

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН ИФЗ РАН



С.А.Тихоцкий

05.06.2014 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Еремина Михаила Олеговича

«Моделирование эволюции напряженно-деформированного состояния нагружаемых геосред и твердых тел как нелинейных геодинамических систем»,

представленную в диссертационный совет Д 212.267.13 при ФГБОУ ВПО

«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертационная работа М.О.Еремина посвящена развитию новых численных методов механики деформированного твердого тела в приложении к проблемам геомеханики и геодинамики. В работе решен ряд интересных задач механики для элементов конструкций и рассчитаны геодинамические этапы эволюции деформации для ряда крупных геологических объектов земной коры Центральной Азии и Индо-Евразийской коллизии в процессе нагружения, отвечающего концепции движения литосферных плит. При решении геодинамических задач выполнялись также исследования синтетического сейсмического процесса, возникающего в моделях. Целью этой части работы диссертанта было изучение

закономерности поведения геосреды как нелинейной динамической системы, включающей фазу катастрофы – разрушения всего локального объема.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 143 наименований и приложения. Общий объем диссертации 125 страниц текста и 57 рисунков. Рисунки отличного качества, выполнены в оттенках серого цвета. Некоторые рисунки, относящиеся к тектоническим картам, представлены в цвете. Диссертация написана в хорошем стиле, понятным русским языком. Каждая глава завершается заключением, в котором сформулированы главные научные достижения, полученные в данном разделе диссертации.

Введение диссертации состоит из 7 стр., в нем имеются рубрики, в которых в соответствии с требованиями ВАК обсуждаются вопросы актуальности работы, цели и задачи, новизна и вклад автора, а также другие важные показатели научной работы. Здесь представлены пять защищаемых положений, которые также отвечают требованиям ВАК по новизне и обоснованности фактическим материалом. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из которых 8 в журналах из списка ВАК. Различные разделы диссертации докладывались на российских и международных конференциях.

В отзыве далее будет отражено содержание работы по главам, каждая из которых сопровождается моими комментариями и замечаниями.

Предварительно скажу, что результаты, полученные в работе и созданные численные алгоритмы расчета задач геомеханики и геодинамики показывают высокий уровень научной подготовки М.О.Еремина и составляют значимый вклад в исследование процессов закритического деформирования и разрушения горных пород и массивов

Первая глава диссертации посвящена описанию одного из важных объектов исследований М.О.Еремина – геологической среде с позиции нелинейной динамической системы. Здесь представлены положения современной геодинамической концепции тектоники литосферных плит. Для

исследуемого региона и его ближайшего окружения анализируются фактические геофизические данные по перемещениям дневной поверхности коры, полученные GPS-геодезией, данные о характере сейсмического режима в земной коре, а также данные о тектонических разломах земной коры, полученные по результатам геологических и тектонофизических работ (интерпретация К.Ж.Семинского). В подразделе, относящемся к механическим аспектам работы, представлены положения о самоорганизации сложных иерархических систем, полученные в рамках нелинейной динамики, результаты которой интерпретируются в соответствии с базовыми положениями синергетической теории диссипативных систем. Рассмотрены положения режимов с «обострением», развиваемые после работ научных школ А.А.Самарского и С.П.Курдюмова.

В подразделе «Формулировка критериев пластичности и/или разрушения» обсуждаются базовые положения, определяющие закритическое поведение среды. Говорится о том, что в работе локальный материальный объем считается разрушенным, если в ходе эволюции деформационного процесса его прочностные свойства снижены *до нуля*. Данное положение отличается от классического, используемого в механике разрушения – достижение предельной нагрузки. Время закритического деформирования и вид тензора напряжений определяют форму предельной поверхности нагружения в пространстве напряжений.

Содержание главы показывает хорошее владение М.О.Ереминым широким спектром геофизических данным и понимание фундаментальных проблем механики закритического поведения среды.

Вторая глава диссертации посвящена «Математической постановке задач эволюции нагружаемых твердых тел и сред». Здесь приводятся все математические соотношения, на которые опираются численные расчеты диссертанта. Это прежде всего законы сохранения массы, импульса сил и энергии, а также закон Гука и предельные соотношения, отвечающие среде Друккер-Прагера в модификации В.Н.Николевского (учет внутреннего

трения на хрупкую прочность/предел текучести и дилатансии). Отдельно дано разъяснение по выбору функции деградации среды, отвечающей за предел локальной прочности среды. Эта функция рассчитывается как интеграл по времени закритического деформирования, и ее форма выбрана так, что учитывает вид тензора напряжений (вид эллипсоида напряжений), определяемые значениями коэффициента Лоде – Надаи. С этой целью в нее вводится коэффициент в виде функции Хевисайда, который скачком изменяется от 0 до 1 соответственно при отрицательных и положительных значениях коэффициента Лоде – Надаи. Далее в главе дается достаточно детальное представление метода М.И.Уилкинса по прямому расчету напряжений в рамках задачи динамической теории упругости. Рассмотрены эффекты «неправильной» деформации сетки, влияющие на численный расчет и приводящие к осцилляции деформаций, а также объяснены приемы, снижающие их влияние.

Содержание этой части диссертации производит очень хорошее впечатление и отражает глубокое знание М.О.Ереминым математических аспектов проблемы численного решения задач механики.

В последних двух подразделах этой главы рассматриваются примеры расчета закритического поведения образцов и простейших элементов конструкции с целью верификации математического аппарата численного комплекса, созданного М.О.Ереминым, путем сравнения с экспериментальными данными. Результаты 2D расчета трехточечного изгиба балки и 3D расчета кубического образца пористой керамики при осевом нагружении приведены в виде поля повреждаемости и распределения значений коэффициента Лоде - Надаи.

Следует особо отметить хорошее схождение результатов расчетов с экспериментом и впечатляющее графическое представление материала. Показано, что существуют особенности формирующейся структуры разрушения в зависимости от уровня нагружения и связанного с ним периода времени до полной потери несущей способности балки.

Ко второй главе диссертации относится *первое защищаемое положение*, отвечающее разработке математического аппарата модели квазихрупкой (псевдопластической – *геомех.*, катаклатической – *тектонофиз.*) среды на основе описания хрупкого разрушения и пластического деформирования. Считаю его полностью обоснованным и доказанным через практическое применение.

Третья глава диссертации посвящена исследованию явления прерывистой текучести, отражающегося в отклонениях напряжений от среднего за пределом упругости. В начале раздела обсуждаются экспериментальные данные по этому вопросу и теоретические положения, объясняющие это явление. Полученные в работе результаты удивительно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что отражает отличное владение М.О.Ереминым математическими методами и программированием, что является базисом при создании численных комплексов.

К третьей главе работы относится *второе защищаемое положение*, определяющее формирование прерывистой текучести при закритическом деформировании.

Четвертая глава диссертации посвящена моделированию деформаций в литосфере складчатых областей Центральной Азии. Сразу следует заметить, что представленные в диссертации расчеты захватывают существенно больший район, чем это следует из названия главы. Этот район правильнее было бы именовать Центральной и Юго-Восточная Азия или область коллизии Индии и Евразии. Были выполнены расчеты для двух моделей, одна из которых, выполненная в сферических координатах, захватывала область $40-160^\circ$ ВД и $20-70^\circ$ СШ, а вторая отвечала Чуйско-Курайской зоне, где в 2003 году произошло сильное землетрясение с $M=7.6$.

Для создания модели механических свойств (прочности) для первого расчета (Индо-Евразийская коллизия) использовались данные о структуре разломных зон из работ К.Ж.Семинского. Данные о горизонтальных движениях, полученные GPS-геодезией, позволили диссертанту

верифицировать краевые условия на меридиональных ограничениях модели. Основное нагружающее усилие создавало движение Индийской плиты. Полученные результаты численных расчетов дают информацию о горизонтальной кинематике деформирующейся области.

Вторая модель численных расчетов четвертой главы относилась к коре Чуйско-Курайской зоны. При этом расчете использовались результаты, полученные в первой модели для Индо-Евразийской коллизии. На границе модели задавались соответствующие кинематические параметры. При создании модели использовались данные о геологических разломах и интенсивности сейсмичности, что позволило определить закономерность пространственного распределения прочности на начальной стадии моделирования.

Результаты расчета приведены в виде пространственного распределения интенсивности пластических деформаций, значений коэффициента Лодена-Надаи и вертикальной компоненты перемещений в виде сформированного рельефа. По этим параметрам наблюдается хорошее соответствие результатов расчетов природным данным, полученным в том числе из тектонофизического анализа разрывных смещений (механизмов очагов землетрясений).

Результаты расчетов данного региона интерпретировались с позиции выявления особенности сейсмического режима. В работе приводятся графики повторяемости событий разного магнитудного диапазона, полученным по результатам численного расчета. Они хорошо повторяют известные природные закономерности. Показано, что временные вариации сейсмичности следует связывать с локальными особенностями деформационного процесса (локализация необратимых деформаций), а не с изменением параметров внешнего источника нагружения среды, что является важным достижением работы.

Конечно, полученные в этой главе результаты следует рассматривать как первое приближение в расчете природного деформационного процесса.

Но уровень проблем, которые диссертант преодолел при получении данного результата, показывают его высокий научный потенциал, а сами результаты являются важными и требуют своего сравнения с уже существующими данными о природных напряжениях.

К четвертой главе относится *пятое защищаемое положение*, связывающее временные вариации сейсмического режима Чуйско-Курайской зоны с пространственно-временной локализацией деформационного процесса в зонах разломов. Считаю его вполне обоснованным

Третье и четвертое защищаемые положения, связанные с приближением деформируемой системы к локальной и глобальной потере устойчивости, сложно отнести к конкретной части работы. Они вытекают из всего комплекса расчетов, представленных во второй, третьей и четвертых главах диссертации. Считаю, что эти защищаемые положения вполне обоснованы и доказаны.

Заключение диссертации содержит основные выводы (их десять) по выполненным исследованиям, включающим кроме защищаемых положений и другие важные достижения диссертанта.

Можно констатировать, что задачи, решенные в диссертации М.О.Ереминым, требуют высочайшего уровня владения математическими методами и приложены в области геодинамики, где в России в настоящее время получено мало по-настоящему значимых результатов. Представленные в диссертации и уже опубликованные результаты численных расчетов будут чрезвычайно востребованы в науках о Земле.

Новизна полученных результатов и их научная ценность состоит в разработанном алгоритме учета накопления повреждаемости, прямо влияющей на локальные механические свойства конструкций и геоматериалов. Учет при расчете повреждаемости вида эллипсоида напряжений также является важным элементом новизны численного расчета. Важным элементом новизны работы является изучение фазы предразрушения и выявление закономерности напряженно-

деформированного состояния в период приближения к катастрофе - разрушению. Выводы, полученные в этой части исследований, помогают делать прогноз катастрофических явлений разрушения. Впервые создана модель напряженно-деформированного состояния коры для зоны Индо-Евразийской коллизии при механических свойствах среды, учитывающих закритическое ее поведение. Новизной работы является и проведенный анализ синтетического сейсмического режима, возникающего в численной модели Чуско-Курайской зоны. Показано его подобие природному процессу.

К работе имеются замечания. В своем большинстве они относятся к приложению и интерпретации результатов расчета в геодинамике.

По первой главе диссертации следует отметить отсутствие обсуждения данных о природном напряженном состоянии земной коры сейсмически активных областей, которые в настоящее время имеются в том числе по исследуемым в работе регионам, и которые прямо могут быть соотнесены с результатами расчетов, выполненных М.О.Ереминым.

В приложении к проблемам геомеханики также не очень понятным выглядит утверждение о снижении прочности деформируемого локального объема до нуля. Как показали эксперименты на образцах горных пород (Byerlee, Brace, Mogi, Ставрогин и мн. др.) в условиях всестороннего обжатия, соответствующего обстановке в глубине коры, даже при формировании сквозной трещины, полностью разрывающей образец, существует остаточная прочность, связанная с силами трения на берегах трещины.

По второй главе диссертации отмечу, что при представлении математического аппарата часто отсутствует описание используемых в них параметров.

Из вида функции повреждаемости следует, что при тензоре чистого сдвига, когда коэффициент Лоде – Надаи равен нулю, эта функция принимает такое же значение, что и для одноосного сжатия. В работе не

дается объяснения, почему это так, хотя достаточно много места уделено объяснению разницы между состояниями, отвечающими значениям коэффициента Лоде – Надаи больше и меньше нуля. Данные о природном напряженном состоянии, формирующемся в разных геодинамических обстановках, очень часто показывает, что тип тензора напряжений, характеризуется значением коэффициента Лоде – Надаи, близким к нулю (особенно в областях субдукции), с вариациями 0.1-0.2 относительно нуля. Вид функции повреждаемости, принятый в работе, создает в таких областях скачкообразные изменения прочности в процессе эволюции деформаций, что должно приводить к неустойчивости численного расчета.

Также заметим, что в приводимом здесь описании, а также везде далее, диссертант неверно интерпретирует физическую суть коэффициента Лоде – Надаи. В работе говорится, что при его значениях больших нуля имеет место сжатие со сдвигом, а при меньших – растяжение со сдвигом. Поскольку коэффициент Лоде – Надаи характеризует только девиаторную часть тензора напряжений, то правильно говорить о состояниях одноосного сжатия и растяжения с чистым сдвигом в приложении к анализу девиаторных напряжений. На стр. 54 при описании результатов расчета трехточечного изгиба балки в подписях записано: «чистое растяжение», «чистое сжатие», что следует понимать как одноосное сжатие и одноосное растяжение, формирующееся при приближении этого коэффициента к +1 или -1. Это особенно важно в приложении к задачам геодинамики, которые рассмотрены в следующих главах, в которых существуют понятия горизонтально сжатия, растяжения и сдвига, соответствующие ориентации в пространстве главных осей тензора напряжений. Эти положения геодинамики никак не связаны с видом тензора напряжений, определяемым значением коэффициента Лоде – Надаи.

На стр. 50 в предпоследнем абзаце написано: « ... вычисленные компоненты искусственной вязкости добавляются к соответствующей

компоненте тензора напряжений». Здесь пропущена фраза, из-за чего предлагается суммировать физические параметры разной размерности.

Представление результатов расчетов не предваряется постановкой задачи механики, в которой должны быть описаны способы задания краевых нагрузок. Если для задачи трехточечного изгиба дана схема нагружения в виде рисунка, то для кубического образца сказано только, что он подвергался осевому нагружению. Как были приложены точечные и осевые нагрузки, было ли боковое стеснение на поверхности куба или в точках приложения изгиба, ничего этого в диссертации не указывается.

По материалам третьей главы следует отметить, что результаты расчетов напряженно-деформированного состояния образцов, так же как и в предыдущем разделе, не предваряются формулировкой краевых условий задачи. Более того, в этом случае вообще нигде не указано, о каком нагружении идет речь. Только из рис. 35 и 39 начинаешь понимать, что рассматриваются 2D и 3D полосы, испытывающие продольное растяжение.

Так же как и в расчетах предыдущего раздела, полученные результаты в основном представлены в виде распределения пластических деформаций, которые показывают удивительное сходство с экспериментальными данными. Расчет подтверждена феноменологическая модель, объясняющая явление прерывистой текучести как сугубо релаксационного процесса.

В качестве замечания к первой части четвертой главы (Индоевразийская коллизия), так же как и в предыдущих случаях, отмечу отсутствие записи краевых условий нагружения. Приведенная в диссертация постановка задачи очень короткая и содержит только словесное описание краевых условий нагружения и указание, что задача решалась в сферической системе координат. В работе не приводятся результаты расчетов по вертикальным движениям. Из этого я делаю вывод, что задача решалась в сферической системе координат в двумерной постановке, т.е. мощность

литосферы (коры) в результате нагружения остается неизменной. Об этом ничего не сказано, что является серьезным упущением работы.

Из расчетной модели следует отметить достаточно поверхностную, а иногда ошибочную интерпретацию результатов расчетов, проведенную автором. При анализе временных вариаций напряженного состояния в районе Байкальской рифтовой зоны в работе утверждается (стр. 97), что по результатам численных расчетов наблюдалось изменение напряженного состояния вплоть до инверсии локальной геодинамической обстановки от сжатия со сдвигом до растяжения со сдвигом. На самом деле, этот вывод сделан по данным об изменениях коэффициента Лодэ – Надаи, который никаким образом не определяет геодинамический тип напряженного состояния (см. замечание по второй главе). Геодинамическую обстановку (тип напряженного состояния – *тетанофиз.*) определяет ориентация осей главных напряжений, а она в расчетах не может резко изменяться (горизонтальная ориентация оси максимального сжатия изменится на горизонтальную ориентацию главного напряжения минимального сжатия – девиаторного растяжения), если краевые условия нагружения сохраняются постоянными.

В диссертации фактически только сказано о том, что наблюдается хорошее соответствие рассчитанной ориентации векторов перемещений с данными GPS (рис. 47). В то же время из рисунка 47 можно также заметить, что по амплитудам смещений хорошего соответствия с данными GPS нет. Так, данные GPS-геодезии показывают, что амплитуды векторов горизонтальных перемещений для Гималаев максимальны и резко снижаются (почти в два раза) для западного и восточного Тибета, а в равнинном Китае (юго-восточный участок расчетной области) это уменьшение амплитуд горизонтальных движений становится многократным (4-5 раз). Из результатов численных расчетов следует, что для Тибета уменьшение амплитуд горизонтальных смещений в сравнении с Гималаями составляет не более 10—20%, а для равнинного Китая это уменьшение не более 40-50%.

Подобные различия модели и природного объекта не были отмечены в работе. Замечу, что это различие модели и природного объекта не следует воспринимать как отрицательные результаты диссертационной работы. Это подсказка, полученная именно по результатам расчетов, позволяющая в дальнейшем уточнить не только модель строения, но и, возможно, всю концепцию условий воздействия на кору исследуемого региона.

По приведенным в диссертации результатам расчетов можно также заметить, что резкие локальные вариации значений коэффициента Лоде-Надаи наблюдаются в зонах локализации пластических сдвиговых деформаций (рис. 46). Если внутри крупных блоков земной коры значение этого коэффициента находилось вблизи 0.3 – 0.5 (эллипсоид напряжений – одноосное сжатие с чистым сдвигом), то в ограничивающих их полосах локализации он уменьшался до 0, что отвечало типу эллипсоида напряжений, близкого к чистому сдвигу. Этот результат, с одной стороны, действительно хорошо соответствует природным данным о напряжениях (Ребецкий и др.), где обширные участки коры горно-складчатых орогенов действительно имеют тип тензора напряжений, близкий к чистому сдвигу. Но, с другой стороны, следует отметить, что этот результат в работе был интерпретирован неверно. В диссертации сказано, что в блоках, где коэффициент Лоде-Надаи равен 0.5 наблюдается горизонтальное сжатие. Этот вывод из данных о значениях коэффициента Лоде-Надаи сделать нельзя. Точно так же не говорит о соответствии полученных напряжений механизмам землетрясений типа сдвиги со взбросами и значения коэффициента, близкие к нулю. Для подобных утверждений необходимо анализировать ориентацию главных напряжений.

Сделанные замечания по интерпретации результатов расчетов требуют в дальнейшем дополнительного осмысления с привлечением специалистов геологов и тектонофизиков.

По второй части четвертой главы в качестве замечания следует отметить то, что в работе не объясняется, каким образом данные о сейсмических

событиях в численной модели были определены. Можно только предполагать, что в численном расчете кроме неупругих деформаций могли формироваться и разрывные смещения (хрупкие трещины). Это также является серьезной недоработкой диссертации.

Особо отмечу, что все перечисленные выше замечания, сделанные в ходе анализа содержания работы, не влияют на общее хорошее впечатление от диссертации, не опровергают защищаемые положения и не снижают ее общего высокого уровня. Столь подробное их изложение было сделано именно для того чтобы помочь талантливому молодому исследователю быстрее овладеть сложной терминологией тектонофизики. Это позволит ему выйти на новый еще более высокий уровень научных результатов.

Заключение

В целом, диссертационная работа М.О.Еремина является завершенным исследованием, оформленным в соответствии с требованием ВАК, выполненным на высоком научном уровне. Приведенные в работе результаты следует определить как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение. Диссертация написана грамотно, на хорошем русском языке, аккуратно оформлена и иллюстрирована качественным графическим материалом. В своей диссертации М.О.Еремин продемонстрировал глубокий уровень знания специальных вопросов механики, вычислительных методов, и знакомство с рядом важных положений сейсмологии и геодинамики.

В автореферате диссертации и в публикациях М.О.Еремина адекватно и в достаточной для понимания форме изложено содержание всех глав диссертации. Имеющиеся в автореферате рисунки отличного качества.

Работа соответствует п. 9 « Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор М.О.Еремин заслуживает присуждения ему степени

кандидата физико–математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв ведущей организации на диссертацию М.О.Еремина составлен доктором физико-математических наук Ю.Л.Ребецким и утвержден на семинаре ИФЗ РАН «Вопросы теории и практики измерений и комплексной интерпретации потенциальных полей и других наземных и спутниковых данных», протокол № 1 от 04.06.2014 г.

Зав. лаб. им. М.В.Гзовского ИФЗ РАН
Д.физ.-мат.н. Юрий Леонидович Ребецкий



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Адрес: 123995, ГСП-5, г. Москва Д-242,
улица Большая Грузинская, 10, стр. 1.

Веб-сайт <http://www.ifz.ru/>

Телефон: +7 (499) 766-26-56

Адрес электронной почты: direction@ifz.ru