РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю.Шмидта

ТЕКТОНОФИЗИКА И АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАУК О ЗЕМЛЕ

К 40-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ М.В. ГЗОВСКИМ ЛАБОРАТОРИИ ТЕКТОНОФИЗИКИ В ИФЗ РАН

Тезисы докладов Всероссийской конференции

13-17 октября 2008 г., Институт физики Земли РАН, г. Москва

Tom 1

Москва 2008 **Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40- летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН:** Тезисы докладов Всероссийской конференции. в 2-х томах. Т. 1. – М.: ИФЗ, 2008. – 345 с.

 \mathbf{B} сборнике публикуются расширенные тезисы докладов, научную конференцию, представленных на посвященную сорокалетию создания в ИФЗ РАН лаборатории тектонофизики. В докладах рассматривается широкий круг научных проблем, используются при исследовании И решении которых тектонофизические методы и подходы.

Ответственные редакторы: академик-секретарь ОНЗ РАН А.О. Глико академик РАН Ю.Г. Леонов

Редакционная коллегия:

д. физ.-мат. н. Ю.Л. Ребецкий д. геол.-мин. н. Л.А. Сим

к. геол.-мин. н. Ф.Л. Яковлев к. техн. н. А.В. Михайлова

В оформлении обложки использованы фотография М.В. Гзовского (1948 г) и фотография тектонофизического отряда в период работ на Ферганском хребте (1960 г, во главе отряда М.В. Гзовский)

Предисловие

Проведение конференции приурочено к сорокалетнему юбилею лаборатории тектоносоздана М.В. Гзовским Институте которая была В им. О.Ю. Шмидта АН СССР в 1968 году. В Геофизический институт АН СССР (с 1956 г – ИФЗ РАН), в отдел геодинамики, которым руководил В.В. Белоусов, Михаил Владимирович пришел в 1950 году, имея хороший геологический опыт работы на Северо-Западном Кавказе (под рук. Д.С. Кизевальтера и М.В. Муратова), в Восточных Альпах и Венгрии (совместно с В.В. Белоусовым и А.В. Горячевым), в Кара-Тау (под рук. Е.Е. Захарова и В.В. Белоусова). Он уже шесть лет преподавал общую геологию, структурную геологию и геотектонику в МГРИ. К этому времени также относятся первые работы М.В. Гзовского в новом зарождающемся направлении - тектонофизике. В 1954 году в трех номерах журнала «Известия АН СССР» (сер. геофизич.) выходят его статьи: «О задачах и содержании тектонофизики», «Тектонические поля напряжений», «Моделирование тектонических полей напряжений и разрывов». Эти статьи стали программными и вместе с двухтомной монографией, посвященной тектонике Байджансайского антиклинория (1958 и 1962 гг), составили теоретический и практический базис тектонофизики. Создание лаборатории тектонофизики предварялось формированием группы из 6-ти сотрудников под руководством М.В. Гзовского, которая выделилась из отдела геодинамики в 1964 году. Группа расширилась, в нее был приглашен крупный механик А.С. Григорьев. В результате расширения в тектонофизической группе над одной проблемой количественного описания тектонических процессов стали работать геологи, физики-экспериментаторы и механики-теоретики.

За годы существования небольшой по численности группы и лаборатории тектонофизики ее сотрудники выпустили несколько сборников и монографий: «Пластические и упругие низкомодульные оптически-активные материалы» (Д.Н. Осокина, 1963 г), «Экспериментальная тектоника» (В.В. Белоусов и М.В. Гзовский, 1964 г), «Математика в геотектонике» (М.В. Гзовский, 1971 г); «Тектонофизика и механические свойства горных пород» (сб., 1971 г); «Основы тектонофизики» (М.В. Гзовский, 1975 г); «Поля напряжений и деформаций в литосфере» (сб., 1979 г); «Поля напряжений и деформаций в земной коре» (сб., 1987 г); «М.В. Гзовский и развитие тектонофизики» (сб., 2000 г); «Тектонофизика сегодня» (сб., 2002 г); «Тектонические напряжения и прочность горных массивов» (Ю.Л. Ребецкий, 2007 г), было защищено 8 диссертаций, из них две – докторские. В лаборатории консультировались, работали и стажировались аспиранты и ученые из многих научных центров не только нашей страны (Иркутск, Минск, Львов, Новосибирск, Ташкент, Ашхабад, Фрунзе, Апатиты и др.), но и из зарубежных стран (С. Стоянов – Болгария, Дзиро Хирояма – Япония, Ма Цзинь и Сун Вень Пен – КНР, М. Машка – ЧССР и др.). Сотрудники лаборатории также обучались в зарубежной аспирантуре, так Е.С. Никитина в 1977 г защитила Ph. D в отделе количественной тектоники (рук. Ж. Анжелье) Парижского университета им. П.и М. Кюри.

В самые последние годы заложенное М.В. Гзовским направление по изучению природных объектов получило продолжение в работах сотрудников лаборатории тектонофизики Ю.Л. Ребецкого и Ф.Л. Яковлева, создавших новые методы оценки напряжений и деформаций по данным о разрывных и складчатых структурах. Применение численных конечно-элементных программ дало новый импульс тектонофизическому моделированию в работах Е.С. Никитиной и А.В. Михайловой. Продолжаются исследования закономерности формирования вторичных нарушений сплошности вблизи крупного разрыва в рабо-

тах Д.Н. Осокиной. Здесь в самое последнее время получен ряд новых результатов фундаментального и прикладного характера. Приход в лабораторию А.В. Маринина и Л.А. Сим укрепил ее геологическую группу. В последние годы после некоторого перерыва в лаборатории вновь начали стажироваться студенты и молодые ученые (В.Н. Войтенко, И.В. Лукъянов, В.В. Погорелов, А.Б. Рапопорт, Е.В. Толстая, В.В. Эктов), овладевающие тектонофизической методологией изучения тектонических процессов.

За прошедшие годы в СССР и новой России прошло несколько совещаний и крупных конференций, на которых, в частности, рассматривались темы, относящиеся к различным разделам тектонофизики: Первое Всесоюзное тектонофизическое совещание, организованное М.В. Гзовским и В.В. Белоусовым в ИФЗ РАН в 1957 г. Всесоюзное совещание по тектоническим напряжениям в земной коре и методикам их определения в горных выработках, 1971 г. Москва (организована М.В. Гзовским); «Механика литосферы (исследование механики геологических тел для геологического прогнозирования и управления горным давлением)», 1974 г. Ленинград; «Эксперимент и моделирование в геологических исследованиях», 1984 г. Новосибирск; «Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии», 1987 г. Ялта; «Механизмы структурообразования в литосфере и сейсмичность». 1991 г. Москва: «Тектонофизические аспекты разломообразования в литосфере», 1991 г. Иркутск; «Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные)», 1994 г. Москва; «Структурные парагенезы и их ансамбли», 1997 г, Москва; «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», 1999 – 2007 гг (раз в два года). Новосибирск. Отметим также семинар по измерению напряжений в массиве горных пород, проводившийся раз в два года с 1967 по 1991 гг СО Академии наук СССР.

В большинстве этих семинаров, совещаний и конференций, как правило, рассматривалась какая-то одна из тем, составляющих базис тектонофизики, такие как: измерение природных напряжений, тектонофизическое моделирование, разломообразование, напряженное состояние литосферы и др. Исключение здесь составляет Первое Всесоюзное тектонофизическое совещание (1957 г), в рамках которого рассматривался широкий круг проблем тектонофизики от ее физических основ до изучения разномасштабных тектонических структур в геологических объектах и путем моделирования. С этих позиций Всероссийская конференция «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» может рассматриваться как продолжение совещания 1957 г, т.к. также предлагает рассмотреть широкий перечень задач, относящихся собственно к тектонофизике, и представляет большой спектр направлений, развиваемых в науках о Земле, в которых уже используются или могут быть использованы тектонофизические подходы.

Тектонофизика, создавая свои методы для решения фундаментальных проблем геодинамики, все больше расширяет область своего приложения — горное дело, поисковая геология, прогноз коллекторских свойств массивов районов разработки углеводородных залежей, обеспечение безопасной эксплуатации и экологической безопасности подземных выработок и хранилищ, сейсмическое районирование. В последнее время понимание важности изучения природных напряжений и деформаций, прочности горных массивов находит свое отражение и в работах, связанных с изучением сейсмического режима и оценкой сейсмического риска, по физике очага землетрясений, а также в геофизических исследованиях. Именно поэтому мы считали возможным проведение тектонофизической конференции с подобной расширенной тематикой. Далее достаточно коротко будет представлено содержания тезисов докладов, при этом мы будем давать ссылки только на первого автора публикуемых тезисов.

В первом разделе представлены доклады, которые составляют теоретические основы тектонофизических исследований и выносят на рассмотрение важнейшие результаты и проблемы в смежных науках о Земле. В тезисах докладов В.Н. Войтенко, О.Б. Гинтова,

В.В. Гончара, А.М. Ручьева, Л.А. Сим, А.И. Тимурзиева, Ф.Л. Яковлева дается развитие методов тектонофизических исследований, ориентированных на получение информации о деформациях и напряжениях по данным о разрывных и складчатых структурах, а также по данным о форме минеральных зерен. Здесь отдельно надо отметить работу С.Н. Кашубина, в которой намечены пути оценки некоторых параметров тензора напряжений по сейсмологическим данным, определяющим параметры поляризации упругих волн. В этой работе фактически речь идет о внедрении тектонофизических подходов в геофизический диапазон данных. Отметим также тезисы Г.Ю. Болтышева, в которых представлены результаты приложения метода Г.И. Рейснера по типизации коры на основе комплекса геолого-геофизических данных для Восточно-Европейской платформы. В тезисах М.А. Гончарова обсуждаются вопросы терминологии, используемой в тектонофизических исследованиях: тектоническое течение, однородная деформация, деформационные ранги и структурные уровни, пластическая и разрывная деформация. Важным элементом этого раздела являются тезисы И.Т. Айтматова, Ф.Ф. Горбацевича, В.Л.Ильченко, Г.И.Кулакова, в которых приводятся материалы по фактическим замерам напряжений в массивах горных пород (методы in-situ) для внутриплитных и платформенных областей. Эти данные вместе с данными реконструкции напряжений и деформаций, выполненной на основе анализа морфологии складчатых и разрывных структур, должны являться основой создания моделей механизма генерации напряжений для континентальной коры. Работы, в той или иной мере касающиеся этого вопроса, представлены в тезисах И.Т. Айтматова, Д.А. Астафьева, А.В. Викулина, П.Г. Дядькова, А.А. Козырева, А.М. Кузина, К.Г. Леви, М.Г. Леонова, В.Ф. Подурушина, В.С. Пономарева, А.Л. Строма, В.И. Шевченко, Ф.Н. Юдахина. Здесь следует особо выделить два направления, которые можно определить как механизмы генерации напряжений, связанные с внешним или внутренним воздействиями. В первом основная роль по формированию напряжений в континентальной литосфере отводится границам литосферных плит (зонам рифтогенеза, коллизии, субдукции), а во втором - считается, что в современное поле напряжений большой вклад вносят процессы, происходящие в коре и верхней мантии самого исследуемого региона; кроме того, велика роль (в некоторых случаях определяющая) остаточных напряжений, возникающих в горных породах в ходе пластического и катакластического деформирования и тем или иным образом зафиксированных в породном массиве (боковое стеснение, минерализация трещин и др.). Наряду с этими механизмами также обсуждается роль в генерации современных напряжений кинетической вращающейся Земле (М.М. Довбнич). заключенной BO Ю.Л. Ребецкого выполнен анализ наиболее значимых результатов, полученных при изучении природных напряжений и деформаций, и даются новые перспективные направления исследований, являющиеся важными не только для самой тектонофизики, но также и в смежных науках о Земле.

Другой блок работ первого раздела представлен тезисами П.В.Макарова, С.Ю. Милановского, Б.П. Сибирякова, В.П. Трубицына, определяющими с механических позиций свойства и закономерности деформирования пород коры и литосферы. Эти работы будут крайне полезны при развитии теоретических основ тектонофизики. Изучение механического поведения разрыва сплошности среды в классической для геомеханики постановке выполнялось в экспериментальных исследованиях Г.Г. Кочаряна, Лю Личиань,

Ма Цзинь. Здесь исследовалось явление прерывистого скольжения вдоль разрыва во взаимосвязи с изменением локального (вблизи разрыва) поля деформаций (напряжений), замеры которого осуществлялись с помощью розеток тензодатчиков, а также с акустической эмиссией и тепловым режимом, обусловленным локализацией пластических де-

формаций и трением на разрыве. В тезисах Д.Н. Осокиной крупный разлом рассматривался с позиции уже теоретической механики разрушения как генератор вторичных разрывных структур и деформаций поверхности земной коры. Выполнялся анализ типов вторичных разрывов и трещин, возникающих на разных стадиях разломообразования. В тезисах С.И. Шермана, Ю.К. Щукина ставятся вопросы, относящиеся к проблемам сейсмической опасности и возможности применения тектонофизических подходов в их решении. Реальные успехи применения методов тектонофизики для оценки сейсмоопасности важных промышленных объектов отражены в исследованиях Р.М. Лобацкой.

Во втором разделе представлены результаты математического и физического моделирования деформационных структур горного массива коры и литосферы. Работы этого раздела, представленные в тезисах А.Н. Бокуна, С.А. Борнякова, А.Л. Грохольского, А.В. Михайловой, А.Е. Молчанова, Д.Н. Осокиной, М.К. Турапова, В.Т. Филатовой, А.В. Черемных, прямо отвечают задачам тектонофизического изучения тектонических деформаций, напряжений и структур разрушения в их взаимосвязи. В некоторых тезисах (М.К. Турапова, В.Т. Филатовой, А.В. Черемных) также выполнено сопоставление результатов моделирования с данными о природных напряжениях и деформациях горных массивов в конкретных геологических объектах. В другом блоке работ, представленном в тезисах Е.Е. Дамаскинской, О.И. Парфенюк, В.В. Погорелова, Т.В. Романюк, В.Н. Смирнова, Е.И. Суетновой, В.Ю. Тимофеева, Е.В. Шилько, методами математического и физического моделирования решаются вопросы, больше относящиеся к задачам геодинамики и физики очага, однако результаты, полученные в них, крайне важны и в тектонофизике. Отдельно надо отметить работу Ю.П. Стефанова, в которой методами численного (конечно-разностного) моделирования исследуется стадия пластического течения горных пород. Используемые автором алгоритмы позволяют изучать эволюцию структур локализованного пластического течения и хрупкого разрушения, возникающих в модели в процессе увеличивающегося внешнего нагружения.

В третьем разделе представлены работы, связанные с изучением напряжений и деформаций в природных массивах горных пород для конкретных крупных геологических объектов. Здесь ряд тезисов следует отнести к исследованиям природных объектов, выполненных в русле классических тектонофизических работ М.В. Гзовского – это работы: В.И. Алехина, Ж. Анжелье, О.А. Барулевой И.Н. Бубняк, В.В. Гончара, Н.И. Демьянович, Н.Ю. Дулабовой, А.А. Колесниченко, М.Л. Коппа, В.А. Корчема-гина, О.В. Луниной, А.В. Маринина, И.О. Павлова, А.В. Парфеевец, В.А. Петрова, Р.А. Умурзакова, Ш.Д. Фатхуллаева, В.И. Шацилова. В них напряжения и деформации природного геологического объекта исследуются в основном по геологическим данным (трещиноватость, борозды скольжения). Сейсмологические данные (механизмы очагов землетрясений) для анализа сейсмотектонических деформаций используются в исследованиях В.С. Имаева, О.А. Кучай, А.О. Мострюкова, Н.Н. Полешко, Н.А. Сычевой. Отдельно следует отметить работы Т.В. Гиоргобиани, А.К. Худолея и Ф.Л. Яковлева, в которых объектом исследования механизма деформирования геологических объектов служат складчатые комплексы. Работы по изучению деформаций геологических объектов, выполненные с использованием методов геолого-структурного анализа и элементов геодинамической реконструкции, отражены в тезисах Т.Л. Бабаджанова, Н.Б. Кузнецова, Ю.И. Кустова, В.С. Милеева, А.В. Назаревича, Л.М. Расцветаева, Т.Ю.Тверитиновой. Отдельный обширный блок работ относится к изучению деформаций поверхности земной коры по данным инструментальных геодезических наземных и спутниковых (GPS и др.) наблюдений. Он представлен в тезисах Р.М. Кармалеевой, С.И. Кузикова, Ю.О. Кузьмина, М.А. Лебедевой, А.В. Лухнева, А.О. Мострюкова, М.Т. Прилепина, В.А. Санькова, В.Ю. Тимофеева. Геофизические методы исследования деформаций геологических объектов использованы в исследованиях: А.Н. Марчука, Л.Л. Панасьян, И.А. Широкова.

Четвертый раздел – «Разлом как особое геологическое и физическое тело» содержит работы исследователей широкого спектра научных направлений: геологов, геофизиков, геодезистов, геомехаников, петрохимиков, химиков и физиков. Такой широкий диапазон научных дисциплин связан со сложностью рассматриваемых в рамках этого раздела явлений, происходящих в теле разлома. В этом разделе прежде всего следует отметить тезисы О.С. Барыкиной, А.А. Козырева, К.Ж. Семинского, В.В. Травина, Н.С. Фроловой, в которых особенности структуры и вещественного строения разломов разного масштаба рассматриваются с геологических позиций в соотношении с проявлениями в аномалиях деформаций и напряжений породного массива. Инструментальные методы изучения строения тела разлома используются в работах Е.А. Баталёвой, А.А. Боброва, Т.В. Гусевой, С.М. Зверева, Н.О. Кожевникова, А.М. Кузина, Н.И. Павленковой, С.А.Попова. В них приводятся данные по проявлению аномального поведения породного материала тела разлома в геофизических полях и в инструментально измеряемых деформациях. С позиции геомеханики вопросы распределения напряжений и вторичных разрывных структур рассматриваются в работах Э.В. Калинина и Ж. Анжелье. Исследования петрохимического характера, представленные в тезисах Ю.С. Геншафта, Е.Б. Лебедева, А.М. Ручьева, А.Я. Салтыковского, Ю.Ф. Соколовой, можно отнести к исследованиям, создающим основу интерпретации поведения геосреды в теле разлома. В них приводятся данные лабораторных опытов по вещественному преобразованию породы в различных условиях, когда наличие девиаторных напряжений существенно меняет ход реакций. Здесь особо обратим внимание на работу В.Ю. Траскина, в которой излагаются физикохимические основы эффекта Ребиндера, суммирующего целый спектр явлений, происходящих с веществом горных пород на микроуровне и в конечном итоге определяющих снижение макропрочности породного массива. Вопросы взаимодействия разлома с внешними физическими полями, влияние на его прочность различных факторов и возможности воздействия на него рассматриваются в тезисах Л.М. Богомолова, И.Л. Гуфельда, И.Г. Киссина, Б.В. Левина, В.В. Ружича, А.А. Спивака. Попытки обобщения внутреннего состояния тела разлома и его отражение в деформационном поле сделаны в работах Ф.А. Летникова, Ю.Л. Ребецкого, Б.М. Чикова.

В пятом разделе – «Тектонофизика в решении проблем поиска и разработки месторождений полезных ископаемых» содержится ряд работ геомеханической направленности, в которых исследуется поведение образцов горных пород под нагрузкой, а также развиваются вопросы теории расчета прочности геомассива. Подобные исследования представлены в тезисах А.А. Авагимова, А.А. Беспалько, А.Г. Вострецова, А.М. Коврижных, А.А. Красновского, П.С. Мартышко, Ю.А. Морозова, Р.М. Насимова, И.Э. Семенова, Ю.В. Федотова, А.И. Чанышева. Здесь особо отметим исследования крупных коллективов, выполненные под руководством Н.Н.Мельникова, В.А. Мансурова и В.Н. Опарина, в которых делаются обобщения целого комплекса теоретических и практических работ, связанных с обеспечением безопасности проведения горнодобывающих работ в районах подземных выработок. Исследование проявления особенностей тектоники областей разработки месторождений различного генезиса в их взаимосвязи с напряженным состоянием породного массива представлено в тезисах А.И. Веселова, А.С. Гладкова, Д.В. Жирова, Д.Н. Задорожного, А.В. Ловчикова, В.А. Петрова, И.А. Потехиной, М.К. Турапова, Я.М. Хазана. Отметим работы А.С. Батугина, М.Г. Вахнина, Э.Р. Казанковой, Ю.О. Кузьмина, А.И. Ходжиметова, О.С. Юрченко. В них указанные вопросы обсуждаются применительно к нефтегазоносным областям. Именно в связи с проблемой разработки и поиска нефти и газа в этот раздел были включены доклады А.М. Виноградова, Г.Н. Гогоненкова, А.И. Некрасова, И.П. Сапчук, Л.А. Сим по изучению сдвиговых разрывных структур и напряженного состояния осадочного чехла Западной Сибири.

В шестом разделе обсуждаются вопросы по теме «Региональная тектоника и сейсмический режим, геологические, геофизические и сейсмологические данные - тектонофизический аспект». Наибольшее число работ этого раздела - тезисы Д.Р. Акмановой, Е.Э. Благовещенской, В.А. Бормотова, Е.А. Горбуновой, П.Г. Дядькова, О.Г. Злогодуховой, О.А. Кучай, Б.В. Левина, А.А. Никонова, Н.А. Радзиминович, А.Б. Садыковой, К.Ю. Санникова, В.Б. Смирнова, Н.Г. Томилина, С.В. Трофименко, Г.П. Яроцкой посвящено изучению сейсмического режима различных сейсмоопасных участков коры: Отметим тезисы Г.М. Стеблова, в которых основой исследований являются данные GPS геодезии. Вопросы районирования земной коры по степени сейсмической опасности рассматриваются в тезисах А.С. Батугина, Е.Г. Бугаева, Т.Г. Краснораменской, В.И. Мельниковой, В.А. Пьянкова. Исследование взаимосвязи предвестников с сильными землетрясениями осуществляется в работах: В.А. Гаврилова, И.Л. Гуфельда, Г.Н. Копыловой, Л.А. Латыниной, И.В. Лукьянова, А.В. Назаревича, А.А. Никонова, Н.Г. Томилина, В.А. Широкова. Развитие различных аспектов теории очага землетрясения и их практического приложения представлено в работах Е.Е. Ламаскинской. А.А. Лобрыниной. М.В. Родкина, В.В. Степанова, С.М. Строгановой, В.И. Уткина, Е.Б. Чиркова. Следует обратить внимание на тезисы С.С. Арефьева, в которых излагаются результаты сейсмических исследований для очаговой области Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г. Данные о строении верхних слоев тектоносферы, полученные с использованием геофизических и сейсмологических методов, представлены в работах: А.А. Баранова, Н.А. Бушенковой, Т.К. Злобина, Е.С. Колтышевой, Р.А. Лементуевой, М.Н. Луневой, В.В. Мордвиновой, Н.Н. Неведровой, В.Д. Суворова, Е.Б. Чиркова, Важный и полезный для широкого круга специалистов анализ и обобщение проблем и подходов в их решении, используемый в сейсмологических и геофизических исследованиях, выполнен в тезисах Н.В. Шарова и Ю.К. Щукина. Некоторые из сформулированных в них положений имеют прямое приложение в тектонофизике и могут быть решены ее методами.

В завершение следует отметить, что тектонофизика прошла большой путь в своем развитии. Многие направления, намеченные М.В. Гзовским, плодотворно развиваются. Однако значительно продвинувшись в методическом направлении, осуществив приложение новых методов исследования к широкому спектру тектонически активных регионов, мы вновь и вновь возвращаемся к нескольким ключевым проблемам. Эти проблемы многократно рассматривались ранее и считалось, что они получили свое объяснение, но новые данные требуют в ряде случаев ревизии. К таким проблемам следует прежде всего отнести объяснение механизма генерации напряжений для внутриплитных областей, взаимоотношение внешних и внутренних источников напряжений в коре, генезис и роль остаточных напряжений, взаимоотношение вертикальных и горизонтальных движений и проблемы горообразования, механизм формирования разломов в консолидированной коре и влияние дегазации мантии на свойства пород коры, процессы и явления, происходящие в теле разлома и их влияние на его механические свойства, структурная и реологическая зональность коры и литосферы, механизм крупномасштабного хрупкого разрушения коры, генезис и механизмы течения в нижней коре. Все эти вопросы в той или иной мере рассматриваются в тезисах докладов конференции, однако их достоверное и хорошо обоснованное решение – долговременные задачи тектонофизики.

Раздел І

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СМЕЖНЫХ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ



Раздел І

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СМЕЖНЫХ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ



Об остаточных напряжениях в горных породах

И.Т. Айтматов, Г.О. Казакбаева

Институт физики и механики горных пород НАН КР, г. Бишкек, Киргизия

Согласно существующим представлениям о напряженном состоянии массивов горных пород верхней части земной коры считается, что естественное напряженное состояние пород данных структур обусловлено, главным обравоздействием на геологическую среду гравитационных сил и современных тектонических процессов. Начиная с середины ХХ-го столетия осуществленные в разных странах натурные измерения напряжений в скальных массивах выявили значительное превышение величин горизонтальных напряжений по отношению к вертикальным (гравитационным) напряжениям. В большинстве случаев горизонтальные напряжения по своим значениям превосходят вертикальные в 1.5–3.0 раза. Наряду с этим имеют место также и определенные зоны и структуры скальных массивов, где горизонтальные и вертикальные напряжения по своим значениям равны или близки друг к другу, что приблизительно соответствует гидростатическому (геостатическому) условию распределения напряжений в породном массиве. Данное условие отвечает гипотезе, выдвинутой в свое время швейцарским геологом А. Геймом (XIX в).

Однако далеко не все реальные факты условий напряженного состояния и геодинамических процессов, возникающих в массивах скальных пород, возможно объяснить с позиций вышеуказанных представлений. В частности, при измерении напряжений в скальных породах во многих случаях не только в разных региональных тектонических структурах, но даже в пределах участков отдельного рудного поля или месторождения в одной и той же породе, не претерпевшей заметных природных деформаций наряду с напряжениями сжатия также имеют место и значительные растягивающие напряжения на близких расстояниях. В некоторых зонах горизонтальные и субгоризонтальные напряжения по своим значениям в 5-6 раз могут превышать средний уровень нормальных горизонтальных напряжений на равных глубинах. Среди вертикальных напряжений в массивах пород различных тектонических структур преобладают напряжения, которые по своим значениям приблизительно равны гравитационному уровню. Однако вместе с тем в отдельных случаях, как в массивах горных территорий, так и в пределах стабильных, тектонически спокойных структур встречаются породные массивы, где нормальные вертикальные напряжения по своей величине оказываются выше их гравитационных значений. При этом данные явления выявлены не только в отдельных локальных участках соответствующих породных массивов, но имеются также некоторые зоны, где и в региональном плане вертикальные

напряжения по своей величине превосходят напряжения, обусловленные действием только гравитационных сил.

При бурении колонковых геолого-разведочных скважин не редко в кернах крепких пород образуются диски, свидетельствующие о высоком напряженном состоянии массива в этих зонах. Керновые диски могут возникать на разных глубинах, включая малые глубины (15–20 м). Известно также не мало случаев образования дисков при бурении скважин в свободных от массива блоках.



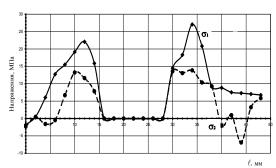


Рис. 1. a – модельный образец с возникшей генетической трещиной; δ – эпюры главных напряжений по горизонтальному сечению (1-1), образец № 9

Указанные выше условия существенной пространственной неоднородности полей естественных напряжений в горных породах характерны, как правило, для полей, сочетающих остаточные, гравитационные и современные тектонические напряжения.

Во многих случаях в породах магматического и метаморфического генезиса неоднородность естественных полей напряжений имеет четко выраженный периодический характер пространственной изменчивости. Вместе с тем в отдельных локальных зонах таких массивов выявляются места, где величины напряжений могут на порядок отличаться от напряжений в ближайших соседних точках.

Данные условия пространственной неоднородности полей естественных напряжений обусловлены главным образом наличием в массивах соответст-

вующих горных пород остаточных напряжений. Зоны с высокой концентрацией остаточных напряжений являются потенциальными очагами горных ударов, возникновение которых определяется нарушением состояния естественного равновесия остаточных напряжений в зонах их высокой концентрации.

Нашими исследованиями остаточных напряжений в физически однородных моделях из твердого оптически активного материала было выявлено, что пространственные вариации полей остаточных напряжений и генетических, и наведенных термическим процессом имеют четко выраженный периодический характер. При этом при технологическом процессе изготовления модельного материала из эпоксидной смолы ЭД-6 путем ее полимеризации и отверждения на основе введения компонентов отвердителя и обеспечения соответствующего температурного режима преобразования смолы в твердое тело в последнем в отдельных случаях на этапе завершившегося процесса отвердения материала самопроизвольно возникала трещина. Исследования поляризационно-оптическим методом напряжений в изготовленном модельном материале (без приложения внешних нагрузок) показали наличие высоких остаточных (генетических) напряжений, обусловленных технологическим режимом процесса отверждения смолы (рис. 1).

В краевых зонах, вблизи возникшей трещины по обе стороны отмечены высокие растягивающие напряжения, что качественно отражает наличие высоких напряжений, фиксируемых при их измерении в краевых зонах тектонических нарушений в массивах горных пород.

Исходная модель геодинамики коромантийной оболочки Земли для тектонофизического моделирования

Д.А. Астафьев

OOO «ВНИИГАЗ», г. Москва, D_Astafiev@vniigaz.gazprom.ru

Методологической основой для изучения всей совокупности геологических образований, явлений и геодинамических процессов с помощью тектонофизического моделирования в настоящее время является концепция тектоники литосферных плит. Однако накопленные геолого-геофизические материалы, в частности, данные по сейсмотомографии Земли и ее отдельных сегментов, разрезы ГСЗ, глубинного МОГТ, результаты космогеодезических съемок с определением скоростей и направлений движения литосферных плит, реизучения глубинного строения горноскладчатых осадочных бассейнов, окраин континентов, рифтовых континентальных и океанических систем свидетельствуют о распространении тектогенеза не только на литосферную и верхнемантийную оболочки, но и на всю толщину коромантийной оболочки Земли в целом, то есть геодинамические процессы распространены от поверхности Земли до раздела ядро-мантия. При этом, судя по сейсмотомографическим картинам тектонически активных регионов и образований, таких как пояса субдукции, современного орогенеза, океанических и континентальных рифтов, современных геосинклинальных зон (Карибской, Средиземноморско-Каспийской, Индонезийской, Океанийской и др.), тектогенез в равной степени определяется как латеральной, так и вертикальной до глубины 2900 км составляющими движений коромантийного вещества при сохранении твердофазности не только литосферы, но и практически всей мантийной оболочки за исключением фрагментов астеносферы ческим характеристикам пластичны. Кроме того, в зонах активного тектогенеза фиксируются явные признаки дискретного магматизма по вертикальным и субвертикальным разломам в земной коре. С учетом проявления древнего магматизма в консолидированной коре можно констатировать натвердофазной коромантийной оболочке Земли существующей дискретной квази жидкой фазы, заполняющей магматические вертикальные, субвертикальные каналы и латеральные расслоенные области, которые фиксируются на временных сейсмических разрезах, соответственно, в виде столбчатых структур и обширных латеральных магматических тел, например, под осадочными бассейнами.

Наряду с глубинными коромантийными структурами, благодаря космогеодезическим данным, стала известна практически полная планетарная картина траекторий абсолютного движения литосферных плит (модель Минстера-Джордана), образующих явные группировки, внутри которых плиты стягиваются к поясам субдукции и современного орогенеза. Наиболее крупная группировка — Африкано-Евразиатско-Австрало-Западно-Тихоокеанская, плиты которой стягиваются к Альпийско-Гималайскому орогеническому поясу и Восточно-Евразиатско-Австралийскому поясу субдукции. Вторую группировку образуют Американские, Гренландская и Восточно-Тихоокеанские плиты, стягивающиеся к Кордильеро-Карибско-Андийскому поясу субдукции. Третья группировка — это Антарктическая плита с окружающими ее океаническими плитами южных частей Атлантики, Индийского и Тихого океанов.

С учетом глубинного строения коромантийной оболочки этих плит и законов конвекции такие группировки, несмотря на сложные очертания и наличие областей их сопряжения без океанических рифтов (Аляскинско-Чукотская и Скоттия), являются хорошо сформированными конвективными ячейками Бенара д-типа. Указанные группировки фактически коромантийных плит окружены разделяющими их поясами апвеллинга мантийного вещества под океаническими рифтами. Одновременно пояса субдукции и современного орогенеза, а также континентального рифто- и бассейногенеза являются поясами и областями гравитационного погружения (дайвинга) коромантийного вещества на раздел ядро-мантия. Сквозной дискретный дайвинг коромантийного вещества явно обусловлен плавлением и фазовыми переходами нижнемантийного вещества на разделе ядро-мантия и после-постоянную подпитку апвеллинга. При этом поясам и областям дайвинга соответствуют области пониженной (до 4-х км), а поясам апвеллинга соответствуют области повышенной (до 4-х км) гипсометрии поверхности жидкого ядра. Таким образом, принципиальными отличиями предлагаемой концепции строения и геодинамики Земли для тектонофизического моделирования от ныне господствующей концепции тектоники литосферных плит являются следующие: 1 – литосферные плиты – это фактически коромантийные плиты или сектора коромантийной оболочки Земли, образующие группировки, представляющие собой конвективные ячейки Бенара д-типа; 2 – в настоящее время в коромантийной оболочке Земли существуют три явные конвективные ячейки Бенара д-типа (Африкано-Евразиатско-Австрало-Западно-Тихоокеанская, Американо-Гренландская и Антарктическая), но может быть и больше и меньше – две и даже одна при существовании Пангей [1]; 3 – причиной формирования Пангей является доминирование поясов или областей дайвинга в одной или нескольких смежных конвективных ячеях, охватывающих коромантийные сектора бывшего Панталассы, проградирование дайвинга в направлении к поясам апвеллинга с последующим их поглощением, слиянием конвективных ячей в одну и синхронным формированием нового Панталассы; 4 – причиной распада Пангей является ослабление дайвинга в области закрывшегося Панталассы (например, Палеотетиса) и усиление дайвинга на окраинах Пангеи, после чего окраинные

пояса дайвинга, поглощая океанические коромантийные сектора и проградируя к поясам апвеллинга, приводят к распаду (разрыву) Пангеи и раскрытию новых океанов типа Атлантического, Индийского - так реализуется цикл Уилсона; 5 – конвективные ячейки функционируют благодаря продолжающемуся выделению эндогенной энергии на разделе ядро-мантия и наличию в коромантийной оболочке Земли планетарной магмофлюидодинамической системы; 6 – основными элементами магмофлюидодинамической системы Земли являются – пояса и области дайвинга внутри конвективных ячеек под зонами субдукции, формирующимися орогенами, континентальными рифта-или внешние слои жидкого ядра, по которым осуществляется перераспределение мантийного вещества в виде магматических расплавов на постоянно действующую подпитку апвеллинга; пояса апвеллинга под океаническими рифтами, где происходит вынужденное раздвигание коромантийных плит, дискретный подъем магматических расплавов и наращивание (омоложение) коромантийной оболочки Земли на всю ее толщину; дискретная квазижидкая фаза в твердофазных сегментах коромантийных плит, концентрирующаяся в областях дайвинга под континентальными рифтами, осадочными бассейнами и орогенами в связи с деструкцией и аккрецией под ними коромантийного

При тектонофизическом моделировании глобальных и региональных геодинамических процессов важно воспроизвести тектонофизическую модель геодинамики коромантийной оболочки Земли, позволяющую наблюдать возникновение в процессе эксперимента конвективных ячеек Бенара при и изучить особенности развития дайвинга коромантийного вещества как первопричины тектонической активизации, обособления и аккреции коромантийных плит, а также его роли в формировании не только субдукционных структур, но и континентальных рифтов, надрифтовых депрессий, орогенов. Открывается возможность более достоверно моделировать палинспастические реконструкции формирования и распада Пангей, уточнить причины глубокофокусных землетрясений за счет латеральных разрывов вертикальных и субвертикальных столбчатых тел при опережающем погружении их нижних частей в процессе неравномерного дайвинга коромантийного вещества. Правильное понимание геодинамических процессов и производных от них коромантийных структур позволит разработать методы их выявления, мониторинга, а главное прогнозирования средне- и быстротекущих геодинамических явлений.

Литература

1. Астафьев Д.А. Экстремальные состояния геодинамики Земли. Фундаментальные проблемы геотектоники. М.: ГЕОС. 2007. Т. 1. С. 36-39.

Типизация земной коры Восточно-Европейской платформы по геолого-геофизическим данным

Г.Ю. Болтышев

Геофизическая служба РАН, Калужская область г. Обнинск, grig@ifz.ru

Проведена типизация земной коры для большей части Восточно-Европейской платформы. Выделение типов коры проводилось методом кластерного анализа, который разработан в ИФЗ РАН доктором геол.-мин. наук Г.И. Рейснером [1]. Типизация земной коры основана на интегральной характеристике небольших её объёмов (элементарных ячеек размером 20 на 30 минут градусной сетки). Элементарным ячейкам присваивались значения ряда геолого-геофизических параметров. В качестве исходных данных были использованы: мощность земной коры, высота рельефа и размах его высот, глубина залегания консолидированного фундамента, плотность теплового потока, изостатические аномалии. В результате последующей обработкой исходных данных по формальной итерационной процедуре кластерного анализа были выделены типы земной коры со сходными характеристиками. Далее проводился сравнительный анализ элементарных ячеек на разных шагах кластерного анализа. Типизация земной коры методом кластерного анализа позволяет решать как фундаментальные, так и прикладные задачи.

Раздробленность земной коры можно рассматривать как фундаментальное свойство верхней оболочки Земли. В последнее время в научной литературе этой проблеме уделяется пристальное внимание. В данной работе раздробленность земной коры исследуется методом кластерного анализа [2–6]. Производятся поиски признаков самоорганизации отдельных элементов, составляющих блоковую структуру земной коры, а также закономерностей её организации.

В типизации земной коры методом кластерного анализа выделяются все крупнейшие тектонические элементы Восточно-Европейской платформы. Краткий анализ выявленных закономерностей показал, что на первых шагах кластерного анализа наблюдается сложное, почти хаотичное строение региона. Однако ряд структур проявляют свою однородность уже на первых шагах кластерного анализа. Типы коры, представленные на ранних шагах кластерного анализа, на последующих шагах образуют ареалы различного размера. Не изменяется структура Воронежского и Украинского щитов в пределах нескольких шагов кластерного анализа. Так сохраняется устойчивая структура (ядро) этих тектонических элементов Восточно-Европейской платформы. Устойчивыми структурами (ядрами) обладают Черноморская и Прикаспийская впадины, в то время, как Днепрово-Донецкий прогиб не имеет устойчивого ядра. Проведённый количественный анализ типов земной коры, выделенных методом кластерного анализа, среди ряда крупных

тектонических элементов Восточно-Европейской платформы позволил выявить различный характер их неоднородности, определяемый различной степенью и различным типом раздробленности этих структур.

Черноморская впадина на последних шагах представлена в основном двумя типами коры. Один тип коры приурочен преимущественно к западно- и восточно-черноморским котловинам. Значения геолого-геофизических параметров этого типа коры отражают структурную специфику котловин с более тонкой субокеанической корой, мощным осадочным чехлом и низким тепловым потоком. Разделяющая котловины часть акватории и практически всё остальное пространство прибортовых зон представлено другим типом коры, который характеризуется большим диапазоном значений геолого-геофизических параметров, а на промежуточных шагах область развития одного из типов строго ограничена границами Западно-Черноморской впадины.

Присутствие в структуре Днепровско-Донецкого прогиба исключительно неустойчивых типов земной коры определяется сильной латеральной изменчивостью значений геолого-геофизических параметров, характеризующих типы коры. Поэтому на более детальных шагах кластерного анализа территория прогиба последовательно распадается на все более мелкие участки, представленные различными типами коры, без наличия стабильных ядер.

Литература

- 1. Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е. Типизация земной коры и современные геологические процессы. М.: 1993. 209 с.
- 2. Болтышев Г.Ю. Количественные характеристики гетерогенности земной коры (на примере ряда тектонических элементов Восточно-Европейской платформы) // БМОИП, отд. геол. 2003. Т. 78, вып. 4. С. 17-22.
- 3. Иогансон Л.И., Болтышев Г.Ю. Гетерогенность и стадии развития осадочных бассейнов Западной Евразии // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 2000. № 10. С. 20-29
- 4. Иогансон Л.И., Болтышев Г.Ю. О гетерогенности земной коры Северной Евразии // Вестник ОГГГГН РАН. М.: 2000 (4). http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/4-2000/ioganson.pdf.
- 5. Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. О гетерогенности и раздробленности земной коры Западной Евразии // Тектоника неогея: общие и региональные аспекты. Материалы тектонического совещания. 2001. М.: ГЕОС. С. 274-276.
- 6. Ioganson L.I. The Earth's crust heterogeneity as recent geodynamic processes evidence and seismicity # 27th General Assembly ESC: Book of Abstr. and Papers. Lisbon University, Portugal, 10-15 Sept., 2000. P. 59.

Ротационная вихревая геодинамика: геологический и физический аспекты

А.В. Викулин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Развитие представлений о ротационных вихревых движениях. 5-3 вв. до н.э. Исключительная по тонкости интуиция мыслителей-материалистов Левкиппа, Демокрита и Эпикура позволила им из «каши» существовавших в то время мистических представлений о Пространстве и Времени извлечь и сформулировать физически прозрачную в настоящее время идею о «вихревых атомах», по сути — элементарных частицах со спином.

<u>1644 г.</u> Согласно модели философа и математика Р. Декарта причиной возникновения Солнечной системы стало вихревое движение – единственно устойчивая форма движения.

<u>1755, 1796 гг.</u> Выход в свет космогонической (философа И. Канта) и небулярной (математика и астронома П. Лапласа) гипотез, в основах которых были заложены представления о вихревой и вращающейся газопылевой туманности, из которой образовалась Солнечная система.

Середина XIX — начало XX вв. Задача прогноза погоды и построения теории атмосферных циклонов возрождает интерес к вихревой динамике. Трудами математиков Г.Л.Ф. Гельмгольца, Г.Р. Кирхгофа, В. Гребли и многих других сначала доказываются основные теоремы вихревой динамики, физиком лордом Кельвином строится теория вихревых атомов, а затем физиком Дж.Дж. Томсоном разрабатывается вихревая теория материи и взаимолействий.

<u>1925 г.</u> Идея спина «витает в воздухе». *Физиками-теоретиками* Дж. Уленбеком и С. Гаудсмитом гипотетически, для теоретического объяснения экспериментальных данных, в физику окончательно вводится спин – как собственный момент количества движения.

<u>1927-1928</u> гг. Завершение становления квантовой механики. Спин объявляется квантовым числом и обоснование гипотезы древних мыслителей о вихре – как первоисточнике устойчивого движения, фактически, выводится за рамки физики. Вихревые движения как макроскопические турбулентные течения изучаются в рамках гидродинамики.

Начало кризиса в физике, который продолжается до настоящего времени.

- <u>1928 г</u>. Начало вихревого этапа в геологии и тектонике выход в свет пионерской работы китайского *геолога* Ли Сы-гуана, в которой впервые описаны вихревые движения геологической среды.
- 1933 г. Японским геологами-геофизиками С. Фуджихарой с соавторами на основании данных геодезических измерений впервые формулируется вывод о

- вращательном движении очага землетрясения 1.09.1923 в Канто блока земной коры протяженностью около 200 км.
- <u>1950-е гг</u>. Теоретические физические исследования трещины Гриффитса и моделирование *тектонических* разломов приводят к выводу о вращении образующихся в материале трещин (Yoffe, 1951; Магницкий, 1965).
- <u>1960-1970-е гг</u>. Исследования *тектонофизика* М.В. Гзовского (1975) устанавливают пространственную волнистость крупных тектонических разрывов и формируют вывод, согласно которому представления об их прямолинейности часто не соответствуют наблюдаемым фактам.
- <u>1961</u> г. Выход в свет работы геолога А.В. Пейве, в которой устанавливается блоковый характер геологической среды и делается вывод о том, что каждый блок обладает самостоятельной движущей силой, связанной с вращением Земли и эволюцией гравитационного поля Солнечной системы.
- <u>1969 г</u>. Выход в свет первого издания фундаментального труда физика и механика Л.И. Седова «Механика сплошной среды», в котором обращается внимание на важность механических задач с собственным моментом количества движения макроскопических объемов вещества.
- <u>1972 г</u>. Выход в свет работы *геолога* О.И. Слензака, в которой на новом качественном уровне развиваются вихревые представления Ли Сы-гуана.
- <u>1979</u> г. Выход в свет работы *геолога* И.В. Мелекесцева, в которой была предложена вихревая вулканическая гипотеза и рассмотрены некоторые следствия.
- <u>1979-1991</u> гг. Физиками и геофизиками М.А. Садовским (2004) с коллегами разрабатываются представления о блоковой геофизической среде, в рамках которых предпринимается попытка построения модели геомеханического сейсмического процесса. Отличительной особенностью таких моделей является сильная нелинейность описывающих их уравнений (Артамонов, 1976; Журавлев, 1982; Любушин, 1987).
- <u>1984 г</u>. Выход в свет работы *механика* Л.И. Лобковского и *геолога* Б.В. Баранова о «Клавишной модели сильных землетрясений», в которой впервые в рамках одной модели сейсмического процесса аналитически были совмещены представления о блоковом строении геофизической среды с ее волновыми тектоническими движениями.
- <u>1993 г.</u> Выход в свет знаковой и для геологии и для физики монографии геологов А.Н. Дмитриевского и И.А. Володина и физика Г.И. Шипова «Энергоструктура Земли и геодинамика». В этой работе вихревые геодинамические движения (структуры) «увязаны» с полями кручения физического вакуума и, тем самым обозначен возможный путь выхода из уже затянувшегося кризиса в естествознании.
- <u>1995 г</u>. Экспериментальное обнаружение признаков существования уединенных деформационных волн в геофизических полях послужило *механику и геофизику* В.Н. Николаевскому основой для построения

математической волновой модели поворотных движений блоков горной породы.

<u>1999 г</u>. Развивая концепцию блоковой среды А.В. Пейве его ученики-*геологи* пришли к выводу о том, что геологическая среда является нелинейной и самоорганизующейся и, вследствие этого, ее движение может быть представлено в виде тектонического течения с неоднородными деформациями, ненулевыми дивергенциями и вихрями (Лукьянов, 1999).

В рамках таких представлений «самостоятельной движущей силой блока» земной коры может быть только его собственный макроскопический момент в смысле Л.И. Седова.

2003-2008 гг. Выход в свет монографии физика и геофизика А.В. Викулина «Физика волнового сейсмического процесса» (2003), в которой в рамках представлений Пейве – Седова – Садовского о блоковой среде с собственным макромоментом строится модель планетарного сейсмического процесса. В рамках модели: дается количественное объяснение эффектам миграции нутации землетрясений И полюса планеты; количественно определяется энергия тектонического движения; проводится качественное вулканизма и сейсмичности объяснение взаимосвязи построение принципиально новой модели очага землетрясения, в основе которой взаимодействии представления 0 очагов; теоретически обосновывается существование принципиально нового типа ротационных геофизических (блоковых, вращающихся) ответственных за взаимодействие слагающих их блоков и тектонических плит.

Резюме. Как видим, представления об «элементарных» вихревых моментах являются самыми первыми «интуитивными» и, как оказалось, правильными представлениями. Гипотеза о собственном моменте блока геофизической среды наследует их, позволяет (как в свое время и гипотеза спина в квантовой механике) объяснить целый ряд геофизических явлений и является перспективной для дальнейших геологических и геофизических построений. Показано: определяющее напряженное состояние поверхности Земли вихревое ротационное поле — как решение вихревой механической задачи Дирихле о равновесной в каждый момент эллипсоидальной фигуре капли гравитирующей вращающейся жидкости — может являться «аналитической» основой новой геологической парадигмы.

В рамках таких представлений изучение планетарных вихревых геологических структур, связанных с полями кручения физического вакуума, может в дальнейшем приблизить нас к решению единой для естествознания проблемы первоисточника вихревого движения и вывести и физику, и геологию из кризиса.

Корреляция параметров конечной деформации и анизотропии магнитной восприимчивости: сравнение результатов исследования метатурбидитов Северо-западного Приладожья

В.Н. Войтенко

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

В данной работе представлены предварительные результаты исследований свойств анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) и конечной деформетаморфизованных песчаников Северного Приладожья. обломочных породах количественную оценку деформации обычно определяют на основе анизотропии гранулометрических характеристик, однако существуют методы, использующие и другие характеристики горных пород. Исследование магнитных параметров горных пород выявило, что общим свойством их является магнитная анизотропия. Среди различных причин образования магнитной анизотропии важная роль отведена одноосным давлениям при высокой температуре, сопровождающим кристаллизацию и перекристаллизацию горных пород. Таким образом, связь между магнитной анизотропией и текстурными особенностями горных пород позволяет использовать, в частности, АМВ для изучения деформированных пород [1]. Если количественная оценка деформации - стрейн-анализ, является достатрудоёмким. определение AMB является то чувствительным методом для характеристики петроструктуры горных пород. Многочисленные исследования на качественном уровне подтвердили положительную корреляцию между различными параметрами деформации горных пород, однако количественные отношения между этими двумя параметрами остаются дискуссионными [9].

Магнитная восприимчивость горной породы (отношение намагниченности породы к приложенному полю или K=I/H) определяется вкладом всего минералогического состава, включая парамагнитные (слоистые силикаты, ПШ), диамагнитные (кварц, кальцит) и ферромагнитные (магнетит, гематит) зёрна. В общем, АМВ зависит от преобладающей кристаллографической ориентировки, формы зёрен, состава и, в меньшей степени, от количества и размера микротрещин [1, 9]. На основе минералогических данных и величин АМВ для породы в целом и применения теоретических механизмов деформации разработаны методы оценки конечной деформации на основе магнитных характеристик [6].

Оценка однородной конечной внутренней деформации изучаемого объекта возможна по изменению формы и расположения «индикаторов деформации» в составе объекта (оолитов, галек, палеонтологических останков и других). Деформация характеризует изменение формы и объёма и определяется симметричным тензором второго ранга, имеющим шесть независимых

элементов. Для описания деформации используют ориентировку главных направлений деформации (три угла Эйлера) и величины главных деформаций [3], аналогичные параметры используются и для описания эллипсоида AMB [1, 9].

Для проведения стрейн-анализа для каждого ориентированного образца были изготовлены три взаимно перпендикулярных шлифа, дальнейшая обработка производилась по микрофотографиям шлифов. Песчаники анализировались методами стрейн-анализа: R_f/ϕ , «средней радиальной длины» — MRL и методом Фрая [4, 5, 7]. Параметры эллипсов деформации применялись для построения эллипсоида деформации с использованием программы М. Брендона [3, 8]. Для определения AMB из ориентированного образца выпиливался куб ($2\times2\times2$ см). Оценка AMB проводилась на измерителе магнитной восприимчивости KLY-2 с использованием программы SUSAR.4 в лаборатории палеомагнетизма ВНИГРИ (СПб).

Северное Приладожье в тектоническом строении Фенноскандинавского щита представляет собой юго-восточную часть Раахе-Ладожской зоны сочленения эпиархейского Карельского кратона и раннепротерозойского Свекофеннского пояса. Супракрустальные образования на территории Се-Приладожья представлены преимущественно ассоциациями верного карельского комплекса. Здесь выделяется людиковийский надгоризонт (метавулканиты сортавальской серии) И калевийский надгоризонт серии), (метатурбидиты ладожской c границей между ними 1920± 50 млн. лет [2]. Характерными особенностями Северного Приладожья являются наличие купольно-глыбовых выступов архейского фундамента, окаймлённых нижнепротерозойскими вулканогенно-осадочными породами. Выше по разрезу залегают выполняющие межкупольное пространство метатурбидитные породы ладожской серии. Супракрустальные образования Северного Приладожья претерпели зональный региональный метаморфизм фаций средних давлений (группа В). Изучаемые участки расположены в пределах северной части Кирьяволахтинского выступа, где метаморфизм достигает эпидот-амфиболитовой субфации. Литологические границы в вулканитах и метатурбидитах подновлены разрывными нарушениями, а сланцеватость (S1) субпараллельна слоистости.

Для определения магнитных и деформационных характеристик были отобраны 30 ориентированных образцов: 13 из метавулканитов и 17 из метатурбидитов (обломочных пород). Все анализируемые породы классифицированы на три группы по величине средней магнитной восприимчивости (К, в ед. $CU*10^{-6}$): обломочные (120–270), вулканиты (340–570) и метасоматически изменённые вулканиты (1 290–23 240). По степени анизотропии магнитной восприимчивости обломочные породы группируются в узком интервале значений P' (1.1–1.3). Форма эллипсоида AMB в подавляющем большинстве сплющенная вдоль оси Z: $0.2 < T \le 0.9$. Для сравнения результатов AMB и деформации горных пород использовались только 8 образцов

метапесчаников, для которых был проведён стрейн-анализ. Метапесчаники представлены средне-, крупнозернистыми породами с реликтовой обломочной структурой, по минералогическому составу в основном кварцбиотитовые.

Сравнение ориентировок главных осей эллипсоида деформации и главных осей эллипсоида АМВ показало, что в большинстве случаев минимальная ось магнитной восприимчивости суб-перпендикулярна сланцеватости (S1), за исключением приразломных участков разреза, а также совпадает или расположена рядом (10-20°) с осью укорочения эллипсоида деформации. Максимальные и промежуточные оси магнитной восприимчивости также проявляют схожие ориентировки с осью удлинения и промежуточной осью, соответственно. Однако, не смотря на приблизительное совпадение ориентировок осей эллипсоидов деформации и АМВ, величины, характеризующие форму эллипсоида (у и Т), степень АМВ (Р') и величину полной девиаторной деформации (E_d) существенно различаются и не проявляют каких-либо корреляций. Параметры АМВ и деформации, вынесенные на диаграммы (Р'-Е_д) и (T – v) показали независимость распределений величин. Форма эллипсоида деформации в большинстве случаев удлинённая вдоль оси X ($-0.7 \le v < -0.1$), а форма эллипсоида АМВ - сплющенная вдоль оси Z. Также необходимо отметить, что степень АМВ (1.1-1.3) примерно в два раза выше полной девиаторной деформации (0.5–0.8) для одной и той же породы.

Проведённое сравнение параметров конечной деформации и анизотропии магнитной восприимчивости метапесчаников ладожской серии Северного Приладожья позволило выявить следующие деформационные особенности пород. Ориентировка эллипсоидов конечной деформации и АМВ в первом приближении совпадает, что позволяет использовать оценку АМВ, как эффективный метод, для определения ориентировки осей деформации. Это совпадение, даже при существующем малом количестве образцов, представляется нами как наиболее значительное. Корреляция степени АМВ (Р'), формы эллипсоида АМВ (Т) и полной девиаторной деформации (E_d) в исследуемых породах выявила, что эти параметры независимы. Это может быть связано с различными механизмами деформирования зёрен породообразующих минералов в горной породе при деформации и метаморфизме; и степенью вклада магнитных характеристик минералов в совокупную АМВ породы.

В ходе работы вопросы магнитной анизотропии обсуждались с В.Э. Павловым (ИФЗ РАН). Автор благодарен за помощь в определении анизотропии магнитной восприимчивости А.Г. Иосифиди и В.В. Попову (ВНИГРИ).

Литература

1. Использование магнетизма горных пород при геологической съёмке. Под ред. Шолпо Л.Е. Л.: Недра. 1986. 224 с.

- 2. Матреничев В.А., Вревский А.Б. Сергеев С.А., Матуков Д.А. Граница между людиковием и калевием в Северном Приладожье: геологические взаимоотношения и изотопный возраст // Доклады РАН. 2006. Т. 407, № 5. С. 1-5.
- 3. Brandon M.T. Analysis of geologic strain data in strain-magnitude space // Journal of Structural Geology. G. B.: Pergamon Press. 1995. No 17. P. 1375-1385.
- 4. Chew D.M. An Excel spreadsheet for finite strain analysis using the Rf/ \square technique // Computers & Geosciences. 2003. No 29 (6). P. 795-799.
- 5. Erslev E.A., Ge H. Least-squares center-to-center and mean object ellipse fabric analysis // Journal of Structural Geology. G. B.: Pergamon Press. 1990. V. 12, No 8. P. 1047-1059.
- 6. Jezek J., Hrouda F. SUSIE: A program for inverse strain estimation from magnetic susceptibility // Computers & Geosciences. 2007. V. 33, Is. 6. P. 749-759.
- 7. Mulchrone K. F., O'Sullivan F., Meere P. A. Finite strain estimation using the mean radial length of elliptical objects with bootstrap confidence intervals // Jour. of Struct. Geol. 2003. V. 25, Issue 4. P. 529-539.
- 8. Owens W. N. The calculation of a best-fit ellipsoid from elliptical sections on arbitrarily oriented planes # Journal of Structural Geology. G. B.: Pergamon Press. 1984. V. 6, No 5. P. 611-618.
- 9. Pareś J.M., Van Der Pluijm B.A.- Correlating magnetic fabrics with finite strain: Comparing results from mudrocks in the Variscan and Appalachian Orogens // Geologica Acta. 2004. V. 2, Issue 3. P. 213-220.

Комплексирование структурно-парагенетического и кинематического методов – условие дальнейшего прогресса в полевой тектонофизике

О.Б. Гинтов, А.В. Муровская, С.В. Мычак

Институт геофизики НАН Украины, г. Киев, Украина, gintov@igph.kiev.ua

В последние годы как у тектонофизиков стран СНГ, так, особенно, в зарубежной науке интерес к тектонофизическому методу структурных парагенезисов снизился из-за увлечения большими возможностями дислокационного анализа напряжений (по Ю.Л. Ребецкому [1]) с более привычным названием «кинематический метод». К этому следует отнестись резко критически, так как структурно-парагенетический метод «работает» там, где кинематический метод практически неприменим — на древних щитах, при изучении планетарной трещиноватости и ранних этапов развития деформационных процессов. Поэтому если исследователь ставит перед собой задачу тектонофизически осветить возможно больший период тектонического развития определенного региона, ему необходимо использовать оба метода в комплексе.

Объединенная феноменологическая теория прочности Кулона – Навье – Мора доказывает общность физико-механической природы процессов разрывообразования и пластической деформации горных массивов посредством активизации подвижек по старым трещинам. Это позволяет исследовать оба процесса как раздельно, так и в пространственно-временном единстве, используя в комплексе сильные стороны и структурно-парагенетического, и кинематического методов и не опасаясь дублирования результатов или того, что при изучении тектонических событий рассматривались взаимоисключающие теоретические построения.

Обоснование совместного прохождения процессов разрывообразования и фрикционного скольжения позволяет решать задачу уменьшения неоднозначности в определении ориентации главных осей нормальных напряжений, которая нередко проявляется и в структурно-парагенетическом, и кинематическом методах. В первом случае неоднозначность появляется из-за ошибок в идентификации типов сколов, во втором — из-за эквивалентности нескольких решений. Взаимное согласование результатов определения ориентации главных осей для условий одновозрастных процессов трещинообразования и фрикционного скольжения позволяет уточнить положение осей и деформационные режимы.

Удобство кинематического метода, заключающееся в возможности формализации и компьютеризации практически всех операций по обработке и интерпретации материалов полевых измерений, нередко уводит на второй план трудности, связанные с предположительным характером некоторых

критериев, положенных в основу метода. Основной постулат метода – коллинеарность расчетного вектора касательного напряжения и вектора подвижки на плоскости зеркала скольжения – является достаточно приближенным, ибо он соблюдается лишь в идеальных условиях: трещины должны быть гладкими и бесконечными по своей протяженности, то есть пересекать исследуемый горный массив полностью, выходя далеко за его пределы. При несоблюдении этого условия (что в природе встречается чаще всего) взаимовлияние пересекающихся трещин вызывает переориентацию касательных напряжений, возникновение локальных полей, ведущих к изменению направлений подвижек, которое невозможно учесть. Вторая трудность обусловлена тем, что поля напряжений, как и всякие геофизические поля, обладают свойствами эквивалентности и аддитивности, что при наложении нескольких фаз деформации ведет к совпадению или сближению ориентировки векторов подвижек, связанных с разными фазами и разными полями напряжений.

Неоднозначность структурно-парагенетического метода в первую очередь заключается в том, что он опирается на экспериментальные данные и предблизость природных условий условиям эксперимента, что выдерживается далеко не всегда. С другой стороны, этот метод позволяет выполнять операции, важные для общего тектонического анализа, определения деформационных режимов, углов скалывания α_0 и свяпараметров, установления глубинности деформационных процессов, а также хронологической последовательности этапов и фаз деформации земной коры путем прослеживания последовательности возникновения и развития (активизации) деформационных структур, опираясь на характер их взаимоотношений между собой, тип пластических деформаций и все имеющиеся геологические данные о возрасте и структурных преобразованиях горных пород.

Для решения всех подобных задач важную роль играет построение прочностных разрезов земной коры $\Delta \sigma = f(H)$ на основе имеющихся массовых экспериментальных данных о прочности и пластичности горных пород – главных механических характеристиках коры выше раздела Мохо. Нормальные прочностные разрезы земной коры конкретных регионов являются экспериментальной основой для решения некоторых количественных задач при комплексировании структурно-парагенетического и кинематического методов. В сочетании с данными, полученными в поле, они позволяют оценить такие параметры как внутреннее и сухое трение, прочность связей и трение покоя, соотношение возникающих при деформации напряжений с внутрипоровым давлением, сброс напряжений (независимо от порового давления) при переходе от процесса трещинообразования к фрикционному скольжению и др.

При построении порегионных прочностных разрезов учитываются естественные физико-геологические условия, в которых находятся горные породы

на конкретных глубинных уровнях. Соотношение процессов разрушения монолитных объемов горных пород и массивов с трещинами рассматривалось во многих работах, при этом большинство авторов исходили из результатов экспериментов по изучению прочностных свойств горных пород при комнатной температуре и скорости деформирования ≥ 10 –4 с-1, обобщенных Ж. Баэрли, по данным которого прочность горных пород с трещинами почти на всем промежутке интересующих нас глубин в земной коре на 10–20% ниже прочности монолитных пород и должна учитываться при расчете прочностных свойств деформируемых массивов [2].

Однако в работе [3] было показано, что при реальных скоростях деформирования $\leq 10^{-8}$ с-1, и реальных температурах прочность трещиноватых горных массивов ниже прочности монолитных почти повсеместно только в консолидированном фундаменте. В осадочном слое при сжатии она ниже только до глубины $\approx 5-6$ км, при растяжении — до ≈ 10 км, а глубже, начиная с самых высокотемпературных разрезов, соотношение этих величин постепенно становится обратным. Поэтому реальные прочностные разрезы отличаются от экспериментальной зависимости прочность — давление, полученной Ж. Баэрли.

Одно из важных направлений комплексирования — охват тектонофизическими исследованиями возможно большего временного отрезка изучаемого тектонического цикла (или циклов). Начало деформационных процессов после накопления некоторой толщи пород — образование планетарной трещиноватости и тектонических трещин при прогибании бассейна осадконакопления — изучается только структурно-парагенетическим методом. Сжатие и складкообразование, когда формирование разрывов и перемещение пород по плоскостям трещин и поверхностям напластования происходит почти одновременно, изучается обоими методами, а завершающий орогенез и неотектонические движения — в основном кинематическим. Раннедокембрийские тектонические движения могут исследоваться, как уже отмечалось ранее, только структурно-парагенетическим методом. Поэтому непрерывная хронологическая шкала деформационных процессов может быть построена лишь при комплексном использовании обоих методов.

Литература

- 1. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига». 2007. 406 с.
- 2. Byerlee J. Friction of rocks // Pure and appl. Geophys. 1978.No 116. P. 611-626.
- 3. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: «Феникс». 2005. 572 с.

Критерий мощности компетентного слоя в определении изгибного и разломно-пластического стилей деформирования

В.В. Гончар

Институт геофизики НАН Украины, г. Киев, Украина, gonchar@igph.kiev.ua

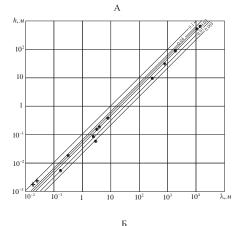
М.В. Гзовский [1] обосновал ряд количественных критериев возникновения складок, обозначив мощность компетентного слоя в качестве основного параметра, контролирующего проявление упругого изгиба и пластического расплющивания при продольном сжатии. В работах [3-5] исследовалась роль мощности пласта в формировании складок с различной длиной волны. Предлагаемый подход обобщает свойства мощности компетентного слоя в определении стиля деформирования и длины волны складки изгиба. Можно показать, что точки складок в координатах длины волны и мощности апроксимируются серией прямых (в логарифмическом масштабе), отвечающих константам безразмерного напряжения $\sigma(1-v^2)/E$ в интервале $0.005 \div 0.1$ (рис. 1, А). Предполагается [3], что получаемые таким образом уровни напряжений являются близкими среднему пределу прочности пород осадочных бассейнов. Используя линейно-упругую – идеально-пластическую реологию условие упругого изгиба можно представить следующим образом: изгиб начинается на пределе упругости ($\varepsilon = \varepsilon_p$), когда одновременно достигается предел пластичности для вмещающей среды и критическое изгибное напряжение Эйлера для компетентного слоя

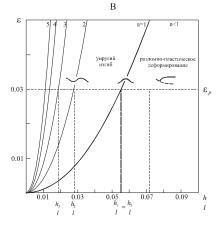
$$\sigma_e = (n\pi h/l)^2 \frac{E}{1 - v^2},\tag{1}$$

где h,l — мощность и длина слоя, $n=l/\lambda$ — изгибное число, λ — длина волны складки. Учитывая, что в случае плоской деформации $\varepsilon = \sigma(1-v^2)/E$ [3], представим уравнение (1) в безразмерном виде

$$h/l = \frac{1}{\pi n} \sqrt{\varepsilon} \ . \tag{2}$$

Полученные в соответствии с (2) кривые (рис. 1, Б) связывают упругую деформацию и относительную мощность слоя h/l при различных значениях числа изгиба. Устанавливая предельную упругую деформацию получим точки пересечения прямой $\varepsilon_p = const$ с кривыми изгибной неустойчивости при n = const. Значения относительной мощности h_i/l для целых значений $n \ge 1$ характеризуют изгиб компетентного слоя и имеют с критической величиной $h_c/l = h_1/l$ отношения, кратные n, то есть, обозначают число изгибов (например, $(h_c/l)/(h_3/l) = 3$), что соответствует выводам традиционного описания связи длины волны и мощности [3, 4]. В правой части для всех сло-





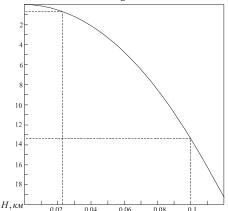


Рис. 1. А — Аппроксимация отношения мощности слоя к длине волны природных складок линиями равных значений безразмерного напряжения $\sigma \frac{\left(1-v^2\right)}{E}$ (оцифрованы). Точки —

данные из работ [3–5], крестики – микроскладки в образцах криворожских кварцитов [2].

Б – Диаграмма, связывающая упругую деформацию с относительной мощностью компетентного слоя (уравнение (2)).

В – Кривая изменения относительной критической мощности с глубиной для терригенных пород в условиях кулоновой прочности

ев с $h/l > h_c/l$ критическое изгибное напряжение Эйлера не будет достигнуто и наиболее вероятным будет развитие разломно-пластической деформации.

Принимая во внимание данные о соотношении мощности слоя и длины волны складок изгиба (рис. 1, A), определяем диапазон изменения предела упругости $\varepsilon_p = 0.005 \div 0.1$, тогда на основании (2) приходим к выводу, что критическая относительная мощность слоев в природе должна колебаться в пределах $0.022 \div 0.1$. Объяснение данного диапазона можно получить, привязывая изменение h_c/l к изменению прочности пород в осадочном разрезе по глубине. Используя выражение Кулона — Мора для прочности получим кривую, описывающую изменение критической относительной мощности с

глубиной (рис. 1, В). Как видно, найденный выше интервал изменения критической мощности полностью перекрывается кривой терригенного разреза в интервале глубин 1-13 км, то есть вполне соответствует диапазону глубин типичного деформированного осадочного бассейна.

Литература

- 1. Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. III, IV. М.: Изд. АН СССР. 1963. 544 с.
- 2. Гончар В.В. Моделирование асимметричной складчатости на основе продольнопоперечного изгиба // Изв. ВУЗов. Геология и разведка, 2005. № 2. С. 3-9.
- 3. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир. 1985. 730 с.
- 4. Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л., Вархафтиг К., Файф У. Земля: введение в общую геологию М.: Мир. 1974. 845 с.
- 5. Currie J.B., Patnode H.W., Trump R.P. Development of folds in sedimentary strata // Geol. Soc. Am. Bull. V. 73. 1962. P. 655.

Относительность некоторых базовых понятий тектонофизики

М.А. Гончаров

Геологический факультет МГУ, г. Mocква, m.a.gonch@mail.ru

Этапы развития тектонофизики. Таких этапов можно выделить три [2]. Первый этап — «не-физический» (до середины 20-го века): господство умозрительных построений, без собственно физической основы (пример — так называемый «эллипсоид деформации Беккера» с его круговыми сечениями, параллельно которым якобы располагаются трещины скалывания). Второй этап — «сопроматный» (до 70–80-х годов 20-го века), когда в нашей стране, в первую очередь усилиями М.В. Гзовского [1], была предпринята попытка заложить «физические основы тектонофизики», что на деле свелось к внедрению некоего «ликбеза» из области учения о сопротивлении материалов. Третий этап ознаменован становлением тектонофизики как самостоятельной отрасли геологии, изучающей весьма длительные процессы, происходящие по своим законам в уникальной геологической иерархически устроенной среде, и оперирующей своими собственными понятиями.

Тектоническое течение. Этот термин понимается двояко: 1) либо, в соответствии с постулатами механики сплошных сред (О. Коши), как сочетание поступательного перемещения, вращения и деформации элементарных объемов геологической среды [2, 3]; 2) либо, гораздо чаще, в соответствии с постулатами «сопромата», как синоним пластической деформации по достижении средой «предела текучести». В настоящее время, в связи с развитием представлений о конвективном характере тектонических движений и деформаций в геосферах разного ранга, первый из указанных подходов имеет несомненное преимущество, поскольку при конвекции вещество не просто «течет», испытывая пластическую деформацию, а «течет в определенном направлении».

Однородность деформации. Этим термином обычно обозначают понятие «однородное поле деформаций». Такое общепринятое сокращенное обозначение иногда приводит к недоразумениям. Например, превращение квадрата при его двумерной деформации в прямоугольник не является достаточным признаком однородной деформации, поскольку при этом остается неизвестным поле деформаций внутри квадрата. Однородность этого поля может быть установлена по деформации внутренней квадратной сетки, если все малые квадраты превратились в одинаковые прямоугольники. Антипример резко неоднородной деформации – квадратные (в вертикальном сечении) ячейки двумерной валиковой конвекции в горизонтальном слое: квадратный периметр ячеек сохраняется неизменным, а их внутренняя квадратная сетка искривляется.

Деформационные ранги, структурные уровни. Если немного усложнить предыдущую модель, подвергнув конвектирующий горизонтальный слой дополнительному боковому сжатию, то мы обнаружим следующее. Слой состоит из ряда квадратных конвективных ячеек (своеобразной «квадратной сетки»), форма которых превратилась в прямоугольную. Все эти квадраты деформированы одинаково (однородная деформация 1-го ранга - ОД-1). Внутри же каждой ячейки деформация резко неоднородна: в нижнем домене (одном из четырех квадрантов ячейки) восходящего конвективного потока и в верхнем домене нисходящего потока господствует обстановка горизонсжатия, a В двух остальных доменах-квадрантах ячейки (в шахматном порядке) – обстановка горизонтального растяжения. Эти деформации противоположного знака взаимно компенсируют друг друга, как по горизонтали, так и по вертикали, обеспечивая сохранение прямоугольной формы периметра ячейки (неоднородная компенсационная деформация 1-го ранга – НКД-1). В доменах горизонтального сжатия в слоистой среде возникает складчатость (ОД-2, поскольку примерно одинаковы возникшие складки). Следующие «вложенные друг в друга» геологические тела испытывают попеременно НКД и ОД, подробнее см. в [2]: отдельная складка (НКД-2), относительно прямолинейное крыло складки (ОД-3), осадочный ритм на крыле (НКД-3), слой в ритме (ОД-4), микролитон с ограничивающими его кливажными зонами (НКД-4). Характерным свойством однородных уровней деформации (ОД) является простота ее количественного выражения. На неоднородных же уровнях (НКД) возникают структурные формы: антиклинории и синклинории на уровне 1-го ранга, складки на уровне 2-го ранга, преломление кливажа на уровне 3-го ранга, сам кливаж на уровне 4-го ранга.

Пластическая и разрывная деформация. По «сопроматной» традиции считается, что, по мере нарастания напряжений, упругая деформация тела переходит, по достижении напряжениями «предела текучести», в пластическую деформацию без разрыва сплошности тела, а затем, по достижении напряжениями «предела прочности», происходит разрывная деформация. Однако понятие о «пределе прочности» нельзя применить в случае сыпучей среды, у которой прочность вообще отсутствует. В то же время эксперименты по растяжению слоев из песка показывают, что при увеличении скорости деформации вместо равномерного удлинения слоев и уменьшения их мощности происходит формирование сбросов. Разрывы сплошности зафиксированы также в «текучих» метаморфических толщах. Поэтому вместо понятия о «пределе прочности» имеет смысл говорить об «энергетической выгоде» относительного перемещения более крупных участков деформируемого тела.

Пластическая деформация тела имеет два аспекта: факт деформации и механизм деформации. Первый аспект — это изменение формы тела, т.е. изменение конфигурации его внешних границ. При этом, по определению,

сплошность тела не нарушается. Второй аспект – это совокупность всех перемещений вещества внутри тела, обеспечивающая изменение его формы. И чем «грубее» эти перемещения, т.е. чем больше размер перемещаемых частей тела, тем меньше оснований говорить о сохранении сплошности тела. Однако все это не означает, что следует отказаться от представления о сохранении сплошности тела при его пластической деформации, поскольку нельзя говорить о деформации вообще: всегда следует сопоставлять два ее параметра – размер самого деформируемого тела (L) и размер (l) тех поверхностей, вдоль которых осуществляется взаимное перемещение отдельных частей тела. Здесь возможны три варианта соотношения этих параметров: 1. L » 1. Разрывное нарушение выступает в качестве механизма пластической деформации, о чем говорилось выше. Таким нарушением сплошности тела можно пренебречь 2. L ~ 1. Разрывное нарушение выступает в качестве альтернативы пластической деформации. В качестве примера можно привести переход вверх по разрезу и (или) по простиранию взброса во флексуру. 3. L « l. Pasрывное нарушение выступает в качестве координатора пластической деформации более мелких объемов на его окончаниях. Эта деформация компенсирует убывание амплитуды разрывного нарушения вплоть до нуля. Для такого сочетания пластической и разрывной деформации также характерно «иерархическое чередование»: однородная деформация (ОД) в телах $L \gg l$, резко неоднородная компенсационная (НКД) – в более мелких составляющих их телах $L \sim 1$ и снова однородная (ОД) в еще более мелких телах $L \ll 1$. При этом максимум деформации имеет место в зоне динамического влияния разлома, разрыва или трещины при отсутствии деформации в разделяемых ими блоках, с компенсационным обеспечением умеренной деформации более крупного тела, составленного из этих блоков.

Заключение. Главная проблема тектонофизики 21-го века — это создание собственной теоретической и понятийной базы, которая, используя в нужной мере законы физики, в то же время была бы основана на свойствах именно геологической среды, притом длительно деформируемой. В частности, нуждаются в модернизации традиционная последовательность в изучении триады «структура — динамика (действующие силы) — кинематика», а также критерии подобия при физическом моделировании.

Литература

- 1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- 2. Гончаров М.А., Талицкий В. $\hat{\Gamma}$., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: Книжный дом «Университет», 2005. 496 с.
- 3. Лукьянов А.В. Пластическая деформация и тектоническое течение в литосфере. М.: Наука. 1991. 144 с.

Современные и палеонапряжения в Печенгском геоблоке по данным исследований разреза Кольской сверхглубокой скважины

Ф.Ф. Горбацевич¹, С.Н. Савченко²

¹ – Геологический институт Кольского НЦ РАН, г. Aпатиты, gorich@geoksc.apatity.ru

 $^{2}-$ Горный институт Кольского НЦ РАН, г. Апатиты

Современные напряжений земной коры являются причиной наиболее грозных природных катастроф, - землетрясений, цунами, оползней и др. Напряжения (палеонапряжения), действовавшие в прошлые геологические времена, определяли направления движения континентальных плит, процессы орогенеза, метаморфогенные преобразования кристаллических пород и др. Исследование Печенгского геоблока, окрестностей и разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) позволили, во многом, прояснить механизмы действия, параметры современных и палеонапряжений в кристаллических породах.

Современные напряжения. Известно, что современное напряженное состояние пород Балтийского щита, в основном, формируется раздвижением континентальных плит в районе срединноокеанических рифтовых зон Атлантического и Ледовитого океанов и давлением Африканской плиты на Евразийскую литосферную плиту. С учетом условий передачи напряжений и деформаций, геометрии блоков, методами численного моделирования построена модель распределения современных напряжений на территории Фенноскандии [1]. Наиболее интересным и сложным объектом на севере Балтийского щита является Печенгский геоблок. На основании анализа разломной тектоники и данных о физико-механических свойствах пород, слагающих массивы Печенгского геоблока получено, что вблизи поверхности максимальные сжимающие напряжения изменяются незначительно – от $1.1\ T$ до 1.2 T, а минимальные от 0.6 T до 0.9 T, где T = 50 МПа. Ориентация максимальных сжимающих напряжений в блоке преимущественно субмеридиональная. Однако геологическое и тектоническое строение этого блока весьма сложное и пока позволило создать лишь общую карту распределения горизонтальных напряжений. В окрестности СГ-3 усредненные главные горизонтальные напряжения примерно равны: $\sigma_1 = 1.05 T_1 \sigma_2 = 1.11 T_2$. Азимут наибольшего сжатия составляет ≈ 320°.

При изучении распределения напряжений в разрезе СГ-3 по вертикали были использованы методы: расчетный, насыщения разуплотненных образцов, их нагружения, оценки по степени дискования керна. Сводные данные показали, что с учетом тектонических напряжений, горизонтальная составляющая $\sigma_{\rm q}$ поля напряжений по разрезу Кольской сверхглубокой довольно близка к вертикальной $\sigma_{\rm z}$. Экспериментально определение их отношения составляет

0.7–0.8. Резкие изменения величины $\sigma_{\rm q}$ фиксируются в зоне контакта толщ протерозойского и архейского возрастов (6.4–6.9 км) и смены углов падения сланцеватости, пространственной ориентировки элементов упругой симметрии пород (9–9.7 км). Наряду с неоднородностями структуры разреза, упругая анизотропия пород заметно влияет на значения горизонтальной составляющей поля современных напряжений. Рост упругой анизотропии сопровождается изменениями $\sigma_{\rm q}$ в диапазоне глубин 6.4–8.8 км. Резкий скачок этой величины в районе глубины 9.7 км также связан с высокой упругой анизотропией пород [2].

Палеонапряжения. Палеонапряжения в геодинамике Печенгского геоблока играли существенную роль. На это указывает сложная геология, метаморфизм пород протерозойского и архейского возраста, наличие Луоттинского и Лучломпольского разломов и др. Разрез СГ-3 также проходит через метаморфические породы протерозойского и архейского возраста. В

вертикальном разрезе архейского комплекса выделено 10 толщ, характеризующихся различным составом и сочетанием слагающих их пород, типом регионального и дислокационного метаморфизма, гранитизации, элементами пликативной и дизьюнктивной тектоники.

были проанализированы траектории четырех стволов Кольской скважины СГ-3, пройденных в разное время, достигшие различных предельных глубин. На рис. 1 траектории этих стволов вынесены на горизонтальную плоскость. Выполненный анализ показал, различных глубинах, в пределах различных свит и толщ, плоскость структурной (упругой) анизотропии пород занимает разное положение. В пределах всего разреза выделяется 10 интервалов (этажей), различающихся параметрами пространственного положения плоскости струк-

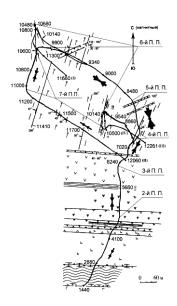


Рис. 1. Траектории стволов Кольской сверхглубокой скважины в проекции на горизонтальную плоскость

турной анизотропии, упруго-анизотропными свойствами пород [2].

Характеристики этажей с различающимися параметрами их пространственного положения и показателя анизотропии были исходными для построений пространственных ориентировок компонент палеонапряжений. В соответствии с этим, на рис. стрелками отображена направленность действия главной

компоненты палеонапряжений на разных глубинах разреза СГ-3. Толщина стрелок пропорциональна усредненной величине этой компоненты.

Судя по параметрам упругой анизотропии, протерозойская часть разреза СГ-3, за исключением рудного интервала 1.7–1.9 км [2] и зоны Лучломпольского разлома формировалась при сравнительно спокойном палеотектоническом режиме и слабых горизонтальных силах. В архее происходили значительные геодинамические события, связанные, скорее всего, с циклом Кольско-беломорского метаморфизма. Отдельных этапы цикла отличались как по интенсивности, так и по направленности действия тектонических сил. Из полученных данных следует, что структура и анизотропия пород, возникшая в период этих этапов, не была изменена палеогеодинамикой более поздних этапов.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант № 07-05-00100-а.

- 1. Савченко С.Н., Козырев А.А. Исследование напряженного состояния массива горных пород вблизи Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2002. № 2. С. 163-174.
- 2. Строение литосферы российской части Баренц-региона. Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2005. 318 с.

Принцип минимизации гравитационной энергии и напряженное состояние тектоносферы

М.М. Довбнич

Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина, dovbnichm@nmu.org.ua

Напряженно-деформированное состояние является одной из важнейших характеристик земной коры, определяющей развитие большинства тектонических и геодинамических процессов. Автору представляется, что дополнительную информацию о тектонических напряжениях можно получить на основе анализа отклонений от равновесного состояния вращающейся Земли.

Цель настоящей работы – рассмотрение основных методических положений расчета и некоторых результатов оценки напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии.

На 27-й сессии Международного Геологического Конгресса К.Ф. Тяпкиным была предложена новая модель равновесного состояния вращающейся Земли, названного геоизостазией [1]. Физико-математической основой данной концепции является принцип минимизации гравитационной энергии. Данный принцип неоднократно использовался исследователями (И.Г. Клушин, Э.Л. Шен, В.В. Кузнецов) для объяснения внутренней структуры, эволюции и протекания геологических процессов Земли.

Опираясь на исследования В.В. Кузнецова [2] кратко остановимся на основных положениях принципа минимизации гравитационной энергии. Данный принцип равнозначен известной в физике вариационной задаче о минимуме поверхностной свободной энергии. Принцип минимизации гравитационной энергии планеты заключается в том, что площадь фазовой поверхности стремится быть минимальной. В нашем случае фазовой поверхностью является поверхность геоида. Принцип минимизации «заставляет» планеты стремиться к гидростатическому равновесию, его выполнение приминимизации площади физической поверхности Равновесной формой вращающейся Земли является эллипсоид вращения. Земля достигнет гидростатического равновесия в тот момент, когда отклонение геоида от эллипсоида в целом по Земле окажется равной нулю. Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать аномалии геоида, в тоже время имеют место процессы, приводящие к нарушению равновесного состояния. На сегодняшний день можно считать окончательно установленным, что Земля находится в состоянии близком к состоянию гидростатического равновесия вращающейся, неоднородной по радиусу жидкости. При этом в качестве критерия уравновешенности Земли могут служить как отклонения геоида от эллипсоида, обусловленные неоднородностями тектонической природы внутри планеты, так и деформирование фигуры планеты под действием вариаций скорости вращения, изменения положения оси вращения в теле Земли, лунно-солнечных приливов и пр. Поскольку существуют отклонения реальной физической поверхности Земли от эллипсоида, то в соответствии с принципом минимизации гравитационной энергии должны существовать и напряжения, стремящиеся выровнять эти неоднородности, привести их в соответствие с фигурой равновесия. Естественно, что закон распределения напряжений будет определяться функцией отклонения физической поверхности Земли от эллипсоида.

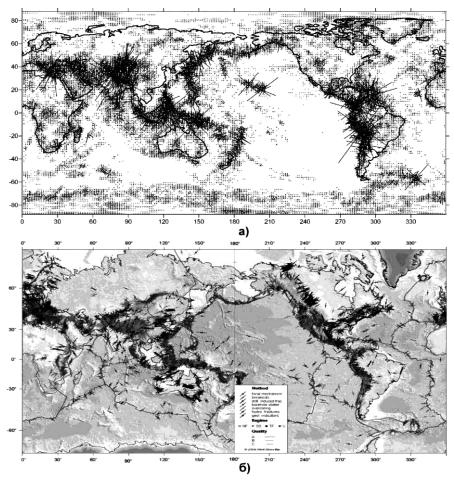


Рис. 1. Сопоставление осей геоизостатических напряжений (а) с осями напряжений (б), полученными в рамках проекта World stress map

На основе разработанных автором алгоритмов, выполнен анализ напряженного состояния тектоносферы, обусловленного нарушением геоизостазии, проявляющимся в виде аномалий геоида, определенных на основе данных спутниковой гравиметрии (проект GRACE). Данные аномалии являются индикатором тектонических напряжений, повлекших за собой возникновение плотностных неоднородностей в земной коре и мантии, проявляющихся в виде нарушений геоизостазии. В работе [3] выполнен анализ структуры и возможной природы аномалий геоида, показано, что аномалии геоида представляют собой суперпозицию трех составляющих, вызванных различными причинами. При выполнении настоящих исследований расчет полей напряжений был выполнен на основе "высокочастотной" составляющей аномалий геоида [3], так как именно в этих аномалиях, по мнению автора, находят отражение тектонические процессы, протекающие в верхних тектоносферы, представляющие интерес как при решении теоретических, так и прикладных вопросов. С целью оценки тектонической и геодинамической позиции полей напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии, было выполнено их сопоставление с полями напряжений полученным в рамках проекта World stress map (рис. 1). Как видно из рисунка области аномально высоких тектонических напряжений, выделяемые независимыми методами тесным образом коррелируются с аномалиями полей напряжений геоизостаприроды. Подобная зависимость подтверждает допущение о связи полей геоизостатических напряжений с тектоническими процессами, а фактически тектоническими напряжениями, вызывающими нарушение равновесного состояния физической поверхности вращающейся Земли.

В заключении необходимо отметить, что использование явления геоизостазии, открывает новые возможности для изучения напряженного состояния тектоносферы и его использования при решении задач тектоники и геодинамики.

- 1. Тяпкин К.Ф. Новая ротационная гипотеза структурообразования и геоизостазия // Геофизический журнал. 1980. № 5. С. 40-46.
- 2. Кузнецов В.В. Физика Земли: обоснование и разработка модели «горячей» Земли. ИКИР, Камчатка: 2006. 465 с.
- 3. Довбнич М.М. Разночастотные составляющие аномалий геоида, их структура и природа // Геофизический журнал. 2007. № 5. С. 201-212.

О модели развития сейсмотектонического процесса во внутриконтинентальных районах Евразии

П.Г. Дядьков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики CO PAH, г. Новосибирск, djad@uiggm.nsc.ru

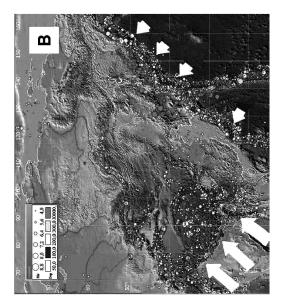
Представленное в докладе исследование посвящено проблеме взаимовлияния сейсмотектонических процессов, происходящих на конвергентных границах тектонических плит и во внутриплитных областях.

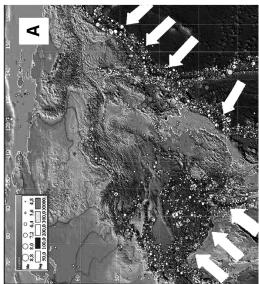
Выполненный анализ развития сейсмических активизаций на востоке Евразии и в районах Центральной Азии позволил выявить следующее:

- в абсолютном большинстве сейсмоактивных регионов Северо-Восточной и Центральной Азии в той или иной степени проявилась активизация 1987—1991 гг, которая характеризовалась преобладанием механизмов очагов землетрясений со сдвиговыми и взбросо-сдвиговыми компонентами подвижек. За этой внутриконтинентальной активизацией последовала сильнейшая за предшествующие 20–30 лет активизация в зонах субдукции на северо-западе Тихого океана (Курилы, Япония, Камчатка), которая имела место в 1993—1995 гг. Между активизациями 1987—1991 гг и 1992—1993 гг наблюдалось кратковременное сейсмическое затишье.
- во время активизации в зоне Западно-Тихоокеанской субдукции (1993-1995 гг) в большинстве рассмотренных районов Северо-Восточной и Центральной Азии отмечалось умеренное, либо более интенсивное (Байкал), увеличение сейсмической активности в 1994—1996 гг. Характерной особенностью этой активизации являлось исключительное преобладание сбросовых компонент подвижек в очагах землетрясений в зонах раздвига (Байкальский регион) [1, 2] и значительное увеличение процента такого типа подвижек в зонах сжатия и сдвига (Северный Тянь-Шань) [3].
- во время отмеченных выше активизаций 1987–1991 и 1993–1996 гг наблюдалось также увеличение числа деструктивных динамических проявлений горного давления и техногенных землетрясений на рудниках Дальнего Востока, Горной Шории и Урала.

Одним из наиболее вероятных источников таких мегарегиональных сейсмических активизаций во внутриконтинентальных областях Евразии могут быть межплитные процессы на конвергентных границах Евразийской плиты с Индо-Австралийской и Тихоокеанской плитами.

Поскольку релаксация части накапливаемых на этих конвергентных границах напряжений происходит циклически, что особенно ярко проявляется в зонах субдукции, то во внутриконтинентальных частях Евразии, особенно на границах микроплит и блоков, могут наблюдаться изменения внутрикоровых напряжений в зависимости от стадий сейсмического цикла [2, 3].





вания в областях Центральной и Восточной Азии. Левый рисунок отображает стадию 1 с накопленными в районе конвергентных границ упругими деформациями (белые стрелки). Правый рисунок показывает изменившуюся ситуацию после сейсмической активизации в зонах субдукции, в результате которой произошло временное частичное снятие упругих деформаций в зонах субдукции (стадия 2). Кружками ис. 1. Схема действия механизма стесненного (А) и частично стесненного (В) латерального деформироизображены эпицентры землетрясений

Для более наглядного объяснения этого механизма рассмотрим его в рамках условий стесненного и частично стесненного деформирования, рассмотренного в работе [4], где такой подход был применен для описания стационарных режимов деформирования среды при коллизионном влиянии. С этой точки зрения земная кора во внутриконтинентальных областях будет находиться либо в условиях стесненного деформирования – в интервале времени между сейсмическими активизациями на конвергентных границах (стадия 1), либо в условиях частично стесненного деформирования - во время сейсмической активизации на одной из конвергентных границ и какое-то время после нее (стадия 2) - см. рис. 1. Отметим, что условия деформирования среды во время стадии 1 способствуют более плотной упаковке ее блоковой структуры. Этот период стесненного деформирования может сопровождаться внутриплитными землетрясениями с преобладанием сдвиговых и взбросовых механизмов очагов. При частично стесненном деформировании (стадия 2) может возникать степень свободы на восточной границе Евразийрезультате разрушения зацепов плиты в и барьеров континентальной и субдуктирующей океанической плитой посредством сейсмической активизации. На стадии 2 в районах Центральной и Восточной Азии может наблюдаться увеличение процента землетрясений со сбросовой компонентой подвижки в очагах землетрясений не только в областях раздвига (рифты и грабены), но также и в областях с преобладанием режима сдвига и сжатия.

Важным является вопрос об особенностях переходного периода (1992—1993 гг.) между активизациями 1987—1991 гг и 1993—1995 гг. Пока не ясно, заканчивалась ли стадия 1 снижением уровня накопленных упругих деформаций как во внутриконтинентальных областях, так и, до определенного уровня, в зонах субдукции. Последнее могло ослабить межплитные контакты и спровоцировать здесь начало сейсмической активизации 1993-1995 гг. Однако не исключено, что в условиях стесненного деформирования период сейсмического затишья 1992—1993 гг мог быть связан с дальнейшим накоплением упругих деформаций, при котором определенную роль могли играть и дилатансионные явления.

- 1. Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Саньков В.А. Сейсмотектоническая активизация Байкальского региона в 1989-1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование изменений напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 373-386.
- 2. Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Саньков В.А., Л.А.Назаров, Л.А.Назарова, В.Ю.Тимофеев Современная динамика Байкальского рифта: эпизод сжатия и последующее растяжение в 1992-1996 годах // Доклады РАН. 2000. Т. 72, № 1. С. 9-103.
- 3. Дядьков П.Г., Полешко Н.Н., Калмыкова Н.А., Ли А.Н., Тихомиров А.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Влияние Западно-Тихоокеанских субдукционных процессов на изменения напряженного состояния земной коры и сейсмичность Центральной Азии // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: (Материалы XXXVII Тектонического совещ.), Новосибирск, 10-13 фев. 2004 г. Новосибирск: 2004.Т. 1. С. 168-169.
- 4. Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформациии Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы коллизионно-блочной геодинамики // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 7. С. 692-723.

О пространственных вариациях анизотропии упругих свойств керна и горных пород из обнажений на поверхности как индикаторах напряженного состояния

В.Л. Ильченко

Геологический институт Кольского НЦ РАН, г. Aпатиты, vadim@geoksc.apatity.ru

Немаловажной в тектонофизических исследованиях является проблема возможности прогнозирования пространственного расположения в литосфере или хотя бы в пределах отдельно взятого геоблока участков или зон с аномальным напряженно-деформированным состоянием. В настоящей работе делается попытка объяснить пространственное распределение подобных зон совокупным влиянием силового геодинамического воздействия и индивидуального для каждого отдельно взятого геоблока волнового поля.

Образцы из внутренних областей литосферных блоков достаются исследователю, главным образом, в виде керна. Упругие свойства и анизотропия керна в значительной мере обусловлены разгрузкой от напряженного состояния, в котором он пребывал до выбуривания и подъёма на поверхность, релаксацией поля напряжений, действовавших в массиве во время отбора керна – тектоно-кессонного эффекта [1]. При этом глубина места отбора керна, проявляющего признаки аномального напряженно-деформированного состояния в массиве, может быть и не очень большой [2]. Таким образом, упругие свойства и анизотропия кернового материала отображают современнапряженно-деформированное состояние в точке отбора керна. Происхождение же современного напряженно-деформированного состояния может иметь довольно древние корни. В особенности если речь идет о кристаллических щитах, активная тектоническая жизнь которых завершилась в докембрийские времена. Один из примеров тому – зона Лучломпольского разлома [3], вскрытая Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3).

Образцы с поверхности. Упругие свойства и анизотропия образцов с поверхности, по-видимому, также обусловлены разгрузкой от напряженного состояния, в значительной мере усугубленной процессами выветривания. При этом довольно сложно сказать что-либо определенное о времени начала и завершения процесса такой разгрузки. Вероятно, скорость разгрузки, в данном случае, пропорциональна скорости эрозионных процессов, которые в разные периоды могли существенно различаться.

На основании достаточно большого количества наблюдений, заключающихся в систематических измерениях анизотропии упругих свойств керна и образцов горных пород с поверхности можно сделать вывод, что и внутри массивов горных пород и на поверхности вариации их упругих свойств и анизотропии в пространстве подчиняются ряду одних и тех же закономерностей. Закономерности эти таковы, что во-первых, в каждом геоблоке

существует индивидуальная картина пространственных вариаций анизотропии упругих свойств; во-вторых, такое распределение, в большинстве случаев, может быть описано графиком гармонического колебания для образцов из обнажений с поверхности или графиком затухающего колебания для керна скважин. Эти вариации бывают прекрасно выражены в рельефе, если местность гористая, в гармоничной периодичности "нарезки" ущельями горных цепей и их отрогов. Пространственные вариации анизотропии упругих свойств керна скважин во многих случаях также подчиняются волновому закону. Эти закономерности, по-видимому, касаются всех пород в пределах тектонических границ геоблоков. Выражаясь образно: «все струны звучат». А поскольку нет двух одинаковых геоблоков, то нет и одинаковых «звучаний». Каждый блок, со времени обособления, «поёт» свою песню, в своей «тональности» и своим «голосом». Иначе говоря, каждый обособленный геоблок является колебательной системой, испытывающей со всех сторон (от соседблоков) динамическое воздействие. Возникновение колебательной системы, представляет собой, по-видимому, совокупность бегущих и стоячих волн, вызываемых приливным лунно-солнечным воздействием на литосферу. Совокупность воздействия на геоблок поля стоячих волн (с их зонами пучностей и узлами) с полем внешнего динамического воздействия со стороны соседних геоблоков может порождать гармоническое пространственное распределение вариаций анизотропии упругих свойств пород, слагающих геоблок. В экспериментальной работе, посвященной исследованию вероятной роли стоячих волн в процессе разрушения образцов горных пород, находящихся в ситуации одноосного сжатия (между плитами пресса), было установлено, что разрушение происходит по системам трещин, образующих совокупность вложенных конусов – аналог структуры "cone-inсопе" [4]. Степень сложности колебательной системы и, соответственно, геометрии пространственного расположения зон напряженно-деформировансостояния, напрямую ОТ конфигурации зависит (геометрических очертаний) и некоторых других специфических его особенностей. Пространственные вариации упругих свойств и анизотропии пород, находящихся в колебательной системе, подчиняются установившейся раз и надолго (по крайней мере, на период сохранения целостности геоблока) гармонии, подобно акустическим свойствам концертного зала или театра.

Судя по имеющейся информации о пространственных вариациях анизотропии упругих свойств, не исключены ситуации, когда может происходить наложение новейших волновых полей на картины распределения анизотропии упругих свойств, оставленные палео- и про-палео-полями. Такие наложения могут быть обусловлены, например, разделением (расколом) одного мегаблока с уже сформированной волновой картиной распределения анизотропии упуругих свойств, на несколько блоков, соответственно с приобретением этими блоками собственной, отличной от всех остальных конфигурацией, заставляющей этот блок "звучать" по-новому и, соответст-

венно, перестраивать или перенастраивать в нём вариации пространственного положения анизотропии упругих свойств пород. Оставшиеся в новом блоке реликты, обусловленные прежней волновой картиной могут оказывать искажающее воздействие на новое "звучание". Такое искажение может способствовать усложнению волновой картины в результате суперпозиции остатков старого и нового волновых полей. Нечто подобное наблюдается в разрезе СГ-3 в интервале глубин 9–11 км [5].

Подтверждение в будущем правоты высказанной здесь гипотезы может быть весьма полезным для избегания проблем, какие могут возникать в результате сооружения, например, стратегических объектов народного хозяйства в непосредственной близости от зон с аномальным напряженно-деформированным состоянием.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 07-05-00100-а.

- 1. Горяинов П.М., Давиденко И.В., Горбацевич Ф.Ф., Ланев В.С., Медведев Р.В., Смирнов Ю.П. Теоретические и экспериментальные основы тектоно-кессонного эффекта (явление дезинтеграции), геодинамические следствия // Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов европейской части СССР. Апатиты: 1992. С. 136-144.
- 2. Горбацевич Ф.Ф., Ильченко В.Л., Смирнов Ю.П. Геодинамическая обстановка в интервале 1.7-1.9 км Кольской сверхглубокой скважины // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2000. № 1. С. 70-77.
- 3. Ильченко В.Л., Горбацевич Ф.Ф., Смирнов Ю.П. Анизотропия упругих свойств керна и состояние пород околоствольного массива Кольской сверхглубокой скважины в зоне Лучломпольского разлома // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2005. № 3. С. 1-11.
- 4. Ильченко В.Л. Физическое моделирование напряженного состояния и деформаций в нагружаемой твердой среде, находящейся под воздействием ультразвуковых стоячих волн // Труды Всероссийского совещания «Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы». Новосибирск: Изд. СО РАН. Филиал «Гео». 2003. С. 49-53.
- 5. Ильченко В.Л., Горбацевич Ф.Ф., Смирнов Ю.П. Упругая анизотропия образцов керна Кольской сверхглубокой скважины из интервала 8.7-11.4 км // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1999. № 3. С.151-159.

Вариации поляризации упругих волн как индикатор вариаций тектонических напряжений

С.Н. Кашубин

ФГУП «ВСЕГЕИ», г. С-Петербург, Sergey_Kashubin@vsegei.ru

Согласно гипотезе экстенсивно-дилатансионной анизотропии (ЭДА), выдвинутой S. Crampin [1], одной из вероятных причин сейсмической анизотропии в земной коре является линейная упорядоченность, возникающая в трещиноватой среде под действием ориентированных тектонических напряжений. Земная кора не является сплошной средой. Она насыщена заполненными флюидами и газами трещинами (микротрещинами) и порами. Благодаря высокой податливости и подвижности флюидов, поддерживающих поры и микротрещины в открытом состоянии, под действием ориентированных напряжений происходит закрытие одних из них (тех, что ориентированы перпендикулярно максимальному сжимающему усилию) и раскрытие других (ориентированных перпендикулярно минимальному сжатию или максимальному растяжению). Напряжения в некоторых случаях или, возможно, в большинстве случаев могут не открывать трещины, а просто изменяют форму пор или изменяют ранее существующие трещины. Таким образом, если преобладающее напряжение в земной коре является сжимающим, то микротрещины будут иметь тенденцию к линейной упорядоченности параллельно главной оси сжатия; если преобладающее напряжение является растягивающим, то микротрещины будут иметь тенденцию к линейной упорядоченности, перпендикулярной главной оси растяжения. Важно то, что по гипотезе ЭДА возникновение и разрастание большого количества мелких трещин может происходить в регионах, где напряжение по величине на один-два порядка меньше, чем необходимо для возникновения разломов. В результате порода, в которой возникает такая линейная упорядоченность, станет анизотропной по отношению к сейсмическим волнам.

Волновые поля в анизотропных средах имеют ряд особенностей по сравнению с волновыми полями в изотропной среде [2]. При этом наиболее чувствительными к экстенсивно-дилатансионной анизотропии оказываются сдвиговые волны, демонстрирующие при распространении в определенных направлениях эффект расщепления поперечной волны. Дело в том, что поперечная волна, входящая в область анизотропии, как правило, расщепляется на две (или больше) квазипоперечных волны с различными скоростями и различными, почти ортогональными, поляризациями, фиксированными для данного направления распространения. Причиной расщепления является временное запаздывание между разнополяризованными волнами. Принципиальным является то, что при наличии ориентированных горизонтальных напряжений ЭДА-трещины ориентируются в вертикальной плоскости, т.к.

почти повсеместно присутствующее вертикальное литостатическое давление препятствует раскрытию горизонтальных трещин. Таким образом, представляется, что обнаружить и оценить явление ЭДА можно, прежде всего, по азимутальным наблюдениям расщепления поперечных волн. При этом направления смещений в более «быстрых» S-волнах будут соответствовать преобладающему направлению ориентировки трещиноватости, (т.е. направлению преобладающего сжимающего напряжения), а смещения в «медленных» S-волнах – ортогональному направлению.

Результаты сейсмических исследований на Урале [2] показали, что волновым полям, возбуждаемым при взрывах, свойственна изменчивость кинематических и поляризационных характеристик, обусловленная не только 3-мерной структурой, но и азимутальной анизотропией упругих свойств земной коры складчатого пояса. Сопоставление этих данных с распределением тектонических напряжений в земной коре Урала по данным измерений напряженного состояния в горных выработках, изучения современных движений в процессе высокоточных режимных геодезических измерений и наблюдений местной сейсмичности показали, что установленные аномалии сейсмической анизотропии могут быть связаны с напряженным состоянием среды. В частности, азимуты максимальных значений скоростей и векторов смещений частиц в первых вступлениях поперечных волн совпадают с ориентировкой максимальных сжимающих напряжений, установленных в результате измерений в горных выработках, а аномалии расщепления поперечных волн вдоль Урала коррелируются с распределением эпицентров тектонических землетрясений. На этом основании был сделан вывод о применимости гипотезы ЭДА к консолидированной части земной коры Урала и о преобладании региональных сжимающих напряжений субширотного направления в его пределах.

Анализ временных вариаций сейсмической активности на Урале показал, что намечается определенная цикличность в активизации и затухании этой активности. Сравнение периодичности сейсмической активизации с вариациями скорости вращения Земли показывает, что сейсмическая активность Урала возрастает в периоды замедления скорости вращения Земли. В годовом цикле выделяются максимумы и минимумы сейсмоактивности. Намечается также определенная приуроченность возрастания количества тектонических событий к периодам новолуния, когда приливные силы Солнца и Луны однонаправлены. На этом основании был сделан вывод о наличии вариаций напряжений в земной коре Урала [3].

Таким образом, было предположено, что, если вариации поля напряжений в соответствии с гипотезой ЭДА, вызовут изменения анизотропных свойств среды, то это проявится в изменении поляризации сейсмических волн. Принципиально новым элементом в предлагаемом подходе является то, что предполагается анализировать не вариации времен вступлений волн и даже не вариации отношения Vp/Vs, а гораздо более чувствительный параметр

волнового поля – поляризацию S-волны, что не делалось при подобных исследованиях ранее.

Были проанализировать записи нескольких сотен промышленных взрывов с одного и того же карьера за период с 2000 года на одном из пунктов локальной уральской сейсмологической сети, на котором эффект расщепления S-волн фиксируется достаточно четко. В качестве анализируемого параметра волнового поля использовалась разность времен вступлений двух ортогонально поляризованных поперечных волн, определяемая через функцию взаимной корреляции соответствующих горизонтальных компонент сейсмической записи [4]. По всем записям в течение месяца определялась среднеквадратическая погрешность среднего значения Δt . Было установлено, что наблюдаемые квазипериодические вариации Δt превышают соответствующие среднеквадратические погрешности, а произошедшие за это время тектонические события имели место после того как разность времен вступлений ортогонально поляризованных поперечных волн достигала максимума.

Если считать, что увеличение Δt связано с возрастанием сжимающих напряжений в среде, то полученный результат позволяет положительно оценивать перспективы мониторинга напряженного состояния геологической среды по вариациям поляризации сейсмических волн, возбуждаемых промышленными взрывами. А это, в свою очередь, открывает принципиально новые возможности, как в части среднесрочного прогноза сейсмической активности, так и в связи с решением задач сейсмического районирования.

- 1. Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic // Geophys. J. R. astr. Soc. 1978. V. 3. P. 67-496.
- 2. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе. Екатеринбург: УрО РАН. 2001. 182 с.
- 3. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона / С.Н. Кашубин, В.С. Дружинин, А.Н. Гуляев и др./ Екатеринбург: УрО РАН. 2001. 126 с.
- 4. Кашубин Н., Дружинин С., Пустовалов А. Возможности мониторинга напряженного состояния геологической среды по вариациям поляризации упругих волн // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Материалы Международной конференции Т. 2. Казань: Изд. Казанск. гос. ун-та. 2007. С. 60-62.

Дифференциация тектонических напряжений в верхней части земной коры с учетом влияния природных и техногенных факторов

А.А. Козырев, С.Н. Савченко

Горный институт Кольского НЦ РАН, г. Апатиты

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлен факт широкой распространенности тектонических напряжений в верхней части земной коры как в изверженных кристаллических породах, так и в осадочном (метаморфизованном) комплексе пород.

М.В. Гзовским в 1954 году впервые было введено понятие «тектонические поля напряжений» [1, 2], им же в этот период предложен метод реконструкции палеонапряжений (ориентировки главных напряжений) по геологическим данным о трещинных структурах.

По данным экспериментальных определений в породах кристаллического и складчатого фундамента горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 60% случаев, в осадочных породах — в 15–20%. Причем это превышение может достигать до 5–10 раз и именно горизонтальные напряжения определяют особенности проявлений горного давления и устойчивость конструктивных элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых и комплексов различных подземных выработок.

В настоящее время получили признание две концепции о формировании поля напряжений в верхней части земной коры. Согласно первой естественное поле напряжений определяется действием гравитационных и остаточных напряжений, связанных с генезисом формирования массивов. Остаточные напряжения рассматриваются как самоуравновешивающиеся компоненты напряжений при отсутствии действия внешних сил. Исходя из предположения о взаимосвязи остаточных напряжений с условиями формирования массивов, следовало бы ожидать, что в течение длительных геологических периодов времени эти напряжения должны были бы прорелаксировать.

Согласно второй концепции суммарное поле напряжений в массиве определяется совместным действием гравитационного и тектонического полей, соотношение между которыми меняется в значительных пределах. Тектонические поля напряжений связываются с современными движениями плит и блоков земной коры.

Условия и закономерности проявления тектонических напряжений весьма разнообразны. Параметры поля напряжений в массиве характеризуются большой изменчивостью как по площади, так и с глубиной и находятся в сложной зависимости от тектонотипа региона, интенсивности современных движений, свойств пород, структурных неоднородностей и нарушенности массива, рельефа и ряда других факторов. Тектонически напряженные мас-

сивы отличаются повышенными значениями градиента скорости современных поднятий земной коры, повышенной сейсмической активностью, аномальными проявлениями горного давления в скважинах и подземных выработках на сравнительно малых глубинах.

Согласно опубликованным данным по измерениям на территориях Фенноскандии, Северной Америки, Канадского щита, ЮАР, Австралии, России и стран СНГ широко распространено мнение о линейной зависимости избыточных горизонтальных напряжений с глубиной, причем градиент их роста с глубиной для отдельных территорий различный [3]. Отмечается снижение разницы между максимальными горизонтальными и вертикальными напряжениями в массиве пород с углублением горных работ. По-видимому, с глубиной за счет роста вертикальной составляющей отношение этих напряжений будет стремиться к единице. Имеющиеся данные по Южной Африке на глубине до 4000 м свидетельствуют о гидростатическом распределении напряжений в массиве. По нашим данным [4, 5], полученным в результате исследования кернового материала Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, отношение средней величины горизонтальных напряжений (с учетом бокового отпора) к вертикальным на глубинах до 12000 м близко к 0.8.

Анализ мировой карты напряжений в верхней части земной коры [6] показывает, что проявления тектонических напряжений приурочены, главным образом, к границам взаимодействия литосферных плит, зонам субдукции и связаны напрямую с движением плит. Следует отметить, что горизонтальные и вертикальные движения земной коры взаимосвязаны и их соотношение определяется тектонотипом региона, строением и местоположением участка земной коры. Но поскольку в настоящее время наиболее изученными являются вертикальные движения, то, как правило, распределение тектонических напряжений связывают преимущественно с ними.

Первым такую взаимосвязь напряжений с новейшими движениями земной коры попытался установить М.В. Гзовский. Он предложил приближенную формулу для определения величины касательных напряжений по средним градиентам вертикальных перемещений поверхности земной коры. Им же впервые дана оценка величины касательных напряжений в земной коре на территории СССР [7].

Нами предложена схема формирования избыточных горизонтальных напряжений в пределах крупных блоковых структур, основанная на положениях тектоники плит, за счет раздвига пород в рифтовых зонах и давления океанической части плиты на континентальную, либо континентальной плиты на континентальную. По данным численного моделирования в упругой постановке при заданных в принятой гипотезе граничных условиях показана неоднородность поля напряжений в блочной структуре плиты [8]. Изменение направлений и величины главных напряжений в отдельных блоках обусловлены изменчивостью свойств пород, параметрами залегания межблоковых разломов, их линейными размерами, условиями нагружения на

границах модели. Показано удовлетворительное совпадение регионального направления максимального сжатия в отдельных блоках с реконструированными по тектонофизическим данным, механизму очагов землетрясений, либо по данным непосредственных измерений в массиве.

Изучена динамика изменения напряженного состояния пород вокруг очистных пространств отрабатываемых месторождений, выявлены характерные зоны вблизи выработанных пространств на различных этапах ведения очистных работ и пространственное их расположение, в пределах которых превалирующее влияние могут оказывать как вертикальные, так и горизонтальные напряжения, либо их комбинации.

Новой представляется проблема проявления техногенной сейсмичности в тектонически напряженных массивах при ведении крупномасштабных горных работ, организация мониторинга в таких районах [4]. Выемка больших горных масс при действии в массиве тектонических напряжений и гористом рельефе поверхности сопровождается волнообразными знакопеременными деформациями массива, увеличением скорости его деформирования иногда на порядок, что может привести к изменению геодинамического режима рассматриваемого региона и, соответственно, к проявлениям горнотектонических ударов и техногенных землетрясений за счет сдвига пород по разломам либо вспарывания перемычек между смежными разломами.

- 1. Гзовский М. В. О задачах и содержании тектонофизики // Изв. АН СССР, Сер 3, Геофизика. 1954. № 3. С. 244-263.
- 2. Гзовский М. В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР, Сер. 5, Геофизика. 1954. № 5. С. 390-410.
- 3. Potvin Y., Hadjigeorgiou J., Stasey T.R. Introduction. Challenges in Deep and High Stress Mining // Australian Centre for Geomechanics. CSiRO. Curtin University University of WA. Joint Venture. Printes: Quality Press, Pert, Australia. 2007.
- 4. Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н. и др. Сейсмичность при горных работах. Апатиты: КНЦ РАН. 2002. 325 с.
- Савченко С. Н. Оценка напряженного состояния горных пород в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины. ФТПРПИ. 2004. № 1. С. 27-34.
- 6. Zoback M.L., Zoback M.D. Adams J. end eth. Global patterns of tectonic stress // Nature. 1989. V. 341. № 6. P. 291-298.
- 7. М.В.Гзовский. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- 8. Kozyrev A. A., Savchenko S. N. The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modelling // Geoecology and Computers, Edit. By Sergey A. Yufin, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 2000. P. 431-435.

Динамика деформационных характеристик разломных зон

Г.Г. Кочарян

Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, gevorgk@idg.chph.ras.ru

Большинство эволюционных процессов, происходящих в земной коре, приурочено к нарушениям сплошности различных иерархических уровней. Коровые землетрясения скорее представляют собой акт проскальзывания по существующей поверхности разрыва, чем распространение новой трещины в хрупком материале [1]. Процессы массопереноса, аномалии различных геофизических полей также часто наблюдаются именно в межблоковых зонах. Адекватное описание деформационных процессов, происходящих на границах между структурными блоками, представляется необходимым условием для построения современных аналитических и численных моделей, используемых в задачах тектонофизики.

Заимствованная Брейсом и Байерли [2] из трибологии идея прерывистого скольжения оказалась исключительно продуктивной при решении многих задач в науках о Земле. Согласно используемым в этом подходе представлениям, закономерности деформирования нарушений сплошности в значительной степени определяются фрикционным взаимодействием и, в конечном итоге, базируются на представлениях о существовании различий между статическим и динамическим трением.

Хотя изучению закономерностей фрикционного взаимодействия посвящено большое количество исследований, механика возникновения неустойчивости по-прежнему остается плохо понятой, а параметры в базовых соотношениях по-разному интерпретируются различными авторами. В настоящей работе на основе разработанной ранее нелинейной модели нормального и сдвигового деформирования нарушений сплошности массива горных пород, интерпретируются некоторые результаты лабораторных и полевых экспериментов.

При рассмотрении дискретной среды, которую представляет собой массив горных пород, могут реализоваться различные деформационные режимы. Наблюдаемые макродеформации могут быть вызваны изменением действующих на массив сил, и напротив, накопление кумулятивной деформации может инициировать изменение баланса сил в системе. Последнюю ситуацию достаточно легко представить в целом ряде задач, например при действии в системе вибраций, вязких сил и т.д. Именно такая постановка, которая является, по нашему мнению, актуальной при рассмотрении процессов в окрестности очага динамического события в земной коре, применялась в экспериментах.

В лабораторных опытах, в которых система блоков, нагружалась статическими и динамическими нагрузками, исследовались закономерности эволюции прочностных и деформационных свойств межблоковых контактов.

Рассмотрены макромеханические признаки перехода от скоростного упрочнения контакта, к его разупрочнению, т.е. возникновению неустойчивости. Предложен макроскопический критерий развития динамической неустойчивости на контакте. Впервые прямыми измерениями показано, что режим скоростного разупрочнения наступает после того, как напряженнодеформированное состояние контакта достигнет «спадающей ветви» реологической зависимости. Предельное состояние может быть достигнуто и при меньшем, по сравнению с текущей прочностью контакта, уровне напряжений. Необходимым условием этого является опережающее рост напряжений увеличение уровня деформации контакта. В натурных условиях подобный опережающий рост деформаций может быть достигнут за счет различных процессов таких, как сейсмическое воздействие удаленных землетрясений, снижение эффективного коэффициента трения, флюидодинамика геотермальных зон и т.д.

При малых скоростях деформирования существенным становится эффект упрочнения контакта.

На рис. 1 приведено отношение жесткостей контактов, измеренных до и после эксперимента, в зависимости от скорости межблокового перемещения для трех различных серий опытов. Можно видеть, что характер процессов нарушения и залечивания контакта напрямую зависит от скорости деформации. При этом существует характерное значение V_0 скорости межблокового перемещения, при котором свойства контакта остаются практически неизменными. При изменении на порядок размера зерна заполнителя трещины и вдвое величины приложенного нормального давления величина V_0 оставалась в диапазоне 0.05–0.1 мкм/мин или 25–50 мм/год.

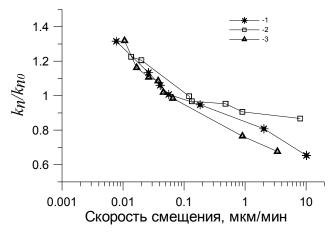


Рис. 1. Зависимость отношения начальных и конечных жесткостей контактов в зависимости от скорости межблокового перемещения для трех различных серий опытов

Примечательно, что это значение совпадает с верхней границей характерных значений скорости смещения по сейсмогенным разломам.

Полученные результаты интерпретируются на основе адгезионной теории фрикционного взаимодействия. Выполненные оценки показывают, что значение V_0 не должно сильно меняться при изменении масштаба задачи. Поскольку закономерности фрикционного взаимодействия определяются деформационными процессами на мезоуровне, характерным размером является размер частиц геоматериала, заполняющего нарушение сплошности. Эта величина довольно слабо изменяется при переходе от лабораторного масштаба к натуре. Кроме того, при изменении размера частиц на порядок, радиус контакта между ними меняется, как известно, всего лишь вдвое.

Таким образом, скорость деформации разломной зоны является фундаментальным параметром, определяющим динамику эффективных характеристик разломов. При средних скоростях относительного смещения берегов более чем 25-50 мм/год упрочнения разломных зон не происходит, что приводит к возможности реализации региональной или техногенной деформации в виде асейсмического крипа.

- 1. Scholz C. H. Earthquakes and friction laws // Nature. 1998. V. 391. P. 37-42.
- 2. Brace W.F. and Byerlee J.D. Stick-slip as a Mechanism for Earthquakes // Science. 1966. V. 153. P. 990-992.

О роли механически жестких образований в геологических процессах и их отображение в данных сейсмических наблюдений

А.М. Кузин

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Mocква, amkouzin@ya.ru

В тектонических процессах одним из главных являются процессы накопления и диссипации упругой энергии. Основное направление в исследовании тектонических процессов связано с изучением разрывных нарушений (РН). Механически жестким геологическим образованиям, обеспечивающим накопление упругой энергии, уделяется несопоставимо мало внимания. О значительной роли жестких тел (экранов) в рудной геологии известно очень давно, в нефтяной геологии к этому выводу стали приходить относительно недавно. Так, например, в [3] подчеркивается: что «природный резервуар является неотъемлемой частью гидродинамической системы,.... Существование таких энергетических систем без подложки невозможно».

Физической основой для объяснения существенной роли жесткого геологического образования может служить геомеханическая модель «твердого тела со структурой» [8]. Помимо процессов накопления и диссипации упругой энергии при высокой скорости деформации происходит увеличение жесткости твердого тела, а в некоторых случаях, и увеличение его эффективной прочности, обеспечивающей его устойчивость по отношению к волнам деформаций и напряжений. В статическом состоянии жесткое тело формирует разность вертикальных напряжений между его кровлей и подошвой. Незначительная разница в упругости приводит к тому, что в кровле, в бортовом обрамлении напряжения более чем 10% меньше, а в самом массиве напряжения, наоборот, возрастают [12]. Это способствует созданию термодинамического градиента и, соответственно, миграционного потенциала для флюидных потоков вдоль границы жесткого тела и вмещающей среды.

Перечисленные свойства жесткого тела позволяют объяснить миграцию магматических каналов. Из анализа данных сейсмической томографии следует, что магматические каналы расположены на периферии области низкой скорости и тяготеют к границам высокоскоростных блоков, независимо от типа земной коры. С миграцией флюидных потоков связывается присутствие под всеми континентами в верхней мантии высокоскоростных аномалий скорости (в том числе наклонных и листрических), уходящих на глубину порядка 300-400 км и особенно четко фиксирующихся под древними платформами [6].

Те же свойства жесткого тела могут объяснить приуроченность месторождений флюидного генезиса к узлам пересечения разрывных нарушений. По данным физического моделирования процесса образования узлов РН [9] наблюдалось явление упрочнения. Оно происходило на фоне увеличения

количества трещин. Следовательно, в процессе неупругого деформирования даже в однородной среде образуются области с относительно более высокой механической жесткостью. Этот вывод подтверждают результаты геологотектонической интерпретации данных сейсмической томографии [10]. После сейсмического события на границе Чуйской впадины и Чаган-Узунского блока проявилась дифференциация скорости, отсутствующая до землетрясения.

Образование зон упрочнения в среде может происходить при флюидизации [1]. В то же время флюидизация — это наиболее эффективный способ снятия напряжений при землетрясениях, взрывных извержениях вулканов [2]. Так, наиболее сильные землетрясения с магнитудой 6.5—6.8 баллов происходят в областях, где флюидное давление более 90% от литостатического [7]. С дегазацией недр связаны зоны объемного катаклаза (месторождения урана), трубок взрыва (алмазы), выбросы угля. Образование взрывоопасных зон в угольных шахтах происходит только там, где присутствуют РН, флюидоизмененные породы (зоны упрочнения или «бронирования») и повышенные концентрации углеводородов [13]. Из исследований фильтрации при деформировании выбросоопасных и невыбросоопасных песчаников [11] можно сделать вывод, что области упрочнения в зонах РН экранируют газообразные флюиды.

Классическим примером сочетания механически жесткого тела, РН и месторождений флюидного генезиса можно назвать рифогенные структуры. В газонасыщенных рифогенных известняках и в зонах РН [5] значения коэффициента Пуассона могут достигать отрицательных значений. Необходимо заметить, что при геодинамическом моделировании это важнейшее свойство часто не учитывается.

Анализ и обобщение данных позволили автору прийти к выводу о фундаментальной роли механически жестких образований в геологических процессах: — большинство очагов землетрясений расположено на границе жестких блоков [14]; — все месторождения флюидного генезиса залегают на жестких образованиях или на их границах [4]; — к границам жестких образований приурочены процессы вулканической деятельности.

В заключение необходимо отметить еще одно важнейшее свойство: помимо накопления-диссипации упругой энергии механически жесткие образования являются демпферами волн напряжений и деформаций и обеспечивают стационарность протекания различных геологических процессов.

- 1. Добровольский И.П. Теория подготовки очага землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. 1991. 224 с.
- 2. Валяев Б.М. Роль активной вторичной флюидизации в изменении напряженного состояния, разупрочнении и деформациях минеральных комплексов // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293, № 1. С. 177-181.

- 3. Еременко Н.А., Чилингар Г.В. Геология нефти и газа на рубеже веков. М.: Наука. 1996. 176 с.
- 4. Кузин А.М. Разработка методики прогноза залежей флюидального генезиса по данным сейсмических методов // Прикладная геофизика. М.: Недра. 1994. Вып. 131. С. 396-406.
- 5. Кузин А.М. Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений // Геофизика. 1999. № 5. С. 3-15.
- 6. Павленкова Н.И. Флюидный режим верхних оболочек Земли по геофизическим данным // Флюиды и геодинамика. М.: Наука. 2006. 283 с.
- 7. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига». 2007. 406 с.
- 8. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики // М.: Недра. 1986. 301 с
- 9. Ружич В.В. Разломные узлы, их механизм и роль в становлении напряженного состояния земной коры Байкальской рифтовой зоны // Математические экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике. М.: Наука. 1986. 120 с.
- 10. Санина И.А., Усольцева О.А., Иванченко Г.Н., Еманов А.Ф. Модель глубинного строения зоны Чуйского землетрясения по данным сейсмической томографии и дистанционного и дистанционного зондирования // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. Сб. научных трудов ИДГ РАН. Под. ред. акад. РАН В.В. Адушкина. М.: ГЕОС. 2005. 266 с.
- 11. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: «Наука», 2001. 343 с.
- 12. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы. Под ред. акад. Е.М. Сергеева. М.: Недра. 1986. 254 с.
- 13. Труфанов В.Н., Гамов М.И., Рылов В.Г., Майский Ю.Г., Труфанов А.В. Углеродная флюидизация ископаемых углей Восточного Донбасса. Ростов-на-Дону: Изд. Рост. ун-та. 2004. 272 с.
- 14. Шебалин Н.В. Сильные землетрясения // Избр. Труды. М.: Акад. Горных наук. 1997. 541 с.

Экспериментальное исследование геодинамических напряжений в массиве горных пород Алтае-Саянской сейсмической зоны

Г.И. Кулаков¹, М.Б.Устюгов²

- 1 Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, admin@misd.nsc.ru
- ² Сибирская Государственная Геодезическая Академия, г. Новосибирск, gea-sib@ssga.ru

Рассматриваются некоторые результаты многолетних шахтных экспериментов, приводившихся в Алтае-Саянской сейсмической зоне из подземных выработок Таштагольского рудника по добыче железной руды. В пределах вентиляционной горной выработки на глубине от поверхности 760 м была оборудована специальная замерная станция в виде участка выработки, закрепленного тюбинговой крепью. Железобетонные тюбинги изготовлены на заводе ЖБИ, каждая рама крепи включала пять тюбингов, образующих стенки и свод, тюбинг, укладываемый на почве и включающий водосточную канавку и опору для рельсового пути. Протяженность замерной станции около 27 м, в ее пределах установлено 20 рам. Одна из рам использовалась как измерительное устройство, по ее периметру были установлены фотоупругие датчики в количестве 16 шт. Датчики типа ФДО-2 диаметром 40 мм и высотой оптического элемента 30 мм устанавливались в бетоне тюбингов во время их изготовления на заводе. Зазор между породным контуром и тюбинговой крепью был заполнен самотвердеющим составом, включающим дробленую породу и вяжущее. Это позволило создать непрерывный контакт тюбингов с вмещающей породой.

Замерная станция была оборудована в августе 1985 г. По показаниям датчиков определялись величины квазиглавных напряжений в тюбинговой крепи и их ориентация.

Первые два этапа снятия показаний датчиков (после начальных практически нулевых при установке крепи) проведены 24.09.85 г и 26.12.85 г, т. е. через месяц и четыре месяца после монтажа крепи.

Первый же анализ этих результатов вызвал массу вопросов. Почему всего через один месяц прирост напряжений в тюбингах составил 6.0–9.7 МПа, а в следующие три месяца напряжения возросли до 9.7 МПа по датчику 3, до 13.5 МПа по датчику 7. Некоторое уменьшение по отдельным датчикам связано со спецификой их положения в общей раме крепи.

Прочность боковых пород $\sigma_{\text{сж}} = 120-130$ МПа. Очистная выемка в ближай-ших блоках начата только в декабре 1985 г. Процесс прироста напряжений в тюбинговой крепи продолжался и в первой половине 1986 г. В последующие годы величины напряжений в тюбингах в одни периоды снижались, в другие возрастали. Наибольший прирост напряжений наблюдался в 1988 г. В районе Таштагольского рудника 05.02.88 г произошло землетрясение, эпицентр которого находился в 4.5 км от границы шахтного поля. Последующий анализ

показал, что изменение напряжений в динамометрической раме тюбинговой крепи достаточно подробно отслеживало формирование очагов землетрясений в окрестности Таштагольского рудника, а особенно тех, эпицентры которых находились на расстоянии до 250 км от шахтного поля.

Необходимо отметить, если в обычных условиях подготовительные выработки рудника после окончания очистных работ не разрушались в течение длительного времени, однако в зоне замерной станции все прилегающие выработки были сильно деформированы к концу наблюдений и подходы к замерной станции раздавлены. Другими словами, прирост геодинамических напряжений за счет формирования очагов землетрясений был значителен и существенно отразился на состоянии горных выработок.

Исходные напряжения в массиве земной коры в пределах участка наблюдений состояли из трех составляющих: гравитационной, тектонической и геодинамической, при этом вклад всех трех в общее напряженно-деформированное состояние массива был примерно сопоставим.

Таблица

	Номера датчиков															
Дата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	12	13	1 4	15	16
		прирост напряжений σ_1 в крепи, МПа														
24.09.85 26.12.85 07.09.88	9,7 9,2 3,5	7,7 6,4 6,4	6,2 9,7 9,0	6,2 3,9 19,3	4,1 - -	1,7 5,5 24,0	6,0 13,5 15,0	9,2 5,8 14,3	3,0 2,9 9,2	6,2 5,8 11,7	6,2 9,4 8,8	6,6 6,2 16,7	5,8 5,2 18,4	3,2 8,1 6,4	3,2 4,7 14,3	3,0 6,2 12,3

Тектонофизика М.В. Гзовского и современная неотектоника

К.Г. Леви

Институт земной коры CO PAH, г. Иркутск, levi@crust.irk.ru

Тектонофизика М.В. Гзовского – ретроспективный взгляд на основы количественной геологии. Тектонофизика М.В. Гзовского положила начало внедрению числовых методов в геологию, считавшейся до того времени искусством визуального отображения геологической ситуации – тектоники, разломов, складок т т.п. На память приходят экспериментальные результаты, отражающие процесс формирования складок течения в докембрийских толщах (Кириллова), методические приемы изучения проблем развития процессов разломообразования в консолидированных породах земной коры (Гзовский, 1979) и т.п. Его идеология легла в основу и некоторых фундаментальных основ неотектоники – например, градиента неотектонических движений (Рейснер и др.), Именно идеи М.В. Гзовского заложили основы количественной неотектоники, развивавшейся автором этих строк на протяжении более чем четверти века (1976–2008 гг). Именно работы М.В. Гзовского подвигли меня на разработку принципиально новых оснований для отображения неотектонических движений на картах. Случилось так, что неотектоника стала тем связующим звеном между тектоникой древних комплексов и современной геодинамикой, которое позволило не только решать проблемы современной сущности явлений, но и перейти к прогнозу реализации этих сущностей во времени.

Неотектонические движения и их амплитуды. В концепции неотектонических движений Н.И. Николаева и С.С. Шульца-старшего априори полагалось, что земная поверхность к началу проявления неотектонических движений была ровной, как поверхность «стола» и по существу располагалась на уровне мирового океана. Таким образом, амплитуды вертикальных неотектонических движений предлагалось отсчитывать именно от уровня мирового океана. Это не было заблуждением, поскольку в то время геофизики только начинали говорить об изостатическом равновесии элементов земной коры. Но из этого утверждения неминуемо следовал вывод о том, что поверхность континентов никогда не была ровной как крышка «стола» и что над легкими породами, слагающими земную кору всегда располагались поднятия, а над тяжелыми формировались депрессии. Следовательно, исходная поверхность, предшествовавшая началу неотектонических движений никогда не была ровной, как крышка «стола». Но как выйти из этой ситуации, как правильно оценить пространственное положение поверхности выравнивании, которое предшествовало началу проявления неотектонических движений. Оказывается, на этот счет, природа оставила нам некоторые подсказки - густоту расчленения земной поверхности в связи с ее поднятием и эрозионную терминанту, которые позволяют, в первом приближении, воссоздать ее рельеф. Именно от него следует отсчитывать амплитуды вертикальных неотектонических движений.

Неотектонические движения и возраст начала их проявления. Со времен Н.И. Николаева и С.С. Шульца-старшего считалось, что неотектонические движения начали проявляться повсеместно лишь с олигоцена. Однако, изданная в 1979 г. карта кор выветривания и поверхностей выравнивания территории СССР (Горелов и др.) поставила эту концепцию под сомнение. Стало очевидным, что неотектонические движения на всей территории СССР начали проявляться в разное время. Но более того, время начала их проявления следовало искать именно в предгорных прогибах, а не во внутригорных впадинах, осадки которых отражают более поздние этапы горообразования. Эта концепция послужила основанием для датирования начала общих неотектонических движений на континентах (Леви).

Типы неотектонических движений – (горизонтальная тектоника) и ее следствия. Традиционно в геотектонике и неотектонике превалировала павертикальных тектонических преобладания горизонтальными. Однако многочисленные сведения, как результат детального картирования именно тектонических движений методами полевой тектонофизики, показали, что преобладающими являются именно горизонтальные движения блоков литосферы. Это явилось подтверждением фундаментальных представлениях М.В. Гзовского о роли «горизонтальной тектоники» в формировании геотектонического облика континентальной литосферы. Ведь действительно, горизонтальные движения блоков литосферы энергетически более выгодны - они не предполагают энергетических затрат не преодоление силы тяжести. Если реальные вертикальные перемещения блоков земной коры ограничены 9-ю км (иначе горный массив просто раздавит собственное основание), то горизонтальные перемещения по своей амплитуде просто не ограничены ни чем. Это утверждение подтверждает факт соотношения горизонтальной и вертикальной компонент движения в очагах землетрясений и в сейсмогенных трещинах на дневной поверхности.

Экзогенно-активный слой земной поверхности, градиент скорости недвижений литосферы отеконических И термальная эволюция континентов. Вслед за Н.И. Николаевым автору этих строк удалось развить представление о рельефе земной поверхности как о неком слое, оценить хаинтенсивность этих деформаций, вычислить вертикальных неотектонических движений для континентальных массивов. Полученные в результате реализации этой концепции параметры неотектонических движений показали прекрасные их корреляционные соотношения с параметрами геофизических полей, в частности, геотермическим. Это, в свою очередь, позволило выполнить построения по оценке мощности континенлитосферы установить закономерности проявления неотектонических движений и сейсмичности.

Все сказанное выше — результат последовательного внедрения идей М.В. Гзовского в неотектонику и не могло бы состояться без его заочного участия в этих исследованиях Вечная ему память и моя благодарность за все сделанное им при жизни и его коллегам, увековечившим память о нем в книге «Основы тектонофизики».

Латеральные тектонические потоки в литосфере Земли: факт существования, структура, концептуальные построения

М.Г. Леонов

Геологический институт РАН, г. Mockba, m leonov@ginras.ru

В плейттектонической парадигме литосферные плиты рассматриваются как относительно жесткие пластины (блоки, террейны), консолидированная кора которых (а также и континентов в целом) представляет собой «костную» субстанцию, а все сколько-нибудь значимые структурообразующие процессы протекают лишь на границах плит. Предполагается, что основной объем сиалических литосферных плит, или – лучше сказать - сиалических масс сформирован в течение архея - раннего протерозоя, и с большой долей уверенности можно полагать, литосферные плиты в процессе эволюции перемещались по латерали на весьма значительные расстояния, пока не заняли своего современного если литосферные плиты, как показывают палеомагнитных палеоклиматических реконструкций, горизонтальные перемещения, то логично предположить, что эти движения должны были бы найти отражение в особенностях инфраструктуры и состава слагающих плиты горных масс.

В последние годы в литературе неоднократно обсуждались проблемы тектоники консолидированной коры континентов, и на основе большого фактического полевого и литературного материала было показано, что основной формой структурно-тектонической жизни консолидированной коры является объемная (3D) деформация тектонического течения (например [7]). Были описаны также геологические тела, которые проинтерпретированы как протрузии кристаллических пород, внедрявшиеся в верхние горизонты земной коры под влиянием тектонических «шоков» и вязкостной инверсии, что является одним из условий их возникновения. При этом одним из следствий феномена объемной (3D) подвижности горных масс является возникновение латеральных тектонических потоков (например [1, 6, 7, 11]. «Вмороженные» в земную кору, они формируют своеобразные объемные структурные элементы, представляющие собой важный компонент строения и тектонической эволюции литосферы Земли. В качестве разновидности эти структуры были обозначены мной в докладе на XXXIII Тектоническом совещании, а в докладе на ХХХҮІІ Тектоническом совещании было показано их фундаментальное значение для понимания тектоники и геодинамической эволюции консолидированного слоя земной коры. Тогда же были предложены и названия для этой категории структур — *«горизонтальные протрузии»* или *«плито-потоки»* Термин «горизонтальные протрузии» уже нашел применение в геологических построениях [3, 5]. Тем не менее вопросы масштабности явления в пространственном и временном планах, структурное его выражение и значимость для понимания эволюции земной коры нуждаются в обсуждении.

В докладе приведен фактический материал, отражающий строение, эволюцию и возможные механизмы формирования структур типа горизонтальных протрузий или плито-потоков для разных временных интервалов (от докембрия до наших дней) и различных геодинамических обстановок как внутриконтинентальных, так и океанических. Приведенный материал дает полное основание рассматривать описанную категорию структур как отражение реальных геологических процессов, происходящих в земной коре и литосфере.

При этом нужно отметить, что проблема объемных горизонтальных перемещений коровых горных масс в виде тектонических потоков была впервые изложена на примере Центральной Азии швейцарским геологом Эмилем Арганом [1], которому несомненно принадлежит приоритет в этой области геологических знаний.

Фактический материал и обзор модельных построений (рис. 1-3) в совокупности позволяют сделать некоторые важные выводы. Плито-потоки (горизонтальные протрузии) реальные геологические это (геодинамические системы), составляющие существенный элемент континентальной и океанической литосферы. Физические и расчетные модели подтверждают возможность объемного латерального течения в пределах литосферы (в том числе и земной коры) и верхней мантии, и они (модели) достаточно адекватно отражают реалии строения и истории становления природных объектов. Исходя из имеющихся данных, «плито-(«горизонтальную протрузию») онжом определить пространственно ограниченное горизонтально-плоскостное геологическое тело, обладающее признаками объемного (3D) тектонического течения (реидной деформации) и латерального перемещения горных масс. Реидная деформация практически всегда связана с уменьшением вязкости – именно это и служит причиной употребления термина «протрузия».

Разница в употреблении понятий «горизонтальная протрузия» и «плитопоток» весьма условна и обусловлена двумя положениями: масштабностью явления (в объемном его выражении) и механизмом движения. Структуры, имеющие относительно малые объемы (от первых км³ до десятков и первых

¹ В некоторых англоязычных работах для обозначения сходных структур употреблен термин «латеральная экструзия» (lateral extrusion). Учитывая, что термин экструзия обычно применяется к магматическим телам и не отражает наличия тектонического фактора, более оправданным мне представляется применение термина «протрузия» в соответствии с его первичным пониманием, которое было предложено Ч. Лайелем.

сотен км³) можно называть горизонтальными протрузиями; структуры отражающие реидную деформацию в пределах значительной части коры (а также литосферы) и имеющие региональный масштаб, сопоставимый с объемами литосферных плит, лучше называть плито-потоками. В первом случае главную роль в перемещении масс играет главным образом процесс тектонического выжимания из областей повышенных напряжений в зоны декомпрессии. Во втором случае движение плито-потоков причинно связано с внутрикоровыми и подкоровыми течениями, может возникать спонтанно и происходить автономно относительно соседствующих блоков земной коры и литосферы. Однако разделение на плито-потоки и горизонтальные протрузии весьма условно.

Формирование «плито-потоков» – это фундаментальное распространенное явление, определяющее многие черты структурной эволюции и геодинамики фундамента платформ и подвижных поясов. Своим существованием они отражают зафиксированную в структуре коры внутреннюю подвижность огромных объемов горных пород и возможность латерального перераспределения на разных глубинных литосферного слоя континентов. Их формирование связано, прежде всего, с ослабленных возникновением реологически объемов вязкостью. Подвижность может возникать режимах «холодной» деформации, относительного прогрева, проявления метаморфизма твердопластического течения, субсолидусного состояния горных масс, их частичного подплавления и определяется степенью связности пород. Потеря обеспечивается различными механизмами вещественной переработки пород, и все они приводят к возникновению среды пониженной вязкостью. Последнее обстоятельство решающую роль при формировании «плито-потоков». Выявление данной категории структур еще раз подтверждают фундаментальное значение тектонического течения горных масс при формировании структурного плана литосферы, которая рассматривается как весьма подвижная субстанция, способная испытывать значительные пластические деформации на разных глубинных уровнях [1, 2, 7, 8, 11, 12, мн. др.]. Деформация объемного течения может сопровождаться комплексом вещественных преобразований, таких как метаморфизм, плавление, гранитизация. И одним из результатов подобных тектонических процессов является формирование гигантских горизонтальных кристаллических протрузий или плито-потоков структурой типа «матрешки» (telescope structure).

Существует еще одна характерная особенность геодинамических режимов, связанных с возникновением плито-потоков. На ряде примеров выявлена определенная этапность формирования структурно-тектонического плана, которая коррелируется с этапами вещественного преобразования пород. Речь идет о чередовании эпох транспрессии и транстенсии, которые зафиксированы в особенностях проявления деформационного, метаморфического и

магматического процессов. Эта особенность не нашла должного отражения в современных геодинамических моделях, хотя смена режимов растяжения сжатия (транспрессии и транстенсии) и их неоднократное чередование во времени свойственны многим геоструктурам. Одним из возможных объяснефеномена может быть признание асимметричности незамкнутости конвективных ячей и существования продольной (по длинной оси ячеи) субгоризонтальной ветви течения материала (т.е. элементов адвекции) (например, работы М.А.Гончарова), а также наличие двухъярусной конвекции (адвекции) с относительно крупномасштабными ячейками в верхней мантии и более мелкими в пределах астеносферы-литосферы. В этом случае квазипластичные литосферные плиты при их латеральном перемещении последовательно будут попадать то в условия сдвига с растяжением, которое сопровождается проявлением основного вулканизма, слабым проявлением метаморфизма и подслаиванием коры за счет деплетированных мантийных и астеносферных масс (underplating), то в условия сдвига со сжаинтенсивными структурно-вещественными сопряжено c преобразованиями горных масс, гранитизацией и вертикальным аккретированием корового слоя в пограничной зоне «фундамент-чехол» (intraplating, overplating). Чередование режимов «горячая» – «холодная» мантия (кора) в условиях «давление + сдвиг» приводит [4] к смене одной формы мантийной активности (магматизм, вулканизм) другой (метаморфизм и гранитизация). Данная модель, объединяющая явления латерального перемещения масс, их структурно-вещественную перестройку в режиме сдвигового течения и формирование гигантских горизонтальных протрузий (плито-потоков), находит подтверждение на примере материалов по Карельскому массиву, Украинскому щиту, поясу Лимпопо (Африка) и других регионов и находится в согласии с расчетными моделями, объясняющими механизм движения литосферных масс над латеральными ветвями мантийных плюмов.

Для внутреннего строения плито-потоков (горизонтальных протрузий) и проявления в их пределах тектоно-деформационного процесса характерны следующие особенности.

(1) Специфический структурный парагенез, отражающий поступательное движение масс и их объемное сдвиговое течение по направлению длинной оси структуры. В парагенез входят: зоны сплющивания и нагнетания; линейные зоны осепродольного течения; зоны субгоризонтального течения и срывов; зоны диссипативного сдвигового объемного течения; зоны относительной декомпрессии и оттока горных масс. Первые три категории — это зоны концентрированных деформаций, которые определяют разноранговую внутреннюю делимость корового слоя. Также характерны: общая синформная чешуйчато-покровная структура и конформный подковообразный изгиб структурных линий в плане; наличие поперечных складок коробления; развитые по всему объему структуры пластического течения со сдвиговонадвиговой кинематикой; наличие колчановидных складок.

- (2) Подковообразная форма и структура типа «матрешки» с вложенными друг в друга тектоническими пластинами, разделенными зонами пластических срывов-разделителей (детачментов) и ярко выраженная внутренняя субслойная структурно-метаморфическая расслоенность;
- (3) Наличие краевых зон вязко-пластического сдвига, трансформированных в краевые надвиги и покровы.
- (4) Внутренняя структура, отличающаяся от структуры соседствующих с протрузией тектонических элементов (зон, массивов, террейнов и пр.).
- (5) Высокоградиентный метаморфизм с чередованием зон разной степени вещественной трансформации пород в зонах концентрированных деформаций (особенно в краевых зонах) и наличие в ряде случаев поясов гранулитового метаморфизма.
- (6) Тектонически обусловленные субгоризонтальные внедрения магматического материала, приводящие к структурно-реологическому расслоению движущихся масс.
- (7) Наличие гранитного магматизма, проявляющегося на поздних стадиях консолидации.
- (8) Наличие субвертикальных и субгоризонтальных зон офиолитового и тектоно-метаморфического меланжей.
- (9) Относительно слабое морфоструктурное расчленение рельефа (кроме фронтальных зон нагнетания и сплющивания).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 07-05-01158).

- 1. Арган Э. Тектоника Азии. М.: ОНТИ. 1935. 192 с.
- 2. Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука. 1978. 327 с.
- 3. Буртман В.С. Тянь-Шань и Высокая Азия. Тектоника и геодинамика в палеозое. М.: ГЕОС. 2006. 216 с.
- 4. Иванкин П.Ф. Взаимодействие потоков восстановительных газов с литосферой подвижных поясов // Дегазация Земли и геотектоника. М.: Наука. 1985. 259 с.
- 5. Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематическая эволюция Карельского массива и Беломорско-Лапландского пояса в палеопротерозое (Балтийский щит). Москва: ГЕОС. 2006.
- 7. Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе. М.: Научный Мир. 1997. 313 с.
- 8. Леонов М.Г. Тектоника консолидированной земной коры // Проблемы геодинамики литосферы. М.: Наука. 1999. С. 227-252.
- 9. Лукьянов А. В. Пластические деформации и тектоническое течение горных пород литосферы // Тектоническая расслоенность литосферы. М.: Наука. 1980. С. 105-146.
- 10. Трубицин В.П., Рыков В.В., Трубицин А.П. Конвекция и распределение вязкости в мантии // Физика Земли. 1997. № 3. С. 3-10.
- 11. Echtler H., Chauvet A. Carboniferous convergence and subsequent crustal extension in the southern Schwarzwald (SW Germany) // Geodin. Acta. 1991-1992. V. 5. № 1-2. P. 37-49.

- 12. McCourt S., Wilson J.F. Late Archaean and Early Proterozoic Tectonics of the Limpopo and Zimbabwe Provinces, Southern Africa // Geol. Dept. and University of West. Austral., 1992. Publ. 22. P. 237-245.
- 13. Martinod J., Hatzfeld D., Brun J et all. Continental collisionl, gravity spreading, and kinematics of Atgea and Ananolia. Tectonics. 2000. V. 19, № 2. P. 290-299.
- 14. Mason By.R. The Limpopo mobile belt southern Afrika // Phil. Trans. Res. London. A. 1973. V. 273. P. 463-485.
- 15. Taboada A., Rivera L.A., Fuenzalida A. et all. Geodynavics of thr norhtern Andes: Subbdactions and intracontinental deformation (Colombia) // Tectonics. 2000. V. 19, № 5. P. 787-813.
- 16. Van Reenen D.D., Bartjn J.M., Roering Jr.C. Deep crustal response to continental collision: The Limpopo belt of southern Africa // Geology. 1987. V. 15, № 1. P. 11-14.

Использование тектонофизических методов для обеспечения безопасной эксплуатации объектов ядерной энергетики Красноярского края

Р.М. Лобанкая

Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, lob@istu.edu

Использование тектонофизических методов в прикладных исследованиях широко известно и неизменно дает хорошие результаты при решении практических задач. Исключительное значение методы тектонофизики приобретают, когда речь идет о безопасности эксплуатации особо важных народнохозяйственных объектов, непосредственно использующих геологическую среду для реализации технологического цикла. В докладе рассмотрены конкретные задачи, решение которых с помощью тектонофизических подходов является оптимальным и дает реальные результаты для снижения экологического и экономического рисков.

На территории Красноярского края около 60 лет существуют производственные мощности объектов ядерной энергетики, в том числе связанные со складированием отработавшего ядерного топлива и захоронением ядерных отходов в подземные горизонты. Их безопасная эксплуатация напрямую связана с оценкой качества геологической среды, изучением геологических структур, в первую очередь разломно-блоковых, предполагающим определение кинематических типов разломов, амплитуд смещений по ним с неоплейстоцена, глубины их проникновения, площадного и линейнейного раздробленности территории, c изучением напряженноуровня деформированного состояния литосферы, что, в свою очередь, обеспечивает возможность долговременного прогноза устойчивости территории к природным и техногенным нагрузкам в процессе ее эксплуатации.

При решении вышеперечисленных задач основой базы данных для неотектонических и тектонофизических построений, а также для прогноза устойчивости геологической среды служит качественно откартированная сеть разломных и разломно-блоковых структур. Все объекты ядерной энергетики этого региона сосредоточены в зоне динамического влияния Байкало-Енисейского разлома, имеющего древнее заложение в качестве Краевого шва Сибирской платформы, а начиная с мезозоя служит границей между Сибирской платформой и молодой Западно-Сибирской плитой и захватывает обе тектонические структуры.

Нами откартирована инфраструктура Байкало-Енисейского разлома в масштабе 1:25000 в 30 километровой зоне от упомянутых объектов, которая представлена достаточно плотной сетью близмеридиональных дизъюнктивов разного ранга и кинематики, осложненной разрывными нарушениями системы северо-западного («саянского») простирания [1]. По кинематическому

типу в правобережье Енисея (Сибирская платформа) выделяются близмеридиональные взбросы и надвиги, которые наследуют древнюю разломную сеть, затем более молодые диагональные сдвиги — северо-западные, преимущественно правые, и северо-восточные преимущественно левые, рассекающие и смещающие эту сеть. Для левобережья Енисея (Западно-Сибирская плита), наиболее типичными разломами являются сбросы.

Откартированная сеть неотектонических разломов выкалывает сложную структуру мега-, макро- и микроблоков. Каждый из них характеризуется различными темпами неотектонических движений, отразившимися в ряде их морфотектонических особенностей. Мегаблок левобережья Енисея отличается слабо контрастным рельефом, стабильными нисходящими движениями. Мегаблок правобережья Енисея, в пределах которого сосредоточены все объекты, характеризуется тенденцией к поднятиям и более высокой степенью раздробленности. Здесь выделяется пять крупных макроблоков и более 50 микроблоков. Для каждого из макроблоков определен в количественном выражении уровень раздробленности, а для каждого из микроблоков средние скорости поднятий и опусканий за неотектонический этап (1.8 млн. лет), оценки которых составили 0.2-0.3 мм/год. Тектонофизический анализ показал, что для территории правобережья Енисея характерно региональное поле сжатия близширотной ориентировки, в условиях которого длительное время формировались меридиональные взбросо-надвиговые структуры Байкало-Енисейского разлома. Сдвиги – более молодые, чем взбросо-надвиги, являются отражением изменения положения главных сжимающих напряжений в позднем плейстоцене-голоцене с близширотного на близмеридиональное. Отмечается весьма показательная тенденция, указывающая на прямую связь между уровнем раздробленности макроблоков и характером поля тектонических напряжений. Полосы максимальной раздробленности макроблоков соответствуют местам перекрытия регионального поля сжатия локальными сдвиговыми полями напряжений, вдоль право – и левосдвиговых разломных структур. Есть все основания считать, что полосы присдвиговых микроблоков представляют собой участки «конечной» блоковой раздробленности литосферы и являются структурами максимально устойчивыми к природным и техногенным воздействиям. Данное обстоятельство явилось определяющим при решении одной из главных для этой территории задач, связанной с долговременным прогнозом устойчивости геологической среды и выбором площадки для строительства подземной лаборатории с целью дальнейшей ее эксплуатации в качестве полигона для складирования высокорадиоактивных отходов.

Вторая задача, которая решалась с помощью тектонофизических построений, связана с возможностью дальнейшей безопасной эксплуатации существующего несколько десятилетий полигона захоронения низко – средне- и высокорадиоактивных отходов в мульде переслаивающихся песчаноглинистых отложений юрского возраста. Эта задача связана с определением

генезиса (дизъюнктивного или пликативного) Правобережной тектонической структуры в западном борту юрской мульды. Разломный характер ограничения обеспечивает экранирующую роль структуры для проникновения радиоактивных изотопов с подземными водами в западном направлении в сторону главной водной артерии региона — р. Енисея. Флексурный характер структуры ограничения мульды не дает гарантированного экрана.

Проведенный нами палеотектонический, палеотектонофизический и тектонофизический анализ позволил придти к однозначному выводу о поэтапной
смене полей тектонических напряжений от позднего докембрия — раннего
палеозоя до кайнозоя, определить дизъюнктивный характер Правобережной
тектонической структуры в западном ограничении юрской мульды Черского
и обосновать безопасный характер дальнейшей эксплуатации подземных горизонтов, в которых складированы радиоактивные отходы. Полученные нами
выводы подтвердились проведенными позднее геодезическими наблюдениями и результатами мониторинга по постоянно действующей сети
нагнетательных и наблюдательных скважин.

Третья задача связана с анализом характеристик разломной сети в 300 км зоне от эксплуатируемых объектов для уточнения исходной сейсмической балльности для эксплуатации ядерных объектов. Напряженное состояние земной коры было одним из факторов, позволяющих обосновать выделение доменов для последующих расчетов. Уточнение положения доменов в свою очередь привело к снижению оценки исходной сейсмичности на 0.5 балла, что существенно повышает уверенность при эксплуатации объектов и снижает непродуктивные экономические затраты.

Выше приведенные данные показывают, что использование тектонофизических методов для решения конкретных прикладных задач на объектах ядерной энергетики Красноярского края показывает их высокую эффективность и достоверность результатов, получаемых в процессе исследований. Необходимо отметить, что в ряде случаев тектонофизический анализ представляет собой практически единственный путь полноценного решения тектонических задач по обеспечению безопасной эксплуатации объектов повышенного экологического и экономического значения.

Литература

1. Лобацкая Р.М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 2. С. 141-150.

Лабораторно-экспериментальная система для исследования тектоно-деформационного физического поля и теплового эффекта деформаций

Лю Личиань, Ма Сэнли, Лю Пэйшунь, У Сюцжан, Лю Тианчань, Ма Цзинь

Государственная главная лаборатория сейсмодинамики Института геологии Сейсмологического бюро Китая, г. Пекин, Китай

По М.В. Гзовскому «метод моделирования имеет исключительно важное значение в тектонофизике, так как только при его помощи можно наблюдать развитие во времени процессов, подобных тектоническим, получать многократное повторение аналогичных явлений и рассматривать на модели любую часть изучаемого структурного элемента коры». В свое время он подвёл итоги достижений тектонофизики, полученных в течении более 20 лет, и перечислил 9 важных проблем, ожидающих дальнейших глубоких исследований. Пятая проблема — усовершенствование теории и техники моделирования тектонических процессов.

На протяжении многих лет, следуя по указанному М.В Гзовским направлению, отделение тектоно-деформационного физического поля при Государственной главной лаборатории сейсмодинамики Института геологии при Сейсмологическом бюро Китая, следя за развитием современной новейшей техники, занималось совершенствованием технической системы моделирования. Благодаря выполнению последних 4–5 пятилетних планов развития, в настоящий момент мы завершили создание усовершенствованной экспериментальной системы воспроизведения физического поля при тектонической деформации. Она состоит из следующих частей:

1. Крупномасштабная двухсторонне-нагрузочная экспериментальная машина для моделирования процесса динамики земной коры.

Установка является комплексом с двухсторонней сервоуправляющей нагрузочной цифровой системой. По предварительной установке параметров движения на компьютере она может моделировать различные сложные процессы смещения или нагрузку в двух направлениях и достигать синтетического эффекта динамической нагрузки в двух направлениях. Размер образца эксперимента может доходить до $500 \times 500 \times 100$ mm. Благодаря этому имеются большие возможности подготовки образцов для экспериментов с различными структурами и установки сотен датчиков на образце для наблюдения пространственных полей различных физических величин и их эволюционного процесса. Последние годы разрабатывается трёхосный сосуд, выдерживающий 300 MPa окружающего давления, 150 MPa порового давления и 300° температуры с сервоуправляющими системами. Наличие 48 пар выходных сигнальных проводов позволяет ожидать осуществления исследо-

вательских экспериментов с тектоническими деформациями при высоком давлении.

2. Наблюдательная система для сбора данных по мультипараметрическим физическим полям.

В наблюдаемые основные физические поля включаются деформация с использованием деформометра электросопротивления (до 128 датчиков), смещение на разломе (до 32 датчиков) и акустическое излучение (до 48 датчиков). В последние годы были разработаны системы наблюдения за температурой контактным способом на многочисленных пунктах и фототехники наблюдения за инфракрасным излучением. Первоначально производилась регистрация электрических и магнитных сигналов в процессе деформации пород.

Также создаются: плотная цифровая спектральная система для наблюдения полем деформаций, скоростная наблюдательная система инфракрасной фотографии с высоким разрешением и лазерная система для наблюдения смещений на многочисленных пунктах.

3. Высокоточная, широкодиапазонная и скоростная система сбора данных.

В экспериментах тектонофизического моделирования разница между признаками сигналов различных физических величин велика. Имеются и сигналы высокочастотного акустического излучения, и сигналы обычного медленного изменения деформационных смещений. В ходе эксперимента иногда в момент нестабильности нужно иметь возможность регистрировать сильную флуктуацию сигналов, а в других случаях надо регистрировать в сложном процессе эволюции слабые сигналы так называемых "предвестников". Для регистрации сотен сигналов, исходящих из различных датчиков, необходим целый комплекс систем сбора данных. В нашей лаборатории созвысокочастотные (до 50 MHz частоты опроса, среднечастотные (около 100 КНz, 48 каналов) и низкочастотные (прямой поток до сотен герц, общее число каналов около 150) системы сбора данных. Динамический разброс различных частотных диапазонов многоканального коллектора – от 12 bit (высокочастотная часть) до 18 Bit (низкочастотная часть). Разрабатывается более высокоточная система сбора (20 Bit).

Используя описанную выше систему тектонофизического эксперимента, в последние годы были проведены экспериментальные исследования теплового физического поля при возникающих деформациях пород с целью создания физической основы применения спутниковой инфракрасно-телеметрической техники в изучении деформации земной коры. Т.к. изменения температуры, вызванные деформацией земной коры, весьма незначительны, то требования к наблюдательной системе и окружающим условиям очень строгие.

Надёжность результатов деформационного инфракрасно-теплового эксперимента определяются правильным выбором параметров системы наблюдения инфракрасного излучения, установки высокочувствительных приборов для наблюдения за тепловым полем и эффективный контроль теп-

лового фона окружающих условий. На основе детального анализа шумов и помех определены основные технические параметры главных устройств для теплового инфракрасного эксперимента и создан комплекс соответствующей аппаратуры. Эксперименты на образцах типичных материалов показывают, что при учёте различных специфических требований и тщательного выбора наблюдательных устройств, после строгого исправления ошибок, можно получать надёжную информацию о деформационном тепловом процессе.

Согласно М.В. Гзовскому «Сочетание полевых исследований, моделирования и математического решения тектонофизических вопросов обеспечит достоверное знание физических закономерностей тектонических процессов» Мы надеемся, что Государственная главная лаборатория сейсмодинамики Института геологии Сейсмологического бюро Китая будет вносить большой вклад в направлении экспериментального моделирования деформационного физического поля.

(Русский текст был предоставлен проф. Ма Цзинь, редакция текста – Л.А.Сим и Ф.Л.Яковлев)

Характерные признаки теплового поля для идентификации сдвига и нестабильности разлома по данным лабораторных экспериментов

Ма Цзинь¹, Лю Личиань¹, Лю Пэйшун¹, Ма Шаопэнь²

¹ – Государственная главная лаборатория сейсмодинамики Института геологии Сейсмологического бюро Китая, г. Пекин, Китай

Резюме: Соотношение между тепловым полем и полем деформации представляет собой физическую основу для выявления возможности использования спутниковых данных по инфракрасным излучениям или поверхностным термическим полям для анализа движений по разлому. Этот вопрос обсуждается на основе данных по лабораторным экспериментам.

Исследовались образцы пород с кулисообразным разломом. Для подачи нагрузок на образец применялась двухсторонняя сервероуправляющая система.

Изменения яркости поля инфракрасного излучения и термического поля синхронно регистрируются в процессе деформации образцов пород с помощью инфракрасного термо-фотограмметрического прибора и контактного термометрического прибора. Были также использованы цифровой ССD фотоаппарат и метод цифровой спектральной корреляции (МЦСК) для сбора цифровых изображений и последующего анализа этих данных, с целью определения процессов изменений полей перемещения и деформации.

Были получены следующие результаты экспериментов.

- 1. Перед разрушением зон перемычки у кулисообразного разлома температура в этих зонах максимальна при сжатии и минимальна при растяжении. Данные МЦСК выявляют, что средняя деформация в зонах перемычки максимальна при сжатии, а при растяжении минимальна; это говорит о том, что противоположное состояние напряжений в зонах перемычки у кулисообразного разлома явно проявляется в термическом поле (рис. 1), при этом получен признак, показывающий напряженное состояние образца у разлома.
- 2. Были выявлены две стадии деформации в кулисообразном разломе: стадия накопления напряжений и появления разрушений в зонах перемычек и стадия нестабильного сдвига вдоль разлома. Соответственно, механизм нагревания изменяется от нагрева вследствие деформации до нагрева вследствие трения. Изменение механизма нагревания сопровождается появлением большого количества предвестников. Три типа явлений наблюдаются в зонах перемычки в процессе изменения механизма нагревания перед нестабильным сдвигом по разлому: падение температуры, быстрая флюктуация температуры и импульсное повышение температуры. Механизм этих явлений обсуждается в докладе.

² – Политехнический институт Пекина, г. Пекин, 100081, Китай

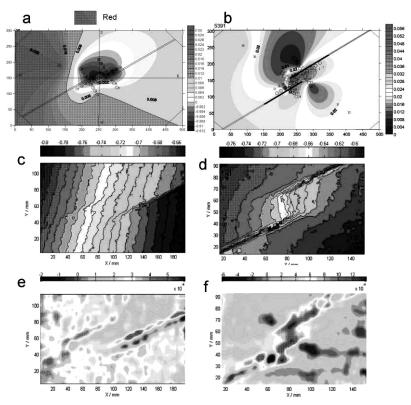


Рис. 1. Изолинии поля температуры (a, b), изолинии поля перемещения по направлению оси Y (c, d) и поле средней деформации (e, f) для образцов с кулисообразными разломами сжатия (справа) и растяжения (слева) перед разрушением зон перемычки

3. За этими изменениями термического поля следовало быстрое повышение температуры вдоль разлома. Оно начиналось за 2–3 секунды перед нестабильным смещением его крыльев. Однако, спад температуры в зонах перемычки происходит примерно за 20 секунд до нестабильного смещения по разлому, а импульсное повышение температуры появляется на 10–20 секунд раньше смещения по разлому. Эти явления могут служить предвестниками перед нестабильным смещением крыльев разлома.

Данные экспериментов показывают, что наблюдение и изучение термического поля в чувствительных зонах разлома могут иметь большое значение для обнаружения и определения предвестников возникновения нестабильного смещения крыльев разлома.

Планируется проект полевых наблюдений вдоль подходящего разлома. (Русский текст был предоставлен проф. Ма Цзинь, редакция текста – Л.А.Сим и Ф.Л.Яковлев)

Математическая теория эволюции геосред и геоматериалов в полях действующих сил

П.В. Макаров

Институт физики прочности и материаловедения CO PAH, г. Toмск, pvm@ispms.tsc.ru

В работе развивается эволюционный подход к описанию деформационного отклика на нагружение геосред и геоматериалов, основанный на идеях нелинейной динамики. Под деформационным откликом понимаются процессы деструкции прочных сред в полях действующих сил, т.е. процессы неупругой деформации и одновременного развития разрушения. Кратко дается экспериментальное обоснование дискретности процессов деструкции. Ранее автором было установлено, что деструкции всех материалов и сред начинается с минимальных размеров межатомных расстояний и продолжается вплоть до размеров протяженных структурных элементов земной коры, следуя общему генетическому коду — универсальному принципу фрактальной делимости твердых тел и сред [1]. Показывается, что в основе математической теории эволюции всех твёрдых тел и сред лежат уравнения механики деформируемого твёрдого тела, как фундаментальные уравнения математической физики, отражающие самые общие природные законы сохранения массы, импульса, моментов импульса и энергии [1, 2].

Всё многообразие физических механизмов неупругой (пластической) деформации и процессов дилатансии, т.е. развития несплошностей разных масштабов и различной физической природы на этом феноменологическом уровне описания интегрально отражается путём задания нелинейных функций отклика среды на нагружение – эволюционными определяющими уравнениями первой и второй группы. Определяющие уравнения первой группы – макроскопические уравнения. Эти уравнения задают связи между макроскопическими усредненными параметрами среды: параметрами теческоростями изменения напряжений и скоростями деформации, а также скоростями накопления средой несплошностей (повреждений). В них должны также входить источники неупругой деформации и повреждений, на которых могут возникать нестационарные диссипативные структуры [1, 3]. Эти уравнения должны также включать положительные и отрицательные обратные связи между параметрами. Такие обратные связи являются регуляторами образования различных структур в нагружаемой среде [3]. Эволюционные уравнения второй группы – это кинетические уравнения, задающие скорости накопления неупругой (пластической в том числе) деформации и скорости накопления повреждений. Эволюционные уравнения второй группы устанавливают связи между макроскопическим уровнем описания и процессами на более мелких масштабах, т.е. на «микроуровне».

В настоящем контексте под «микроуровнем» понимается иерархия масштабов, которые не вводятся явно в рассмотрение, а учитываются интегрально путем задания соответствующих кинетик накопления различного рода несплошностей и повреждений средой. Определяющие уравнения второй группы включают также уравнения, отражающие изменения усредненных макроскопических прочностных характеристик среды или геоматериала. Они включают как скорость деградации прочностных характеристик за счет накопленных повреждений, так и скорость восстановления прочности вследствие «залечивания» повреждений.

Наблюдаемая прочность геосреды является, таким образом, результатом динамического равновесия между этими конкурирующими процессами. Следовательно, эти уравнения конструируются на основе ведущих физических механизмов «микроскопических» масштабов, т.е. масштабов меньших, чем изучаемый масштаб, который рассматривается как макроскопический. Такой макроскопический масштаб зависит от решаемой задачи.

Выполнены тестовые расчеты эволюции напряженного деформированного состояния в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) от некоторого исходного состояния – зародившейся зоны растяжения. Эти расчеты демонстрируют появление в БРЗ разломов качественно сходных с наблюдаемыми. В частности, скорости растяжения оказались существенно связанными с развитием поворота Амурской плиты, а также с особенностями взаимодействия океанической тихоокеанской коры с материковой. Эти процессы развиваются существенно неоднородно вплоть до периодических смен локальных обласна области сжатия и наоборот на долговременного существования общей тенденции растяжения в БРЗ. Для тестирования модели были выполнены численные тестовые расчёты, эволюции геосреды кровли над выработанным пространством в шахте по известным временам обрушения кровли [4].

Показано, что, изменяя только соотношение между положительными и отрицательными обратными связями (при прочих равных условиях), среда реагирует на нагружение от типичного пластического течения до хрупкого разрушения. Таким образом, снимается известное противоречие между слабо связанными классическими теориями пластичности и хрупкого разрушения. При длительной квазистационарной стадии, предшествующей катастрофическому этапу эволюции среды в режиме с обострением, наблюдается типичное пластическое течение.

Другой предельный случай – развитие катастрофы как системы трещин с самого начала нагружения – демонстрирует хрупкое разрушение среды. В основе математической теории эволюции лежит система динамических уравнений механики сплошных сред, численное решение которых имеет принципиальные ограничения по времени процесса. Эти ограничения обусловлены жесткими требованиями на выбор шага по времени (условиями устойчивости разностной схемы). Для решения этой «проблемы времени»

предложена специальная процедура введения в модель реального времени процесса, которая заключается в решении последовательности динамических на каждом временном отрезке ΔTi до установления динамического равновесия между приложенными к среде силами и реакцией среды на нагружение на этом этапе процесса ΔTi . Эта процедура позволяет решать как задачи ударноволнового нагружения, так и задачи геодинамики и плитной тектоники с характерными временами в миллионы лет. С другой стороны, если предыдущей эволюцией подготовлен сверхбыстрый режим, то на следующем шаге $\Delta Ti+1$ этот катастрофический режим может быть рассчитан максимально подробно, даже если его скорости близки к ударно-волновым. Эффективность развиваемой методологии ярко иллюстрируется также тем, что выполненные численные расчёты эволюции нагружаемой среды позволяют описывать как медленные квазистационарные фазы эволюции, так и этапы эволюции в сверхбыстрых катастрофических режимах — режимах с обострением.

Показано, что наличие медленной подготовительной фазы эволюции и катастрофического сверхбыстрого режима с обострением является фундаментальным свойством общего эволюционного процесса. Характерные времена и масштабы этих этапов эволюции определяются нелинейными свойствами геосреды на соответствующем масштабе и задаются эволюционными уравнениями первой и второй группы. Таким образом, любое землетрясение есть обязательный катастрофический этап эволюции – режим с обострением на соответствующем масштабе. Физически этот режим означает прорыв разрушения с меньших масштабов на большие. Следовательно, увеличение масштаба деструкции всегда развивается как катастрофа в режиме с обострением.

- 1. Makarov P.V. Evolutionary nature of structure formation in lithospheric material: universal principle for fractality of solids, Russian Geology and Geophysics 48 (2007). P. 555-571.
- 2. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования // Физ. мезомех. 2005. Т. 8, № 6. С. 39-56.
- 3. Макаров П.В. Замечания по математической теории эволюции нагружаемых твёрдых тел и сред // Φ из. мезомех. 2008. Т. 11, № 3. С. 40–61.
- 4. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П. Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством // Физ. мезомех. 2008. Т. 11, № 1. С. 44–50.

Роль трещиноватости горных массивов в эволюции земной коры

С.Ю. Милановский, В.Н. Николаевский

Институт физики Земли РАН, г. Mockba, victor@ifz.ru

В предлагаемом анализе состояния и развития земной коры используются эксперименты по разрушению образцов горных пород при высоких Р-Т условиях в их сопоставлении с геофизическими исследованиями, а именно с доступными сведениями о глубинных разломах и границах в коре и верхней мантии. Используется прием скейлинга (переноса данных о финитном состоянии кернов на масштабы земной коры) в сопоставлении с результатами сейсмозондирования, магнитотеллурии, петрофизики и геохимии.

Исходные представления таковы. Если горные массивы по прочностным своим свойствам близки к гранитам, то хрупкое разрушение (в том числе катакластическое) возможно вплоть до границы Мохоровичича, а, следовательно, кора в целом гидравлически проницаема для воды и газов. Количественные отклонения в прочности (амфиболитов, перидотитов, серпентинитов, базальтов и др. от гранитов) приводят к широкой гамме вариантов строения коры, отвечающей наблюдаемому геологическому разнообразию (в том числе к различиям континентальной и океанической).

Введение воды как геологического фактора обеспечивает отличие пород коры от мантии, меняет динамику разрушения, вводя в действие элементы самоорганизации в ходе эволюции литосферы. Само присутствие воды при разрушениях в нижней коре приводит к разломным нарушениям в амфиболитах, плавлению гранитов, отменяет ограничения Кеннеди – Ито по фазовым границам «базальт – эклогит» и обеспечивает быструю кинетику развития событий, требуемую в общих теориях изменений вещества на Мохо и его переноса и накопления в литосферной колонке. Известные различия в типах метаморфизма также связаны с наличием и отсутствием воды. Внутри земной коры становятся принципиально важными различия в типах хрупкого разрушения. Они зависят от хода геотермы и конкуренции напряжений по вертикали и горизонтали, что объясняет существование волноводов выполаживанием глубинных разломов в средней коре. Изменения сейсмических скоростей теперь обусловлено не только сменой пород, но и уровнем их трещиноватости. Пустотность системы трещин чувствительна к возмущениям поля напряжений, проявляющихся как при землетрясениях, так и при квазистационарном развитии тектонических событий. Температуры на Moxo в 600° Цельсия является критической для различия в реологии пород верхней мантии – выше этого порога деформации зависят от скорости разрушения, что ограничивает зону накопления упругой энергии земной корой за счет реагирования верхней мантии на изменения тектоники в форме пластических течений. Их остаточные следы – это анизотропия сейсмических скоростей.

Тектонофизическое описание тектонического разрыва как комплекса разноранговых дизьюнктивных структур и локальных полей механических параметров в окружающем массиве

Д.Н. Осокина¹, Ф.Л. Яковлев¹, В.Н. Войтенко²

¹ – Институт физики Земли РАН, г. Москва, osok@ifz.ru, kvasov144@sumail.ru

Для решения ряда вопросов геодинамики необходима корректная интерпретация природных структур, образованных разрывами 1-го и 2-го порядка. В тектонофизике использовались три основные концепции (механические модели) описания единичного разрыва: разрыв как зона скалывания (сдвигания), разрыв—дислокация, разрыв—трещина. Затем разрыв рассматривался с позиций тектонофизики как поверхность разрушения, окруженная конечным объемом, в котором возникают неоднородные локальные поля напряжений и деформаций, разрывы и складки 2-го порядка. Смещения по разрывам связаны с параметрами полей деформаций и напряжений [5, 6, 10].

В настоящей работе предлагается развивающий эти представления подход к описанию единичного тектонического разрыва как комплекса, объединяющего геологические разрывные структуры разных рангов (главный разрыв 1-го порядка, разрывы и складки 2-го порядка) и локальные поля механических параметров (напряжений, деформаций, смещений), возникающие во вмещающем эту структуру объеме массива. Для этого тектонофизические исследования единичного тектонического разрыва как разрыва - трещины производятся в следующей последовательности: 1) задание параметров задачи (ориентации разрыва, коэффициента трения на берегах, параметров регионального поля напряжений); 2) постановка задачи математического моделирования локальных полей механических характеристик около разрыватрещины; 3) расчет полей напряжений и смещений, составление их карт; 4) прогноз вторичных нарушений и структур (разрывов, складок, поднятий, депрессий); 5) составление сводной карты нарушений и структур 1-го и 2-го порядков. При этом основной разрыв (вертикальный сдвиг), рассматривается как конечная поверхность контакта блоков массива, при расчете используется решение задачи теории упругости для слоя, нарушенного трещиной сдвига с трением берегов [4].

Ранее для разрыва-трещины было исследовано 3D поле напряжений слоя с разрывом (при разных вариантах исходного поля), в том числе были изучены: распределение величин и направлений главных напряжений, переиндексация их осей, положение областей с разными геометрическими типами поля и т.д., а также поле кулоновых напряжений и положение облас-

² – Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург, voitenkoslava@list.ru

тей разрушения около разрыва [1, 2, 3]. Было показано, что расчет и анализ локальных полей напряжений 4-х масштабных уровней (микро-, мезо-, субмакро- и макроуровней) в зоне у конца разрыва и изучение строения этих полей позволяют осуществить прогноз нарушений 2-го порядка у окончаний сдвига 1-го порядка.

Зона у конца разрыва была разделена на три участка с разным характером 2D и 3D напряжений и разными типами ожидаемых нарушений 2-го порядка; на этих участках прогнозируются: на первом – сбросы и отрывы, на втором – сдвиги, на третьем – надвиги и складки. Для нарушений каждого типа дается также прогноз их ориентировок. [2, 3, 10].

Данные экспериментов с моделями и данные геологии подтверждают результаты расчетов.

Основная задача настоящей работы — использование результатов расчета локальных полей напряжений разных уровней и проведенного на этой основе прогноза разрывов 2-го порядка (с выяснением их генезиса) для интерпретации природных разломных зон. Ожидается, что наборы теоретических решений для разных условий нагружения и разной прочности (реологии) среды при исследовании природных разломных структур разного масштаба помогут выявить этапы развития структуры, реконструировать ее геометрию, внешнее поле напряжений и т. д. [5, 6, 10].

Так как в работах ряда авторов имела место неоднозначная интерпретация разломных структур, в частности разрывов 2-го порядка вблизи разлома (см. ниже), в задачи работы входит сравнение «расчетных» нарушений 2-го порядка с натурными нарушениями около разломов, выяснение генезиса последних, их классификация и т.п.

С этих позиций рассмотрены натурные данные о нарушениях 2-го порядка, наблюдаемых: 1) в зонах скалывания и 2) в окрестностях разломов. В первом случае наблюдаемые нарушения 2-го порядка соответствуют полю напряжений, отвечающему механическим условиям в зонах скалывания (сдвигания). Во втором случае картина этих нарушений остается не изученной до конца, а ее объяснение – неоднозначным [8, 9, 10]. В работах ряда геологов испольнекорректной интерпретации этих зовались варианты Сопоставление натурных данных о нарушениях 2-го порядка с данными о вторичных нарушениях, прогнозируемых на базе расчетов, показывает, что совокупность нарушений 2-го порядка около разрыва может состоять из двух групп с различным генезисом: 1) нарушений первой группы, возникающих (до образования разрыва) в исходном поле массива или в поле зоны скалывания. Назовем их нарушениями 1-го («доразрывного») этапа; 2) нарушений второй группы, возникающих (после образования разрыва) в локальном поле напряжений, обусловленном смещениями берегов. Их назовем нарушениями 2-го («послеразрывного») этапа [6, 10]. Эти нарушения могут возникать прежде всего в зонах у концов разрыва, а также в областях разрушения, прилегающих к приконцевым участкам разрыва. Общее свойство нарушений этой группы (2-го этапа) – изменение ориентации плоскостей скола, а нередко и их кинематики, при «пересечении» разрыва – переходе от одного из крыльев к другому.

М.В. Рац, С.Н. Чернышев [7, 9] и К.Ж. Семинский [8] предложили разделять разномасштабные нарушения 2-го порядка, наблюдаемые вблизи разлома, на две категории: 1) нарушения, возникшие до образования разлома (для них предложен термин «опережающие»); 2) нарушения, возникающие после образования разлома (за ними предложено сохранить термин «оперяющие»). В природных условиях около разломов могут одновременно наблюдаться нарушения обоих типов, что и приводит к неоднозначности (или даже к путанице) при объяснении их генезиса. Рассмотренные выше предложения о разделении натурных вторичных нарушений на две группы (по характеру поля напряжений, в котором они образовались, или по времени их образования – до или после возникновения разрыва) представляют собой два идентичных подхода. Из их сопоставления следует, что независимо от близости к разрыву «опережающие» нарушения – это те, которые возникли в региональном поле массива или в поле зоны скалывания (на 1-ом «доразрывном» этапе), а «оперяющие» – это те, которые возникли в локальном поле напряжений разрыва (на 2-ом «после разрывном» этапе).

Сопоставление натурных данных о вторичных нарушениях с расчетными объясняет главную особенность нарушений второй группы, обусловленных локальным полем у окончаний разлома – различную ориентацию плоскостей (и часто различную кинематику этих нарушений) в разных крыльях. Эти изменения связаны с тем, что величины главных напряжений локального поля и ориентация их осей при переходе через разрыв испытывают скачкообразное изменение. Этим нарушения второй группы резко отличаются от нарушений первой группы, «опережающих», характеристики которых не меняются при переходе через разрыв.

С позиций предлагаемого подхода описывается ряд разномасштабных природных структур: новейшие структуры разломной зоны Тан-Лу (Дальний Восток), локальные поля пластических деформаций около разрывов в Таласском Алатау и т. п.

- 1. 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.
- 2. Осокина Д.Н. Сейсмогенные области вторичного разрушения вблизи активного разлома и в малой зоне у его конца, связь их геометрии с полем напряжений и прочностью массива (на основе расчета кулоновых напряжений) // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный мир. 2007. С. 270-278.
- 3. Осокина Д.Н.Особенности локальных полей напряжений разных уровней и нарушений второго порядка в окрестностях окончания сдвигового разрыва, их взаимосвязь

- с региональным полем напряжений // Тектонофизические исследования. М.: Изд. И Φ 3 РАН. 2008.
- 4. 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.
- 5. Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л., Войтенко В.Н. Тектонофизический анализ полей напряжений, деформаций, нарушений второго порядка около единичного разлома и возможности его практических приложений // Девятые геофизические чтения имени В.В. Федынского, 01-03 марта 2007 года. М.: 2007. С. 75-76.
- 6. Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л., Войтенко В.Н. Изучение тектонического разрыва как объекта, объединяющего мегатрещину, ее поля (напряжений, деформаций), и вторичные структуры (тектонофизический анализ) // Тектонофизические исследования. М.: Изд. ИФЗ РАН. 2008.
- 7. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра. 1970. 164 с.
- 8. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО». 2003. 242 с.
- 9. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука. 1983. 240 с.
- 10. Osokina D.N., Yakovlev F.L., Voitenko V.N.Second rank fractures and 3D stress & strain local fields of fault with sides friction as ones development stages evidence: theory, experiment and natural examples (on the basis of «fracture-crack» and «fracture shear zone» models study) // Geophysical Research Abstracts. 2007. V. 9. P. 10465...

Волновой механизм формирования краевых прогибов

В.Ф. Подурушин

ООО "ВНИИГАЗ"; 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка; vfp53@mail.ru

Коллизия литосферных плит в тектонофизическом аспекте может быть сопоставлена с соударением слоистых пластин. Верхний слой коры континентального типа представлен вулканогенно-осадочным чехлом, который в рассматриваемых условиях деформируется как пластичное тело [3]. Ниже последовательно залегают наиболее хрупкий и упругий «гранитный» слой, пластичный «базальтовый» слой, мантийная часть литосферы, обладающая промежуточными реологическими свойствами [4].

Из характеристики «гранитного» слоя следует, что энергия тектонического удара должна распространяться в нем в виде бегущей упругой геодинамической волны (ГДВ). Однако в зоне перехода от континента к океану (континентальные склон и подножье) «гранитный» слой утонен и раздроблен на блоки, разделенные рифтогенными впадинами с осадочным выполнением. На начальном этапе коллизии край континентальной литосферы, имеющий клиновидное сечение, вдвигается в толщу аккреционной призмы. Затем, после соприкосновения с противоположной плитой, энергия столкновения начинает расходоваться на уплотнение упаковки окраинных блоков континентальной коры, смятие и выжимание пластичных рифтогенных осадков. В этих условиях преобладают пластические деформации, тектонический удар демпфируется, коллизия имеет мягкий характер, возникновение упругих ГДВ затруднено.

На последующем этапе (рис. 1), после достаточного уплотнения краевых зон противостоящих плит, в столкновение вовлекается полноценная континентальная кора, а коллизия переходит в жесткий режим. Упругий «гранитный» слой взаимодействующих континентов в полосах, с обеих сторон прилегающих к коллизионной сутуре, изгибается в сторону свободной дневной поверхности. Объем, образовавшийся под изгибом, с двух сторон заполняется материалом «базальтового» слоя под действием всестороннего всасывающего эффекта и нагнетающей силы давящей плиты. Обращенная вверх выпуклость консолидированной коры формирует основание горного сооружения. Последнее надстраивается аллохтонными массами: выжатыми из сутурной зоны осадками континентальной окраины, обдуцированными пластинами океанической или островодужной коры, фрагментами «гранитного» слоя, сорванными на участках, где был превышен предел прочности пород.

В объем валообразного поднятия консолидированной коры частично втягивается «базальтовый» материал ближайшего платформенного обрамления. В области оттока толщина «базальтового» слоя уменьшается, заставляя проги-

баться вышележащие «гранитный» слой и древний осадочный чехол. Похожее явление сопровождает движение сейсмогенных волн цунами, вызывая значительное понижение поверхности океана непосредственно перед их приходом. Вторым фактором прогибания «гранитного» слоя на окраине кратона служит его упругая реакция на воздымание в соседнем орогене. В возникшей таким образом впадине закладывается глубокий и крутой приорогенный фланг платформенного краевого прогиба. По отношению к орогену тот же прогиб является передовым. Краевой прогиб заполняется молассой – продуктами разрушения орогена. Для обозначения взаимосвязанных структур «ороген + передовой (краевой) прогиб» предлагается использовать термин «динамопара», а для их геоморфологического проявления – «морфодинамосоответственно пара». Эти понятия отражают структурный геоморфологический признаки ГДВ.

фронт ГДВ фронт ГДВ упругий ("гранитный") слой разломы: а - коллизионная континентальной коры сутура, б - прочие пластичный ("базальтовый") доорогенные чехлы граница Мохоровичича слой континентальной коры континентальной коры направления действия доорогенные чехлы океаническая кора кеанической коры тектонических сил направления перетекания известково-шелочные пластичного материала вудканиты активной нижней коры континентальной окраины

Начало жесткой коллизии. Зарождение ГДВ

Рис.1.

Амплитуда ГДВ отражает положение равновесия между упругой и гравитационной силами. Ее максимум во времени приурочен к начальному периоду существования волны, а в пространстве тяготеет к шву столкновения плит. В дальнейшем, по мере движения в глубь литосферной плиты и с удалением от источника, энергия ГДВ уменьшается, расходуясь на внутреннее трение, сопутствующие пластические деформации, взаимодействие с ниже- и вышележащими горными массами, в том числе значительным объемом ново-

образованной молассы передового прогиба. Вместе с потерей энергии падает амплитуда ГДВ, происходит ее затухание, в процессе которого формируется пологий платформенный борт краевого прогиба.

Распространению упругих геодинамических волн сопутствует образование послойных срывов в наименее компетентных толщах, отзывающихся на динамическую нагрузку пластическими и разрывными деформациями. Известно, что в осадочном чехле к таким толщам, относятся глинистые и соленосные формации, в консолидированной коре — границы плотностных и реологических неоднородностей литосферы (поверхностей фундамента, Конрада, Мохоровичича, внутренней расслоенности мегаслоев), а также разрывных нарушений доколлизионного возраста, в первую очередь древних надвигов. Примером последних служат рифейско-вендские тектонические покровы Норильского района Сибирской платформы, возрожденные вследствие повторной коллизии в позднем палеозое-раннем мезозое [2].

Смещения происходят не единовременно по всей поверхности надвига, а в сравнительно узкой полосе прохождения динамопары, движущейся от коллизионного шва во внутренние части плиты [5]. Таким образом осуществляется дискретно-волновой массо-энергоперенос, исследованный и описанный А.И. Добролюбовым [1].

- 1. Добролюбов А.И. Бегущие волны деформации. Минск: Наука и техника, 1987. 144 с.
- 2. Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М. и др. Геология и рудоносность Норильского района. М.: Наука. 1988. 279 с.
- 3. Расцветаев Л.М. Содвиговые парагенезы в ансамбле коллизионных структур // Структурные парагенезы и их ансамбли. Материалы совещания. М.: ГЕОС. 1997. С. 136-140.
- 4. Трифонов В.Г., Макаров В.И., Пономарев В.С. Закономерности новейшего тектогенеза // Тектонические процессы: Докл. сов. геологов на XXVII сес. Междунар. геол. конгр. (Вашингтон, июль, 1989). М.: 1989. С. 211-218.
- 5. Юдин В.В. Варисциды Северного Урала. Л.: Наука., Ленинградское отд. 1987. 173 с.

Латентные – остаточные напряжения в геологической среде

В.С. Пономарев

Геологический Институт РАН, г. Москва

- 1. Различают два вида упругой деформации: мгновенную («гуковскую») деформацию є0, изменяющуюся синхронно с изменением обусловившей её силы, и деформацию последействия ε_{Φ} , фиксируемую структурой тела. Такую деформацию далее будем называть фиксированной упругой деформацией (ФУД). ФУД могут длительно сохраняться в твердом теле и после того, как причина, вызвавшая их появление, более не действует. Таким образом, суммарная упругая деформация твердого тела в общем случае состоит из двух составляющих: $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\Phi}$. (1). Соответственно, помимо «обычных» напряжений σ_0 , обусловленных мгновенными деформациями ϵ_0 , будем различать латентные (остаточные) напряжения σ_{Φ} , обусловленные фиксированными деформациями ε_{Φ} , а обусловленную ими упругую энергию, выраженную через её плотность, – как *латентную энергию* u_{Φ} . Симметрично выражению (1), в общем случае $\sigma = \sigma_0 + \sigma_{\Phi}$ (2.1) и $u = u_0 + u_{\Phi}$ (2.2). В «классической» геомеханике рассматривается частный случай, при котором $\sigma = \sigma_0$, $\sigma_{\Phi} = 0$ (3.1), а $u = u_0$ и $u_{\Phi} = 0$ (3.2). Нами же предлагается в рассмотрение другой частный случай, при котором $\sigma = \sigma_{\Phi}$, $\sigma_0 = 0$ (4.1), и $u = u_{\Phi}$ и $u_0 = 0$ (4.2).
- 2. Поле латентных напряжений имеет дискретную структуру. Оно представляет собой ансамбль элементарных полей напряжений, возникающих в областях «нестыковки» структурных элементов. Каждое из них представляет собой автономную замкнутую самоуравновешенную систему напряжений противоположного знака. Размеры элементарных полей определяются размерами взаимодействующих структурных элементов (или размерами структурных связей). Они могут возникать на связях любого масштабного уровня от связей на уровне кристаллических решеток, до связей на уровне крупных геоблоков. В отличие от напряжений σ_0 , причиной появления σ_{Φ} могут служить не только внешние силовые воздействия, но и самые различные механические, физические и химические процессы.
- 3. Картина НДС зависит от соотношения размеров элементарных систем напряжений и избранного масштаба рассмотрения. Пусть Q масштаб рассмотрения и L характерный размер области, в которой замыкается единичная система латентных напряжений масштабного ранга і. В рамках «классической» геомеханики рассматривается случай, когда $Q << L_{i,}$. При $Q >> L_{i}$ совокупность множества элементарных полей латентных напряжений предстанет перед наблюдателем как своего рода фоновая напряженность. На этом уровне понятие напряжений в их «классическом» понимании теряет смысл. При $Q \approx L_{i,}$ выполняя точечные измерения в разных частях единичной

системы, наблюдатель столкнется с явлением сильного разброса измеренных значений не только по модулю и знаку, но и по ориентировке в пространстве.

- 4. С энергетической точки зрения каждая единичная область ФУД представляет собой заряд упругой энергии, элементарный энергетический носитель. Суммарная энергия множества элементарных носителей составляет собственный энергетический потенциал твердотельной системы. Если величина u_{Φ} достигает некоторого порогового значения $[u_{\Phi}]$, система переходит в метастабильное состояние. Тела, перешедшие в такое состояние, будем называть энергонасыщенными. Механическое поведение энергонасыщенных тел резко отличается от поведения тел, рассматриваемого в рамках «классической» геомеханики. В своих типичных проявлениях процессу разрушения энергонасыщенных тел свойственно самопроизвольное лавинообразное развитие, в результате чего тело расчленяется на множество фрагментов. Процесс этот релаксационный: он развивается не за счет притока энергии от внешнего источника, а за счет энергии, заблаговременно аккумулированной непосредственно разрушающимся телом. Развитие трещин сопровождается излучением интенсивных упругих импульсов.
- 5. Способность геологической среды связывать, фиксировать упругие деформации и за их счет формировать собственный энергетический потенциал, является важнейшим, фундаментальным свойством геологической среды. Сценарий разрушения энергонасыщенных тел проявлен в самых различных натурных и техногенных ситуациях. Разработанные представления могут способствовать решению самых разных проблем горного дела, сейсмологии, геофизики и геологии.

Достижения и перспективные задачи тектонофизических исследований

Ю.Л. Ребецкий

Институт физики Земли РАН, г. Москва, reb@ifz.ru

М.В. Гзовский рассматривал развитие методов тектонофизических исследований прежде всего для решения важнейших фундаментальных задач, стоящих в рамках наук о Земле, а также для задач разведки и разработки месторождений природных ископаемых. В большей мере решение этих задач связывалось с созданием методов интерпретации данных о морфологии природных складчатых и разрывных структур в терминах геомеханики и геодинамики.В настоящее время многие из заложенных им направлений успешно развиваются, внося существенный вклад в решение проблем горного дела и геолого-разведки, физики очага и геодинамики.

Несколько десятилетий потребовалось, чтобы алгоритмы методов, заложенных М.В. Гзовским, позволили получать данные не только об ориентации осей главных напряжений, но и данные о полных компонентах тензора напряжений и параметрах прочности горных массивов в их природном залегании [1] (методы анализа морфлогии разрывных структур), а также данные об эволюции внутриплитовых орогенов [2] (методы анализа морфологии складчатых комплексов). Новые типы данных (величины напряжений, амплитуды изменения мощности складчатых орогенов), которые с помощью этих методов могут быть получены для тектонически активных районов, с одной стороны расширяют возможности их приложения для решения прикладных и фундаментальных задач, а с другой позволяют увидеть ряд новых проблем, требующих исследования.

- 1) Данные о природных напряжениях для внутриплитовых орогенов, по результатам реконструкции с применением полученные катакластического анализа совкупностей механизмов очагов землетрясений [1], показали существенный вклад (более 70-80%) внутрикоровых и внутримантийных неоднородностей на формирование напряжений в верхней и средней коре [3]. Фактически это определяет ведущую роль в этих областях плотностных неоднородностей и следовательно гравитационных напряжений в сравнении с напряжениями, вызываемыми горизонтальными движениями плит. Исследование взаимосвязи этих факторов и их проявление поверхности современных напряжениях И лвижениях перспективных спутниковые данные) является одной ИЗ тектонофизических исследований, развивающей фундаментальные основы геодинамики.
- 2) Эти исследования, а также сейсмологические данные об изменении типа механизмов очагов землетрясений, происходящих на разных глубинных

уровнях коры, требуют более внимательного исследования роли остаточных напряжений, возникающих в процессе гравитационного уплотнения горных пород. Установленная в работе [4] возможность формирования в горизонтальном направлении напряжений наибольшего сжатия в результате выноса в верхнии слои коры пород, получивших большие остаточные деформации на глубине, дает возможность получения количественных оценок и районирования внутриплитовых орогенов по ожидаемому типу напряженного состояния. Необходимы дальнейшие тектонофизические исследования, развивающие этот подход, и сопоставление прогнозных согласно данной концепции напряжений с результатами данных о природных напряжениях, получаемых в рамках метода катакластического анализа или из данных in-situ. Исследования этого направления наряду с фундаментальным аспектом имеют также и прикладной характер в рамках горного дела.

- 3) Сравнение закономерности распределения современных напряжений в зонах субдукции и для внутриплитовых орогенов позволило установить, что уровень девиаторных напряжений в последних выше 3—4 раза. Этот факт в большей степени вызван повышением уровня флюидного давления, действующего в зонах контакта литосферных плит с сравнении с разломами вунтриплитовых областей. Определяющая роль флюидного давления на процесс хрупкого разрушения [5] ставит новую задачу изучение факторов, отвечающих за измененение флюидного давления в зонах разломов, и возможности его оценки, что также является перспективной задачей тектонофизики.
- 4) Результаты анализа поля напряжений в области подготовки крупных землетрясений [6] показали, что уровень девиаторных напряжений в них не самый высокий как это следует из Рэйдовской концепции модели очага. Очаг сильного землетрясения связан с областью среднего уровня эффективного давления и максимальных касательных напряжений, а начало его «вспарывания» возникает в области максимального градиента напряжений. Эти факты позволяют в качестве определяющей рассматривать концепцию Рихтера на област подготовки очааг землетрясения, как область пониженной прочности. Изучение закономерности поля напряжений и эволюции прочности в области подготовки крупномасштабного хрупкого разрушения (землетрясения) еще одна из ближайших задач тектонофизики.
- 5) Еще одной перспективной задачей тектонофизики, смыкающейся с двумя предыдущими, является изучение физических и химических процессов, происходящих в разломах верхней и средней коры. В рамках этой проблемы как разломы следует рассматривать особые геологические механические свойства которых связаны с такими дилатансия, диспергация (милонитизация) и компакция горных пород. Важнейшим явлением, изменяющим прочностные свойства пород здесь рассматривать эффект Ребиндера, определяющий изменение размерности кристаллов и зерен, и стресс метаморфизм горных пород,

происходящий в участках их особого милонитового и ультрамилонитового состояния [7]. Это и два предыдущих направления исследований определяют проникновение тектонофизики в фундаментальные проблемы геомеханики и физики очага землетрясения.

- 6) Анализ механического поведения пород коры разного глубинного уровня показывает, что процессы, рассмотренные выше в качестве ведущих процессов в теле разлома, здесь также проявляются. Разница заключается в том, что, если в теле разлома области с различным типом ведущего процесса располагаются мозаично и достаточно хаотично, то в земной коре они имеют глубинную зональность. В рамках этих исследований необходимо создание моделей реологически расслоенной земной коры, учитывающих особенности ее структурного строения от макро- до мегаскопического уровней, следует развивать тектонофизические подходы в интерпретации геофизических данных в расшифровке этих данных в терминах механики.
- 7) Еще одно направление тектонофизических исследований связано с новым типом данных, получаемых с использованием методов 3Д-сейсмики при изучении осадочного чехла в районах залежей углеводородных месторождений. Выделяемые этими методами разрывные структуры позволяют применять к ним тектонофизические подходы развитые для данных о разрывных структурах, наблюдаемых геологическими и сейсмологическими методами. Необходимость развития исследований в последних двух направлениях фактически определяет проникновение тектонофизических подходов и методов в геофизику, требуют создания соответствующих методов интепретации геофизических данных.

Исследования поддержаны грантами РФФИ 06-05-64410.

- 1. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Изд. Наука. 2007. 406 с.
- 2. Яковлев Ф.Л. Многоранговый деформационный анализ структур линейной складчатости // Доклады РАН. 2008. Т. 422, № 3.
- 3. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Тектонические напряжения земной коры Алтая и Саян // Казань: Изд. Каз. гос. ун. 2007. Т 1. С. 155-154.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений землетрясений // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 1, № 11. С. 66-73
- 5. Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании. Сб. Флюид и Геодинамика. М.: Наука. 2006. С. 120-146.
- 6. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т. 47. № 11. С. 1192-1206.
- Ребецкий. Ю.Л. Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясений // Доклады РАН. 2005. Т. 400, № 3. С. 372-377.

Идентификация структурных элементов сдвиговых дислокаций и решение обратной тектонофизической задачи подбором адекватного модельного парагенезиса

А.М. Ручьев

Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, ruchyov@krc.karelia.ru

Метод, предложенный [3] для исследования сложных сдвиговых дислокаций, в которых из-за пространственного совмещения разновозрастных структурных парагенезисов затруднена полевая идентификация их плоскостных элементов, нередко близких по ориентировке и макроскопически сходных по минеральному выполнению, заключается в следующем.

При полевой работе ориентировка базисных (недеформированных) участков плоскостных структурных элементов (кливажа, сланцеватости, полосчатости и др.) определяется непосредственным измерением элементов залегания их отпрепарированных поверхностей, или рассчитывается по элементам залегания двух и большего числа линий, лежащих в искомой плоскости (линий ее пересечения с поверхностью рельефа обнажения). Документируются возрастные соотношения структурных элементов, характер смещения по ним, их минеральное выполнение.

Для статистической обработки первичных данных и моделирования применяется компьюторная программа с возможностями не меньшими, чем у «StereoNet» (Version 2.02).

При интерпретации материалов используются составляющие основу тектонофизической модели средней части зоны скалывания [1, 2] следующие представления о пространственных и временных соотношениях элементов идеализированного сдвигового структурного парагенезиса (ИССП): R-, R'-сколы Риделя формируются на ранней стадии деформации, они ориентированы плоскостями базисных участков под углом скалывания (α_0) к оси максимального главного напряжения σ_1 , расположены с разных сторон от оси и под углами соответственно $\pi/4$ - α_0 и $\pi/4$ + α_0 к осевой плоскости зоны скалывания, отклоняясь от нее при правом сдвиге вправо, при левом – влево; Рсколы формируются после R-, R'-сколов, ориентированы плоскостями базисных участков под углом α0 к оси минимального главного нормального напряжения сжатия σ_3 и под углом $\pi/4$ - α_0 к осевой плоскости зоны скалывания, располагаются зеркально-симметрично плоскости R-сколов; Т трещины отрыва – перпендикулярны оси σ_3 и компланарны оси σ_1 , ориентированы плоскостями базисных участков под углом $\pi/4$ к осевой плоскости зоны скалывания, отклоняясь от нее при правом сдвиге вправо, при левом влево; L-сколы формируются на заключительной стадии деформации, параллельны осевой плоскости зоны скалывания (плоскости генерального смещения); плоскости, соответствующие базисным участкам элементов сдвигового структурного парагенезиса пересекаются по линиям, параллельным оси σ_2 .

Анализ πS-диаграмм в главных чертах сводится к следующему.

Выделение поясов распределения статистических максимупоясов. выбраковка идентификация ложных (предварительная) структурных элементов проводятся в процессе выявления закономерных, отвечающих тектонофизической модели, угловых соотношений между максимумами предпочтительной ориентировки структурных элементов. Технически процедура сводится к измерению на тSдиаграмме угловых расстояний между однопоясными максимумами и простейшим вычислениям, включающим определение величины α₀. В качестве αθ принимается рассчитанный угол, при котором выполняются закономерности пространственной ориентировки, свойственные элементам ИССП. После нахождения α_0 по угловым соотношениям статистических плоскостей можно определить, каким элементам идеализированного парагенезиса они соответ-Разумеется. при идентификации элементов структурного парагенезиса учитываются и полевые наблюдения последовательности их формирования, направлений смещения и др.

Решение обратной тектонофизической (морфокинематической, кинематической) задачи – определение пространственной ориентировки осей главных нормальных напряжений, отвечающих природному структурному парагенезису, достигается моделированием соответствующего ему ИССП. Моделирование включает: построение диаграммы элементов ИССП и осей главных нормальных напряжений сжатия при вычисленном угле скалывания (удобен исходный вариант при вертикальном положении оси σ_2 и меридиональной ориентировке плоскости L-скола); преобразование (поворот) модельной диаграммы до совмещения проекции выбранного на ней структурного элемента с проекцией одноименного на статистической диаграмме (в качестве «опорного» предпочтителен наиболее выраженный идентифицированный максимум), при этом проекции оси σ_2 и линии пересечения плоскостей, соответствующих статистическим максимумам, должны совпасть. При моделировании «автоматически» проверяется правильность идентификации структурных элементов природного парагенезиса. Адекватность модели качественно оценивается степенью совмещения проекций элементов идеализированного и анализируемого структурных парагенезисов при «сложении» диаграмм. Пространственная ориентировка осей главных нормальных напряжений определяется по приемлемой модельной диаграмме. Моделирование всей совокупности элементов ИССП позволяет получить и иную нужную информацию, в частности, данные для прогноза.

Последовательность деформационных событий реконструируется с учетом возрастных соотношений структурных элементов, принадлежащих различным парагенезисам.

Метод опробован на различных геологических объектах Карелии (беломориды и др.). Материалами этого опробования еще раз дополнительно аргументируется адекватность перечисленных базовых положений тектонофизической модели средней части зоны скалывания [1, 2]. Результаты исследования структуры сформированных в tP-условиях различных метаморфических фаций (от зеленосланцевой до амфиболитовой) сдвиговых дислокаций разнообразных пород подтверждают существование статистически выявляемой закономерности высокоточных угловых соотношений структурных плоскостных элементов. Эта закономерность позволяет обоснованно (в рамках принятых модельных представлений) выделять природные парагенезисы трех и большего числа структурных элементов.

Установлено что, сложные πS-диаграммы зон рассланцевания отражают совокупность, как правило, большого числа пространственно совмещенных сдвиговых парагенезисов (до 20–30), различающихся величиной α₀, набором и ориентировкой структурных элементов. При этом одни и те же структуркачестве. элементы. нередко В новом ΜΟΓΥΤ неоднократно функционировать в составе различных парагенезисов. Для полиметаморфических парагнейсов беломорского комплекса отмечается сходство (вплоть до идентичности) ряда структурных парагенезисов на удаленных друг от друга участках развития изофациальных метаморфитов и отсутствие такового для гетерофациальных пород в пределах участков.

Получены новые сведения об относительной частоте встречаемости различных по набору структурных элементов сдвиговых парагенезисов. Например, в гнейсах чупинской свиты беломорид частоту их встречаемости отражают следующие показатели, %: для tP-условий амфиболитовой фации повышенного давления — $\{RR'L\}$ -39,66; $\{R'PL\}$ -58,62; $\{RPL\}$ -1,72; для tP-условий эпидот-амфиболитовой фации — $\{RR'L\}$ -29,27; $\{R'PL\}$ -69,51; $\{RPL\}$ -1,22. Намечается большая, чем предполагалась ранее, изменчивость угла скалывания при деформации горных пород в природных условиях. Так, в структурных парагенезисах, формирующихся в tP-условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, частота встречаемости различных величин угла скалывания характеризуется сложным почти непрерывным распределением в диапазоне изменения α_0 от 0– 1° до 42° .

- 1. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс. 2005. 572 с.
- 2. Гинтов О.Б., Исай В.М. Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. Киев: Наук. Думка. 1988. 228 с.
- 3. Ручьев А.М. Структурный анализ сдвиговых дислокаций // Новые идеи в науках о Земле. VIII международная конференция. М.: 2007. Т. 1, S-1. С. 298-301.

Промежуточные состояния между быстрыми и медленными движениями в средах со структурой

Б.П. Сибиряков 1 , Е.Б. Сибиряков 1 , Б.А. Бобров 1 , Е.В. Деев 1 , А.Ф. Ревуженко 2 , С.В. Лавриков 2 , А.В. Радченко 3 , И.И. Шабалин 4 , А.Е. Медведев 4

- ¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, sibiryakovbp@ipgg.nsc.ru
- ² Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск
- ³ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
- ⁴ Институт теории и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск

Проблема

- 1. Одна из главных трудностей, лежащая в основе работ по развитию физических основ сейсмологии и сейсморазведки, состоит в том, что мы признаем сложность реальных сред, их блочное строение, иерархичность и т.д. лишь словесно. Когда начинается математическое описание явлений динамического деформирования реальных сред, то используется классическая модель сплошного континуума Коши и Пуассона, которая абсолютно не признает никаких перечисленных обстоятельств. В результате уравнения движения и равновесия не только не годятся для количественных расчетов, но и качественно не отражают важнейшие аспекты поведения сред, обладающих структурой.
- 2. Какие же это качественные несоответствия? Прежде всего, реальное существование очень низких скоростей волн, не имеющих ничего общего со скоростями обычных продольных и поперечных волн. Столь медленные волны, со скоростями порядка сантиметров в минуту и менее, были обнаружены в лабораторных опытах ИФПМ СО РАН. Они спорадически фиксировались сейсмологами, однако, именно лабораторные опыты показали, что это действительно волны, для которых свойственны явления отражения и другие признаки настоящих волн.

Во-вторых, существует немалое количество опытов, которые показывают, что нелинейные волны возникают при весьма малых сейсмических и акустических колебаниях. Мы очень легко вступаем в нелинейность, и это обстоятельство представляется весьма таинственным.

В-третьих, модель сплошной среды обладает тем свойством, что уравнение равновесия никогда само по себе не перейдет в уравнение движения, без какого-то внешнего толчка. В природе же все как раз и возникает без этих внешних толчков. Многие природные и техногенные катастрофы подкрадываются медленно, незаметно. Это значит, что в природе нет китайской стены между медленными и быстрыми процессами, а в математическом описании такая стена имеет место и обойти ее невозможно

3. Пути преодоления перечисленных трудностей приводят к необходимости создания некоторых новых моделей континуума, отличного от сплошной среды Коши и Пуассона. Эти модели должны обладать внутренней структурой. Внутренняя структура обычно представлена некоторой системой пор и трещин, как правило, достаточно сложных. Сама геометрия пор и трещин разумным образом может быть описана методами интегральной геометрии. Здесь поточечное описание не принимается во внимание, а вся геометрия пор и трещин представлена только коллективными характеристиками этих сложных объектов. Помимо обычной пористости важнейшей характеристикой порового пространства является удельная поверхность, так как обратная величина ее определяет средний линейный размер структуры.

Все экспериментальные результаты, упомянутые в данной работе, особенно, касающиеся влияния очень слабых воздействий типа лунных приливов на весьма сильные колебания Земной Коры, опыты по появлению нелинейных колебаний под действием слабых периодических сил удовлетворительно объясняются с помощью новой модели континуума со структурой. Старая точка зрения о том, что для слабых колебаний нет физических проблем, может теперь уверенно считаться предрассудком для структурированных сред.

Результаты

В течение ряда предшествующих лет в ИНГГ СО РАН велись работы по созданию новой модели континуума для сред, обладающих структурой. Такая модель была построена, и она привела к созданию системы уравнений равновесия и движения бесконечного порядка для структурированных сред. Несмотря на то, что общая теория таких уравнений пока отсутствует, просматривается некоторое множество простых частных решений, которые описывают как обычные, так и необычные волновые явления.

- 1. Теория волн в средах со структурой описывает, наряду с обычными продольными и поперечными волнами, также и волны, которые движутся со скоростями, гораздо меньшими скоростей упомянутых волн. Эти медленные волны могут обладать как угодно низкой скоростью, что дает естественную основу для объяснения упомянутых явлений. Низкие и сверхнизкие скорости характерны как для продольных, так и для поперечных волн [1]
- 2. Среди представленных решений особое внимание вызывают решения, описывающие явления, связанные с параметрическими резонансами волн в структурированных средах. Такие явления полностью исключаются в классических моделях сплошной среды. Параметрические резонансы приводят как к затуханию волновых процессов, так и к их неограниченному росту, разумеется, если есть источник внешних периодических колебаний достаточно большой энергии. При этом важно отметить, что начальное воздействие может быть очень слабым. Тем самым, теоретически описан один из сценариев развития катастроф, когда последние развиваются постепенно, плавно, без резких изменений напряженного состояния среды. При этом, высокие частоты, если они есть в спектре периодической внешней силы, вызывают

параметрические резонансы, которые приводят, в свою очередь, к снижению скоростей распространения волн, а это явление приводит к появлению параметрических резонансов для более низких частот спектра. Указанный процесс последовательного включения все более низких частот в так называемые неустойчивые решения, может продолжаться неограниченно, включая собственные частоты Земли как планеты [2].

- 3. Вопрос о возникновении нелинейных колебаний при слабых воздействиях на среду также является достаточно острым в настоящее время. Конечно, реальной физической причиной таких явлений является концентрация напряжений в угловых точках микро и мезо структур, однако, математическое описание таких явлений исключительно трудно. Тем не менее, отказ от сплошной модели среды позволил объяснить и это явление. Появление суммарных и разностных гармоник, что совершенно справедливо считается явным признаком нелинейности волнового процесса, сопровождается увеличением амплитуды этих колебаний во столько раз, во сколько раз длина волны больше размеров элементарной структуры. Для сред, лишенных структуры, требуются исключительно сильные воздействия для возникновения нелинейных колебаний.
- 4. Среди теоретических результатов следует также отметить решения, которые не соответствуют ни быстрым, ни медленным процессам, так как в классическом смысле не являются решениями ни уравнения равновесия, ни уравнения движения. По-видимому, эти решения соответствуют так называемым метастабильным состояниям, одним из ярких проявлений которого является сейсмическая эмиссия. Классическая модель сплошной среды ставит нас перед альтернативой либо медленные, квазистатические процессы, либо быстрые волновые явления. Новая модель континуума размывает грань между этими крайними состояниями, допуская промежуточные, метастабильные ситуации.

- 1. Сибиряков Б.П. Динамика микронеоднородных геологических сред. Новосибирск: Изд. НГУ. 2004. 233 с.
- 2. Сибиряков Б.П. Параметрические резонансы и неустойчивость геологических структур // Физическая мезом еханика. 2005. Т. 8, № 2. С. 5-10.

Некоторые методические аспекты реконструкции тектонических напряжений по геологическим индикаторам

Л.А. Сим

Институт физики Земли РАН, г. Mockba, sim@ifz.ru

Методы изучения тектонических напряжений по геологическим индикаторам делятся на две большие группы, в каждой из которых имеются разновидности. К первой относятся методы, основанные на выделении сколовых сопряженных трещин (М.В. Гзовский, 1954; П.Н. Николаев, 1977 и др.) и восстанавливающие тектонические напряжения, вызвавшие их образование. Во второй группе методов анализируются вектора тектонических перемещений на зеркалах скольжения (О.И. Гущенко, 1973; J. Angelier, 1974; Ю.Л. Ребецкий, 1999, 2000 и др.). При изучении следов перемещений допускается, что они могут образоваться на ослабленных поверхностях любого возраста и генезиса в случае их благоприятной ориентировки по отношению к наложенному полю напряжений. Наибольшее количество борозд скольжена плоскостях, близких к должно фиксироваться максимальных касательных напряжений t_2 в случае трехосного напряженного состояния или на плоскостях, конусообразно расходящихся от осей σ_1 – минимальных или σ_3 – максимальных сжимающих напряжений в случаях одноосного напряженного состояния.

Между тем, при трехосном нагружении ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$) кроме максимальных касательных напряжений, обусловленных разностью абсолютных величин главных нормальных напряжений σ_1 и σ_3 , значимые касательные напряжения могут быть и за счет разности абсолютных величин между σ_1 и σ_2 (\mathbf{t}_3), а также между σ_2 и σ_3 (\mathbf{t}_1). Несмотря на то, что величины касательных напряжений на плоскостях \mathbf{t}_1 и \mathbf{t}_3 меньше, чем на плоскостях \mathbf{t}_2 , в реальной среде из-за наличия неоднородностей фиксируются случаи, когда для тектонических перемещений, вызванных воздействием последнего поля напряжений, используются уже существовавшие в горной породе плоскости, близкие по ориентации к плоскостям действия \mathbf{t}_1 или \mathbf{t}_3 . Рассмотрим этот и другие феномены распределения плоскостей со следами скольжения и возможные методические следствия.

На рис. 1 показаны стереограммы с результатами реконструкции тектонических напряжений кинематическим методом (О.И. Гущенко, 1979). Распределение векторов перемещений лишь на рис. 1, б, е, ж сгруппировано вблизи плоскости действия \mathbf{t}_2 , при этом максимумы на рис. 1, е, ж приурочены лишь к одной из плоскостей \mathbf{t}_2 . Основные максимумы плоскостейсместителей на рис. 1, в, е приурочены к плоскости \mathbf{t}_1 и \mathbf{t}_3 .

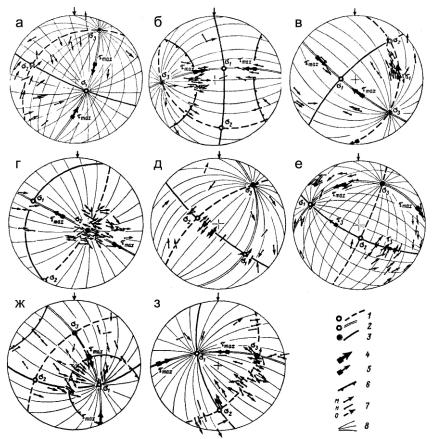


Рис. 1. Реализация разных плоскостей касательных напряжений в реальной геологической среде (сетка Вульфа, верхняя полусфера).

1-3 – оси главных нормальных напряжений и плоскости их действия: $1-\sigma_1$, $2-\sigma_2$, $3-\sigma_3$; 4-5 – полюса плоскостей действия касательных напряжений t_2 (4) и $t_{1,3}$ (5); 6 – конические поверхности, оси которых совпадают с осями σ_1 и σ_3 ; 7 – вектора перемещений на ослабленных поверхностях (M – уверенные, H – с неопределенным знаком; O – противоречащие найденному полю напряжений); 8 – системы дуг больших кругов, расходящихся от осей σ_1 и σ_3 Привязки стереограмм: O – Казахстан, остальные – Приполярный Урал

Приведенные примеры показывают, что в неоднородной среде в последнем поле напряжений (принято, что подавляющая масса борозд скольжения образована в наиболее молодом поле напряжений) при деформировании пород используются уже готовые неоднородности; процент неотектонических трещин в докембрийских отложениях Приполярного Урала в зонах активизированных новейших разломов составляет 15–30% от общего числа,

соответственно, восстановить только по трещиноватости новейшее поле напряжений здесь вряд ли удастся (Л.А. Сим, 1982, 1987, 2000). Если плоскости с максимумами борозд скольжения в районе полюсов плоскостей действия \mathbf{t}_2 и \mathbf{t}_3 на стереограмме рис. 1, е трактовать как сопряженную систему трещин, то можно восстановить ошибочные ориентации осей главных нормальных напряжений.

Другие феномены распределения плоскостей с бороздами скольжения обнаружены в ситуациях, близких к одноосному сжатию (рис. 1, б-д) и к одноосному растяжению (рис. 1, ж, з). Лишь на стереограммах на рис. 1, б, ж заметна тенденция группирования плоскостей со смещениями вблизи конических поверхностей вокруг осей σ_1 и σ_3 . На рис. 1, г в ситуации, приближенной к одноосному сжатию, реализованные плоскости сгруппированы вблизи оси сжатия. Это - плоскости рассланцевания с разбросом в их ориентировках и направлениях перемещений по ним. Несмотря на то, что сланцеватость субнормальна к реконструированной оси сжатия, вопреки теоретическим запретам, по ее плоскостям происходят перемещения. Связано это, по всей вероятности, с малым трением на плоскостях рассланцевания, обусловленной скоплением на них минералов подгруппы листовых силикакоторые облегчают тектонические перемещения. Относительная концентрация полюсов площадок с бороздами скольжения вблизи плоскостей, нормальных к оси сжатия (рис. 1, д) и оси растяжения (рис. 1, з) показывает, что смещения происходят по поверхностям, субпараллельным осям σ_3 и σ_1 . При одноосном растяжении подобное распределение можно объяснить тем, что в обстановке растяжения наименее раскрытыми остаются трещины, параллельные оси растяжения - на них и зафиксировались следы подвижки. Это не означает, что по прочим плоскостям не было перемещений - вероятно, на них не было условий для образования борозд скольжения из-за малого трения. Такое же распределение плоскостей сместителей при одноосном сжатии можно объяснить лишь тем, что это породы, в которых направление движения определять надо не по правилу Гофера, а наоборот, т.е. ось сжатия должна быть осью растяжения. Подобные ситуации требуют дополнительного полевого изучения.

Приведенные примеры свидетельствуют, что в геологической среде из-за ее разного рода неоднородностей возможны отклонения от модельных представлений о характере процессов деформирования.

Провальные дислокации в приводораздельных частях горных массивов и возможные механизмы их образования

A.Л.Стром¹, M.Е. Грошев²

¹ – Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, a.strom@g23.relcom.ru

В докладе рассмотрены два вида дислокаций в приводораздельных частях горных массивов — нагорные грабен-провалы с амплитудами смещений в метры — первые десятки метров и кальдерообразные провалы глубиной в сотни метров. Коренное отличие этих дислокаций от разнообразных оползней и обвалов, при формировании которых большие объемы горных пород смещаются в «свободное пространство» долин, обрамляющих разрушающиеся хребты, состоит в том, что здесь смещение происходит «внутрь» горного массива. Соответственно, при выяснении условий возникновения таких провальных дислокаций основная проблема состоит в том, чтобы найти «свободное пространство», способное компенсировать «исчезнувший» объем.

Возможные условия формирования нагорных грабен-провалов проанализированы на примере дислокации Хонайхол, расположенной в северовосточной части Таджикской депрессии вблизи участка строительства Рогунской ГЭС и представляющей собой грабен шириной 200-300 м и длиной около 1 км в приводораздельной части хребта высотой 300-400 м над тальвегами обрамляющих его долин. При его формировании «исчезло» порядка 2 % объема этого хребта, сложенного прочными крутопадающими меловыми песчаниками. Для того, чтобы компенсировать этот дефицит объема, краевые части хребта выше уровня эрозионного вреза должны разойтись на 7-8 м. Расчеты, проведенные для двумерной модели методом конечных элементов показали, что при сейсмическом воздействии значительной интенсивности во внутренних частях массива возникают значительные деформации растяжения, сочетающиеся со знакопеременными вертикальными ускорениями в его верхней части, что может привести к наблюдаемым эффектам.

Намного более загадочными являются относительно изометричные кальдерообразные провалы на сводах хребтов-антиклиналей площадью в несколько квадратных километров и глубиной в сотни метров. На сегодняшний день известны три подобных дислокации. Это т.н. «структура Битут», образовавшаяся при катастрофическом Гоби-Алтайском землетрясении 1957 г [1] и доисторические дислокации Кызылкель и Джузумды в Центральном Тянь-Шане [3, 6]. Для объяснения формирования структуры Битут Н.А. Флоренсовым и В.П. Солоненко была предложена модель, согласно которой «исчезновение» в недрах Земли примерно 100 миллионов м³ горных пород компенсировалось клинообразным поднятием хребта Ихэ-Богдо шириной около 17 км примерно на 3 м по обрамляющим его разломам, падающим под

² – OOO Центр геодинамических исследований, г. Mockва, m-groshev@yandex.ru

хребет [1]. Однако реалистичность такой модели вызывает некоторые сомнения. В частности, непонятно, каким образом при кратковременной (при землетрясении) деформации, при которой горные породы должны вести себя как твердое тело, все растяжение моментально сосредоточилось на очень ограниченном участке, где образовалась полость, в которую и произошло проседание блока в среднем на 250 м.

Такой механизм еще менее реалистичен при объяснении условий образования намного более крупной дислокации Кызылкель, расположенной в Центральном Тянь-Шане к северу от долины р. Нарын на гребне хребта Санташ, представляющего собой новейшую антиклиналь шириной около 8 км. Дислокация представляет собой грубо-кольцевую, точнее, ромбовидную впадину примерно 2×3 км в плане и глубиной 300-800 м с крутыми бортами и плоским, слабо наклонным дном. Объем впадины, соответствующий объему «исчезнувших» горных пород оценивается примерно в 3 км³. Имеющиеся геолого-геоморфологические данные показывают, что провал произошел катастрофически, скорее всего в голоцене, так как ее борта срезают эрозионные формы рельефа, сформировавшиеся на своде новейшей антиклинали. Первоначально впадина была замкнутой; позже ее южный борт был прорезан в результате попятной эрозии в долине ручья Кызылкель, впадающего в Нарын. Молодые разрывы, выходящие за пределы контуров впадины, не обнаружены.

Формирование в недрах хребта полости, способной вместить столь гигантский объем горных пород, вследствие какого-либо быстрого процесса (при землетрясении), как в модели, предложенной для объяснения происхождения структуры Битут представляется невозможным. Даже если предположить, что вдоль длинной оси дислокации произошло локальное раскрытие на 10-20 м (признаков которого мы не видим), эта «щель» должна была бы проникать в недра на 100-50 км, что, на наш взгляд, невозможно. Совокупность имеющихся данных не позволяет объяснить происхождение этой дислокации ни за счет вулканизма, ни за счет карста, ни за счет растяжения при формировании структуры типа pull-apart. Рассмотрев различные варианты, мы предположили, что подобные дислокаций могут возникать при обрушении свода полости в ядре новейшей антиклинали, формирующейся в условиях тектонически расслоенной литосферы [4, 7]. И на Тянь-Шане и в Монголии, где новейшее горообразование связано с ростом складок основания в сильно деформированных и метаморфизованных каледонских и герцинских комплексах [2], срыв верхней части коры мощностью в несколько километров может в определенных условиях приводить к отслаиванию свода антиклинали и формированию такой полости. Такие явления, хотя и меньшего масштаба, описаны на некоторых гидротермальных месторождениях [5, рис. 328, 239]. Несмотря на всю «экзотичность» предложенного механизма, он позволяет логично объяснить катастрофические кальдерообразные провалы на водоразделах хребтов-антиклиналей.

- 1. Гоби-Алтайское землетрясение. М: Издательство АН СССР. 1963. 391 с.
- 2. Макаров В.И. Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. Труды ГИН. 1977.Т. 307. 172 с.
- 3. Орлов Л.Н. О кинематике и динамике шарьяжей на границе Северного и Срединного Тянь-Шаня. Сейсмотектоника и сейсмичность Тянь-Шаня. Фрунзе. Илим. 1980. C. 50-59.
- 4. Пейве А.В., Руженцев С.В., Трифонов В.Г. Тектоническая расслоенность и задачи изучения литосферы континентов // Геотектоника. 1983. № 1. С. 3-13.
- 5. Смирнов В.И. Полезные ископаемые. Третье издание. М.: 1976. 688 с.
- 6. Стром А.Л. О новой зоне развития палеосейсмодислокаций в северной части Центрального Тянь-Шаня. Доклады семинара "Основные проблемы сейсмотектоники". М.: ВИНИТИ. 1983. № 3290-83. С. 4-13.
- 7. Тектоническая расслоенность литосферы. М.: Наука. 1980. 216 с.

Закономерности ориентировки трещинных систем и осей напряжений осадочных бассейнов Северного полушария

А.И. Тимурзиев

ОАО «Центральная Геофизическая Экспедиция», г. Москва, ait@cge.ru

Резюме. По результатам изучения структур горизонтального сдвига (СГС) обоснованы новые кинематические принципы интерпретации трещинных систем² (разрывных нарушений и линеаментов рельефа), разработана методика сквозной (рельеф-фундамент) реконструкции напряженнодеформированного состояния (НДС) земной коры на основе структурнокинематического анализа линеаментов рельефа и разломов фундамента и чехла по данным сейсморазведки 2Д/ЗД. Для осадочных бассейнов (ОБ) Северного полушария установлены общие и неизвестные ранее закономерности пространственной организации трещинных систем и осей сдвигового поля палеонапряжений и неонапряжений (новейших напряжений).

Фактический материал. Результаты анализа трещинных систем и реконструкций НДС земной коры основаны на интерпретации авторского материала по ОБ Северного полушария: докембрийские платформы (Восточно-Европейская – Прикаспийская впадина и Северо-Африканская – бассейн Иллизи), эпигерцинские плиты (Туранская и Западно-Сибирская), Тихоокеанский тектонический пояс (шельф Вьетнама, бассейн Кыу-Лонг).

Методика исследований (1). Основы структурно-геоморфологического метода реконструкций НДС земной коры заложены нами в начале 80-х годов [1-3] при комплексировании геолого-геофизических данных, дистанционных, полевых и структурно-геоморфологических исследований на Мангышлаке и окончательно оформлены к середине 80-х [4-6] для прогноза трещинноразрывных зон новейшего растяжения при поисках и разведке залежей УВ с трещинными коллекторами. На новом этапе возможности метода расширены за счет включения в комплекс исследований данных сейсморазведки 3Д [7-8]. Важность включения сейсморазведки 3Д в методику реконструкций НДС определяется качественно новым кинематическим типом разрывных структур, картируемых объемной сейсморазведкой.

Реконструкций НДС земной коры (2). В основе реконструкций НДС земной коры анализ трещинных систем и различных структурных парагенезов, служащих индикаторами разрядки тектонических напряжений. По известному рисунку и кинематике трещинных систем решается обратная задача

_

² Под трещинными системами будем понимать всю совокупность разноранговых нарушений сплошности пород (от микротрещин до региональных разломов), фиксируемых различными методами исследований и, имеющих различный, но типичный для отдельного метода масштаб.

восстановления типа НДС и ориентировки осей напряжений. Разломы фундамента, чехла и линеаменты рельефа служат структурно-кинематическими индикаторами разрядки напряжений на различных глубинных уровнях.

Анализа истории развития разломов (3). Для изучения истории развития разломов привлекались данные по азимутальному распределению разломов. История развития разломов изучалась путем восстановления кинематики вертикальных и горизонтальных движений, анализа углов скола в системе материнский сдвиг — оперяющий сброс, выраженных в углах встречи оперяющих разломов к плоскости сдвига в фундаменте и осадочном чехле.

Результаты исследований. Анализ ориентировки трещинных систем для структурных элементов запада Туранской плиты показал высокую сходимость и сопоставимость азимутов их основных систем [4]. Установлено простирание геологических и геоморфологических элементов в пределах единых систем азимутов СЗ 300-320°, СВ 30-40°, С 0-10°, З 270-280°, отражающие их связь с планетарной трещиноватостью (П.С. Воронов, 1968; С.С. Шульц, 1973). На основе сопоставления ориентировки разломов фундамента, складчато-разрывных дислокаций чехла, линеаментов рельефа и трещиноватости пород был обоснован вывод об устойчивости во времени направлений разрядки тектонических напряжений. Для запада Туранской плиты обоснован вывод о генетическом единстве и унаследованности процессов складко- и разрывообразования как двух сопряженных форм деформаций земной коры в едином силовом поле планетарных напряжений. Результаты получены в эпоху двухмерной (плоской) геологии и не позволяли судить о динамике НДС земной коры во времени.

Анализ трещинных систем по изученным ОБ Северного полушария показал, что сейсморазведка 2Д картирует в фундаменте и чехле физические плоскости (сечения сколов) диагональных систем сдвигов, в отличие от 3Д, которая картирует в чехле не физические плоскости сдвигов, а вторичные от сдвигов фундамента оперяющие структуры разрушения (трещины отрыва). Выделяя разные кинематические типы разломов, в совокупности эти два метода дают полную картину ориентировки сколов и отрывов, что позволяет восстановить оси напряжений и тип НДС земной коры без привлечения дополнительных индикаторов. Сечениям сдвигов по данным 2Д отвечает плоскость максимальных касательных напряжений. По данным 3Д максимум на розах-диаграммах (сечение отрывов) совпадает с осью максимальных главных нормальных сжимающих напряжений, ортогонально ей выделяется ось минимальных сжимающих напряжений. На основе геометрии вторичных структур разрушения восстанавливается плоскость, разделяющая блоки со встречным падением кулисных сбросов (с различной полярностью), как проекция оси горизонтального сдвига фундамента в чехле (угол между плоскостью сдвига и оперяющими кулисами равен углу скола). Эта плоскость – шовная зона сдвига по фундаменту. Ей отвечает плоскость максимальных касательных напряжений (динамопара главного сдвигового сечения выражена не всегда).

Важным наблюдением, определяемым современным взглядом на проблему и вытекающим из наших ранних исследований [4], является совпадение ориентировки трещинных систем фундамента и чехла по данным интерпретации потенциальных полей и сейсморазведки 2Д. По данным 3Д в чехле картируется одна система (максимум диаграммы) отрывов, на уровне фундамента картируется полный набор структур разрушения: две пары сколов диагональной системы и максимум отрыва на биссектрисе острого угла, образуемого динамопарой сколов.

Изучение геометрии и кинематики разломов и их тектонофизическая интерпретация на примере бассейна Кыу-Лонг позволило выделить в фундаменте и чехле устойчивые долгоживущие сечения, связанные с проявлением горизонтальных сдвигов фундамента СВ простирания (20-40°), и два разновозрастных сечения оперяющих кулисных сбросов в фундаменте (В 60-80°) и чехле (ССЗ 340-350°), сформированные в условиях разрядки напряжений на завершающих этапах киммерийского и альпийского тектогенеза. При стабильном положении и активном сечении сдвигов фундамента І-ІІІ (СВ-ЮЗ) квадрантов, формирование кулисных сбросов в фундаменте объясняется субширотной правосдвиговой палеотранспрессией (киммерийский этап), а в чехле — субмеридиональной левосдвигов ІІ-ІV (ЮВ-СЗ) квадрантов формирование оперяющих кулисных сбросов в фундаменте объясняется субширотной левосдвиговой палеотранспрессией, а в чехле — субмеридиональной правосдвиговой транспрессией.

Горизонтальные сдвиги фундамента диагональных систем бассейна Кыу-Лонг характеризуются разнонаправленными во времени движениями. Реверсная природа сдвигов фундамента и миграция осей напряжений, установленная для бассейна Кыу-Лонг, объясняется сменой геодинамических обстановок и ориентировки осей напряжений в процессе геологического развития (структурообразования). В этой связи кинематику разломов необходимо рассматривать во временном аспекте, в динамике изменения НДС земной коры, а не как статическое явление. Вопрос о кинематике сдвига неправомочен без указания временного диапазона.

Для трещинных систем Западной Сибири (Пур-Тазовская впадина), Алжирской Сахары (бассейн Иллизи), Прикаспийской впадины (Астраханский свод, Заволжский прогиб) и Туранской плиты (Южно-Мангышлакский прогиб, Бузачинский свод, Горный Мангышлак) установлены схожие геометрические и азимутальные характеристики, а также кинематические и динамические условия развития. Имеющий место азимутальный разброс максимумов простирания основных систем разломов в диапазоне ±15°, связан со структурной неоднородностью деформируемых пород. Это означает, что плоскость разломов одной системы редко бывает строго ориентирована на большом

пространстве, она имеет интервальное распределение вокруг оси азимутального максимума.

Анализ кинематики структурных парагенезов в пределах СГС ОБ Северного полушария позволил обосновать существование как минимум двух полей напряжений сдвигового типа (палео- и неотектонических) с ортогонально ориентированным положением нормальных осей и знакопеременными (реверсными) движениями по плоскостям сколовых сечений. Установленная устойчивость основных направлений разрядки касательных напряжений для ОБ Северного полушария позволяет расширить понятие принципа унаследованности развития тектонических структур, распространив его на поля напряжений, определяющие заложение и формирование складчатых и разрывных дислокаций. С другой стороны, полученные по данным объемной сейсморазведки соотношения разновозрастных и разноориентированных вторичных структур разрушения (систем оперяющих куличных сбросов горизонтальных сдвигов фундамента), характеризуя этапы коренных перестроек структурного плана, служат основой создания динамических схем тектонического районирования на основе синтеза представлений об унаследованности и динамике геологических процессов.

Глобальным следствием полученных результатов является необходимость объяснения с позиций теории мобилизма (допускающей бессистемное, «броуновское» движение литосферных плит) существование для ОБ Северного полушария двух устойчивых сдвиговых полей с единообразно (ортогонально) ориентированными осями напряжений доальпийского (субширотная палеотранспрессия, правосдвиговая для I-III квадрантов и левосдвиговая для II-IV квадрантов) и альпийского (субмеридиональная транспрессия, левосдвиговая для I-III квадрантов) тектонических этапов развития. Для перевода полученных выводов в ранг закономерности для Земли необходимо: изучить параметры догерцинских трещинных систем и палеонапряжений (для рассмотренных нами ОБ герцинская фаза складчатости наиболее поздняя), увеличить статистику по ОБ, выполнить аналогичные исследования для ОБ Южного полушария.

- 1. Тимурзиев А.И. Возможности структурно-геоморфологических исследований в изучении тектоники и нефтегазоносности Мангышлака // Тезисы докладов Республиканской научной конференции. Шевченко. КазНИПИнефть. 1981. С. 2-4.
- 2. Тимурзиев А.И. Структурно-тектонический анализ мегатрещиноватости Песчаномысско-Ракушечной зоны сводовых поднятий // Изв. вузов. Геол. и разв. 1983. № 7. С. 133-137.
- 3. Тимурзиев А.И. Результаты применения анализа зон разломов на Мангышлаке (на примере Песчаномысско-Ракушечной зоны) // Изв. АН Каз. ССР, Серия геол. 1984. № 3. С. 78-81.
- 4. Тимурзиев А.И. Системы разрывных нарушений Мангышлака и их соотношение с планетарной трещиноватостью // Изв. АН СССР, Серия геол. 1985. № 7. С. 108-118.

- 5. Тимурзиев А.И. Методика поисков и разведки залежей нефти и газа в низкопроницаемых коллекторах (на примере Южного Мангышлака) // Геология нефти и газа. 1985. № 1 С. 9-16.
- 6. Тимурзиев А.И. Обоснование структурно-геоморфологического метода прогноза локальных зон новейшего растяжения // Советская геология. 1989. № 1. С. 69-79.
- 7. Тимурзиев А.И. Технология прогнозирования фильтрационной неоднородности трещинных коллекторов на основе реконструкций напряженно-деформированного состояния земной коры по результатам интерпретации сейсморазведки 3Д // Сборник докладов конференции к 75 летию ВНИГРИ. СПб.: ВНИГРИ. 2004. С. 128-139.
- 8. Тимурзиев А.И. Реконструкции напряженно-деформированного состояния горных пород по результатам интерпретации сейсморазведки 3Д (на примере Еты-Пуровского месторождения) // Доклады VIII международной конференции. М.: РГГРУ. 2007. С. 355-358.

Напряжения на подошве литосферы, вызванные мантийной конвекцией

В.П. Трубицын

Институт Физики Земли РАН, г. Mockba, trub@ifz.ru

Геодинамика и тектоника Земли определяются тепловой конвекцией в мантии, осложненной эффектами фазовых переходов и дифференциальным перераспределением химических компонент. Полный тепловой поток Земли 44 ТВт складывается из потока из ядра (8%), тепла распада радиоактивных элементов мантии (27%) и коры (18%) и остывания первично горячей Земли (47%) [1]. За исключением коры, такой быстрый вынос тепла из недр возможен только при конвекции со средней скоростью мантийных течений порядка 3 см/год ≈ 1 Нм/с. Несмотря на малость величин скоростей, конвекция в мантия не стационарна и близка к турбулентной. В мантии возникают большие градиенты скоростей и температур широкого спектра, соответствующего наблюдаемым тектоническим циклам. В последнее время показано, что ни фазовые, ни химические скачки плотности не достаточны для расслоения течений. Поэтому конвекция охватывает всю мантию [2]. Верхняя холодная более вязкая литосфера разбита на плиты. Океанические плиты постоянно возникают в хребтах и погружаются в мантию в зонах субдукции. Они участвуют в глобальном кругообороте вещества мантии, являясь верхней частью своей конвективной ячейки, и поэтому движутся со скоростями течений. Континенты плавают на мантии в течение миллиардов лет, дрейфуя под действием сил вязкого сцепления с мантийными течениями на подошве и торцах. Они постоянно частично обновляются, уменьшаясь при эрозии и размываясь снизу и увеличиваясь при присоединении островных дуг и внедрении плюмов. Большие континенты покрывают несколько конвективных ячеек с разнонаправленными скоростями. Поэтому скорости их дрейфа в несколько раз меньше средней скорости конвекции. Благодаря градиентам скоростей деформации в мантии и коре возникают и постоянно меняются со временем напряжения.

При изучении напряжений в коре и мантии Земли используются два основных типа моделей: региональные и глобальные. В региональных моделях рассматриваются или области зон субдукции, или хребтов океанических плит или отдельные области континентов. Относительно небольшая область не требует очень большой расчетной сетки, поэтому имеется возможность в конвективную модель включить и детально самосогласованно просчитать течения и напряжения не только в мантии с литосферой, но и в коре. В глобальных моделях обычно кору и литосферу рассматривают как граничные условия для мантийной конвекции и рассчитывают только напряжения на подошве литосферы.

Региональные модели континентальных и океанических областей. Эффективная вязкость в мантии (до глубин ~50 км) и в коре определяется как комбинация вязкости крипа и вязкости Мора – Кулона $1/\eta_{Litc} = 1/\eta_{duc} + 1/\eta_{MC}$, где $\eta_{MC} = \tau_{max}/\dot{\epsilon}_{II},~\dot{\epsilon}_{II}$ – второй инвариант девиаторного тензора скоростей деформации и τ_{max} – напряжение, при котором возникает трение скольжения по существующим плоскостям разрыва [3]. Это напряжение определяется законом Мора – Кулона $\tau_{max} = (Ap_{lit} + B)\lambda$, где p_{lit} – литостатическое давление и $\lambda = 1 - p_{por}/p_{lit}$ коэффициент, характеризующий влияние порового давления, который может быть равным между 0 и 1. Характерные значения коэффициентов A = 0.6, B = 60. Вязкость крипа зависит от температуры экспоненциально и от напряжения по степенному закону с показателем 3 или 3.5. Для мантии зависимость вязкости от напряжения оказывает малое влияупрощения ниже литосферы поэтому часто для ньютоновскую вязкость. При заданном начальном распределении температуры решение уравнений конвекции (уравнение Стокса и переноса тепла) для несжимаемой жидкости с вышеуказанной реологией позволяет рассчитать эволюцию течений в мантии и полное поле напряжений и скоростей деформации в литосфере и коре. В частности решения включают процесс отслоения (delamination) и отрыва (detachment) утолщенной области континентальной литосферы и нижней коры с ее погружением в мантию с последующим замещением горячим веществом мантии. Эти решения хорошо описывают геологические процессы позднеорогенной фазы с вулканической активностью, метаморфизмом, растяжением коры и повышением теплового потока и быстрым изменением топографии [3]. Подобные модели также позволяют детально описать поведение плит, погружающихся в зонах субдукции.

Глобальные сферические модели. При большом объеме вычислений приходится ограничиваться более простыми моделями. Вязкость мантии считается зависящей только от глубины. Латеральное распределение плотности, вызывающее течения, находится из данных сейсмической томографии, путем пересчета сейсмических скоростей в плотность по соотношению $dln\rho/dlnv_s=0.2-0.4$. Разрешение томографических моделей и вычислительные возможности ограничивают точность расчета до 30 гармоники, что составляет 1300 км. Литосфера (включая кору) учитывается как граничное условие. В простейшем предельном случае она считается сплошной твердой оболочкой с нулевой нормальной и тангенциальной скоростью. Решение уравнения Стокса с известной нагрузкой дает распределение вязких течений в сфере и соответствующих напряжений, в частности на подошве литосферы.

Эта предельная модель соответствует отсутствию проскальзования между плитами. В другой предельной модели свободных плит литосфера считается состоящей из плит, между которыми нет ни нормальных, ни тангенциальных сил взаимодействия. В качестве граничных условий для каждой плиты задаются интегральные условия равенства нулю полной силы и полного момента

сил, действующих на данный участок литосферы со стороны мантии. Подобная модель использовалась ранее в [5] для расчета дрейфа континентов, но с учетом сил столкновения. Пример расчета распределения тангенциальных сил, действующих литосферу [4], приведен рис. 1 с масштабом стрелки длины 10 грд. сетки в 5 МПа для первой модели сплошной литосферы (рис. 1а) и в масштабе 10 МПа для модели свободных плит (рис. 1б). Поскольку обе подобные предельные модели являются крайними случаями, то в [4] бралась суперпозиция результатов обеих моделей с весами 0.5. Рассчитанные тангенциальные напряжения на подошве литосферы достигают 10 МПа (нормальные – до 30 МПа).

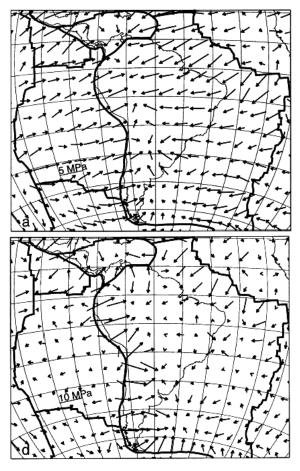


Рис. 1. Пример расчета распределения тангенциальных сил, действующих литосферу [4].

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, гранты: 08-05-00378 и 08-05-00576.

- 1. Korenaga J. Energetics of mantle convection and the fate of fossil heat // Geophys. Res. Lett. 2003, V. 30, № 8. P. 201-204.
- 2. Herzberg C. Food for volcanic diet // Science. 2007. V. 316. P. 378-379.
- 3. Schott B., Schmeling H. Delamination and detachment of a lithospheric root // Tectonophysics. 1998. V. 296. P. 225-247.
- 4. Steinberger B., Schmeling H., Marquert G. Large-scale lithospheric stress field and topography induced by global mantle circulation // Earth. Planet. Sci. Let. 2000. V. 186. P. 75-91.
- 5.Trubitsyn V.P., Rykov V.V. A 3-D numerical model of the Wilson cycle // J. Geodynamics. 1995. V. 20. P. 63-75.

Сейсмотектоническое деформирование одноосного удлинения в литосфере и его геодинамическая интерпретация

В.И. Шевченко, И.П. Добровольский, А.А. Лукк

Институт физики Земли РАН, г. Mockba, shevch@ifz.ru

- 1. Известно, что Таджикская депрессия и смежные части Тянь-Шаня и Памира, расположенные между Евразиатской и Индийской литосферными плитами, находятся в обстановке субгоризонтального сжатия. Сжатие обычно связывают со сближением этих плит. Имеющиеся геологические, сейсмологические и геодезические материалы показывают, что, помимо плейттектонического, существует автономный процесс тектогенеза, связанный, по нашему мнению, с активным увеличением объема слоистых пород земной коры (Гусева и др., 1993; Лукк и др., 2004; Прилепин и др., 2005; Шевченко, 1984, 2005; Шевченко и др., 2006, 2007).
- 2. На территории Гармского полигона ИФЗ СССР было детально, по небольшим выборкам-ячейкам изучено сейсмо-тектоническое деформирование (СТД) верхней части (12 км) земной коры региона (Лукк и др., 2005, 2009). Основания ячеек ~3.5×3 км. Наиболее широко распространено СТД одноосного субгоризонтального укорочения надвиговое, устойчиво И ориентированные вкрест простирания Таджикской депрессии. В приосевой части депрессии зафиксирована «мешанина» разных типов СТД; характерна (за исключением механизмов одноосного удлинения) общая неустойчивость ориентировок осей напряжений. Эта картина свидетельствует о том, что в приосевой части депрессии направленное субгоризонтальное сжатие, обычно связываемое со сближением смежных литосферных плит, отсутствует или, по крайней мере, не играет первостепенной роли. Такую картину СТД сближением плит объяснить невозможно.
- 3. Особое внимание привлекает СТД субгоризонтального одноосного удлинения, зафиксированное во многих ячейках в пределах области «мешанины» (Лукк и др., 2009). СТД этого типа характеризуется тем, что главная ось удлинения T занимает определенное положение в пространстве в общем вдоль простирания депрессии. Предположение о продольном, ориентированном по простиранию реальном растяжении материала Таджикской депрессии не может быть принято, поскольку отсутствуют какие-либо другие признаки такого растяжения. Индивидуальные оси P характеризуются неустойчивостью ориентировок, с более или менее равномерным их распределением по разным направлениям в пределах "слоя", нормального к оси удлинении T. Таким образом, в ячейках с таким видом СТД и в соответствующей части коры направленное сжатие P вообще отсутствует. СТД здесь, тем самым, приближается к гидростатическому (или, точнее, литостатическому).

- 4. СТД этого типа можно было бы получить за счет действия литостатической нагрузки вышележащих пород, т.е. осестремительным сжатием материала, способного при этом к оттоку по простиранию Таджикской депрессии. Тогда распределение СТД этого типа должно было бы быть скоррелировано с рельефом региона, но такая корреляция отсутствует. Это не позволяет принять изложенное объяснение. Поэтому то же самое СТД приходится объяснять тем, что возникает активное осебежное увеличение объема пород (вероятно, за счет привноса дополнительного минерального вещества восходящими потоками глубинных флюидов), т.е. возникает СТД объемного распора (Добровольский и др., 2006; Прилепин и др., 2005; Шевченко, 1984, 1999; Шевченко и др., 2006, 2007).
- 5. Деформации одноосного удлинения характерны для наклонных сейсмофокальных зон в обрамлении Индонезии и Эгейской впадины в Альпийско-Индонезийском подвижном поясе (Лукк и др., 2008; Шевченко и др., 2002). При этом главная ось удлинения T приблизительно совпадает с линией восстания-падения зон, что обычно объясняют тем, что такие зоны соответствуют слэбам, т.е. субдуцирующим частям литосферной плиты, обладающим некоторой отрицательной плавучестью. При такой ситуации слэб должен испытывать реальное растяжение и, соответственно, удлинение. Однако изложенная схема не объясняет тех случаев, когда сжатие P оказывается ориентированным по простиранию сейсмофокальной зоны. На материале Эгейского региона было показано, что такая картина может быть объяснена только на основе предположения об активном увеличении объема пород подвижного пояса [1].
- 6. Обстановка одноосного удлинения (одноосного «растяжения») выявляется при изучении ориентировки «малых» структурных форм трещин, небольших разрывов, других зон концентрации деформаций, прямо наблюдаемых в обнажениях горных пород (Расцветаев, 1982). При этом среди прочих имеет место набор разноориентированных структур скалывания, скольжения, плоскости которых образуют «конусы растяжения» вокруг оси удлинения Т. Поверхности «конусов» являются касательными к плоскостям скалывания, возникших в обстановке такого СТД. Индивидуальные оси укорочения (сжатия) р рассеяны в плоскости (или в «слое»), нормальной к оси Т. Сходство в расположении осей удлинения и укорочения, т.е. сходство СТД, выявленных при изучении землетрясений на Гармском полигоне и в сейсмофокальных зонах Альпийско-Индонезийского подвижного пояса, с одной стороны, и «малых» структурных форм, с другой, позволяет предположить, что и механизмы образования тех и других сходны.
- 7. Определенные аналогии можно усмотреть в некоторых данных, посвященных микроскопическому изучению тектонитов горных пород, обладающих преимущественной ориентировкой минералов, возникшей при наложенных пластических деформациях этих пород. При изучении ориентировки минеральных зерен горных пород используются ориентировки

кристаллографических и кристаллооптических характеристик зерен минералов. Результаты такого изучения изображаются на стереограммах разного типа. Выделяются три типа тектонитов – S-, В- и R-тектониты. Стереограммы R-тектонитов характеризуются поясовым расположением точек выходов таких осей. Такая картина указывает на то, что многочисленные плоскости внутризернового скалывания, скольжения окружают ось R. Макроскопически эта ось соответствует направлению линейности в соответствующих породах. Направление линейности в породе отвечает оси удлинения. При этом "... линейность располагается перпендикулярно направлению ...давления ..." [Елисеев, 1967, с. 86]. Представляется, что предпочтительно связать образование полосовых *R*-тектонитов c активным vвеличением деформированных пород, с обстановкой распора. Такая обстановка автоматически подразумевает получение полосовых стереограмм.

8. Таким образом, выявляется, что, при огромных различиях в масштабах изученных явлений, имеет место сходство в СТД, в расположении осей укорочения и удлинения в рассмотренных частях Таджикской депрессии, Индонезии, эгейского региона, «малых» структурных форм и микроскопической структуры тектонитов. Такое сходство позволяет предполагать, что сходными были и механизмы формирования соответствующих тектонических дислокаций, связанные, по нашему мнению, с активным увеличением объема горных пород.

Литература

1. Шевченко В.И., Добровольский И.П., Лукк А.А. Напряженно-деформированное состояние литосферы эгейского сектора Средиземноморского подвижного пояса // Физика Земли. 2001. № 12. С. 52-63.

Тектонофизика и смежные науки: сейсмология

С.И. Шерман

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ssherman@crust.irk.ru

Введение физического, а впоследствии и математического моделирования в тектонику не только обогатило возможности тектонических обобщений, сократив при этом количество умозрительных построений, но и вызвало необходимость констатации численных характеристик геологических струкобразом, разломов, контролирующих главным определяющих нашу социальную среду объектов: серии рудных месторождений, групп активных вулканов, термальных и минеральных источников, гипоцентров землетрясений и многих других. Оперирование в тектонике численными характеристиками позволило на более высоком уровне коррелировать ее выводы со смежными науками и, прежде всего, сейсмологией. Структурно-тектонические исследования В.В. Белоусова и М.В. Гзовского с группой молодых сотрудников ИФЗ РАН заложили основу науки тектонофипервые значимые выводы связаны c оперированием математическими параметрами разрывов и сейсмичности. Взаимное обогащение этих отраслей знаний продолжается многие десятилетия, чему способствовали десятки исследователей. Среди них выделяются работы П.М. Бондаренко, С.А. Борнякова, О.Б. Гинтова, М.А. Гончарова, В.Г. Гутермана, О.И. Гущенко, И.П. Добровольского, Г.Г. Кочаряна, П.Н. Кропоткина, К.И. Кузнецовой, Ю.Г. Леонова, А.А. Лука, А.В. Лукьянова, В.А. Мансурова, А.В. Михайло-вой, Ш.А. Мухамедиева, Д.Н. Осокиной, А.В. Пономарева, Ю.Л. Ребецкого, Г.И. Рейснера, Е.А. Рогожина, В.В. Ружича, М.А. Садовского, К.Ж. Семинского, Л.А. Сим, Г.А. Соболева, С.С. Стоянова, В.Г. Трифонова, А.И. Шеменды, С.Л. Юнги, Ф.Л. Яковлева и мн. др. Развитию исследований способст-вовали работы большой группы зарубежных ученых, среди которых следует выделить Ma-Цзинь, J. Angelier, W.F. Brace, J. Brune, J.D. Byerlee. S. Cloethingh. K.J. Coppersmith, K. Mogi, A.A. Nowroozi, D.B. Slemmons, D.L. Turcot-te, A.V. Vakov, D.G. Wells, M. L. Zoback, и очень многих других. Результаты их изысканий являются основой многих современных достижений на стыке наук тектонофизики и сейсмологии.

Тектонофизические и сейсмологические исследования пересекаются по многим аспектам. Сейсмология как крупный раздел современной геодинамики владеет многотысячными цифровыми базами данных о пространственновременной локализации сейсмических событий, целенаправленно проведенными результатами физического и математического моделирования, теоретическое обобщение которых позволило установить многие законы сейсмического процесса и разработать модели зарождения очагов землетрясений. При этом практически все обсуждаемые сегодня модели опираются на

представления о том, что очаг землетрясения – суть подвижка по разрыву или его зарождение, а сейсмический процесс – суть деформация и квазитечение огромного объема горных масс, характеризующихся разломно-блоковой структурой.

Тектонофизика оперирует количественными параметрами тектонических структур, результатами физического и математического моделирования их развития, разрабатывает модели их организации и активизации. Тектонофизика изучает физические механизмы развития разрывов, лежащие в основе их многофакторной контролирующей функции локализации событий, процессов или структур. Общность в организации цифровых баз данных и конечных целей — исследование закономерностей геологических процессов и их прогноз — тесно связывают тектонофизические и сейсмологические разработки. В их основе лежат и более глубокие генетические причины, на некоторых из которых следует остановиться подробнее.

Разломообразование и сейсмичность — генетически взаимосвязанные процессы, отражающие закономерности деструкции литосферы. Первый описывается уравнением $\lg N = A - (1/b) \lg L (1)$, второй $\lg N' = a - \gamma \lg E (2)$, при этом $L \approx E$, где: N — количество разрывов на площади; N' — количество землетрясений; L — длина разрывов; E — энергия землетрясений; A, a, b, γ — коэффициенты пропорциональности. Идентичность уравнений и графиков, у которых системы координат отражают генетически близкие величины, свидетельствуют об общности и физическом единстве процессов. Сейсмический процесс хорошо согласуется с блоковой делимостью земной коры, которую можно рассматривать как предел ее деструкции. Процессы разломообразования и сейсмичности фрактальны, и это их обоюдное качество отражает общие свойства многих геодинамических процессов — их автомодельность. Они свидетельствуют о единой физической сути корпоративного процесса деструкции литосферы, определяющего формирование ее разломно-блоковой структуры и сейсмичности.

Поля напряжений хрупкой части литосферы — тот вид исследований, который активно изучается независимыми методами сейсмологией и тектонофизикой. Полученные разными методами результаты были комплексированы в конце прошлого века М.Л. Зобак, составившей карту напряженного состояния литосферы Земли в векторной форме, и в начале текущего столетия С.И. Шерманом и О.В. Луниной, по геолого-структурным и сейсмологическим данным составившими карту напряжений хрупкой части литосферы Земли. На ней впервые выделены площади превалирующих в литосфере шести типов напряжений, намечены закономерности их расположения по отношению к координатной сетке земного шара.

Успешно продолжаются работы по развитию и совершенствованию методов реконструкции полей напряжений. В последнее десятилетие подобные исследования направлены на решение более конкретных задач — анализ закономерностей распределения напряжений в земной коре сейсмоактивных

областей на основе совершенствования методов реконструкции полей напряжений и изучения напряженно-деформированного состояния и механических свойств природных массивов трещиноватых горных пород и условий локализаций в них сильных землетрясений. Работы Ю.Л. Ребецкого и его соавторов — внесли новые оригинальные результаты в этом направлении.

Экспериментальные исследования, главным образом, физическое моделирование – проводится в областях и тектонофизики, и сейсмологии. Научная ценность выполненных ими исследований выходит за рамки каждой из наук. Значимые эксперименты по развитию структур разрушения проведены К.И. Кузнецовой. А.В. Пономаревым, Г.А. Соболевым, Л.Н. Осокиной. А.В. Михайловой, С.А. Борняковым и другими. Физические эксперименты и обобщения К.И. Кузнецовой позволили выяснить общие закономерности разрушения упруго-вязких тел и их результативные приложения к сейсмологии. Сегодня особенно актуальны ее работы об отражении в графиках повторяемости землетрясений динамического состояния горных масс, о сейсмичности как результате деформирования горных масс в переменном поле напряжений. Физические эксперименты Г.А. Соболева по образованию иерархической блоковой структуры при деформировании высокопластичных материалов способствовали познанию соотношений между среднегеометрическими размерами иерархии блоков. Исследование сигналов акустической эмиссии при деформировании образцов и образовании трещин показало, что количественное распределение акустических импульсов по энергии полностью соответствует графикам повторяемости землетрясений. Эксперименты на больших по объему образцах горных пород подтвердили общее подобие процессов разрушения вне зависимости от исходных размеров структур. Экспериментальное подобие в разрушении образцов и излучения упругой энергии природной картине деструкции хрупкой литосферы и сопровождающему ее сейсмическому процессу свидетельствует о том, что можно шире и более смело привлекать экспериментальную тектонику для выяснезакономерностей сейсмического процесса. Немаловажные обсуждаемых наук результаты получены при моделировании областей динамического влияния разломов. Они позволили конкретизировать привязку эпицентров землетрясений к разрывам и направить комплекс тектонофизичеисследований выяснение закономерностей на организации сейсмического процесса в областях динамического влияния активных разломониторинга MOB. сейсмических событий динамического влияния разломов разработаны алгоритмы и программы для относительной количественной оценки активизации разломов в реальном времени.

<u>Вариации активизации разломов в реальном времени, их вероятная причина</u> – направление тектонофизических и сейсмологических исследований для

дальнейшего совершенствования моделей сейсмического процесса. Существующие геолого-геофизические методы не позволяют оценивать вариации активности разломов в интервалах реального (месяцы, годы, первые десятилетия) времени. На базе геоинформационных технологий по разработанной методике оценки количественного индекса сейсмической активности начато изучение пространственно-временных закономерностей современной активизации разломов, ее вероятных источников и механизмов реализации. Показано, что активизация разломов и ее относительно высокая частота в масштабах реального времени вызываются медленными деформационными волнами возбуждения, генераторами которых могут быть межплитные и межблоковые подвижки в хрупкой литосфере. По скорости прохождения деформационных волн возбуждения активные разломы могут классифицироваться на группы, разнящиеся по геолого-геофизическим параметрам. Они позволяют оценивать направление фронтов деформационных волн возбуждения и выделять области преимущественной активизации разломов в интервалах реального (с геологической точки зрения мгновенного) времени.

Разработка комплексной тектонофизической модели сейсмического процесса затруднена отсутствием детально изученного переходного звена между современной активизацией разломов и сейсмичностью. Не взирая на основополагающие модели очагов землетрясений, отталкивающиеся от концепции «очаг – трещина», при переходе на анализ сейсмического процесса исследователи, в основном, продолжают опираться на статистический анализ пространственно-временной локализации очагов землетрясений. При этом опускаются из внимания кинематические, синергетические и другие процессы в зонах активных разломов, контролирующих сейсмические события.

Сейсмический процесс – суть комплекс сейсмических событий, генерируемых селективной активизацией разломов в сейсмической зоне в интервалах реального времени. Геологические методы не позволяют исследовать процесс активизации разломов с требуемой детальностью во времени. Можно использовать пространственно-временные закономерности локализации землетрясений в областях динамического влияния разломов для решения «обратной» задачи - выделения тех разломов, в областях динамического влияния которых в заданный короткий интервал времени фиксируются сейсмические события. При этом будет исследована взаимосвязь локализации большинства эпицентров с конкретными разломами, тенденцию сейсмической активизации которых можно в новой форме исследовать в пространстве и времени. Тектонофизическая модель сейсмического процесса должна основываться на следующей последовательности причинно-следственных связей между структурами, процессами и событиями: исходная разломно-блоковая структура – селективная активизация разломов – сейсмические события в областях динамического влияния разломов - «интегрированная» сейсмичность сейсмической области. Построение комплексной тектонофизической модели сейсмического процесса - одна из областей предстоящих углубленных исследований тектонофизики и сейсмологии. Ее решение откроет прямую дорогу к познанию закономерностей пространственно-временной локализации землетрясений и их прогнозу. Изучение закономерностей деструкции литосферы, образования разломно-блоковой структуры и синхронно протекающей сейсмичности, разработка теоретических моделей этого сложного комплексного процесса — одна из общих ближайших задач тектонофизики и сейсмологии.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 07-05-00251) и программы 16 проекта 3 Президиума РАН «Динамика деформационных процессов в сейсмоактивных регионах Центральной Азии и в очаговых зонах сильных землетрясений».

Стратегия комплексного изучения строения и динамики сред с различными тектоническими режимами

Ю.К. Щукин

Институт динамики геосфер РАН, schuk@idg.chph.ras.ru

Заметная активизация сейсмической активности земных недр, ряд сильных (на Сахалине – Нефтегорское землетрясение) и заметных сильных толчков (Приамурье – г. Комсомольск-на-Амуре; Кузнецкий Алтай – вблизи г. Новокузнецка; Северный Кавказ, вновь о.Сахалин – п. Ноглики и др., наконец, Калининградское, 2004 года), тяжёлые последствия для населения и хозяйства страны предопределяют необходимость разработки и реализации действенных мер по повышению эффективности и ускорению решения задач прогноза сильных землетрясений.

Можно условно выделить три взаимосвязанных задачи: 1 — прогноз места, 2 — прогноз времени, 3 — прогноз последствий землетрясений. Решение их должно проходить взаимозависимо, параллельно, с соблюдением принципа — от общего к частному, и распадается на две крупные стадии: а) районирование и б) мониторинг (пред — и постмониторинг).

На решение первой задачи и прогноз возможных очагов землетрясений нацелены, в первую очередь, комплексные глубинные геолого-геофизические исследования в сейсмичных регионах. Используемый при их реализации комплекс современных методов позволяет изучать не только структурные особенности, но и петрофизические характеристики блоков земной коры, прогнозировать их состав, физические свойства. Эти работы на решение фундаментальных вопросов геодинамики, регионального прогноза скрытых геологических и минерагенических (нефть, газ, твердые полезные ископаемые) объектов на глубине.

Вместе с тем, полученные материалы региональных работ могут быть использованы для прогноза сейсмической опасности крупных территорий, включая не только традиционно сейсмически активные регионы, но и общирные платформенные области со слабой и умеренной сейсмичностью.

На основе изучения связи особенностей строения земной коры и верхней мантии с процессами региональной сейсмичности получен ряд важных выводов и положений, имеющих прямое отношение к практическому решению задач прогнозирования места землетрясения.

Основные из них следующие:

Определены общие для различных сейсмичных областей информативные параметры, по которым эти области отличаются от асейсмичных регионов, и выявлены также количественные параметры, по которым можно различать сейсмоопасные регионы друг от друга.

Установлено, что особенность строения земной коры очаговых зон недавних (менее 40–50 лет) землетрясений заключается в наличии в ней сильных волноводов.

Отмечена зависимость условий возникновения землетрясений от степени консолидированности и расслоенности среды, характеристик её вещественного состава, дискретности и линейности их проявления;

Полученные сведения о связи землетрясений с геологическими неоднородностями и аномалиями физических свойств среды использованы при количественной оценке долговременной сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных. Для разных регионов впервые получены вероятностные оценки места возникновения очагов землетрясений различного генетического типа;

Обнаружена чрезвычайно выраженная индивидуальность проявления землетрясений в геофизических полях для пространственно удаленных друг от друга очагов землетрясений, в том числе для очагов в пределах одного региона, индивидуальность, усугубляемая дальнодействием (от многих сотен до тысяч километров) косвенных прогнозных признаков землетрясений. Последнее обстоятельство вносит наибольшие трудности при оценке и разделении косвенных прогностических признаков местных и удаленных землетрясений. В будущих исследованиях необходимо сместить акцент с изучения вариации полей на изучение изменчивости физических параметров (состояния) среды в относительно локальной её области — очага землетрясения, т.е. приблизиться к исследованию первопричины явления.

Анализ имеющихся результатов позволяет наметить общее направление и конкретные пути повышения эффективности геофизических работ в сейсмоопасных зонах и в регионах с умеренной и слабой сейсмичностью.

Главным здесь является последовательная реализация целостной концепции (системы) комплексных глубинных геофизических исследований. В результате можно ожидать решения задач локализации в пространстве очагов сильных землетрясений и, в сочетании с другими видами гидрогеологических и других исследований, создания информационного обеспечения для прогноза времени их активизации.

Для достижения указанной цели необходимо:

- проведение сравнительного анализа глубинного строения и развития сейсмоактивных и асейсмичных регионов;
- получение количественной оценки напряженного состояния среды в сейсмоактивных регионах и в очаговых зонах сильных землетрясений;
- изучение глубинной природы сейсмичности и выявление статистических и генетических связей очагов землетрясений с неоднородностями среды;
- создание комплексных объемных геолого-геофизических моделей очагов крупнейших землетрясений;

– крупномасштабная (региональная) количественная оценка сейсмической опасности и сейсмического риска в районах расположения крупных промышленных и социальных объектов.

Для решения указанных задач исследования должны быть организованы по принципу «от общего к частному» т.е. проводиться поэтапно: от мелкомасштабных к средне- и далее крупномасштабным. Однако для особо важных и наиболее опасных объектах необходимо (с учетом фактора времени) одновременное выполнение работ разных этапов.

Первым этапом (масштаб 1: 2 500 000 – 1: 1 000 000) предусматривается доизучение строения земной коры сейсмоопасных зон в региональном плане для установления общих сейсмогеологических характеристик отдельных районов и уточнение границ сейсмоопасных площадей, подлежащих детальному изучению. При этом:

по геофизическим данным должны быть выделены неоднородности земной коры и установлены их связи с геологическим строением региона;

выявлена сеть разломов и контактов в земной коре и верхней мантии; определена мощность земной коры и рельеф её основных разделов.

По материалам региональных работ должны быть построены разрезы, карты, схемы: строения консолидированного фундамента и блоков земной коры; глубинных разломов с классификацией по степени активности; рельефа поверхности Мохоровичича и опорных горизонтов коры; региональных аномалий физических полей — гравитационного, магнитного, электрического, а также глубинные разрезы, характеризующие структуру, физические свойства земной коры и иллюстрирующие положение в среде неоднородностей и очагов землетрясений.

Конечным результатом этих исследований должна стать глубинная геологическая основа для карт сейсмического районирования разной детальности на геолого-геофизической основе.

Некоторые особенности континентальной сейсмичности

Ф.Н. Юдахин

Институт экологических проблем Севера АНЦ УрО РАН, г. Архангельск, arhsc@mail.ru

Как известно, континенты составляют по площади существенную часть литосферных плит, за исключением Тихоокеанской, которая является целиком океанической. В свою очередь большую часть континентов занимают древние платформы — кратоны, фундамент которых образует континентальная кора докембрийского, в основном, раннедокембрийского возраста, состоящая из гнейсов, кристаллических сланцев амфиболитовой и гранулитовой фаций и гранитов.

Помимо древних платформ в строении континентов участвуют фанерозойские (или позднепротрозойско-фанерозойские) покровно-складчатые пояса — орогены, выраженные в рельефе горными сооружениями, в противоположность равнинному, в основном, рельефу кратонов. Мощность коры в пределах древних платформ составляет 30—40 км, увеличиваясь до 50—70 км в пределах орогенов [6].

Области высокой континентальной сейсмичности как на платформах, так и в орогенах связаны с неоднородностями в верхней мантии, точнее с областями, где ее скоростные характеристики уменьшены, а значения теплового потока повышены. В то же время на таких территориях отмечается увеличение мощности земной коры.

Несмотря на то, что кратоны и орогены представляют собой различные по определению структуры континентов, в них наблюдается много общих геолого-геофизических особенностей. Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что очаги землетрясений и в орогенах, и на платформах располагаются в пределах земной коры, т.е. являются коровыми. Их преобладающие глубины составляют 8–17 км за исключением глубокофокусных землетрясений таких, например, как в Гиндукуше и Вранче, являющихся «запечатанными» зонами субдукции после закрытия океанов.

На тех же глубинах, что и коровые землетрясения, отмечаются т.н. волноводы — субгоризонтальные зоны трещиноватых пород, насыщенных минерализованными растворами, которые отмечаются пониженными (на 0.1—0.4 км/с) скоростями прохождения упругих волн и пониженными (в десятки и сотни раз по сравнению с выше — и нижезалегающими породами) электрическими сопротивлениями.

Волноводы в земной коре, как правило, разделяют верхнюю хрупкожесткую часть земной коры и нижнюю – псевдопластичную. Первая проскальзывает по второй под действием горизонтального сжатия. В Фенноскандии оно идет со стороны Северо-Атлантической зоны спрединга, в Тянь-Шане – со стороны коллизионной зоны Гималаев, образованной в ре-

зультате столкновения Индо-Австралийской плиты с Евроазиатской. Волноводы при проскальзывании играют роль смазки. Совпадение глубин залегания волноводов и очагов землетрясений позволяет сделать предположение, что последние связаны с горизонтальным перемещением верхней части коры.

Полученные нами ранее результаты [2, 7, 8], согласующиеся с данными других исследователей [1, 3, 4, 5], показывают, что в земной коре присутствуют деформационные волны, распространяющиеся в горизонтальном направлении со скоростями 60–150 км/год. Проходя по какой-либо территории, деформационная волна меняет физическое состояние среды, поочередно вызывая ее растрескивание и консолидацию, т.е. расширение и сжатие. Наряду с возможным провоцированием подземных толчков деформационные волны сами по себе представляют большую опасность для объектов высокого экологического риска.

Источником напряжений, порождающих деформационные волны, служат вышеупомянутые зоны спрединга и коллизии. Деформационные волны характеризуются различными периодами — от нескольких месяцев до десятков лет. Одна из наиболее выраженных волн распространяется от зоны спрединга в сторону Восточно-Европейской платформы со скоростью 60 км/год, другая от коллизионной зоны Гималаев в сторону Тянь-Шаня — 130 км/год.

При сравнении СВАН-диаграмм, рассчитанных по временным распределениям максимальной выделенной энергии Мтах за один и тот же период 1978-1992 гг. в регионах Фенноскандия и Тянь-Шань, наряду с различиями, наблюдается определенная корреляция ритмов для обоих регионов. Характерны четко выраженные, довольно продолжительные по времени проявления 3-5-летние и годовой ритмы, что позволяет предположить, что они связаны с влиянием одного и того же фактора глобального характера. По-видимому, на геодинамику напряженно-деформированной среды оказывают влияние космические причины — приливные воздействия на Землю Луны и Солнца, солнечный ветер, изменения скорости вращения Земли и др.

- 1. Александров С.И., Гамбурцев А. Г. О ритмической миграции очагов землетрясений вдоль Левантского разлома // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Научный мир. 1998. С. 136-139.
- 2. Базавлук Т.А., Юдахин Ф.Н. Деформационные волны в земной коре Тянь-Шаня по сейсмологическим данным // Доклады ДАН. 1993. Т. 329, № 5. С. 565-570.
- 3. Галаганов О.Н., Журавлев В.И., Лукк А.А. Волновые возмущения геофизических полей, наблюдаемые на Гармском полигоне в Таджикистане // Динамические процессы в геофизической среде. М.: Наука. 1994. С. 55-75.
- 4. Касьянова Н.А. Волновая миграция сейсмической активности в пределах Кавказа и Предкавказья // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Научный мир. 1998. С. 245-247

- 5. Лукк А.А., Юнга С.Л. Волновые возмущения сейсмотектонических деформаций и напряжений, регистрируемых по механизмам очагов землетрясений // Динамические процессы в геофизической среде. М.: Наука. 1994. С. 21-39.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.
- 7. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. Особенности проявления геодинамических процессов и внутриплитной сейсмичности на Северо-Западе Восточно-Европейской платформы // Матер. межд. конф. «Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов». Воронеж: ВГУ. 2001. С. 223-225.
- 8. Yudakhin F.N., Bazavluk T.A. Oscillatory processes in the Earth lithosphere // XXII General Assembly of European Geophysical Society. Annales Geophysicae.Pt 1.Sosciety Symp. Solid Earth Geophisics and Natural Hazards. Suppl. 1. V. 15. Vienna. 1997.

Методы выявления механизмов формирования и оценки величины конечной деформации для структур линейной складчатости разного ранга: примеры решения геотектонических задач

Ф.Л. Яковлев

Институт физики Земли РАН, г. Москва, yak@ifz.ru

Для решения задачи определения типа и величины деформации складчатой структуры любого ранга необходимо использовать кинематические модели образования именно этих структур. Такие кинематические модели в определенном смысле являются очередным шагом в развитии представления о механизме формирования структур линейной складчатости. Широко использовавшиеся ранее в тектонике «описательные» механизмы чаще всего являлись умозрительными и не могли быть представлены в виде связей каких-либо геометрических параметров структуры с «величиной развития» этих механизмов. Во всяком случае, в качестве доказательства ведущей роли или единственности действия какого-либо механизма приводились (в «качевиде) многие аргументы, связанные определенную геодинамическую концепцию, но никогда не давалось комплексного сравнения геометрических параметров модельной и природной структуры.

В качестве основы для создания системы кинематических моделей, охватывающих основные ранги структур линейной складчатости (от внутрислойных включений до всего складчато-надвигового пояса), была предложена система семи иерархических уровней [1]. Эти уровни отличаются друг от друга объемом слоистости, охватываемой определенными механизмами (наборами механизмов), которые и формируют типичные для этого уровня структуры. Важно также, что границы выделяемых объектов совпадают с теми границами, в рамках которых действуют наборы механизмов [5]. Совокупность методов исследований, основанных на таких кинематических моделях называется многоранговым деформационным анализом структур линейной складчатости.

Исследования структур разного ранга имеют неодинаковое значение для решения наиболее важных геотектонических задач — механизмы формирования структур небольших менее интересны, чем механизмы формирования структур крупных. Наименьшими с этой точки зрения являются структуры 2-го и 3-го уровня — складки и домены (совокупности складок). Первые два примера показывают решения задач для локальных структур. 1) Модель формирования складок пачек слоев (совместное действие изгиба и сплющивания на компетентный слой) позволила построить номограмму для определения величины укорочения складок в направлении перпендикуляра к осевой плоскости. Были измерены наклоны осевых плоскостей и величина

укорочения в 39 складках в подошве Воронцовского покрова (Северо-Западный Кавказ). Полученный тренд параметров сравнивался с трендами двух численных моделей - горизонтального простого сдвигания и латерального укорочения. Совпадение природного тренда с первой моделью в комбинации с рядом геологических фактов показало высокую степень вероятности формирования этого покрова в результате гравитационного оползания, а не бокового давления [7]. 2) Были проанализированы замеры геометрии доменов в структуре Северо-Западного Кавказа (наклон осевой плоскости, наклон зеркала складок, величина сокращения складок) [6]. Для этого были использованы 11 структурных пересечений (Т. Гиоргобиани и Е. Рогожина). Часть замеров показала тренд возрастания величины укорочения складок при увеличении разности углов падений осевой плоскости и зеркала складок. Эти домены обычно располагались рядом с крупными разломами. Сравнивая природные данные с численной моделью сдвигания по наклонной плоскости и общего сплющивания, было показано, что лучше всего структура описывается как имеющая первоначальный наклон 45° и приращения механизмов 6° сдвигания и 1% сплющивания. Механизм простого сдвигания по субгоризонтальным плоскостям не зафиксирован. Были найдены закономерности расположения этих локальных структур пластического сдвигания в региональной структуре.

Геометрия доменов используется для процедур восстановления доскладчатого состояния структур линейной складчатости. Фактически этот способ является методом построения сбалансированных разрезов для структур внутренних частей складчатых сооружений. Дополняя получаемые доскладчатые разрезы соображением о полных исходных мощностях осадочного чехла, и имея величины укорочения отдельных частей структуры, можно реконструировать основные черты современной структуры в пределах всего чехла до глубин 20–30 км. Разумеется, результаты таких построений позволяют проверить реальность многих выдвигаемых геодинамических моделей формирования складчатых сооружений.

Этим методом была восстановлена структура двух районов Большого Кавказа для уровней 4 и 5 (структурные ячейки и тектонические зоны). 3) Те же структурные пересечения для Северо-Западного Кавказа были использованы для построения квазитрехмерной трехстадийной модели развития его альпийского чехла [4]. Пересечения были разбиты на 244 домена и 42 структурных ячейки. Для каждой ячейки была определена величина укорочения, исходная мощность осадочного чехла (по литературным данным) и «глубина» позиции выходящих в обнажениях пород в новой (постскладчатой) мощности колонны осадков. Для основных стратиграфических реперов (подошвы юры, мела и палеогена) на основании этих 42 точек был построен рельеф для трех стадий: доскладчатой постседиментационной, постскладчатой доорогенной, посторогенной современной. Было показано, что полученный современный рельеф подошвы чехла имеет в среднем глубину

13 км (от -2 до -32 км) и в целом совпадает с последними геофизическими данными и противоречит стандартной схеме пододвигания Черноморской плиты под Кавказ (средняя глубина 5-7 км). 4) На основании этой же работы были определены амплитуды постскладчатого горообразующего поднятия (объемы размытых осадков). Средняя амплитуда поднятия составила 10 км (от 0.5 до 23 км), что превышает общепринятые величины на 0.5-1 порядок. Была выявлена общая положительная корреляция амплитуды поднятия с накопленной мощностью чехла и величиной укорочения. Значительное отставание по времени поднятия от складчатого укорочения структуры показывает связь горообразования с петрологическими преобразованиями пород коры и мантии. 5) Была восстановлена структура Чиаурской зоны Большого Кавказа, а в сравнении со строением Закавказского массива была выявлена структура перехода форланд / хинтерланд [3]. Было определено, что для возникновения имеющегося сочетания структур необходимо иметь на этой границе сброс с амплитудой около 5-7 км и в процессе складкообразования и укорочения амплитуда сброса должна увеличиться до 12–15 км. Верхняя часть колонны осадков чехла может локально надвигаться на межгорный массив, но регионально структура представляет собой сброс. Соответственно, схема пододвигания массива под Большой Кавказ отвергается.

Для более крупных структур (уровень 6 – мегантиклинорий) прямых данных о деформациях складчатых структур недостаточно для прямого решения задач геотектоники, но в качестве гипотезы можно выдвинуть некоторые предположения о движущих силах. 6) Анализ совокупности относительно достоверной геометрии осадочного чехла и истории развития Большого Кавказа показал [2], что крутое положение основных разломов и найденные амплитуды укорочения всей структуры указывают на положение бывшей границы Мохо (40 км глубины на начало юры) примерно на глубине 90–110 км. Соответственно, необходимые преобразования пород коровых в мантийные могут быть основной причиной сначала конседиментационнного погружения, затем «обрушения» с укорочением и складчатостью, с последовавшим горообразованием на современном этапе. Тем самым предлагается считать, что коллизионная структура Кавказа имеет внутренний источник тектонической активности.

- 1. Ребецкий, Ю.Л., Михайлова А.В., Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л. Тектонофизика. В кн.: Планета Земля. Энциклопедиционный справочник. Том "Тектоника и геодинами-ка". СПб.: Изд. ВСЕГЕИ. 2004. С. 121-134.
- 2. Яковлев Ф.Л. Большой Кавказ коллизионная структура с внутренней активностью (автореф. докл. 13.04.2004) // Бюлл. МОИПа, отд. геол. 2006. Т. 81, вып. 1. С. 89-90.
- 3. Яковлев Ф.Л. О построении рельефа поверхности раздела чехол-фундамент Большого Кавказа на основе определения величин сокращения складчатых структур // Материалы XXXIX тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2006. Т. 2. С. 411-415.

- 4. Яковлев Ф.Л. Исследование постскладчатого горообразования первые результаты и подходы к диагностике механизмов на примере Северо-Западного Кавказа // Материалы XLI Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2008. Т. 2. С. 510-515.
- 5. Яковлев Ф.Л. Многоранговый деформационный анализ структур линейной складчатости // ДАН РАН. 2008. Т. 422, № 3 С. 1-6.
- 6. Yakovlev F. Inclined zones of ductile simple shear in folded structures of the North-West Caucasus comparison of natural data and model. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-06236, Geophysical Research Abstracts. V. 7. 06236. 2005.
- 7. Yakovlev, F.; Sim, L.; Marinin, A. Tectonic paleostress fields and deformation state of nappe: comparison of theoretical models with natural data for elucidation of the formation mechanisms, example of Vorontsovsky overthrust (North-West Caucasus). Geophysical Research Abstracts. V. 7. 07085. 2005