

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Мягкова Дмитрия Сергеевича на тему
«Исследование формирования напряжённо-деформированного состояния
эпиplatformенных орогенов методом математического моделирования»
по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых»**

Диссертация Д.С. Мягкова посвящена изучению весьма важной научной проблемы – построению геодинамически, тектонически и количественно обоснованной модели формирования напряженно-деформированного состояния эпиplatformенных орогенов, применительно к региону Центральной Азии.

Работа состоит из введения (которому предшествует раздел «Общая характеристика работы»), четырех глав и заключения, список использованной литературы содержит 81 название. Общий объем работы – 141 страница, работа включает 41 рисунок, 2 таблицы.

В разделе «Общая характеристика работы» сформулирована **цель, задачи** (только в автореферате) и научная новизна исследований, фактический материал и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора и апробация работы. Формулировка целей и задач в целом дает возможность понять логику исследования и последовательность действий, которые автор считает необходимым выполнить для решения поставленной проблемы.

Методика работы, а также используемые **данные и материалы** соответствуют поставленным целям и задачам и отвечают современным подходам в геодинамике и тектонофизике. Основным методом, используемым в работе, является математическое моделирование (аналитическое и численное) процессов формирования эпиplatformенных орогенов.

Диссертация характеризуется значительной **новизной**, которая связана, прежде всего, с разработанными новыми аналитическими (а также численными) геодинамическими моделями эпиplatformенного орогенеза, которые позволяют объяснить наблюдаемые для эпиplatformенных орогенов особенности напряженно-деформированного состояния. Показана значительная роль денудационно-аккумуляционных процессов, а также параметров модели в формировании распределения напряжённого состояния и движений в орогенах. Использованный «эволюционный» метод позволил в аналитической форме получить решение для нестационарных моделей с геометрически нелинейной деформацией во времени.

Во **введении** дается современное состояние проблемы и обоснована **актуальность** работы, которая обусловлена тем, что в настоящее время не существует единой геодинамической модели формирования эпиplatformенных орогенов. Кратко описаны

существующие варианты объяснения их формирования. Очень кратко приводятся данные по особенностям напряженно-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов (режим горизонтального сжатия для хребтов и горизонтального растяжения для впадин), которые являются основным материалом для верификации предлагаемых в работе моделей. Далее в работе рассматриваются два основных механизма формирования напряженно-деформированного состояния Центральноазиатских орогенов: маломасштабная астеносферная конвекция или давление со стороны Индийской плиты в результате коллизии.

В главе 1 описывается аналитическое описание напряженно-деформированного состояния двуслойной (кора – мантийная литосфера) вязкой среды при задании возмущения вектора скорости смещения на нижней границе модели. Приводится постановка задачи, описывается методика построения решения. Приводятся результаты расчёта напряженно-деформированного состояния двуслойной вязкой среды под воздействием гармонического возмущения (скорости, напряжений) в стационарном случае. Затем приводится процедура для нестационарного решения. Проводится исследование влияния вариации параметров модели на эволюцию напряженно-деформированного состояния модели. В результате показано, что двуслойные вязкие модели литосферы с одним скачком плотности (кора-мантия) с гармонической нагрузкой на подошве приводят к нелинейному процессу течения с формированием инверсии вертикальных движений на кровле коры, в результате которых на стадии стабилизации деформирования над опусканием и поднятием подошвы двуслоя – литосферы возникает поднятие – горы и опускание – впадина соответственно. Режим нагружения литосферы в виде маломасштабной конвекции в астеносфере приводит к формированию напряженного состояния преимущественно горизонтального сжатия в коре поднятия и растяжения в коре прогиба, что соответствует тектонофизическим данным о природных напряжениях.

Изложенный в главе 1 (а также в главе 4) материал позволяет сформулировать **первое** защищаемое положение, которое представляется в достаточной степени **обоснованным и доказанным**.

Глава 2 посвящена рассмотрению влияния экзогенных процессов на динамику модели и на напряженно-деформированное состояние. Рассмотрены две модели экзогенных процессов, условно названные «денудационной» и «эрозионной», которые определяются разными характеристиками рельефа – его амплитудой и наклоном, соответственно, и описываются разными уравнениями.

Сначала рассматривается модель денудации и проводится формализация влияния поверхностных процессов по этой модели. Получено общее решение задачи с учётом влияния экзогенных процессов денудационного типа. Затем описана «эрозионная» модель. Проводится исследование структуры движения вещества и напряженного

состояния полученных частных решений (при принятых в работе значениях параметров) для каждой модели. Рассмотрен также (с применением численного моделирования) денудационный механизм формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия для модели с упруго-пластической реологией. Далее, проводится учёт влияния упругой сжимаемости, вводимой в модели с реологией вязкого тела Ньютона.

В результате показано, что введение экзогенных процессов в рассмотренные ранее модели существенно влияют на динамику: приводят к замедлению формирования рельефа, но сопровождаются при этом ускорением процесса деформации коры и увеличением интенсивности внутрикоровых напряжений. При этом рассмотренные денудационная и эрозионная модели дали принципиально различные результаты как по строению формирующегося в коре напряжённо-деформированного состояния, так и по абсолютным значениям рассчитанных напряжений. Эти результаты получены как в вязких, упруго-вязких, так и в упруго-пластических моделях.

Изложенный в главе 2 материал позволяет сформулировать **второе** защищаемое положение, которое представляется в достаточной степени **обоснованным и доказанным**.

В главе 3 представлена математическая модель формирования напряжённо-деформированного состояния, возникающего в условиях потери устойчивости и последующей активной деформации земной коры в условиях горизонтального сжатия (вызванного, например, коллизионным взаимодействием Индостан - Евразия). Описаны постановка и решение краевой задачи для двуслойной коры (упругая верхняя, вязкая нижняя) и вязкой мантии. Деформации верхней коры рассматриваются здесь в рамках теории изгиба упругих тонких пластин, в сочетании с влиянием деформации вязкой части модели.

В результате показано, что для модели формирования напряжённо-деформированного состояния континентальной литосферы при потере устойчивости верхней коры в условиях горизонтального сокращения (т.н. модель общелитосферной складки) в земной коре формируется обстановка горизонтального сжатия как в области хребтов орогена, так и межгорных впадин, что не соответствует природным данным, используемым для верификации.

Материал третьей главы лег в основу **третьего** защищаемого положения, которое является вполне **обоснованным и доказанным**.

В главе 4 рассмотрено более сложная модель напряжённо-деформированного состояния системы литосфера-астеносфера в трёхслойном вязком приближении с термогравитационной конвекцией в нижнем слое под влиянием заданного термического градиента. Т.е. в данной главе произведён переход от механической задачи к термомеханической, а термогравитационная конвекция в мантии (источник напряжений и

деформаций в коре и мантийной литосфере согласно принятому в работе подходу) непосредственно введена в состав модели как процесс в нижнем слое. Дается постановка задачи и приводится методика построения аналитического (довольно сложного) решения. Результаты моделирования по структуре напряжённого состояния в целом продемонстрировали соответствие с более простыми моделями, рассмотренными в главах 1 и 2, но при этом позволили автору детализировать структуру эволюции модели, выявив наличие специфических колебательных процессов в системе литосфера/астеносфера.

Важным представляется основной вывод главы о том, что из-за наличия двух скачков плотности (кора-мантия, литосфера-астеносфера) маломасштабная конвекция в астеносфере приводит в рамках данной постановки к двукратной инверсии вертикальных движений в коре и литосферной мантии.

Как уже отмечено выше, результаты главы 4, совместно с результатами главы 1, обосновывает **первое** защищаемое положение.

В заключении формулируются основные результаты диссертации. Работа производит в целом хорошее впечатление. Полученные в работе результаты имеют несомненное **практическое значение**, т.к. они могут быть использованы при создании численных геодинамических моделей формирования эпиплатформенных орогенов, а также при интерпретации тектонофизических данных и решения обратных задач геодинамики.

Однако к работе есть весьма существенные замечания.

В диссертации приводятся только цель работы, но нет задач (они приводятся только в автореферате). Раздел «Общая характеристика работы» содержит информацию, которую обычно приводят во Введении к диссертации. А вот раздел Введение лучше было бы преобразовать в отдельную главу 1 (например, «Состояние проблемы»). В такой главе было бы желательно при перечислении вариантов формирования эпиплатформенных орогенов дать ссылки по каждому из них. В этом разделе описание ключевых данных по напряженному состоянию орогенов, которые являются основным материалом при верификации моделей, явно недостаточно подробное. Кроме того, неясно, для каких глубин получены эти данные, а это весьма важно, т.к. напряженное состояние в полученных в работе результатах меняется с глубиной, и весьма значительно.

Основным недостатком работы, из которого следуют многие другие, является не вполне достаточное обоснование постулатов работы принятыми в современной геодинамике положениями (конечно, тоже не бесспорными).

Одним из ключевых понятий в работе (источником напряжений в коре и литосфере) является «маломасштабная конвекция в астеносфере», однако не вполне понятно, что это и каковы ее параметры.

В работе явно недостаточное (практически отсутствует, нет ссылок) обоснование выбора параметров моделей (как представляется, не всегда адекватных). Так, принимаемые в моделях значения мощности подкоровой (мантийной) литосферы (50-60 км) представляются довольно низкими для континентов. Принимаемая вязкость коры $\sim 10^{22}$ Па·с, а мантийной литосферы - 10^{20} Па·с, что представляется достаточно странным (т.к. в общем литосфера имеет большую прочность, чем кора). Во всяком случае, все это надо обосновывать. Кроме того, возникает вопрос, насколько существенно эти значения для результатов? Сохранится ли характер движений и напряжённого состояния, если принять вязкость литосферы большей (она может быть до 10^{24} - 10^{25} Па·с)?

Совсем не факт, что сейсмические границы (Мохо, Конарда), которые в работе служат границами слоев модели, можно прямо сопоставлять с реологическими, которые скорее более важны для данной работы. Вообще, природа границ слоев в Земле - это отдельная тема, и в настоящей работе в сопоставлении именно с сейсмическими границами нет необходимости.

Некоторое удивление вызывает «денудационная» модель экзогенных процессов. В работе сказано, что она предполагает «максимальную скорость денудации для наиболее приподнятой формы рельефа», а размерность коэффициента 1/год. Однако уравнение для ее описания (2.1) - фактически уравнение диффузии, и максимальная скорость денудации будет в областях наибольшей кривизны (вторая производная) рельефа, которые совсем не обязательно совпадают с максимальными амплитудами. Кроме того, анализ размерности показывает, что коэффициент в уравнении (2.1.) имеет размерность $\text{м}^2/\text{с}$.

В главе 3 рассмотрена задача о потере устойчивости только верхней упругой коры, но названо это моделью общелитосферной складки. Отметим, что это только одна из возможных "плитотектонических" моделей (которые в работе неявно критикуются), есть и более сложные (но это выходит за рамки работы).

Есть и ряд менее существенных недостатков. Следует отменить огромное количество переменных и параметров, которые зачастую плохо описаны, или даже не описаны совсем, приходится догадываться, что не всегда легко сделать. Также описание, оформление и подписи к рисункам зачастую оставляют желать лучшего. Подробность выкладок зачастую излишняя. Хотя работа написана неплохим научным языком, стиль изложения порой довольно тяжелый, в том числе это касается и формулировки защищаемых положений. В тексте есть повторы некоторых абзацев в разных разделах. Структура и названия разделов в содержании и в самой работе несколько различаются.

Однако указанные недостатки, хотя и несколько портят впечатление от работы, не умаляют значимости диссертационного исследования. В целом все результаты, выводы, полученные в работе, а также положения, выносимые на защиту, являются в достаточной степени обоснованными и достоверными.

Диссертация Д.С. Мягкова представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Автореферат в основном соответствует содержанию диссертации. Полученные результаты прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях и совещаниях. По теме диссертации опубликовано (лично и в соавторстве) 23 работы, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых». Эти научные публикации в полной мере отражают содержание исследований, основные выводы и защищаемые положения диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Личный вклад автора отражен в работе в полной мере. Результаты диссертации могут использоваться при построении геодинамических моделей эпиплатформенных орогенов.

Диссертация Д.С. Мягкова выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей существенное значение при интерпретации геофизических и тектонофизических данных для эпиплатформенных орогенов.

Диссертация Д.С. Мягкова соответствует критериям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Мягков Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Я, Захаров Владимир Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент
профессор кафедры динамической геологии геологического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
доктор геолого-минералогических наук, доцент *MS* Захаров Владимир Сергеевич

Тел.: (495) 9392551, e-mail: zakharov@geol.msu.ru
Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1



Подпись *Захарова ВС* заверяю
Зав. канцелярией геологического ф-та
М.Г. Вебер
М.Г. Вебер

12 сентября 2022 г.