

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН

Института земной коры СО РАН,

чл.-корр. РАН

Д.П.Гладкочуб

«25» августа 2022 г.



ведущей организации на диссертацию

Мягкова Дмитрия Сергеевича

на тему *«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. Тема диссертационной работы принадлежит к наиболее актуальным направлениям исследований в области геодинамики, поскольку получаемые при ее разработке результаты позволяют установить закономерности глубинного строения и напряженно-деформированного состояния (НДС) крупных эпиплатформенных орогенов Центральной Азии, т.е. континентальных структур, которые характеризуются наибольшей сейсмической активностью на современном этапе тектогенеза. Метод, выбранный для решения поставленных задач – математическое моделирование, – дает возможность протестировать предложенные предшественниками механизмы формирования этих структур, а также выявить особенности их эволюционного развития и НДС в разных регионах, отличающихся параметрами деформирования и строения континентальной литосферы.

Цель и задачи. В целом исследование, ориентированное на установление закономерностей эволюции эпиплатформенных орогенов посредством создания серии аналитических и численных моделей, следует считать успешно выполненным. Поставленные задачи решены полностью, хотя к форме представления результатов имеются замечания, отмеченные в заключительной части отзыва.

Новизна исследования и результатов, представленных в диссертации. Результаты работ соискателя характеризуются элементами научной новизны как в собственно исследовательской части, так и в создании методических подходов к математическому моделированию длительных и крупномасштабных геодинамических процессов.

Соискателем разработана серия новых аналитических моделей эпиплатформенного орогенеза, которые в плане механизма формирования горных сооружений относятся к двум группам. В рамках первой из них основной движущей силой внутриконтинентального орогенеза является горизонтальное сжатие, источником которого в природных условиях может быть, к примеру, давление одной литосферной плиты на другую. Для второй, наиболее проработанной группы моделей, в качестве движущего механизма деструкции привлекается маломасштабная термогравитационная конвекция в астеносфере, причем показывается, что и экзогенный фактор (в виде эрозии и денудации) является значимым в формировании НДС эпиплатформенных орогенов.

В методическом отношении в качестве элемента новизны следует отметить примененный соискателем алгоритм использования серии частных аналитических моделей для последовательного получения общего нестационарного решения. Данный алгоритм реализован в рамках задачи о формировании НДС литосферы под влиянием термогравитационной конвекции в астеносфере, что позволило более детально исследовать математическую модель эпиплатформенного орогена на предмет этапности формирования его структуры и эволюции напряженного состояния.

Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов. Исследование формирования НДС эпиплатформенных орогенов, проведенное методом математического моделирования имеет научное значение в плане верификации существующих гипотез о механизмах и энергетических источниках деструкции твердой оболочки Земли. Значимость полученных соискателем результатов определяется непосредственно тем, что решенные им аналитические задачи позволили установить вклады целой серии факторов, которые играют определяющую роль в формировании напряжённого-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов. При этом он расширил круг математических моделей, опытом создания которых могут в дальнейшем воспользоваться специалисты, работающие в области вычислительной тектонофизики и геодинамики.

Оценка содержания диссертации. Работа Д.С.Мягкова является завершённым научным исследованием, представленным в диссертации, объём которой составляет 141 страницу, включая 41 рисунок и 2 таблицы.

Раздел «Общая характеристика работы» содержит краткое описание исследования, которое представлено в соответствии с принятой для диссертации рубрикацией. Содержание подразделов свидетельствует о четкой организации исследования, автор которого представил актуальность работы, цели и задачи,

охарактеризовал фактический материал и личный вклад, отразил научную новизну, теоретическую и практическую значимость результатов. Здесь же сформулировано 3 положения, которые соискатель выносит на защиту. Содержательная часть разделов не вызывает серьезных замечаний.

В разделе «Введение» автор приводит краткий обзор исследований, посвященных строению эпиплатформенных орогенов. Констатирует существование серии моделей их формирования, главными из которых являются те, где задействован внешний энергетический, в частности, термогравитационная маломасштабная конвекция в астеносфере или субгоризонтально ориентированное давление на плиту со стороны смежных плит. Именно эти механизмы выбираются для математического моделирования с целью оценки степени их соответствия природным данным. Основным критерием для верификации моделей является напряженно-деформированное состояние литосферы, восстановленное ранее Ю.Л.Ребецким и Р.С.Алексеевым для Тянь-Шаня и Алтая на базе тектонофизических реконструкций и характеризующееся преобладанием обстановки горизонтального сжатия в хребтах и горизонтального растяжения – во впадинах.

Как следует из краткой характеристики раздела «Введение», автор попытался кратко изложить в нем и обзор проблемы, и представления предшественников, и описание объекта исследований. Вместе с тем, для этого целесообразно было бы отвести отдельную – первую – главу, а во «Введение» переименовать раздел, который идет в диссертации под названием «Общая характеристика работы». В представленном виде ограниченный объем «Введения» не позволил автору более полно описать подходы и результаты математического моделирования, проведенного предшественниками для исследования структуры и напряженного состояния континентальной литосферы при разных механизмах нагружения (в частности, в условиях субгоризонтального сжатия), что необходимо для полноценного обсуждения результатов, полученных в ходе собственных модельных построений.

Кроме того, в этой отдельной главе следовало бы уделить особое внимание расширенному описанию объекта исследований – эпиплатформенным орогенам: наличие корней-антикорней, соотношения мощностей коры, литосферы, астеносферы и пр. В представленном виде они лишь названы, плюс для Тянь-Шаня и Алтая приведены реконструкции напряженного состояния, которые призваны показать доминирование обстановки горизонтального сжатия в области поднятий, а также растяжения и сдвига – под впадинами. Вместе с тем, эта ключевая закономерность, используемая для разбраковки механизмов деформирования литосферы орогенов, тестируемых автором

при моделировании, не является очевидной по представленным иллюстрациям (рис. 1, 2). На них не обозначены поднятия и впадины, а цветовая гамма трехмерной модели рельефа во многом скрыта нанесенными сверху непрозрачными квадратиками, которые отражают результат реконструкции поля напряжений. Доминирование на гистограммах-врезках полей сдвига и сжатия над растяжением, а главное – существование в хребтах достаточно больших участков растяжения и сдвига, а во впадинах – сжатия, безусловно, требует более показательной иллюстрации и подробного описания той закономерности напряженного состояния орогенов, которая закладывается в основу интерпретации данных моделирования.

В главе 1 представлены результаты решения задачи для модели литосферы, отдельные слои которой – земная кора и надастеносферная мантия – представлены в виде несжимаемых тел Ньютона, отличающихся по вязкости на два порядка. Конвекция в астеносфере, приводящая к деформации литосферы, в данной аналитической задаче не воспроизводится напрямую, а задается в виде скоростей течения мантийного вещества через или вдоль подошвы модели. Результаты моделирования в целом соответствуют принятым автором закономерностям строения и напряженного состояния природных орогенов. Это позволило соискателю сделать вывод об их образовании вследствие маломасштабной конвекции в астеносфере и, как следствие, установить и описать этапы деформационного процесса, полученные в ходе решения задачи. Более того, именно на примере данной модели автор диссертации исследовал зависимость полученного решения от значений ее основных параметров (мощности, вязкости и плотности слоев, характеристик основного возмущения), т.е. в полной мере реализовал одно из главных преимуществ математического моделирования.

В главе 2 рассмотрены результаты решения задач, в которых при создании аналитических и численных моделей литосферы учитывается воздействие экзогенных процессов – денудации и эрозии, – широко проявленных в горных сооружениях. Влияние этих процессов моделируется путем введения в расчеты дополнительного граничного условия на дневной поверхности. Результаты расчетов свидетельствуют о принципиально разных НДС, полученных в рамках денудационной и эрозионной моделей. В плане состояния поля напряжений ассоциация горизонтального сжатия с поднятиями и растяжения с опусканиями получена для первой из них, тогда как для второй наблюдается обратная картина. Вместе с тем, обе модели свидетельствуют о необходимости учета экзогенной нагрузки в моделях формирования орогенов, т.к. она не ограничивается близповерхностным воздействием. Убедительно показано, что вследствие денудации и замедления процесса рельефообразования в толще земной

коры под влиянием увеличения интенсивности напряжений происходит ускорение процесса деформации.

Особняком в главе 2 стоит воспроизведение денудационного механизма формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия, т.к. в отличие от остальных задач здесь используется численная модель, конечно-разностная схема Ю.П. Стефанова, а реология литосферных слоев задается в рамках неассоциированного закона пластического течения Друккера-Прагера-Николаевского. Вместе с тем, этот вид моделирования позволил получить НДС, близкое к природному. Кроме того, результаты численного эксперимента подтвердили необходимость учета в авторских расчетах более сложной реологии. Это и было сделано соискателем в заключительном разделе главы 2 за счет ввода упругости в вязкую модель деформации литосферы под действием маломасштабной конвекции.

Глава 3 является единственной в диссертации, где решается задача о формировании напряжённо-деформированного состояния литосферы в обстановке горизонтального сжатия, инициированного боковым давлением. По мнению соискателя, при взаимодействии плит основная часть силового воздействия передаётся через упругую верхнюю часть коры. Это дает ему основание сформировать модель из трех слоев – одного упругого и двух вязких. Первый из них соответствует верхней коре, второй – средней и нижней коре, а третий – мантии без ее разделения на литосферную и астеносферную части. Деформация упругого слоя рассматривается в рамках теории балок. В отличие от задач с астеносферной конвекцией именно потеря устойчивости верхней коры (балки) является причиной деформаций в «вязкой части» модели литосферы. Результаты расчетов свидетельствуют об отсутствии в итоговой картине инверсионных эффектов, а НДС свидетельствует о горизонтальном сжатии под поднятиями и растяжении – под впадинами только в нижней части модели. Как следствие, соискатель делает вывод о том, что созданная модель не может быть принята для объяснения механизма формирования эпиплатформенных орогенов.

В главе 4 рассматривается модель эпиплатформенного орогена, подобная представленной в главе 1, но с воспроизведением термогравитационной конвекции в нижнем слое, который, как и два верхних литосферных слоя, является вязким. Это в совокупности с наличием дополнительной плотностной границы литосфера-астеностфера, по свидетельству автора, принципиально не изменило напряженное состояние в модели, но позволило провести более детальное исследование ее деформации во времени. Установлено, что процесс протекает в три этапа с двумя инверсиями вертикальных движений, количество которых определяется числом,

соответственно, подвижных и внутренних границ, имеющих в модели. Анализ модели, представленной в заключительной главе, позволил повысить достоверность выявленных ранее закономерностей и, таким образом, приблизить результаты математического моделирования к реальной картине эволюции эпиплатформенных орогенов.

В заключении к диссертации на двух страницах изложены главные выводы проведенной работы, которые, не дублируя защищаемых положений, в концентрированном виде представляют главные результаты исследований соискателя.

Замечания по диссертации сводятся к следующему.

1. В работе недостаточно полно представлен объект исследования – эпиплатформенные орогены Центральной Азии. Как уже отмечалось в основной части отзыва, это можно было бы сделать в первой главе работы, причем, кроме описания характерных особенностей природных орогенов, здесь же было бы уместно сформировать представление об обобщенном объекте моделирования, его принципиальном строении, главных параметрах, а также граничных условиях, которые предполагается задать для моделей, рассматриваемых ниже в отдельных главах. В работе приводится набор базовых параметров (мощности, плотности, вязкости слоев), но они различны в автореферате (с.13) и в диссертации (с. 26). При этом нет подробного обсуждения со ссылками на литературные источники, почему были выбраны именно эти значения, а также и некоторые другие количественные характеристики граничных условий для моделирования. В такой вводной главе было бы уместно охарактеризовать реологию слоев обобщенного объекта и причины, по которым в отдельных задачах она различна даже в тех случаях, когда модели сравниваются на предмет решения вопроса об источнике тектогенеза – астеносферная конвекция или субгоризонтальное сжатие. Наличие главы с подобной информацией придало бы работе по математическому моделированию большую строгость, прочно объединив задачи, рассматриваемые в отдельных главах, в одно логичное исследование.

2. В оглавлении к работе нет единства в названиях отдельных глав. Наряду с «Аналитическим расчетом...» (Глава 1), «Задачей о формировании...» (Глава 3) и «Напряженно-деформированным состоянием...» (Глава 4) фигурируют «Экзогенные процессы» (Глава 3). Названия и страницы некоторых разделов отличаются в оглавлении и в самой диссертации (например, раздел 2.4).

3. К тексту диссертации есть серия редакционных замечаний. В терминологическом отношении обращают на себя внимание такие не очень удачные

выражения, как «методы объяснения структур», «ускорение скорости», «тело орогена», «плоская часть платформы», «строение напряжённого состояния» и другие. В некоторых предложениях слова не согласуются, что имеет место и во вводной части диссертации с ключевыми определениями. Наряду с пропусками текста (с.7 – перечень конференций) присутствуют и повторы (например, с.15 и с.55).

4. Список литературы содержит 80 источников. В целом он выполнил свою роль по дополнительной аргументации исследований соискателя, хотя не все ключевые публикации, упомянутые в тексте, нашли в нем свое отражение (например, [Ребецкий, 2008] или [Ребецкий, Алексеев, 2015]. Кроме того, не совсем понятно, почему в одних случаях автор диссертации ссылается на английские версии статей из российского журнала «Геология и геофизика» (№№ 32, 43, 46, 63, 73, 76 и др.), а в других – на русские (№№ 5, 6, 20, 23).

5. К оформлению рисунков существенных замечаний нет, но ссылки на них сделаны не всегда удобно для иллюстрации текста. Иногда рисунок помещен до ссылки, есть путаница в номерах, что можно проиллюстрировать примерами из автореферата: ссылки на с.9, 13, 15 и 21. Основным замечанием к иллюстрированности текста диссертации является недостаток рисунков в заключительной четвертой главе, где описана итоговая модель формирования орогена под действием конвекции в астеносфере. В отличие от других моделей, здесь в качестве основных рисунков представлены эволюционные кривые и скорости течения вещества, но нет распределений нормальных и касательных напряжений с нанесенными на них ориентировками оси сжатия, что несколько затрудняет полноценное восприятие результатов.

Отмеченные выше недостатки относятся к форме представления в диссертации материалов проведенного исследования. Они осложняют прочтение работы, но не касаются сути полученных результатов, которые опубликованы в рецензируемых научных изданиях и представляются обоснованными. Автореферат соответствует тексту диссертации.

В целом работа «Исследование формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов методом математического моделирования» выполнена лично соискателем ученой степени и является завершённым научно-квалификационным исследованием. Она обладает научной новизной и содержит решение задачи построения серии новых математических моделей эпиплатформенного орогенеза, которые имеют значение для углубленного понимания механизмов

деструкции литосферы, а также оценки динамических обстановок проявления тектонического процесса.

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/доктора наук, а её автор – Мягков Дмитрий Сергеевич – достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

«Я, Семинский Константин Жанович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.»

Заведующий лабораторией тектонофизики

ФГБУН Института земной коры СО РАН,

доктор геол.-мин. наук

К.Ж.Семинский

Семинский Константин Жанович
664033, г.Иркутск, ул.Лермонтова, д.128
Федеральное государственное учреждение науки
Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук
E-mail: seminsky@crust.irk.ru
Тел.: 8 914 871 1859

Отзыв рассмотрен и обсужден на заседании Ученого совета ФГБУН Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), одним из направлений научной деятельности которого являются исследования в области геофизики и тектонофизики, 25 августа 2022 г. (протокол № 7) и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Председатель Ученого совета ИЗК СО РАН,

чл.-корр. РАН

Д.П.Гладкочуб

Подписи К.Ж.Семинского и Д.П.Гладкочува заверяю.

Подпись <i>Семинского К.Ж.</i>	Заверяю
<i>Гладкочува Д.П.</i>	
Ведущий инспектор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук	
Тыркова М.Г.	
«25»	2022 г.

