

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**

Материалы докладов Всероссийской конференции
13-17 октября 2008 г.,
Институт физики Земли РАН,
г. Москва

Том 1

**Москва
ИФЗ РАН
2009**

УДК 551.2.3
ББК 26.324

Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Материалы докладов Всероссийской конференции – в 2-х томах. Т. 1. М.: ИФЗ. 2008. – 451с.

В сборнике публикуются материалы докладов, представленных на научную конференцию, посвященную сорокалетию создания в Институте физики Земли РАН лаборатории тектонофизики. В докладах рассматривается широкий круг научных проблем, при исследовании и решении которых используются 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

ПРЕДИСЛОВИЕ

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 Михаил Владимировичем Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН». Проведение конференции приурочено к сорокалетнему юбилею лаборатории тектонофизики, созданной М.В. Гзовским в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР в 1968 году. В Геофизический институт АН СССР (с 1956 г – ИФЗ АН СССР), 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. В дальнейшем группа расширилась, в ней над одной проблемой количественного описания тектонических процессов стали работать геологи, физики-экспериментаторы и механики-теоретики. 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 1997 г защитила Ph. D в отделе количественной тектоники (рук. Ж. Анжелье) Парижского университета им. П.и М. Кюри.

Лаборатория тектонофизики, созданная М.В. Гзовским, не являлась первой тектонофизической лабораторией в СССР. С 1949 г. в ИФЗ уже была лаборатория тектонофизики, созданная В.В. Белоусовым из лаборатории экспериментальной тектоники (1943 г.). Позднее, в конце 50-х эта лаборатория был вновь преобразована в отдел геодинамики. В 1953 году в МГУ В.В. Белоусов создал лабораторию геотектоники и тектонофизики, позднее в 90-х годах ее возглавил М.А. Гончаров. В 1979 г. в Институте земной коры СО РАН С.И. Шерманом была создана тектонофизическая лаборатория, в которой ему удалось собрать молодой геологический коллектив. В 1981 г. в Киеве В.Г. Гутерманом была создана лаборатория тектонофизики, которую в дальнейшем, после смерти Валентина Григорьевича возглавил Я.М. Хазан. К этим крупным научным коллективам следует добавить небольшие группы исследователей во Львове, Минске, Новосибирске (во главе с И.В. Лучицким), разделяющих основные взгляды М.В. Гзовского. Все годы своего существования в ИФЗ лаборатория тектонофизики никогда не представляла собой крупного подразделения. Ее численность в различные периоды колебалась в пределах 6-10 научных сотрудников. Однако именно эти сотрудники являлись родоначальниками многих новых методов исследования и научных концепций, определивших развитие тектонофизики в России. Подобная эффективность исследований связана с концепцией создания лаборатории тектонофизики М.В. Гзовского, которая всегда имела в своем составе физиков, механиков, и геологов, и основной своей задачей ставила развитие методов изучения природных геологических объектов в связи с решением фундаментальных и производственных проблем. Поэтому в лаборатории всегда проводилось много работ с привлечением исследователей из разных организаций, регионов и стран.

ОСНОВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОТРУДНИКОВ ЛАБОРАТОРИИ ТЕКТОНОФИЗИКИ ИФЗ РАН

Методы изучения природных напряжений и деформаций. Здесь прежде всего следует вспомнить методы исследования природного напряженного и деформированных состояний на основе анализа разрывных нарушений, которые в лаборатории развивались М.В. Гзовским – метод сопряженных пар сколов, к.геол.-мин. н. Олегом Ивановичем Гущенко – кинематический метод, к.геол.-мин.н. Влади-

миром Васильевичем Степановым – метод оценки величины тектонических деформаций (метод среднего механизма С.Л. Юнги, предложенный несколько позднее, в основных формализмах подобен методу В.В. Степанова), д.физ.-мат.н. Юрием Леонидовичем Ребецким – метод катакластического анализа (МКА) совокупностей разрывов. *(Здесь и далее будут указываться научные степени настоящих и бывших сотрудников лаборатории в их современном состоянии.)* Известные методы д.физ.мат.н. Петра Николаевича Николаева – тектоно-динамического анализа сколов, к.геол.-мин.н. Вячеслава Дорощевича Парфенова – квазиглавных напряжений и д.геол.-мин.н. Лидии Андреевны Сим – структурно-морфологический – также можно относить к методам, созданным под непосредственным влиянием М.В. Гзовского и лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН, т.к. Николаев долгое время был сотрудником лаборатории, а Парфенов – аспирантом Гзовского. Л.А. Сим всегда активно сотрудничала с лабораторией тектонофизики ИФЗ, работая в лаборатории неотектоники в МГУ. В настоящее время (с 2007 г.) Л.А. Сим является ведущим научным сотрудником лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН. Теоретическим базисом этих методов являются результаты, полученные в экспериментах на разрушение образцов горных пород, а также непосредственные полевые наблюдения деформационного поведения горных массивов. Методы оценки параметров природных напряжений прошли большой путь в своем развитии от получения первых результатов, дававших только ориентацию главных осей напряжений (работы М.В. Гзовского, О.И. Гущенко и др.), до современного состояния, позволяющего оценивать не только величины шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений, но и флюидное давление в трещинно-поровом пространстве и параметры эффективной прочности массивов горных пород в их природном состоянии [Ребецкий, Тектонические напряжения и прочность природных массивов, М.: Академкнига, 2007]. МКА, созданный в лаборатории тектонофизики ИФЗ для оценки величин напряжений, использует не только данные о механизмах очагов землетрясений. В его алгоритм включено положение о предельном для трещиноватых горных пород напряженном состоянии (соотношения Кулона – Мора), закон сохранения импульса сил в вертикальном направлении (в упрощенной постановке это означает равенство вертикальных напряжений весу столба горных пород), а также сейсмологические данные о величине сброшенных напряжений в очагах наиболее сильных для исследуемого региона землетрясений и геофизические данные о рельефе поверхности коры и плотности ее основных слоев. Отдельно следует отметить предложенный в начале 90-х годов в работе Ю.Л. Ребецкого алгоритм оценки величин напряжений путем привлечения к данным об ориентации главных осей и виде эллипсоида напряжений (основной тип данных получаемый широким спектром методов анализа разрывных нарушений) в качестве дополнительных трех уравнений сохранения равновесия (закон сохранения импульса сил). В настоящее время в МКА используется только часть положений этого подхода (сохранение вертикального импульса сил).

С использованием созданных в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН методов реконструкции природных напряжений были построены карты напряженного состояния различных тектонически активных регионов. Это прежде всего известные карты напряжений М.В. Гзовского, О.И. Гущенко, Л.А. Сим. Данные этих карт являются отправной точкой для геодинамических исследований и тектонофизического моделирования. Однако наибольшие перспективы в исследованиях природных напряжений дают результаты применения МКА, разработанного Ю.Л. Ребецким. Именно применение этого метода позволило впервые увидеть характер распределения величин напряжений в области будущего сильного землетрясения [Ребецкий, Маринин, Доклады РАН, 2006]. С использованием этого метода удалось оценить уровень девиаторных напряжений вблизи границ плит и для внутриплитных горно-складчатых орогенов [Ребецкий и др., Проблемы тектонофизики, М.: Изд. ИФЗ РАН, 2008]. Полученные в исследованиях сотрудников лаборатории тектонофизики данные о напряженном состоянии являлись либо первыми для ряда сеймотектонических регионов бывшего СССР, либо серьезно расширяли диапазон ранее не исследуемых параметров напряженного состояния. В настоящее время в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН это направление исследований продолжает развиваться в работах Ю.Л. Ребецкого, Л.А. Сим и к.геол.-мин. Антона Витальевича Маринина, использующего в своих работах также и методы анализа разномасштабных структурных форм Л.М. Рацетаева (МГУ).

Представляемые здесь исследования всегда осуществлялись во взаимодействии с работами других крупных исследовательских центров бывшего СССР и зарубежья, в которых также осуществляется развитие методов оценки природных напряжений. Здесь прежде всего отметим наши дискуссии и обсуждения с Иркутской тектонофизической школой во главе с С.И. Шерманом и К.Ж. Семиным, с Киевской тектонофизической школой во главе с В.Г. Гутерманом, О.Б. Гинтовым и Я.М. Хазаном, сотрудничество с французскими тектонофизиками под руководством проф. Ж. Анжелле и китайскими тектонофизиками из Ключевой Государственной Лаборатории по Землетрясениям во главе с ака-

демиком Ма Цзинь (бывшей аспиранткой М.В. Гзовского), а также контакты с американскими сейсмологами из Геологической Службы США (Ж. Хардебек, М. Симпсон). Наши научные контакты в данном направлении расширяются, проводятся совместные исследования региональных напряженных состояний с учеными из Института Земной Кору СО РАН г. Иркутска (А.А. Добрынина), Института Морской Геологии и Геофизики ДВО РАН г. Ю.-Сахалинска (Т.К. Злобин, А.Ю. Полец), Института Нефтяной Геологии и Геофизики СО РАН из Академгородка г. Новосибирска (О.А. Кучай), Научной Станции РАН «Бишкек» г. Бишкек (Н.А. Сычева), Горного Института КарНц РАН г. Апатиты (А.А. Козырев, В.В. Рыбин, Д.В. Жиров), Института Сейсмологии АН РУз г. Ташкента (Р.А. Умурзаков). Большинство этих исследований поддержано грантами РФФИ.

Другое направление исследований тектонических деформаций на основе анализа морфологии линейных складок развивается в работах к.геол.-мин.н. Федора Леонидовича Яковлева. Здесь для изучения механизмов образования природных складчатых структур используются главным образом методы структурной геологии, дополненные принципами количественного тектонофизического анализа. Методология восстановления деформированного состояния объектов линейной складчатости основана на постепенном, без пропусков, восстановлении всех характерных деформационных параметров от малых объектов по размеру до крупных – то есть используется путь познания от частного к общему. Это позволяет не давать интерпретацию конкретным структурам на основе общепринятых тектонических или геодинамических моделей, а выявлять новые, ранее неизвестные явления, выдвигать новые модели, а также проверять уже известные. Важным здесь является использование процедуры построения сбалансированных разрезов, которые дают достаточно точную картину перемещений отдельных блоков и надежную величину сокращения всей структуры. Численные параметры геометрии структур на уровне доменов для структур сложноскладчатых слабометаморфизованных флишевых прогибов позволяют проводить операции построения доскладчатого структурного профиля и определять достаточно точно размер сокращения всего пересечения и его частей. Первые исследования в рамках развиваемого Ф.Л. Яковлевым подхода были выполнены на основе опубликованных структурных профилей через Северо-Западный Кавказ, составленных Т.В. Гиоргобиани (1989) и Е.А. Рогожиным (1993). Характер распределения величин сокращения вкрест простирания тектонических зон Большого Кавказа показал почти равномерное распределение этой величины, что противоречит стандартной коллизионной схеме «А-субдукции». Анализ структуры перехода форланд-хинтерланд на примере Чиаурской зоны Большого Кавказа показал, что регионально крупный граничный разлом, разделяющий Большой Кавказ и Закавказский массив, является сбросом с современной амплитудой до 15 км по подошве осадочного чехла.

Длительное изучение мультимасштабной линейной складчатости Ф.Л. Яковлевым [Геотектоника, 1987; препринт 1997; Сб. «Тектонофизика сегодня», 2002; Физика Земли, 2009] привело к появлению представления о существовании нескольких иерархических уровней объектов и разработке кинематических моделей их развития. Эти модели позволяют описывать в терминах больших деформаций природные и модельные структуры, опираясь на их геометрию и, соответственно, решать прямые и обратные задачи тектонофизики. На этом пути ряд проблем геометрии и происхождения структур Большого Кавказа уже получили свое решение [Яковлев, Сб. «Современная тектонофизика. Методы и результаты», 2009].

Методы физического моделирования тектонических объектов. Лаборатория тектонофизики внесла громадный вклад в развитие методов тектонофизического моделирования. Это прежде всего экспериментальные работы самого М.В. Гзовского вместе Искрой Михайловной Кузнецовой, Лией Исидоровной Чертковой и аспиранткой из КНР Ма Цзинь, первыми выполнившими с соблюдением условий подобия (в том виде как это представлялось достаточным в тот период времени) моделирование типичных тектонических механизмов деформирования с образованием разрывов и формированием складок в моделях на влажных глинах и петролатуме. Основные положения теории подобия, адаптированные к условиям формирования тектонических структур, изложены в работах М.В. Гзовского, позднее они были несколько дополнены А.И. Шемендой (МГУ). Говоря о требовании соблюдения условий подобия при тектонофизическом моделировании, нельзя обойти вниманием известную работу Г.И. Гуревича [Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М.: Наука. 1974], в которой особое внимание обращалось на необходимость выполнения условия подобия по силе тяжести и коэффициенту Пуассона. Эти замечания оказываются особенно актуальны, когда в физическом эксперименте требуется получить подобную природной морфологию хрупких разрывов (см. в этом сборнике работу Ю.Л. Ребецкого и др. «Разрушение в глубине зон горизонтального сдвига»). С целью наиболее полного соблюдения условий подобия физического эксперимента в

лаборатории был исследован широкий спектр эквивалентных материалов: пасты (суспензии) глины и углеводороды, а также смеси углеводородов с различными наполнителями.

Со второй половины 60-х годов физическое моделирование на пластичных влажных глинах в лаборатории осуществлялись к.техн.н. Анастасией Всеволодовной Михайловой, в работах которой изучен широкий класс типичных механизмов деформирования осадочного чехла над активным разломом кристаллического фундамента. Моделировались структуры, возникающие в осадочном чехле при кинематическом типе разрыва фундамента: взброс, сброс, сдвиг по простиранию и сочетание этих механизмов нагружения. Метод количественного изучения деформаций и перемещений в пластичных моделях был разработан в конце 60-х годов М.В. Гзовским и А.В. Михайловой [Сб. «Экспериментальная тектоника. Методы, результаты, перспективы, 1989». Несколько позднее болгарским тектонофизиком С. Стояновым был предложен вариант того же метода, но с повышенной точностью определения деформаций и перемещений. Слоистые модели из влажных глин, в ходе нагружения которых формируются складки различного генезиса, создавались И.М. Кузнецовой и Ма Цзинь.

Исследование механизмов формирования складчатых комплексов с использованием методов тектонофизического моделирования в основном выполнялось в лаборатории в первые годы ее создания. Было проведено большое число физических экспериментов по исследованию условий формирования складок продольного и поперечного изгиба. Отметим здесь также обзор по моделированию складок, выполненный д.техн.н. А.С. Григорьевым и к.геол.-мин.н. В.П. Ионкиным.

Другим направлением лабораторного эксперимента являлось тектонофизическое моделирование с использованием поляризационно-оптического метода изучения напряжений в моделях на оптически активных, упругих и вязких материалах, начало которому было положено экспериментами физика к.физ.-мат.н. Дарианы Николаевны Осокиной и М.В. Гзовского (первая половина 50-х годов). В рамках этого направления под ее руководством был создан ряд уникальных приборов по изучению оптических и реологических свойств модельных материалов, приборов по моделированию тектонических объектов, а также разработан широкий спектр модельных материалов. По результатам этих исследований Д.Н. Осокина получила два авторских свидетельства на изобретение. Основы поляризационно-оптического метода изложены в ее книге «Пластичные и упругие низкомолекулярные оптически-активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования» [М.: Изд-во АН СССР, 1963], ставшую настольной для тектонофизиков, занимающихся поляризационно-оптическим моделированием тектонических полей напряжений. С применением этой методики в лаборатории тектонофизики в 60-80-х годах было выполнено несколько циклов исследований перестройки однородного исходного поля напряжений, обусловленной отдельными разрывами и их простыми системами. Были изучены локальные поля напряжений в моделях с разрывами различной формы, состоящими из отрезков прямой или дуги в моделях с единичным разрывом, с системами из двух разрывов и с мелкими разрывами в поле крупного, а также в моделях с «мягкими включениями», образованными множеством мелких разрывов, имитирующими очаговые зоны. Целый ряд этих исследований Д.Н. Осокина выполнила совместно с Натальей Юрьевной Цветковой в сотрудничестве с геологами лаборатории О.И. Гущенко и Андреем Алексеевичем Никоновым, а также с сотрудниками Ашхабадского института Сейсмологии В.И. Лыковым и В.А. Петровым. Следует сказать, что без инженера-механика Александра Ломакина и инженера Веры Владимировны Кудряшовой многие физические эксперименты оказались бы не осуществимы. С использованием этой или близкой методики рядом авторов были исследованы локальные поля напряжений в моделях со сложными системами разрывов, имитирующими разрывную структуру: сейсмоактивных регионов, рудных полей и месторождений, отдельных районов и геологических структур. В частности, были изучены напряжения в таких моделях для нескольких сейсмоопасных районов Евразии (Памяти-Тянь-Шаня, Ирано-Туркмении, Карпато-Балкан, Копетдага) и зоны разломов Сан-Андреас.

Работы по тектонофизическому моделированию в ИФЗ РАН в том виде, как они были сформулированы М.В. Гзовским (при выполнении условий подобия по критически важным для эксперимента параметрам) были подхвачены и в других исследовательских центрах нашей страны. Группы по тектонофизическому моделированию на пластичных эквивалентных материалах и упругих оптически-активных материалах были созданы в Новосибирске (И.В. Лучицкий, П.М. Бондаренко), Киеве (В.Г. Гутерман), Львове (А.Н. Бокун), Иркутске (С.А. Борняков, А.И. Мирошниченко, С.С. Семинский, В.Ю. Буддо), Ташкенте (Ш.Д. Фатхулаев), Минске (Д. Бокун).

Методы математического моделирования. Проведение физического моделирования в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН всегда подкреплялось математическим моделированием. Подобное сочетание физического эксперимента и теоретических расчетов является наиболее эффективным инстру-

ментом исследований, т.к. с одной стороны эти методы дополняют друг друга, а с другой определенным образом контролируют получаемый каждым из методов результат. Методы математического моделирования в том виде как они существовали в 70-90-х годах прошлого столетия давали возможность решать задачи механики в линейной постановке (упругое или идеально вязкое тело). Но даже подобные простейшие модели позволяли достаточно быстро выполнить анализ влияния различных параметров нагружения и свойств среды на результат, что в лабораторном эксперименте всего связано с большим объемом работ. Особый импульс математического и физического моделирования в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН придал приход в нее в во второй половине 60-х годов крупнейшего советского механика Адриана Сергеевича Григорьева, который первым из механиков начал систематическое решение задач тектонофизики в нашей стране. В лаборатории под его руководством была сформирована теоретическая группа по изучению напряженно-деформированного состояния тектонических объектов земной коры, в которую в разные годы входили: к.техн.н. Зинаида Евгеньевна Шахмурадова, Валерий Петрович Ионкин, Ю.Л. Ребецкий и к.техн.н. Ирина Моисеевна Волович и Галина Викторовна Россанова. Исследования этой группы включали три цикла. *Первый цикл* – решение классическими методами механики сплошной среды ряда задач о напряжениях и деформациях земной коры при различных механизмах деформирования (для простейших геометрических и физических моделей геосреды). Были решены задачи: об образовании надвига, об изгибе осадочного чехла при вертикальных движениях блока фундамента, о деформировании литосферы над конвекционными потоками, об образовании складок продольного изгиба большой мощности и амплитуды. *Второй цикл* – решение задач с усложненной физической моделью среды, приближающей ее к условиям в тектоносфере. Прежде всего это задачи о напряжениях и деформациях в литосфере с учетом изменения с глубиной ее вязкости (при изменениях состава слоев, температуры и гравитации). Было также проведено развитие теории больших пластических деформаций оболочек и пластин. *Третий цикл* – разработка основ тектонофизической интерпретации современных движений на базе решения задачи о смещениях поверхности, напряжениях и деформациях слоя над разбитым на блоки фундаментом при типичных механизмах деформирования коры (взброс, сброс, горизонтальный сдвиг, раздвиг, содвиг и различные сочетания этих механизмов). В статье А.С. Григорьева «Вопросы математического моделирования в тектонофизике» [Экспериментальная тектоника, М.: Наука, 1985], дан анализ *принципов и особенностей постановки задач* описания тектонических процессов и структур.

С использованием математического моделирования Д.Н. Осокиной с были выполнены важные для теоретической тектонофизики исследования – изучение закономерности распределения напряжений и прогноз формирования вторичных нарушений сплошности вблизи крупного разрыва. Эти работы были бы невозможны без сотрудничества в середине 80-х годов Д.Н. Осокиной с В.Н. Фридманом, учеником Б.В. Кострова. В их совместной работе было построено аналитическое решение (в функциях комплексных переменных) двумерной задачи для единичного разрыва с трением вдоль берегов. На его основе было построено и исследовано распределение в зоне разрыва характеристик тензора напряжений (его компонент, величин и траекторий главных напряжений и т.п.) в зависимости от параметров задачи (ориентации разрыва, коэффициента трения, соотношения главных напряжений). Несколько позднее Б.В. Костров и Ш. Дас исследовали решение трехмерной задачи для эллиптического разрыва и рассчитали распределение напряжений и смещений около него. В дальнейшем Д.Н. Осокина построила трехмерное локальное поле напряжений в слое, рассеченном нормальным к нему закрытым разрывом с трением – путем наложения поля одноосного сжатия по вертикальной оси на двумерное в латеральном направлении поле разрыва, полученное в работе Осокиной и Фридмана [Сб. «Поля напряжений в земной коре», М.: Наука, 1987]. Результаты физического и математического моделирования локальных полей напряжений, обусловленных разрывами и включениями, позволили Д.Н. Осокиной сформулировать проблему существования иерархии полей напряжений различных уровней или иерархической структуры тектонического поля напряжений. Исследования закономерностей изменения поля напряжений около разрывов, позволили рассмотреть причины появления и способы выделения полей различных уровней, а также установить некоторые закономерности связи между полями двух соседних уровней.

В настоящее время, в связи с выявлением важнейшей роли в развитии деформационных процессов неоднородностей геосреды, широкое развитие получили работы с попытками построения реологических моделей такой среды в рамках механики континуума, учитывающей однако мелкомасштабную ее структуру (текстуру). Эти работы опираются на представления, развитые в рамках нового направления геомеханики – мезомеханики (Е.В. Панин и др). В работах Ю.Л. Ребецкого с О.И. Гущенко [Физика Земли, 1995] и студенткой математического факультета МГУ Екатериной Толстой [Сб. «Тектонофизика сегодня», 2002] были исследованы процессы формирования линейной

складчатости в тонкорасслоенных массивах. На основе принципов механики композитов выстроены уравнения, определяющие взаимосвязи между параметрами тензоров деформаций и напряжений разных масштабных уровней (внутрислойные деформации, деформации многослоя, деформации крыла и замка, деформации складчатого комплекса). Для случая, когда на самом низшем уровне (в слоях пачки многослоя,) принята модель линейно-вязкого тела и допускается взаимное проскальзывание на границах слоев с вязким трением, получены уравнения состояния, определяющие реологию всего многослоя в виде анизотропного вязкого тела с параметрами, зависящими от степени сжатия складок (деформационная анизотропия). К этому же направлению следует отнести и работу Ю.Л. Ребецкого с Д.Н. Осокиной и студентом физического факультета МГУ Владислава Эктова [Сб. «Тектонофизика сегодня», 2002], в которой получено приближенное аналитическое решение двухмерной задачи теории упругости для систем сдвиговых разрывов с трением, использующее задание на поверхности разрывов условия сухого трения в интегральной форме, что снижает сложность математического решения. Данное решение, отвечающее усреднению параметров истинного тензора напряжений на мезоуровне, позволяет анализировать взаимное влияние подвижек по нескольким разломам. Для двух разрывов обнаружена зависимость смещений берегов и поля напряжений от очередности активизации. В последних работах Д.Н. Осокиной, вышедших в сборниках лаборатории в 2002 и 2008 гг., еще раз обращалось внимание на роль влияния исходного напряженного состояния на характер ожидаемых вторичных разрывов и необходимость исследования кулоновых напряжений при прогнозе хрупкого разрушения. В последние годы изношенность старого оборудования и нехватка финансирования привели к утрате возможности качественного проведения физического эксперимента. Однако это не привело к потере в лаборатории направления по тектонофизическому моделированию при изучении деформационных структур. Сотрудничество в 90-ые годы с лабораторией количественной тектоники Парижского университета, которую тогда возглавлял проф. Ж. Анжелье, позволило сначала освоить, а затем в рамках совместного проекта приобрести численный комплекс MODULEF по конечно-элементному расчету задач механики деформируемого твердого тела. С использованием этого программного комплекса были выполнены исследования напряженного состояния в зонах субдукции совместно с Т.В. Романюк. Уже в начале этого столетия сотрудничество в рамках проекта МНТЦ с геомеханиками из ИПРИМ РАН А.Н. Власовым и М.Г. Мнушкиным позволило получить в лабораторию программный комплекс UWAY, который в отличие от MODULEF дает возможность решать упруго-пластические задачи механики с применением различных реологических тел (Мизес, Кулон-Мор, Друккер-Прагер). Это вывело работы по математическому моделированию тектонических объектов в лаборатории на совершенно новый уровень. В работах А.В. Михайловой совместно с Ю.Л. Ребецким получены новые данные о эволюции напряжений и деформаций в слое над активным разломом фундамента для упруго-пластической (тело Кулона-Мора) модели среды. В рамках таких моделей есть возможность учитывать не только девиаторную составляющую поля гравитационных напряжений, но и остаточные напряжения, вызываемые этими гравитационными напряжениями и проявляющимися при денудации рельефа. Развиваемые в последнее время контакты лаборатории с сотрудниками Томского Института Проблем Прочности СО РАН Ю.П. Стефановым и П.В. Макаровым позволяют рассчитывать на разработку в ближайшие годы численных программных комплексов, с помощью которых будет возможно выполнять не просто расчеты напряжений в деформируемом теле и давать прогноз мест возникновения и характер морфологии вторичных разрывных структур, но и получать эти структуры в процессе математического моделирования. В настоящее время это направление исследований развивается в работах А.В. Михайловой, Ю.Л. Ребецкого и Виталия Викторовича Погорелова (аспирант В.Н. Конешова). Совместные работы по тектонофизическому – математическому моделированию осуществлялись в рамках проектов РФФИ совместно с К.И. Кузнецовой, Т.В. Романюк, Н.И. Дьяуром из ИФЗ РАН. Говоря о сотрудничестве с тектонофизиками – теоретиками из других научных центров, особо следует вспомнить работы механика – тектонофизика А.Н. Адамовича (Иркутск), тесно сотрудничавшего с группой А.С. Григорьева и выполнившего ряд фундаментальных исследований по взаимодействию трещин применительно к проблемам сейсмической активности разрывов Байкальской рифтовой области.

Изучение свойств горных пород. Изучение свойств горных пород всегда рассматривалось в лаборатории тектонофизики как одно из наиболее важных направлений исследований. Лаборатория никогда не имела оборудования для исследования прочности и деформационных свойств пород и поэтому в этих исследованиях в первые годы своего создания опиралась на работы лаборатории М.П. Воларовича в ИФЗ РАН и результаты изучения других крупных исследовательских центров (работы Моги, Байерли, Брейса, Руммели, Стваврогина и др.). Лаборатория также являлась заказчи-

ком подобных исследований, проводимых другими институтами. Так, возникшее благодаря настойчивости Д.Н. Осокиной сотрудничество со К.П. Шкуриной и Г.Н. Фалалеевым из Института физики и механики горных пород Киргизской ССР (г. Бишкек) в рамках хоздоговорных работ, в которых заказчиком являлся ИФЗ РАН, позволило получить уникальные данные о ползучести разного типа горных пород в экспериментах по длительному (до 1.5-2-х лет) нагружению. В этих работах было подтверждено для горных пород существование предела текучести – уровня девиаторных напряжений, начиная с которого происходит резкое падение вязкости среды. Показано, что упругое последствие при обычных температурах может захватывать интервалы времени десятки дней, а для особо прочных пород и несколько месяцев. С другой стороны, в исследованиях Д.Н. Осокиной была выполнена оценка вязкости для широкого спектра материалов, включающего и горные породы, на основе анализа коэффициента поглощения упругих волн. Полученные в этой работе данные также показали зависимость вязкости от интенсивности девиаторных напряжений. При низком уровне девиаторных напряжений основным механизмом диссипации упругих деформаций является диффузионная вязкость, а при высоком уровне девиаторных напряжений – дислокационная вязкость (ползучесть). Подобная зависимость механизма релаксации напряжений является фундаментальным свойством горных пород, она была получена и для эквивалентных материалов в работах Д.Н. Осокиной [Сб. «Современные движения,» 1973] и С.Стояновым [Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра. 1977], К.Ж. Семинским [ВИНИТИ, 1986].

Замеры *In situ* напряжений в горных породах. М.В. Гзовским всегда уделялось большое внимание измерению уровня напряжений в породах земной коры в их природном состоянии. В связи с этим в период 1966-1971 были установлены контакты с большой группой исследователей из Горного института Кар. НЦ РАН г. Апатит (И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, Д.М. Казикаев, С.А. Батугин), измеряющих современные напряжения в горных выработках. М.В. Гзовский предполагал, что эти совместные работы с геомеханиками позволят сделать выводы о механизме генерации напряжений в верхних слоях земной коры. В настоящее время, после длительного перерыва, эти контакты вновь восстанавливаются. Лаборатория участвует в проекте д.техн.н. А.А.Козырева (ГИ Кар. НЦ РАН, Апатиты) по изучению распределения напряжений для Ковдорского массива нефелиновых сиенитов, рудник Железный.

Механизмы генерации напряжений и формирования больших деформаций в земной коре. Эта проблема всегда являлась базисной при решении фундаментальных и прикладных задач тектонофизики. Без решения этой проблемы невозможно достоверное решение главной задачи, сформулированной М.В. Гзовским для полевой и теоретической тектонофизики – создание теории механизмов формирования тектонических объектов, определяющей: 1) систему внешних (и внутренних) сил, приложенных к рассматриваемому геобъекту или задаваемых движениями его границ; 2) исходную морфологию и механические свойства объекта; 3) возникающие внутри него поля напряжений, деформаций и разрывов. Одним из факторов формирования девиаторных напряжений в верхних слоях коры являются движения вдоль крупных разломов кристаллического фундамента. Этот тип напряженного состояния широко исследован в работах теоретической группы А.С. Григорьева и Д.Н. Осокиной. Другим механизмом формирования напряжений являются движения литосферных плит. Этот тип напряженного состояния исследовался не только путем численного моделирования в работах А.В. Михайловой с Т.В. Романюк и В.В. Погорелова с Ю.Л. Ребецким, но и с применением МКА для зон субдукции Курил и Камчатки, Японии, Зонской дуги. Еще один механизм генерации напряжений, который до самого последнего времени упускался из внимания и не имел количественного описания, - это остаточные напряжения, обусловленные гравитационным упруго-пластическим уплотнением и последующим подъемом пород к поверхности, сопровождающимся денудацией рельефа (Ребецкий, Доклады РАН, 2008). Вероятно, именно этот механизм генерации напряжений ответственен за мозаичный характер распределения напряжений внутриплитных горно-складчатых орогенов.

Исследования кинематики линейной складчатости, глубинной геометрии структуры и распределения величин деформаций показали, что традиционные схемы с внешним давлением и пододвиганием жестких блоков под Большой Кавказ не соответствуют действительности. Выявленное парадоксальное сочетание примерно двукратного регионального укорочения с увеличением амплитуды регионального сброса, по которому фундамент структуры Большого Кавказа опускался относительно окружающих ее стабильных участков коры, привело к пониманию того, что источник движений лежит в верхней мантии. Суть явления заключается в том, что во время складкообразования верхняя мантия и нижняя кора уплотняются, резко погружаются и «вытаскивают на себя» соседние блоки.

Таким образом, сближение стабильных блоков является не активным, как это считается в большинстве геодинамических моделей, а реактивным, вынужденным, и источник энергии находится не снаружи, а внутри структуры.

Тектонофизическое районирование. Со времени прихода М.В. Гзовского в ИФЗ много сил и времени он отдавал вопросам оценки сейсмической опасности и сейсморайонирования. Уже в 1957 г. вышла первая его статья по этому вопросу «Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности, (I и II)» (Изв. АН СССР, 1957). Совместно с сотрудниками института В.И. Буне, К.К. Запольским, В.И. Кейлис-Бороком, В.Н. Крестниковым, Н.Н. Леоновым, Л.Н. Малиновской, И.Л. Нерсесовым, Г.И. Павловой, Т.Г. Раутиан, Ю.В. Ризниченко, В.И. Халтуриным, Г.И. Рейснером создавались методы детального изучения сейсмичности и оценки сейсмической опасности по сейсмологическим данным. Тектонофизическими основами детального сейсмического районирования рассматривались прежде всего градиенты скорости новейших и современных тектонических движений, механические свойства земной коры, тип механизма современной деформации земной коры, а также протяженность по простиранию разрывов, которые могут активизироваться при землетрясении. Разрабатывались геологические критерии повторяемости землетрясений. Было выполнено сопоставление сотрясаемости в баллах на основе карты сейсмического районирования с данными о градиентах скорости новейших и современных тектонических движений для ряда территории СССР. Установлена линейная их взаимосвязь со своими параметрами для различных типов тектонической обстановки литосферы. Это исследование заложило основы для оценки ожидаемой балльности при землетрясениях и прогнозируемой сейсмической энергии для территории СССР.

Совместно с В.И. Буне, Н.А. Введенской, и И.В. Горбуновой были разработаны основы обзорного сейсмического районирования, задачей которого ставилось определение сейсмической опасности на больших территориях. Основу обзорного сейсмического районирования составляет сопоставление сейсмологических и количественных тектонических данных, полученных для рассматриваемой территории. В опытный порядок была создана карта сейсмического районирования Средней Азии. Новые принципы сейсмического районирования опробовались также совместно с В.Н. Крестниковым, И.Л. Нерсесовым и Г.И. Рейснером на примере Центральной части Тянь-Шаня. В 1965 работы по оценке сейсмической опасности и сейсморайонированию активизировались в связи с договором с ГИДЕП и проводились силами группы сотрудников лаборатории академиком РАН Юрием Георгиевичем Леоновым, к.геол.-мин.н. Николаем Николаевичем Леоновым, д.геол.-мин.н. Андреем Алексеевичем Никоновым, П.Н. Николаевым и О.И. Гущенко. В это же время разрабатывались принципы глубоко-структурного районирования земной коры.

Следует отметить, что развитие методов оценки параметров современных напряжений, позволяющих в настоящее время (метод катакластического анализа) определять величины напряжений, дает возможность существенного развития тектонофизических подходов в детальном сейсмическом районировании. Данные о величине напряжений позволяют районировать конкретные разломы на участки благоприятные и неблагоприятные для хрупкого разрушения, оценивать возможную величину снимаемой энергии и той ее части, которая реализуется в сейсмических волнах [Ребецкий, Наука, 2007].

Интерпретация данных о новейших и современных движениях. Уже из представленных выше работ по сейсморайонированию можно сделать вывод о том, что М.В. Гзовский особое внимание уделял современным движениям и связи градиентов вертикальных скоростей перемещений поверхности с величинами тектонических максимальных касательных напряжений, а также с эффективным коэффициентом вязкости. Тектонофизическая интерпретация современных движений земной коры и выявление связи медленных деформаций земной коры с землетрясениями проводились совместно А.А. Никоновым, Л.А. Латыниной, А.Е. Островским, А.К. Певневым. В 80-е годы в Институте Геологии и Разведки Горючих Ископаемых проводились работы по изучению современных движений в Припятской и Терско-Сунженской впадинах в связи с прогнозом залежей нефти, приуроченными к разломам фундамента, которые проявляются в повышенных градиентах вертикальных перемещений поверхности (В.А. Сидоров, А.Т. Донабедов, Ю.О. Кузьмин). Именно совместные исследования ИГиРГИ с лабораторией тектонофизики привели к постановке задачи о напряжениях и деформациях в слое над активным разломом фундамента (А.С. Григорьев, З.Е. Шахмукрадова, Ю.Л. Ребецкий, И.М. Валович, А.В. Михайлова). Аналитические расчёты в комплексе с моделированием на эквивалентных материалах выявили устойчивую связь между распределением напряжений, деформаций и разрушений в слое над разломами фундамента с градиентами вертикальных перемещений поверхно-

сти как в однородных, так и в слоистых средах. В настоящее время лаборатория поддерживает активные связи с лабораторией современных движений ИФЗ РАН под руководством Ю.О. Кузьмина.

ГЛАВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАБОРАТОРИИ ТЕКТОНОФИЗИКИ ИФЗ РАН

Исследование закономерности распределения современных напряжений в сейсмоактивных областях [Ребецкий, М.: Наука, 2007], выполненные с использованием МКА, 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, эти результаты реконструкции природных напряжений для внутриплитовых орогенов 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. Сравнением закономерности распределения современных напряжений в зонах субдукции и для внутриплитовых орогенов установлено, что уровень девиаторных напряжений в последних выше в 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, Сб. «Геодинамика и флюиды», 2006] ставит задачу изучения факторов, отвечающих за изменение флюидного давления в зонах разломов, и возможности его оценки, что также является перспективной задачей тектонофизики.

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 работах [Ребецкий, Доклады РАН, 2008; Физическая мезомеханика, 2008] возможность формирования в горизонтальном направлении напряжений наибольшего сжатия в результате выноса в верхние 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 по данной концепции напряжений с результатами данных природных напряжений, 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. 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 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. 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.

Исследования процессов формирования складчатых структур дают потенциально уникальный по детальности материал для понимания механизмов формирования и преобразования континентальной коры. Существование структур нескольких масштабов, от сантиметров до первых сотен километров, ставит ряд как отдельных, так и взаимосвязанных задач на стыке механики сплошной среды (динамики), кинематики, тектоники и геодинамики. Уточнение уже созданных методов исследования и разработка новых, а также их апробация на природных и модельных объектах будут требовать заметных усилий еще длительное время. Разработанная трехмерная модель осадочного складчатого чехла СЗ Кавказа [Яковлев, Физика Земли, 2009] и важные геодинамические результаты, полученные с ее помощью, показывают, что исследование такого рода других крупных складчатых структур с целью наращивания числа объектов является одной из приоритетных задач. Первые результаты в этом направлении показывают также возможности нахождения закономерностей развития коры на количественном уровне, что вместе с геометрическими ограничениями впервые позволяет не только устанавливать невозможность существования ряда традиционных геодинамических построений, но и переходить к формированию новых геодинамических моделей. Говоря о возможностях изучения механизмов деформирования по данным о складчатых структурах, следует помнить о нерешенности ряда проблем складкообразования. В.В. Белоусов считал, что проблема формирования складок различных форм окончательно не решена и требует дополнительного анализа. Без переосмысления на новом уровне знания причин, приводящих к формированию складок, исследования в области больших деформаций будут требовать постулирования ряда параметров, определяющих процесс складкообразования.

Заключение. 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.

РЕШЕНИЕ СОВЕЩАНИЯ

В последний день конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания Михаил Владимировичем Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН» в ходе обсуждения ее результатов участники конференции предложили:

1. Отметить высокий организационный и научный уровень прошедшей конференции. На конференции был представлен широкий спектр научных проблем, для решения которых использовались тектонофизические методы и подходы, а также освещались исследования, позволяющие сформулировать новые задачи для тектонофизики.
2. Считать целесообразным регулярное раз в 3-4 года проведение конференций с широким охватом научных проблем в смежных направлениях наук о Земле при сохранении объединяющей тектонофизической методологии.
3. Считать необходимым проведение регулярных раз в 2 года школ по тектонофизическим методам анализа геологических, сейсмологических и геофизических данных с целью подготовки научных кадров и расширения использования методов и результатов тектонофизических исследований.