

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕКТОНОФИЗИКИ

© 2009 г. Ю. Л. Ребецкий

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 15.05.2009 г.

PACS: 91.45.-c

В Москве в Институте физики Земли (ИФЗ) РАН с 13 по 17 октября 2008 г. проходила Всероссийская конференция “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН”. Заявки на участие в ее работе подало более 200 ученых, приехавшие из двадцати шести городов нашей страны, а также ученые из тринадцати стран ближнего и дальнего зарубежья. Тезисы конференции, выпущенные до ее начала, представили информацию о 233 докладах (рисунк). На конференции было сделано 134 устных доклада и более 60 стендовых докладов (рисунк). Текущая информация о процессе подготовки конференции публиковалась на ВЕБ-сайте ИФЗ РАН по адресу http://tph_2008.ifz.ru. По своей представительности и широте охвата научных проблем она выделяется из небольшого перечня научных симпозиумов, в которых тектонофизическая тематика являлась приоритетной. Первой из подобных конференций было “Первое тектонофизическое совещание”, проведенное в ИФЗ РАН в 1957 г. В.В. Белоусовым и М.В. Гзовским. Если сравнить какие научные проблемы являлись главными на этих двух конференциях, то можно увидеть большое продвижение в методических вопросах тектонофизики, а также проблемных тектонофизических исследований. Однако существует целый ряд направлений, которые, хотя и получили свое развитие за эти 50 лет, но все еще остаются в разряде проблемных, не имеющих однозначного ответа.

На совещании 1957 г. рассматривались вопросы, посвященные развитию физических основ тектонофизики и методов физического моделирования, исследованию мелких тектонических трещин и деформационных структур, а также крупных разрывов и складчатых областей. Отметим среди авторов докладов таких выдающихся ученых как: Г.Д. Ажгирей, В.В. Белоусов, М.П. Воларович, М.В. Гзовский, В.И. Кейлис-Борок, П.Н. Кропоткин, Е.А. Кузнецов, Н.И. Николаев, А.В. Пэк, П.А. Ребиндер, Я.Б. Фридман, Л.Е. Эйгельсон. Отметим, большое число теоретических работ, закладывавших основы тектонофизических исследований, и практически отсутствие работ, связанных с изучением тектони-

ческих напряжений конкретных региональных геологических объектов.

На конференции 2008 г. наоборот большое внимание было уделено результатам полевых региональных тектонофизических исследований, методам и результатам лабораторного (тектонофизическое моделирование) изучения напряжений и деформаций в горных породах. Помимо этих направлений рассматривались вопросы, связанные с особенностям протекания процессов деформирования и преобразования вещества в теле разлома, механизмами формирования тектонических напряжений в литосфере. На конференции также широко были представлены доклады, в которых были представлены проблемы горного дела, разведочной геологии, геофизических исследований, а также сейсмологии. В этих докладах специальные проблемы данных научных направлений были представлены в контексте тектонофизических подходов и терминов. Такой широкий спектр докладов демонстрирует активное продвижение тектонофизических методов и концепций в смежные направления наук о Земле.

Главными вопросами тектонофизики всегда являлись исследования строения и механизмов формирования разрывов и складок разных масштабов от сублокальных (первые метры) до мегарегиональных (тысячи километров), включающие развитие методов подобных исследований, а также вопросы объяснения источников воздействия и особенности формирования данных структур. Следует сказать, что тема формирования разрывов и трещин, а также вопросы напряженно-деформированного состояния, возникающие в связи с этой проблемой, получила интенсивное продвижение за прошедшие пятьдесят лет. Выполненные Д.Н. Осокиной [1989; 2000; 2002; 2004; 2007; 2008] теоретические исследования закономерностей полей напряжений в окрестности одиночной трещины, дополнявшиеся подобным изучением на оптически-активных материалах для совокупностей трещин, создали хороший фундамент для изучения природных полей напряжений. Новые методы анализа сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений и совокупностей зеркал скольжения, полученные в геологических обнажениях [Ребецкий 2007; Angelier, 1989], позволяют

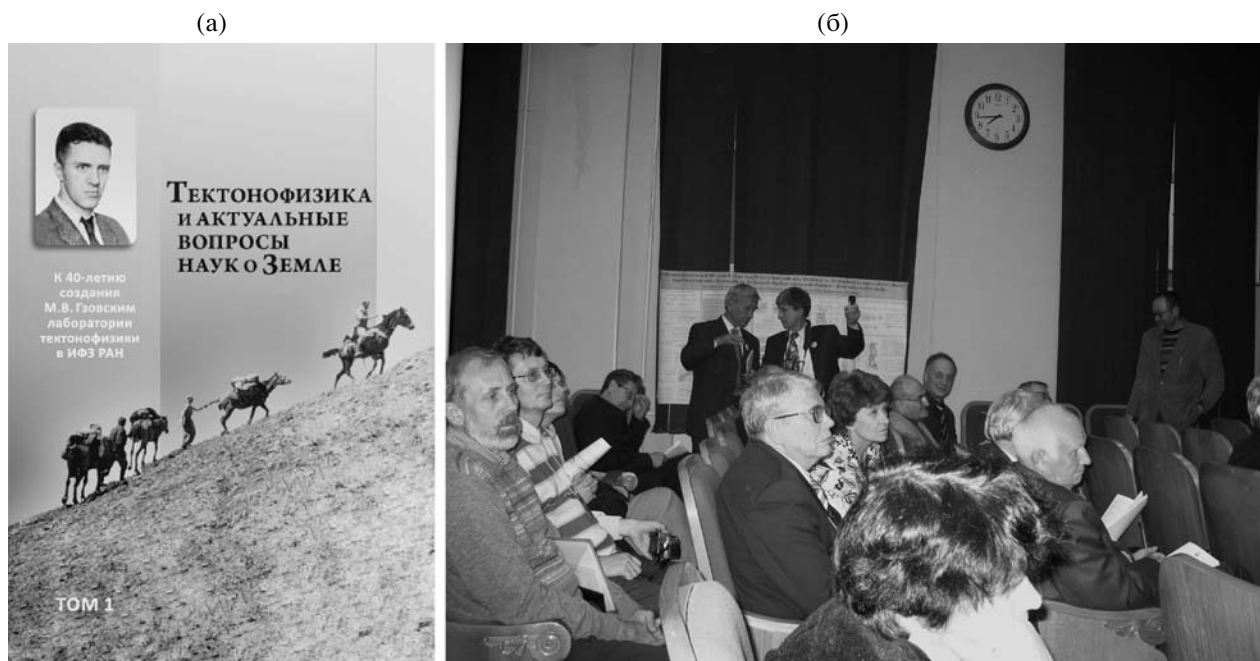


Фото обложки первого тома тезисов конференции (а) и пленарного заседания конференции (б).

рассчитывать уже не только ориентацию осей главных напряжений, действующих в природном массиве, но и относительные значения шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. При использовании дополнительных данных о величине напряжений, сброшенных в очагах сильных землетрясений и данных о литостатическом давлении (топография поверхности и плотностной разрез), можно оценивать и абсолютные значения напряжений, выделяя тектоническое и флюидное давления. Эти методы позволили впервые выполнить реконструкцию поля величин напряжений, формирующихся в области катастрофического землетрясения [Ребецкий, Маринин, 2006].

Другая ситуация складывается в исследованиях механизма возникновения различных типов складчатых структур, которую следует рассматривать как обратную задачу тектонофизики, связанную с возникновением больших деформаций. Эта задача, поставленная в свое время В.В. Белоусовым отошла на второй план, практически нет работ, посвященных этой тематике. Такая ситуация с одной стороны объясняется сложностью данной проблемы, а с другой – неоднозначностью решения обратной задачи складкообразования. Однако и здесь в последнее время наметился прогресс. Появились подходы [Яковлев, 2008], которые позволяют произвести эволюционную реконструкцию складчатых областей, выделяя этапы деформирования, связанные с осадконакоплением, складкоформированием и горообразованием. Эти подходы следует внимательно обсуждать и осторожно интерпрети-

ровать в силу указанной сложности проблемы, но при дальнейшем своем развитии они обязательно внесут важный вклад в проблему изучения механизмов формирования внутриплитных деформационных структур.

Работы в области изучения строения зон разломов [Шерман и др. 1983; Семинский, 2003; Бокун, 1981; 1988], выполняемые на основе результатов тектонофизического моделирования и анализа природных данных дали возможность выявить закономерности формирования этих особых участков земной коры. Отметим серию докладов разных научных школ по получению и интерпретации данных космической геодезии – GPS [Кузьмин, Жуков, 2004; Саньков и др., 2007]. Методы тектонофизического моделирования получили серьезное продвижение в последние 20 лет [Михайлова, Ребецкий, 2008] прежде всего в связи с появлением компьютерных программ по численному моделированию напряженно-деформированного состояния в сложно построенных объектах с реологией упруго-пластического и упруго-вязкого тела. Физическое моделирование также развивалось за счет применения новых материалов и методов наблюдений, но здесь имеется ряд очевидных проблем, связанных с выполнением условий подобия по влиянию силы тяжести [Гуревич, 1974].

Исследование закономерности распределения современных напряжений в сейсмоактивных областях [Ребецкий, 2007] с одной стороны позволило ответить на целый ряд важных вопросов, связанных с механизмами формирования локальных и

региональных деформационных структур, а с другой – дало новый импульс в изучении механизмов формирования тектонических напряжений и физики очага землетрясений. Если в предыдущие годы отправным базисом тектонофизических исследований являлись результаты тектонофизического моделирования, то в настоящее время именно данные о природных напряжениях определяют перспективы развития тектонофизики.

В частности, результаты реконструкции природных напряжений для внутриплитовых орогенов, полученные с применением метода катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений [Ребецкий и др., 2008], показали существенную роль (более 70–80%) внутрикоровых и внутримантийных неоднородностей на формирование напряжений в верхней и средней коре. 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 в современных напряжениях и движениях поверхности (наземные и спутниковые данные) является одной из перспективных задач тектонофизических исследований, развивающей фундаментальные основы геодинамики.

Упомянутые выше результаты, 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 [Ребецкий, 2008] возможность формирования в горизонтальном направлении напряжений наибольшего сжатия в результате выноса в верхний слой коры пород, получивших большие остаточные деформации на глубине, дает возможность количественных оценок и районирования внутриплитовых орогенов по ожидаемому типу напряженного состояния. Необходимы дальнейшие тектонофизические исследования, развивающие этот подход, и сопоставление прогнозных из данной концепции напряжений с результатами оценки природных напряжений, получаемыми 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.

Сравнением закономерности распределения современных напряжений в зонах субдукции и для внутриплитовых орогенов установлено, что уровень девиаторных напряжений в последних выше 3–4 раза. Этот факт в большей степени вызван повышенным уровнем флюидного давления, действующим в зонах контакта литосферных плит в сравнении с разломами внутриплитовых областей.

Определяющая роль флюидного давления на процесс хрупкого разрушения [Ребецкий, 2006] ставит задачу изучение факторов, отвечающих за изменение флюидного давления в зонах разломов, и возможности его оценки, что также является перспективной задачей тектонофизики.

Результаты анализа поля напряжений в области подготовки крупных землетрясений [Ребецкий, Маринин, 2006] 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 рассматривать концепцию Рихтера на очаг землетрясения, как область пониженной прочности, с качестве определяющей. Изучение закономерности поля напряжений и эволюции прочности в области подготовки крупномасштабного хрупкого разрушения (землетрясения) еще одна из ближайших задач тектонофизики.

Следующей перспективной задачей тектонофизики, смыкающейся с двумя предыдущими, является изучение физических и химических процессов, происходящих в разломах верхней и средней коры. В рамках этой проблемы разломы следует рассматривать как особые геологические тела, механические свойства которых связаны с такими процессами как дилатансия, диспергация (милонитизация) и компакция горных пород. Важнейшим явлением, изменяющим прочностные свойства пород здесь следует рассматривать эффект Ребиндера, определяющий изменение размерности кристаллов и зерен, и стресс метаморфизм горных пород, происходящий в участках их особого милонитового и ультрамилонитового состояния [Ребецкий, 2008]. Это и два предыдущих направления исследований определяют проникновение тектонофизики в фундаментальные проблемы геомеханики и физики очага землетрясения.

Анализ механического поведения пород коры для 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 досаточно 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.

Еще одно направление тектонофизических исследований связано с новым типом данных, получаемых с использованием методов 3D-сейсмоки при изучении осадочного чехла в районах залежей углеводородных месторождений. Здесь наблюдаются системы трещин, отвечающие механизму горизонтального сдвига [Гогоненков и др., 2007]. Выделяемые методами 3D-сейсмоки разрывные структуры позволяют применять к ним результаты тектонофизического моделирования [Ребецкий и др., 2008], используемые в настоящее время при интерпретации геологических и сейсмологических данных. Экономическая важность проблемы требует специальных тектонофизических исследований.

Необходимость развития исследований в последних двух направлениях фактически определяет проникновение тектонофизических подходов и методов в геофизику, требуют создания соответствующих методов интерпретации геофизических данных.

Тектонофизика прошла большой путь в своем развитии. Многие направления, намеченные М.В. Гзовским, плодотворно развиваются. Однако значительно продвинувшись в методическом направлении, осуществив приложении 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 актуальным проблемам современной тектонофизики следует прежде всего отнести: *изучение механизмов формирования тектонических напряжений вблизи границ литосферных плит (зоны субдукции и спрединга) и внутри литосферных плит в пределах орогенов и щитов; выяснение роли гравитационных сил в формировании современного поля напряжений; исследование механизма формирования крупномасштабного хрупкого разрушения земной коры – землетрясения; вопросы изучения больших деформаций складчатых орогенов коры, развитие методов тектонофизической реконструкции эволюции этих областей; изучение строения и реологических свойств слоев земной коры и подкоревой литосферы на основе современных данных о напряженном состоянии горных массивов; развитие исследований особенностей строения и физических процессов в теле тектонического разлома; исследование закономерности природного напряженного состояния и его эволюция в районах месторождений полезных ископаемых.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бокун А.Н. Соленые структуры Солотвинской впадины. Киев: Наукова думка. 1981. 135 с.

Бокун А.Н. Зоны скалывания в однослойных моделях из влажной глины. Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. Л.: Междвед. Тект. ком. АН СССР. 1988. Вып. 1. С. 83–85.

Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–18.

Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука. 1974. 482 С.

Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная Геодинамика и вариации физических свойств горных пород. 2004. М.: Изд-во Моск. гос. горного универс. 260 с.

Михайлова А.В., Ребецкий Ю.Л. Моделирование тектонических структур на численных комплексах NASTRAN и UWAY. Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. 2008. М.: Изд-во ИФЗ РАН. С. 37–68.

Осокина Д.Н. Моделирование тектонических полей напряжений, обусловленных разрывами и неоднородностями в земной коре. Экспериментальная тектоника: методы, результаты, перспективы. М.: Наука. 1989. С. 163–197.

Осокина Д.Н. Исследование механизмов деформирования массива в зоне разрыва на основе изучения трехмерного поля напряжений (математическое моделирование). М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 220–245.

Осокина Д.Н. Поле напряжений, разрушение и механизмы деформирования геосреды в зоне разрыва (математическое моделирование). Тектонофизика сегодня. М.: Изд-во ОИФЗ РАН. 2002. С. 129–174.

Осокина Д.Н. Скалывающие кулоновы напряжения и области различного деструктивного поведения массива в окрестностях разрыва. Очерки геофизических исследований. 2004. М.: ОИФЗ РАН. С. 351–359.

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. Федьнского. М.: Научный мир. 2007. С. 270–278.

Осокина Д.Н. Поле кулоновых напряжений и области разрушения в окрестности разрыва. Проблемы тектонофизики М.: изд-во ИФЗ. 2008. С. 69–87.

Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами. Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 74–119.

Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Метод моделирования локальных полей напряжений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений. Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 139–162.

Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 237–241.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясений // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 3. С. 372–377.

- 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.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 1. № 10. С. 25–37.
- Ребецкий Ю.Л.* Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода // Геофизический журнал. 2007. Т. 29. № 4. С. 92–110.
- Ребецкий Ю.Л.* Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения // Геофизический журнал. 2007. Т. 29. № 6. С. 92–110.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние, благоприятное для крупномасштабного хрупкого разрушения горных пород // Докл. РАН. 2007. Т. 416. № 5. С. 106–109.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука. 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений землетрясений // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 1. № 11. С. 66–73.
- Ребецкий Ю.Л.* О возможном механизме генерации в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // Докл. РАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 538–542.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 // Докл. РАН. 2006. Т. 407. № 1. С. 106–109.
- 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., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры Алтае-Саянской складчатой области перед Чуйским (Алтайским) землетрясением. Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. 2008. М.: Изд-во ИФЗ РАН. С. 245–299.
- Ребецкий Ю.Л.* Разломы как особое геологическое тело. Модель развития крупномасштабного хрупкого разрушения. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. Материалы Всероссийской конференции, Москва, 22–25 апреля. М.: Геос. 2008. С. 418–420.
- Ребецкий Ю.Л.* Механохимические процессы в теле разлома. Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Материалы четырнадцатой международной конференции, г.Петрозаводск, 27–31 октября 2008 г. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН. 2008. Ч. 2. С. 143–146.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М.* Скорости смещений по главным сдвигам Монголо-Сибирской подвижной области по данным спутниковой геодезии и повторные периоды землетрясений. Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: материалы Совещания. Иркутск.: ИЗК СО РАН. 2007. Т. 2. С. 131–134.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. ГЕОС. 2003. 241 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1983. 112 с.
- Яковлев Ф.Л.* Многограновый деформационный анализ структур линейной складчатости // Докл. РАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 371–376.
- Angelier J.* From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data // J. Struct. Geol. 1989. V. 11. № 1/2. P. 37–49.