

## **О Т З Ы В**

### **официального оппонента**

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

### **Актуальность исследований. Объект и предмет исследований.**

Диссертационная работа Д.С. Мягкова посвящена изучению методами математического моделирования особенностей напряжённо-деформированного состояния, возникающего под влиянием разных геодинамических процессов, которыми объясняется формирование эпиплатформенных орогенов Центральной Азии. Следует отметить, что существует огромное количество публикаций, посвященных геологическим и тектонофизическим исследованиям эпиплатформенных горных областей Центральной Азии. Предложены некоторые схемы, основанные на отдельных наблюдениях, которыми предлагают объяснить механизм их формирования. Вместе с тем, до сих пор не найден единый механизм, объясняющий одновременно эмпирические данные и о геологических структурах, и о напряженно-деформированном состоянии эпиплатформенных орогенов, что свидетельствует о том, что выбранная Д.С. Мягковым тема диссертации является **актуальной**.

Поставленные диссертантом **цели и задачи диссертационной работы** соответствуют современным тенденциям в исследованиях источников, внешних и внутренних причин орогенеза, в том числе и центральноазиатского. При этом автором решен комплекс важных задач, обеспечивающий полное достижение поставленной в диссертационном исследовании цели, направленных на всесторонне обоснование тектонофизической модели формирования эпиплатформенных орогенов Центральной Азии, объясняющей также формирование их напряженного состояния.

**Анализ публикаций** диссертанта показал, что основные результаты диссертационной работы опубликованы в 23 печатных работах в российских научных журналах, материалах международных и всероссийских конференций. В их числе **три статьи** в журнале «Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле» и **одна статья** в журнале «Геодинамика и тектонофизика» (индексируется в международной базе SCOPUS), входящих в **Перечень рецензируемых научных изданий**, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на

соискание ученой степени доктора наук, 8 статей в материалах международных и всероссийских конференций, а также 11 тезисов международных и всероссийских конференций. В указанных публикациях достаточно полно изложены основные научные результаты диссертации.

Материалы диссертационной работы прошли апробацию на 19 научных конференциях различного уровня (международных, всероссийских и региональных) в Москве, Иркутске, Апатитах, Бишкеке, на Алтае. Стоит отметить, что конкретного списка конференций в автореферате не указано, о нем можно судить только по списку основных публикаций по теме диссертации, указанному в автореферате.

Диссертация состоит из общей характеристики работы, введения, четырех глав, заключения, списка литературы и имеет общий объем 141 страницу. Список литературы содержит 81 источник.

**В общей характеристике работы** сформулированы цель, задачи исследования, определена новизна и изложены научные положения, выносимые на защиту.

**Во введении** содержится литературный обзор по теме исследования.

**Первая глава** «Аналитический расчёт напряжённо-деформированного состояния двуслойной вязкой среды при задании возмущения вектора скорости смещения на нижней границе модели» посвящена созданию первой из двух базовых моделей диссертации – модели формирования напряжённо-деформированного состояния континентальной литосферы под воздействием заданного гармонического распределения вектора скорости на подошве модели, имитирующего воздействие мелкомасштабной астеносферной конвекции. Изучение результатов моделирования позволяет установить как зависимость уровня напряжений в земной коре и верхней мантии от амплитуды скорости, заданной на подошве модели, так и изучить структуру напряжённого состояния в литосфере. Также изучен колебательный режим движения в изучаемых объектах, возникающий за счёт стремления к достижению изостазии.

**Вторая глава** «Экзогенные процессы» посвящена изучению влияния поверхностных (денудационно-аккумулятивных) процессов на напряжённое состояние земной коры. Отдельно рассмотрен вопрос о влиянии формы учёта поверхностных процессов в рамках математического моделирования. Рассмотрены две принципиально различные математические формулы для учёта поверхностных процессов, которые соответствуют денудации горных поднятий и эрозии склонов. Исследование проведено на базе модели предыдущей главы. Показано, что учет экзогенных процессов приводит к существенному росту скорости движения вещества модели и, соответственно, уровня

напряжений. Отдельно выделена модель формирования аномальных напряжений гравитационного сжатия, которая создана на основе упругопластической модели земной коры с применением конечно-разностного метода. Аномалия гравитационного сжатия напрямую не связана с эндогенными процессами и потому данный механизм является экзогенным механизмом генерации коровых напряжений. Показано, что уровень данных напряжений может достигать первых десятков МПа.

**Третья глава** «Задача о формировании напряжённо-деформированного состояния литосферы в обстановке горизонтального сжатия» посвящена созданию второй базовой модели диссертации – модели формирования напряжённо-деформированного состояния литосферы в условиях латерального сокращения литосферы и вызванной им потери устойчивости упругой верхней коры. Данная модель соответствует классической концепции формирования эпиплатформенных орогенов за счёт передачи напряжений от Индийской плиты. Так же, как и в первой главе, исследован режим деформации модели и особенности формирующегося поля напряжений.

**Четвёртая глава** «Напряжённо-деформированное состояние системы литосфера-астеносфера в приближении трёхслойной вязкой модели с термогравитационной конвекцией в нижнем слое» посвящена более усложнённой версии модели с астеносферной конвекцией из первой главы. В этой главе произведён переход от механической модели к термомеханической, в модель дополнительно вводится астеносфера, рассчитывается астеносферная конвекция. Благодаря этому стало возможно гораздо точнее изучить колебательный режим литосферы под влиянием астеносферной конвекции.

Анализируя выполненное исследование в целом, можно отметить качественно выполненные аналитические и численные исследования. Все главы диссертации содержат **новые научные результаты** о характере формирующегося поля напряжений и внутреннего течения в литосфере, полученные автором в ходе выполнения диссертационного исследования. Это стало возможным благодаря **оригинальным геодинамическим моделям** эпиплатформенного орогенеза, предложенным в диссертации. **Впервые** в расчетах удалось показать, что учет денудационно-аккумуляционных процессов разного типа оказывает сильное влияние на формирующееся напряжённо-деформированное состояние земной коры, а за счет воздействия денудационных процессов возможно формирование аномальных сжимающих горизонтальных напряжений. Все это подчеркивает **научную новизну и значение** выполненного исследования.

**Значимость** полученных результатов для науки определяется вскрытыми закономерностями формирования напряжённо-деформированного состояния литосферы под влиянием рассмотренных в диссертации геодинамических процессов. Эта информация чрезвычайно востребована при интерпретации тектонофизических данных и решения обратных задач геодинамики. Предложенные геодинамические модели, а также полученные оценки напряжений и скоростей течений в зонах орогенов могут быть непосредственно использованы для повышения точности решения задач в геолого-геофизических и научных организациях, что определяет **практическую значимость работы и перспективы развития** данного направления.

**Обоснованность научных положений, сделанных выводов и рекомендаций** убедительно доказана математической корректностью построенных моделей, соответствием полученных результатов о параметрах напряженного состояния имеющимся тектонофизическим данным о современном напряженном состоянии орогенов Центральной Азии, другим природным данным, соотносением всего материала рецензируемой работы с наработками других авторов.

Использование в диссертационном исследовании Д.С. Мягкова проверенных аналитических и численных методов решения задач геомеханики, пространственное, качественное и количественное соответствие полученных распределений напряжений и эволюции рельефа дневной поверхности и границ раздела литосферы природным наблюдениям и общим геофизическим представлениям позволяют считать **полученные результаты достоверными**.

Вместе с тем, не смотря на вышеизложенное, по диссертационной работе можно сделать следующие **замечания, поставить вопросы**:

1. Чем обусловлен выбор значений вязкости для коры и мантии в базовом наборе параметров, а также временные промежутки для моделирования? Определятся ли это значениями получаемых напряжений или привязкой к орогенам Центральной Азии?

2. В диссертации отсутствует четкое обоснование привязки цели работы к эпиплатформенным орогенам именно Центральной Азии. Насколько это важно для интерпретации полученных результатов?

3. На стр. 18 диссертации написано «Так как в данном исследовании идёт речь только о сверхмедленных деформациях, по сути – квазистационарных, то здесь пренебрегается вкладом упругости в формирование напряжённо-деформированного состояния модели и рассматриваться будут исключительно вязкие процессы». С этим обоснованием трудно согласиться. Можно рассматривать формирование напряжённо-

деформированного состояния при квазистационарных процессах и на основе упругости.

4. На стр. 20 для шаровой части тензора напряжений записано выражение  $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/2$ , но шаровая часть обычно определяется выражением  $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ . Это вряд ли сильно повлияло на полученные решения, но не понятно, почему было выбрано именно такое выражение.

5. Не разъяснено, какая плоская задача решалась автором: о плоском деформированном или плоском напряженном состоянии?

6. Имеются также замечания по оформлению. Встречаются несогласованные фразы типа «объём работы составил 141 листа, 41 рисунка». Уравнение (4) в автореферате записано с опечаткой и не соответствует уравнению (1.8) в диссертации, в котором следовало использовать разные обозначения в индексах, учитывая, что суммирование идет по повторяющимся индексам. В формулах (1.12) в выражении для  $\tau_{\max}$  должно стоять не промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$ , а минимальное главное напряжение  $\sigma_3$ . На стр. 49 в разделе 1.4 написано «определённый в предыдущем разделе коэффициент скорости денудации  $\lambda$ », но этот параметр определяется позже, только в следующей главе на странице 59. На странице 59 автор ссылается на формулу (1.35), которой нет, по смыслу ей соответствует формула (2.1). В списке литературы иногда присутствует неполное библиографическое описание, например [35] – не указано ни тома, ни страниц. В автореферате встречаются многочисленные ссылки на литературу, а соответствующий список литературы отсутствует, встречаются ссылки на отсутствующие рисунки, например на рис. 32 на стр. 15 или на неправильной номер рисунка, судя по соответствующему описанию.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки всей работы, не позволяют усомниться в достоверности полученных результатов, научная новизна и значимость которых для науки несомненны.

Оценивая содержание работы в целом, следует отметить, что данная диссертация представляет собой завершённое исследование, выполненное на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация написана подробно, доходчиво, хорошо оформлена.

**Автореферат достаточно полно отражает содержание, основные идеи и выводы диссертации.**

Считаю, что диссертационная работа Мягкова Дмитрия Сергеевича «Исследование формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов методом математического моделирования» соответствует

паспорту специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит решение задачи математического моделирования геодинамических процессов и напряженно-деформированного состояния земной коры в зонах орогенов в рамках вязких и упругопластических моделей, имеющей существенное значение для изучения геофизических проявлений напряженного состояния недр Земли и оценки их напряженного состояния по геофизическим данным.

**Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор Дмитрий Сергеевич Мягков достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.**

Я, Смолин Игорь Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
доктор физ.-мат. наук, доцент

 Смолин Игорь Юрьевич

634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/4,  
тел. 8(3822) 286875, e-mail: smolin@ispms.ru

5 сентября 2022 года

Подпись Смолина И.Ю. подтверждаю  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН  
кандидат физико-математических наук

 Матолыгина Наталья Юрьевна

