяющие параметры условия Кулона считались неизвестными. Анализ на параметрической плоскости Мора однородных выборок СКДТ для отдельных доменов и совокупностей однородных выборок СКДТ для участков земной коры, где осуществляется реконструкция напряжений, позволил разработать принципы оценки прочностных параметров природных массивов горных пород, таких как коэффициент поверхностного статического и кинематического трения.

Нахождение главного прочностного параметра – внутреннего сцепления, который может рассматриваться как эффективный, отвечающий данному масштабному уровню осреднения напряжений, и оценка самих величин напряжений, происходит на третьей стадии расчета. Для этого в случае наличия хороших сейсмологических данных (землетрясения низкого магнитудного уровня с широким распределением гипоцентров от поверхности до глубинных слоев земной коры) можно использовать условие равенства вертикальных напряжений на горизонтальных площадках весу столба вышележащих пород. Другой способ оценки на основе данных о величине сбрасываемых напряжений рассматривается при анализе напряжений для западного фланга Зондской сейсмоактивной области, напряжений, предопределивших процесс разрушения в очаге Суматранского землетрясения 26.12.2004.

Использование выражения для вертикальных напряжений, действующих на горизонтальных площадках земной коры, позволяет также оценить величину флюидного давления.

Результаты исследований показали, что для разломных зон, в которых горные породы находятся в предельных условиях и где идет процесс хрупкого разрушения (землетрясения), величины эффективного всестороннего давления и максимального касательного напряжения связаны между собой. Их отношение ограничено значениями порядка 0.5-3.

Выполненные оценки внутреннего сцепления для двух участков земной коры (100 бар для Южных Курил и Японии и 50 бар для участка Сан-Фернандо разлома Сан-Андреас) показали, что оно во много раз меньше наблюдаемого в экспериментах (500-1000 бар).

Установлено, что прочность (максимальные касательные напряжения) природных массивов горных пород в областях активного тектонического режима во много раз меньше величины, ожидаемой по теоретическим данным (Р.Сибсон). Так, для ряда исследованных участков земной коры Южных Курил и Японии ее распределение по глубине близко к постоянному значению и составляет 0.7-1.4 кбар.

Низкая прочность природных массивов обусловлена повышенным, по отношению к ожидаемому, поровым давлением флюида. Для исследованных участков земной коры зоны разлома Сан-Андреас и северо-западного фланга Тихоокеанской сейсмоактивной области флюидное давление намного больше гидростатического и близко к литостатическому.

Как выше уже отмечалось, данные о величинах напряжений являются определяющими для решения ряда проблем в рамках наук о Земле. В частности, анализ динамических параметров очагов землетрясений становится осмысленным и эффективным именно в случае, когда известны величины напряжений, предшествовавших землетрясению. Анализ динамических параметров очагов землетрясений показал, что коэффициент эффективности сброса внутренней энергии не превышает 15-20% и соответствует участкам горных пород, находящимся в условиях низкого эффективного давления. С повышением давления и, соответственно, с повышением девиаторных напряжений эффективность разрядки падает, достигая в пределе 5-7%.

Эффективность рассеяния энергии в сейсмических волнах (КПД землетрясения) не превышает 65-70%, и ее максимум также связан с областями относительно низкого эффективного давления. Для областей

большой величины эффективного давления и, соответственно, высокой интенсивности девиаторных напряжений эффективность сейсмического рассеяния энергии падает до значений 10-15%.

Другим направлением приложения данных о параметрах тектонических напряжений является сейсморайонирование территорий. Результаты подобного сейсморайонирования дают возможность разделять участки разломных зон по степени их подготовленности к формированию крупных разрывов. При этом картина районирования является изменяющейся, требующей постоянного мониторинга тектонической обстановки. Детальность районирования неразрывно связана с масштабным уровнем реконструированного поля напряжений и определяется наиболее представительным диапазоном магнитуд используемого для реконструкции каталога механизмов очагов землетрясений.

Теоретический анализ свойств и особенностей квазипластического течения, развивающегося под действием нагружения в трещиноватых средах, показал, что его характер меняется в зависимости от интенсивности девиаторных компонент тензора напряжений и величины эффективного давления (с учетом флюидного давления). Ранняя стадия трещинного деформирования, в процессе которой новые разрывы не образуются, происходит за счет активизации уже существующей структуры разрывов и характеризуется неассоциированным законом течения, в то время как для стадии максимальной эффективности квазипластического деформирования закон течения стремится выйти на ассоциированный. В силу этих особенностей на начальной стадии квазипластического течения выполняется только часть энергетических критериев метода катакластического анализа (критерий диссипации внутренней энергии на разрывных смещениях). Выполнение всех критериев метода катакластического анализа имеет место для предельной стадии, на которой

в природных массивах наряду с активизацией ранее существовавших разрывов формируются также и новые трещины.

Результаты анализа параметров тектонических напряжений позволили сформулировать новую модель процесса подготовки очага землетрясения. На макромасштабном уровне этот процесс обусловлен действием ряда факторов: дилатансией, диспергацией и дегидратацией горных пород. Каждый из этих факторов определяет различную направленность деформационного процесса, что предопределяет мозаичную структуру области разлома, в которой происходит подготовка землетрясения. Подобная мозаичность, но уже в поле напряжений видна и на мегаскопическом масштабном уровне. Именно с неоднородностью напряжений вдоль зоны субдукции связано сильнейшее землетрясение начинающегося столетия, Суматранское.

М.В.Гзовский в монографии «Основы тектонофизики» [1975, с. 27] определил в качестве главных задач тектонофизики, которая является областью пересечения геофизики, геомеханики, геотектоники, физики очага землетрясений: «изучение механических свойств горных пород и ...усовершенствование методики полевых исследований (на базе пересмотра и развития их теоретических основ)». Он считал, что, «основываясь на знании полей напряжений и зависимости разрушения горных пород от их напряженного состояния, следует выяснять закономерности распределения разрывов в земной коре». Представленные в книге исследования следует рассматривать именно в русле этих идей М.В.Гзовского – как непосредственное продолжение его работ по изучению тектонических полей напряжений и выявлению механизмов деформирования геомассивов и участков литосферы.