

на правах рукописи



МЯГКОВ Дмитрий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭПИПЛАТФОРМЕННЫХ
ОРОГЕНОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2022

Работа выполнена в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель **Ребецкий Юрий Леонидович** - доктор физико-математических наук, г.н.с., И.О. заведующего лабораторией фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Смолин Игорь Юрьевич** – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;

Захаров Владимир Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры динамической геологии Геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.**


Защита диссертации состоится **29 сентября 2022 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта по адресу: г. Москва, Большая Грузинская ул., д.10, стр.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « ____ » августа 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа направлена на изучение путём математического моделирования структуры напряжённо-деформированного состояния, возникающего под влиянием различных геодинамических процессов, предлагаемых к объяснению формирования эпиплатформенных орогенов Центральной Азии.

Актуальность исследований

На текущий момент не существует единой геодинамической модели формирования эпиплатформенных орогенов, объясняющей не только геологические эмпирические данные, но и наблюдаемое напряжённое состояние данных структур. Согласно современным представлениям, формирование орогена связано с деформацией некоторой изначально преимущественно плоской части плиты. Существует несколько вариантов объяснения структуры и причин этого процесса: деформация литосферы под воздействием общего горизонтального сжатия, результат влияния на подошву литосферы действия астеносферной (и вообще – верхнемантийной) термогравитационной конвекции или же влияния внутренних источников энергии, таких как: наличие возможной (для разуплотнённой астеносферы) гравитационной неустойчивости в системе литосфера-астеносфера, неравновесным распределением с глубиной упругих модулей для соответствующих областей литосферы, существенной латеральной неоднородности плотности литосферы и, также, наличия внутренней энергии, связанной, к примеру, с метаморфическими и геохимическими процессами, проистекающими под воздействием тепловой энергии, поступающей из астеносферы. Поскольку на текущий момент ни один из предлагаемых методов объяснения этих структур не соответствует полностью полученным в ходе тектонофизических наблюдений данным [Ребецкий, 2015], то возникает настоятельная потребность в исследовании вкладов всех возможных факторов в формирование наблюдаемого напряжённо-деформированного состояния (НДС) эпиплатформенных орогенов.

Цели и задачи исследований

Основная цель выполненного исследования состояла в создании тектонофизической модели условий нагружения и состояния литосферы эпиплатформенных орогенов Центральной Азии, объясняющей особенности формирования его современного поля напряжений [Ребецкий, 2015]. В рамках этой темы создавались математические геодинамические модели деформации земной коры в вязкой, упруго-вязкой и упруго-пластической постановках. Полученные решения сверялись с результатами тектонофизических реконструкций напряжённого состояния Тянь-Шаня и Алтае-Саян и прочими геолого-геофизическими данными по рассматриваемым структурам, на основании чего делается вывод о степени соответствия

природным данным той или иной модели. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создание вязких аналитических моделей формирования напряжённо-деформированного состояния орогена под влиянием термогравитационной маломасштабной астеносферной конвекции и за счёт потери устойчивости в условиях общего латерального сжатия модели.

2. Усовершенствование моделей, полученных на предыдущем этапе, за счёт перехода от вязких к упруго-вязким телам.

3. Изучение формы и степени влияния экзогенных (эрозионно-аккумуляционных) процессов на эволюцию рассмотренных ранее моделей.

4. На основании анализа результатов моделирования на предыдущих этапах создание результирующей аналитической модели формирования наблюдаемого напряжённого состояния эпиплатформенных орогенов.

5. Методом численного моделирования изучить возможность формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия за счёт воздействия экзогенных процессов.

Фактический материал и методика исследований. Личный вклад автора

Для решения поставленной задачи были использованы результаты тектонофизических реконструкций, полученных сотрудниками лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН [Ребецкий, Алексеев, 2014]. Также автор ознакомился с геодинамическими моделями эпиплатформенного орогенеза, опубликованными ранее в научных рецензируемых журналах, а также с результатами физического моделирования и геолого-геофизическими данными по исследуемому региону.

Моделирование производилось методом аналитического и численного моделирования, рассматривались двумерные модели в рамках приближения механики сплошных сред. Для решения соответствующих краевых задач применялся «эволюционный» метод получения частного решения краевой задачи, заключающийся в том, что для каждого геодинамического фактора, приводящего к существенному изменению напряжённо-деформированного состояния модели решается самостоятельная стационарная подзадача, из которых формируется затем общее нестационарное решение.

Автор лично, под руководством научного руководителя, получил описанные выше аналитические решения. На основании их были созданы соответствующие аналитические модели в программной среде matlab и численные в fortran. Далее автором был произведён анализ результатов моделирования, в первую очередь – путём сопоставления с априорными тектонофизическими и геолого-геофизическими данными.

Научная новизна работы

Получены новые аналитические геодинамические модели эпиплатформенного орогенеза. Их аналитический вид позволил всесторонне изучить распределение напряжённого состояния в зависимости от реологических, механических и геометрических параметров, а также скорости поверхностных и глубинных (изостазия) процессов.

Показана существенная зависимость формирующегося напряжённо-деформированного состояния земной коры от формы денудационно-аккумуляционных процессов.

Примененный «эволюционный» метод позволил в аналитической форме получить решение для нестационарных моделей с геометрически нелинейной деформацией во времени. Успешный опыт моделирования позволяет развивать подобную методику для решения широкого круга краевых задач геодинамики.

Исследовано строение формирующегося поля напряжений, а также характер внутреннего течения в моделях. Полученные закономерности могут быть использованы в дальнейшем при построении геодинамических моделей и интерпретации геофизических и тектонофизических данных.

Защищаемые положения

1. Маломасштабная конвекция в астеносфере из-за наличия двух скачков плотности (кора-мантия, литосфера-астеносфера) приводит к двукратной инверсии вертикальных движений кровли коры, как в области поднятия – горы, так и в области опускания – межгорная впадина, с формированием на стадии стабилизации деформаций субгоризонтальных потоков корового вещества из зоны впадины в зону поднятия.
2. Поверхностные процессы денудации приводят к замедлению формирования рельефа, но сопровождаются при этом ускорением скорости течения в коре и увеличением интенсивности внутрикоровых горизонтальных сжимающих напряжений при отсутствии внешнего сокращения модели, что подтверждено как в вязких, упруго-вязких, так и в упруго-пластических моделях.
3. Из двух режимов нагружения литосферы в виде общелитосферного горизонтального сжатия и маломасштабной конвекции в астеносфере последний наиболее хорошо соответствует данным тектонофизической реконструкции природных напряжений для эпиплатформенных орогенов, объясняющий создание в верхней части коры напряжений горизонтального растяжения в зонах прогибания и сжатия в зонах поднятий альпийского типа.

Теоретическое и практическое значение

Построенные в результате проведённого исследования модели могут быть, в дальнейшем использованы при создании численных геодинамических моделей

формирования эпиплатформенных орогенов, сверка которых с аналитическими является необходимым этапом проверки численной модели на корректность. Также сами по себе полученные закономерности напряжённо-деформированного состояния литосферы, формирующееся под влиянием рассмотренных в исследовании геодинамических процессов представляет ценную информацию при интерпретации тектонофизических данных и решения обратных задач геодинамики широкого круга, не относящихся к регионам развития эпиплатформенного орогенеза.

В дальнейшем создание дополнительных моделей, аналогичным представленным в исследовании, позволит создать библиотеку базовых геодинамических моделей, необходимых для понимания как геодинамики отдельных регионов, так и глобальной. На основе таких моделей возможно будет производить и более глубокий анализ результатов численного моделирования.

Апробация работы и публикации

Результаты моделирования были представлены на 20 Всероссийских и Международных конференциях, совещаниях и семинарах: По теме диссертации опубликовано 23 работ, в том числе 4 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК и 19 тезисов конференций и статей в сборниках по материалам конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объём работы составил 141 листа, 41 рисунок, 2 таблицы. Список литературы содержит 81 источник.

Благодарности

Выражаю особую благодарность моему научному руководителю, д. ф.-м. н. Ю.Л. Ребецкому, идеи которого легли в основу работы и руководство которого не только позволило мне выполнить исследование, но и значительно расширило научный кругозор.

Также хочу поблагодарить моих коллег по лаборатории: Л.А. Сим, А.В. Маринина, А.В. Михайлову и Р.С. Алексеева, чьи исследования сформировали тот базис тектонофизической информации, на который я опирался в своей работе. Большое спасибо В.В. Погорелову, наша совместная деятельность позволила мне получить ценные знания, которые помогли мне и в текущей работе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. По эпиплатформенным орогенам Центральной Азии накоплено большое количество геологических [Хаин, Ломизе, 1995; Белоусов, 1989; Буртман, 2012; Luo et al, 2021; Zubovich et al, 2010; Vinnik et al, 2002, 2006; Burtman, 2010, 2014; Cotton, . Avouac, 1994; Didienko et al, 2010; Vladimirov, 2007, Tychkov et al, 2007; Allen et al, 1992; Goldin, Kuchai, 2007; Kroner et al, 2014; Novikov, Pospeeva, 2016; Omuralieva et al, 2009; Jiang, 2014; Yarmolyuk, 2014; Zhao et al, 2001, Li et al, 2022; Zabelina, 2013; Sun, 2021; Devlaux, 2013; Loury, 2015] и тектонофизических [Ребецкий, 2015; Ребецкий и др., 2013, 2016; Rebetsky et al., 2012] данных. С другой стороны, объясняющие механизм их формирования [Cloetingh et al., 2002; Cloething, Burov, 2011] исключительно за счет латерального сжатия, не подтверждаются современными данными о закономерностях распределения напряжений в коре [Ребецкий, 2015]. Также нет и полностью согласующихся с ними численных моделей [Mikhailov et al, 1999; Тимошкина и др., 2010; Atabekov et al 2022; Liu, 1980; J. Liu, 2007; Jourdon et al, 2017; Lei et al, 2013; Singh, Ghosh, 2020, Babichev et al, 2009;. England, .Molnar, 1997; England, Houseman, 1986; Kong, Bird, 1996; Peltzer, Saucier, 1996; Vogt. Gerya, 2014].

Существуют различные модели формирования эпиплатформенных орогенов. Принципиален вопрос о геодинамических источниках орогенеза, среди которых следует выделить внешние, по отношению к участку литосферы, где формируется ороген, и внутренние, связанные с перераспределением энергии в самом рассматриваемом участке. В качестве первых рассматриваются, в основном, термогравитационная маломасштабная конвекция в астеносфере, деформирующая вышележащую литосферу и коллизионное давление на окраины литосферной плиты со стороны иных плит, вызывающее деформацию внутренних областей плиты в обстановке горизонтального сжатия (см, напр. [Cloething, Burov, 2011, Burov et al., 2014]). Говоря об орогенах Центральной Азии имеется в виду, конечно, влияние Индийской плиты на Евразийскую. Источники второй группы – это деформации, вызванные инверсивным распределением плотности и упругих модулей в коре и литосфере [Современная геодинамика, 2005; Добрецов и др., 1995], гравитационной неустойчивостью в системе литосфера-астеносфера, существенной латеральной неоднородности плотности литосферы и, также, перераспределения внутренней энергии, связанной, к примеру, с метаморфическими и геохимическими процессами, протекающими под воздействием тепловой энергии, поступающей из астеносферы. В работах [Ребецкий, 2012, Ребецкий, Погорелов, 2013] на основе результатов решения простых аналитических моделей обсуждалась проблема несоответствия некоторых моделей процесса формирования внутриконтинентальных орогенов имеющимся тектонофизическим данным [Ребецкий, 2015]. Последние выступают в качестве ключевого источника априорных данных о напряжённом

состоянии исследуемых орогенов. На рис. 1 представлено характерное распределение геодинамического типа напряжённого состояния по телу Алтайского орогена. На нём хорошо видна общая закономерность напряжённого состояния Центральноазиатских орогенов: преобладание обстановки горизонтального сжатия в хребтах и горизонтального растяжения во впадинах. Воспроизведение в моделях этой тектонофизической закономерности является ключевой задачей исследования. Прочие геофизические данные будут использованы при подборе геометрии модели и её упруго-плотностных и реологических параметров.

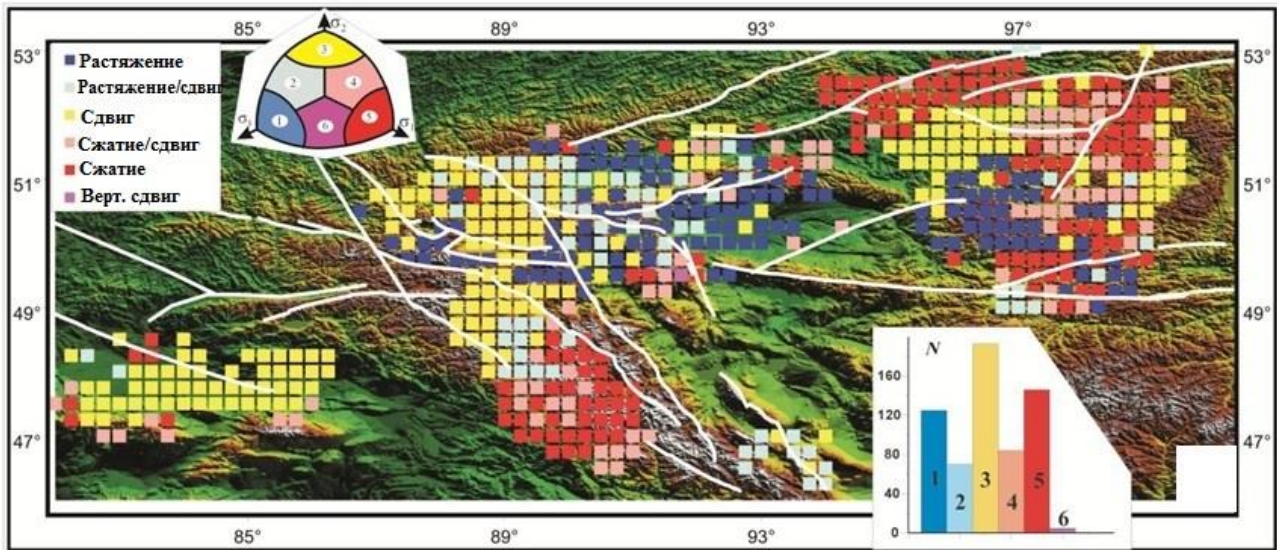


Рисунок 1 - Результаты тектонофизической реконструкции для Алтая [Ребецкий и др., 2013] На иллюстрациях показан геодинамический тип напряжённого состояния (красным – горизонтальное сжатие, синим – горизонтальное растяжение, желтым – горизонтальный сдвиг).

В работе рассматриваются два основных механизма формирования напряжённо-деформированного состояния Центральноазиатских орогенов: маломасштабная астеносферная конвекция или давление со стороны Индийской плиты. В случае, если рассматриваемый механизм формирует в литосфере отличное по строению напряжённое состояние, он будет признан непригодным для объяснения эпиплатформенного орогенеза. Для проведения данного исследования выбран метод аналитического моделирования, созданные модели являются двумерными и упруго-вязкими, либо вязкими.

Глава 1. Аналитический расчёт напряжённо-деформированного состояния двуслойной вязкой среды при задании возмущения вектора скорости смещения на нижней границе модели. В первой главе в приближенной постановке решается геомеханическая задача для модели литосферы, формирующейся под действием маломасштабной астеносферной конвекции (сама конвекция в астеносфере не рассматривалась), на основе которой выполнено исследование эволюции напряженно-деформированного состояния в литосфере во времени. Пока что поставленная проблема рассматривалась исключительно с

позиций механики, далее (глава 4), опираясь на полученные результаты, будет построено решение задачи для трехслойной термомеханической модели, характеризующей состояние литосферы и астеносферы.

Модели литосферы рассчитывались в рамках приближения сплошной среды. Структура модели в начальный момент времени для рассматриваемых задач приведена на рис. 1. Литосфера представлена двумя слоями (кора и мантия) с вязкостями, отличающимися на два порядка, воздействие со стороны астеносферы, в которой происходит термогравитационная конвекция, задается в виде скоростей течения мантийного вещества через или вдоль подошвы литосферы. Сама астеносфера напрямую в модели не участвует, в рамках текущего исследования было достаточно учесть только её влияние на литосферу. Таким образом, здесь представлено именно решение задачи о вынужденном течении через подошву литосферы, а не сама задача об астеносферной конвекции. В обзорной работе [Добрецов и др., 2013] приведены характерные скорости конвективного процесса, составляющие первые см/год.

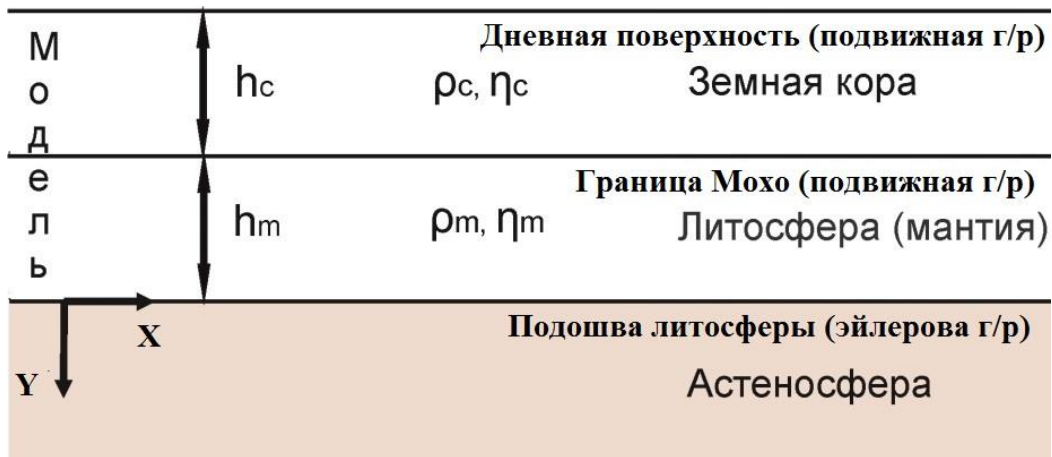


Рисунок 2 - Общая схема двуслойной модели (задача о влиянии астеносферной конвекции).

Поскольку моделируются сверхмедленные процессы в литосфере (характерные времена которых первые десятки млн.лет), то уравнения движения и связи напряжений и скоростей деформаций решались в линейной и квазистатической постановке (вместо уравнений движения выписывались уравнения равновесия). Определяющая система уравнений решалась методом разделения переменных Фурье. Реология основных тел моделей бралась в виде несжимаемого тела Ньютона (линейно-вязкая жидкость).

Уравнения движения записывается в квазистатическом приближении, берётся реология несжимаемого тела Ньютона и задача решается в линейной и двумерной постановке:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma \delta_{ij} + \eta(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (2)$$

$$\rho v_{i,i} = 0, \quad i, j = x, y. \quad (3)$$

Здесь и далее для удобства оператор дифференцирования по пространственным координатам записывается в индексе через запятую, как это принято в тензорном анализе. ρ – плотность, η – динамическая вязкость, δ – символ Кронекера.

Система (1) – (3) стандартными выкладками сводится к единому уравнению (Навье – Стокса), в данном случае принимающему следующий вид:

$$v_{i,k,k,j,j} = 0, \quad i, j, k = x, y, \quad (4)$$

Решение уравнений (4) будет искаться методом Фурье. Введём пространственную частоту $k = 2\pi/\lambda$, где λ – длина волны системы (латеральный размер цикла хребет – впадина орогена). Произведём разделение переменных. Запишем вертикальную компоненту скорости в виде: $v_y(x, y) = \tilde{v}_y(y)\cos(kx)$ (5)

для прочих величин – аналогично.

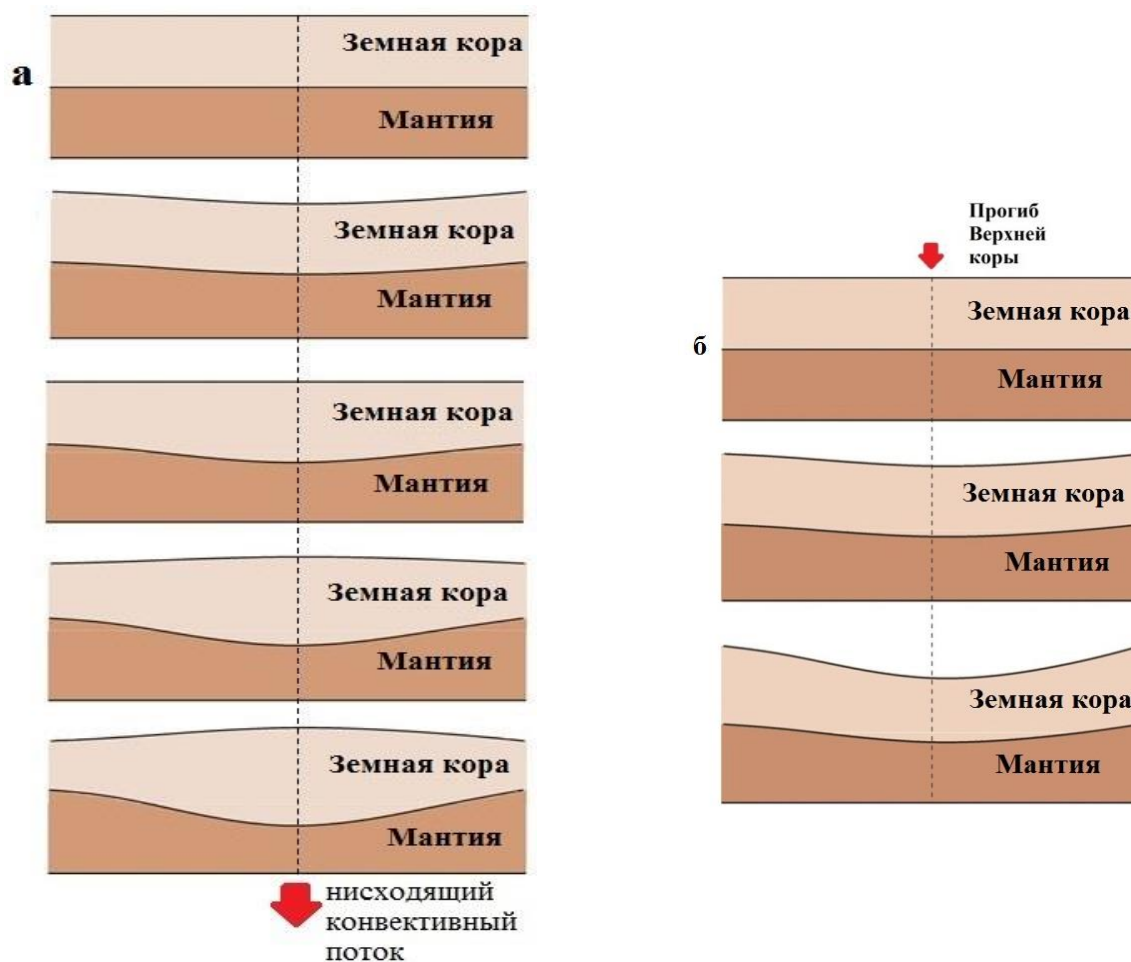


Рисунок 3 - Основные этапы деформации рассматриваемых моделей главы 1 (задача о влиянии астеносферной конвекции, а) и 3 (задача о горизонтальном сокращении литосферы, б)

Поскольку при задаваемой мощности коры 40 км и характерной длине цикла хребет-впадина для орогенов Центральной Азии более 100-120 км (в данном исследовании будет взята величина 120 км) амплитуда формирующегося рельефа на подвижных границах не

будет превышать первые километры, то возможно использовать подход Лява [Love, 1911] при записи граничных условий (ГУ).

Методика получения искомого нестационарного решения базируется на том, что, в силу линейной постановки общей задачи, результат влияния нескольких факторов на общее НДС системы представим в виде суперпозиции НДС, формирующихся за счёт отдельных силовых факторов. В нашем случае имеются 3 основных фактора: базовое возмущение, влияние искривления внутренней границы модели и поверхности, что можно записать как:

$$\sigma_{ij}^{\text{общее}} = \sigma_{ij}^1 + \sigma_{ij}^2 + \sigma_{ij}^3, \quad i, j = x, y, \quad (6)$$

где верхние индексы указывают на принадлежность текущей функции состояния системы к НДС, формирующемуся за счёт перечисленных выше факторов (отдельно).

Несложно установить характер влияния, оказываемого на систему искривлением отдельной границы. Плотность нижележащих слоёв модели выше, поэтому на области близ положения изначально плоской границы будут действовать положительные и отрицательные (Архимедовы) гравитационные силы, где формируются положительные и отрицательные формы рельефа соответственно. В рамках подхода Лява добавим в записанный для нормальных напряжений ГУ дополнительный член:

$$f_{\text{доп}} = \Delta\rho g \zeta \quad \text{при} \quad \zeta = \tilde{\zeta} \cos(kx). \quad (7)$$

где $\Delta\rho$ – разность плотности между разграниченными телами, а g – ускорение свободного падения, $\tilde{\zeta}$ – амплитуд рельефа.

В соответствии с намеченным подходом, получим решения краевых задач, для которых НДС формируется за счёт действия только одного из намеченных факторов: базового возмущения, искривления внутренней границы модели и искривления поверхности модели.

ГУ для первой подзадачи, связанной с базовым возмущением (конвекцией), имеет, с учётом реологии тел модели и (10), вид:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_x &= 0 & \tilde{v}_y &= v_0 & & \text{(нижняя граница),} \\ [\tilde{v}_x] &= 0 & [\tilde{v}_y] &= 0 & [\tilde{\sigma}_{xy}] &= 0 & [\tilde{\sigma}_{yy}] &= 0 & & \text{(внутренняя граница)} \\ \tilde{\sigma}_{xy} &= 0 & & & \tilde{\sigma}_{yy} &= 0. & & & & \text{(верхняя граница)} \end{aligned}$$

ГУ для второй подзадачи (возмущение – искривление Мохо), вытекает из (7).

Положим $\Delta\rho = \rho_m - \rho_c$. Имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_x &= 0 & \tilde{v}_y &= 0 & & \text{(нижняя граница)} \\ [\tilde{v}_x] &= 0 & [\tilde{v}_y] &= 0 & [\tilde{\sigma}_{xy}] &= 0 & [\tilde{\sigma}_{yy}] &= (\rho_m - \rho_c)g\tilde{\zeta}_m & \text{(внутренняя граница)} \\ \tilde{\sigma}_{xy} &= 0 & & & \tilde{\sigma}_{yy} &= 0. & & & & \text{(верхняя граница)} \end{aligned}$$

ГУ для связанной с искривлением дневной поверхности, подзадачи:

$$\tilde{v}_x = 0 \quad \tilde{v}_y = 0 \quad \text{(нижняя граница)}$$

$$\begin{aligned}
 [\tilde{v}_x] = 0 & & [\tilde{v}_y] = 0 & & [\tilde{\sigma}_{xy}] = 0 & & [\tilde{\sigma}_{yy}] = 0 & & \text{(внутренняя граница)} \\
 \tilde{\sigma}_{xy} = 0 & & & & \tilde{\sigma}_{yy} = \rho_c g \tilde{\zeta}_c & & & & \text{(верхняя граница)}
 \end{aligned}$$

Для выписанных ГУ гармоническая x -составляющая уже опущена, будем считать, что оставшиеся y -составляющие относятся к центру нисходящего конвективного потока по x .

Далее могут быть выписаны эволюционные уравнения (подробный вывод приведён в [Мягков, Ребецкий, 2016, 2019]), на основании которых составляется результирующее решение краевой задачи. Решение этих уравнений (эволюционные кривые☺

$$\begin{cases} \tilde{\zeta}_c = C_{0c} + \Delta\rho g \hat{v}_{yc}^3 (C_{1c} \exp(\gamma_1 t) + C_{2c} \exp(\gamma_2 t)) \\ \tilde{\zeta}_m = C_{0m} + (\gamma_1 - \rho_c g \hat{v}_{yc}^2) C_{1m} \exp(\gamma_1 t) + (\gamma_2 - \rho_c g \hat{v}_{yc}^2) C_{2m} \exp(\gamma_2 t) \end{cases} \quad (8)$$

где $\gamma_{1(2)} = 0.5g(\hat{v}_{ym}^3 \Delta\rho + \hat{v}_{yc}^2 \rho_c \pm \sqrt{(\hat{v}_{ym}^3 \Delta\rho + \hat{v}_{yc}^2 \rho_c)^2 - 4\rho_c \Delta\rho(\hat{v}_{yc}^2 \hat{v}_{ym}^3 - \hat{v}_{yc}^3 \hat{v}_{ym}^2)})$, а выражения для констант C_m и C_c опущены из-за громоздкости.

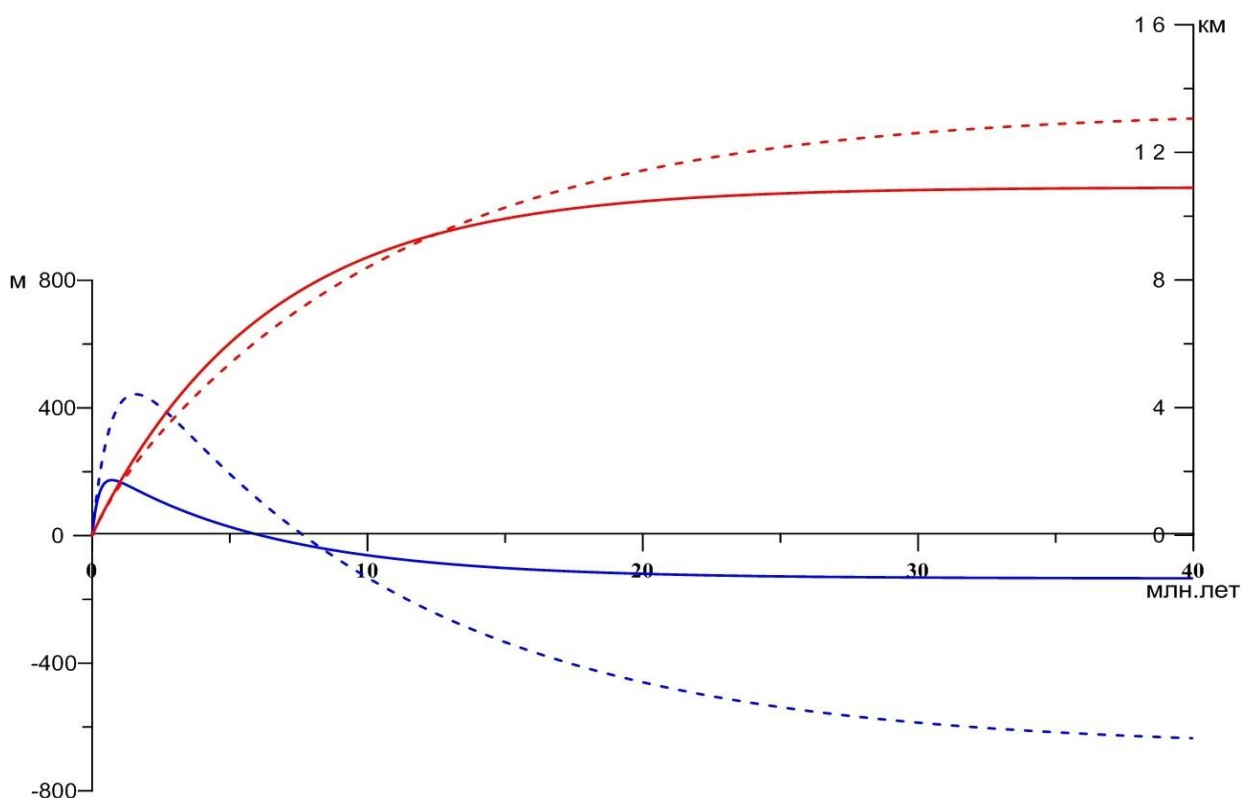


Рисунок 4 - Задача о деформации литосферы под влиянием астеносферной конвекции. Функции эволюции амплитуды рельефа дневной поверхности (синим цветом, построена относительно левой вертикальной шкалы) и подошвы коры (красным цветом, построена относительно правой вертикальной шкалы). Кривые выполнены пунктиром. Сплошные линии соответствуют задаче без учёта влияния денудационных процессов, описанной в главе 1. Пунктирные – с денудацией, описанной в разделе 2.1 главы 2.

На рис. 4 изображены эволюционные кривые, рассчитанные для значений параметров, которые будут использованы и в дальнейшем: $h_c = 40$ км, $h_m = 60$ км, $\rho_c = 2.7$ г/см³, $\rho_m = 3.1$ г/см³, $\eta_c = 3.3 \cdot 10^{22}$ Па*с, $\eta_m = 3.3 \cdot 10^{20}$ Па*с (далее – базовый набор параметров). Структура деформации модели, соответствующая этим кривым схематически изображена на рис. 3а. Полученные эволюционные кривые полностью определяют ход деформации модели.

Теперь можно непосредственно получить окончательное нестационарное решение исходной краевой задачи (рис 4). Первая модель (о влиянии астеносферной конвекции) продемонстрировала многоэтапную структуру эволюции НДС. На первом этапе (рис. 2, строка 1 и 2), продолжающемся до 4-5 млн.л. область литосферы, находящаяся над нисходящим астеносферным конвективным током (далее для определённости будем рассматривать именно эту область, для литосферы над восходящим током верны все те же рассуждения с поправкой на смену знака рельефа) испытывает погружение и на поверхности рельефа формируется прогиб, амплитуда которого достигает максимума в 2.9 млн.л. (рис. 2, строка 2), после чего начинается медленное воздымание изначального прогиба. Максимальная амплитуда погружения составляет 700 м, уровень напряжений в коре достигает 35 МПа на подошве, но, в среднем, составляет 14-16 МПа. Ось σ_3 направлена субгоризонтально, что прямо противоположно требуемому. Далее, постепенно, воздымание приводит к полному выравниванию форм рельефа (рис. 2, строка 3) на времени 20 млн.л. (видно, что скорость эволюции системы снижается со временем, см. рис. 5). При этом сглаживаются абсолютно все особенности в напряжённом состоянии: к примеру поле τ_{max} не меняется по латерали (одномерно). Уровень девиаторных напряжений в коре сильно снижается. При этом ориентации главных осей пока сохраняют прежнюю структуру. Однако далее воздымание не сменяется на погружение, оно продолжается (рис. 2, строка 4 и 5).

Переходим к постинверсионной стадии эволюции модели, которая характерна тем, что, во-первых, в коре формируется замкнутая конвективная ячейка (объединяющая области поднятия и впадины), а ориентации σ_3 в верхней части коры сменяют направление с субгоризонтального на субвертикальное. При этом на поверхности над центром конвективной ячейки формируются локальные максимумы напряжённого состояния (около 5 МПа для τ_{max}). После инверсии на исследуемом участке коры исходное поле ориентаций соответствует уже воздыманию, поэтому нас удовлетворяет, однако формирующаяся постинверсионная смена структуры ориентаций на обратную вновь приводит к несоответствию с данными реконструкций. Следовательно, именно начало постинверсионной стадии эволюции, когда область инверсии режима напряжённого состояния в верхней коре достаточно маломощная.

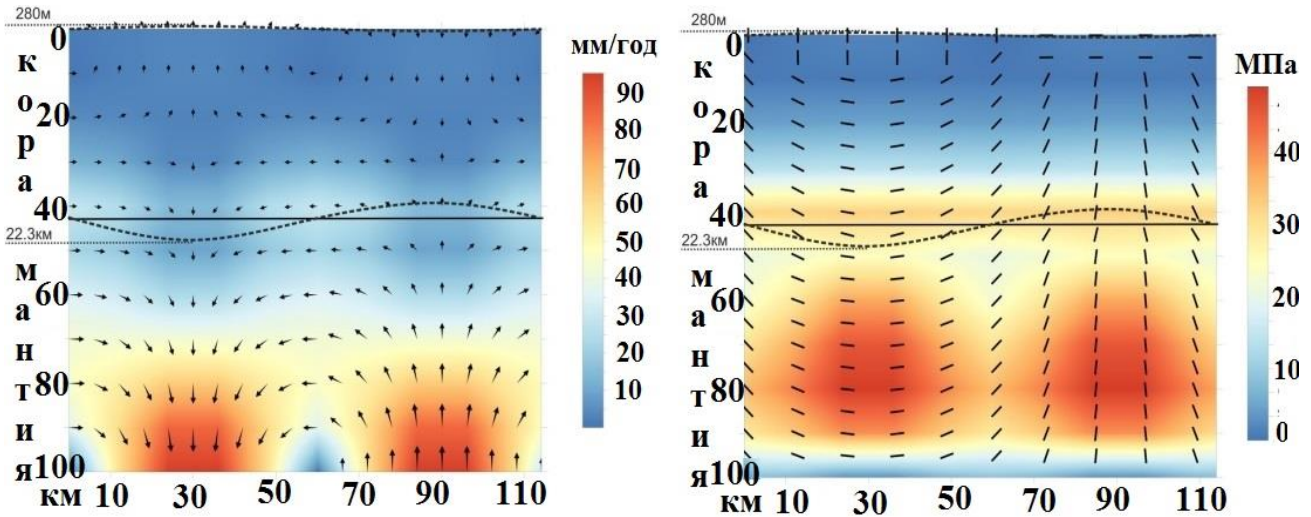


Рисунок 5 - Результаты моделирования (для указанного в тексте набора параметров) для модели I. Слева приведены абсолютные значения вектора скорости течения, с нанесёнными поверх ориентациями вектора скорости. Абсолютные значения скорости в коре увеличены в 100 раз. Справа - максимальные касательные напряжения, с нанесёнными поверх ориентациями оси σ_3 . Данные приведены для значения времени 50 млн.л.

Выводы главы 1. 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 (глубины 15-40 км, 60% мощности земной коры) горизонтального сжатия в коре поднятия и растяжения в коре прогиба, что соответствует тектонофизическим данным о природных напряжениях. Для глубин менее 15 км такого соответствия нет.

Глава 2. Экзогенные процессы.

Раздел 2.1. Денудация и осадконакопление. Важным фактором, влияющим на формирующееся НДС системы, является наличие процессов эрозии и денудации осадочного материала из областей поднятий и последующей аккумуляции в депрессиях, проистекающих на поверхности земной коры [Олиер, 1984; Макаров и др., 2010, 2011]. Эрозионно-аккумуляционные процессы не обязательно сводятся к релаксационным [Ребецкий, 2012, 2013]. При наличии активно формирующегося рельефа они также выполняют активную функцию, повышая скорости движения материала в

геодинамической системе, особенно – близ поверхности, что, в свою очередь, приводит и к росту напряжений в среде.

Наиболее часто предполагается зависимость между скоростью изменения амплитуды рельефа за счёт сноса/накопления осадков и формой рельефа в виде:

$$\dot{\zeta} = \lambda \Delta \zeta, \quad (9)$$

где ζ – амплитуда рельефа, Δ – лапласиан, а λ – числовой коэффициент, характеризующий интенсивность процесса денудации поднятий и осадконакопления во впадинах. Коэффициент λ имеет обратную ко времени размерность (обычно исчисляется в [ед/год]), а дифференцирование ведётся по латеральным пространственным координатам.

Специально отметим, что форма уравнений (9) определяет в большей степени денудацию горных поднятий, а не эрозию их склонов. Она также удобна тем, что (9) можно внести в виде члена непосредственно в эволюционные уравнения. В исследуемых здесь Центральноазиатских орогенах на вершинах хребтов сохранился пенеппен, что говорит о необходимости использования модели процесса в виде эрозии склонов, которая будет рассмотрена в следующем разделе. Важно отметить, что учет экзогенных процессов приводит к размыканию конвективных ячеек близ поверхности, формируемое на постинверсионной стадии эволюции модели (стадии 4 и 5 на рис. 32). Естественно ожидать сильное влияние денудации на амплитуду формирующегося рельефа, для сравнения, на рис. 4 изображены (пунктиром) эволюционные кривые, рассчитанные без учёта влияния экзогенных процессов. Помимо двукратного, на начальной стадии, и более чем четырёхкратного, на асимптотической, снижения рельефа, денудационные процессы приводят также и к ускорению деформации модели, при скорости денудации 1 мм/год скорости течения в коре локально возрастают в 5 раз, также как и уровень напряжений. (так, выравнивание доинверсионных форм рельефа происходит за 5.6 вместо 7.7 млн.лет).

Раздел 2.2. Эрозия и осадконакопление. Вторая рассматриваемая в работе модель экзогенных процессов будет именоваться «эрозионной». В рамках неё предлагается учитывать интенсивность сноса в зависимости от градиента рельефа. Данная модель гораздо лучше, с геологической точки зрения, соответствует эрозии склоновой области орогена, но не вполне подходит для центральных зон депрессий рельефа. Поэтому для геомеханических моделей конкретных регионов корректнее сочетать предложенные подходы.

Структура ввода эрозии в модель исходно похожа на таковую для денудации, с заменой лапласиана на градиент (ниже – для двумерного случая):

$$\dot{\zeta} = C_e \zeta_{,x}, \quad (10)$$

где x – латеральная координата, а C_e – коэффициент, аналогичный λ . Ввести (10) в систему эволюционных уравнений не возможно также непосредственно, как и (9), т.к.

соотношение (10) не удовлетворяет соотношениям симметрии (5) базовой модели. Это, в свою очередь, означает невозможность решения поставленной задачи в аналитической форме, соответственно чему решение искалось в полуаналитической постановке.

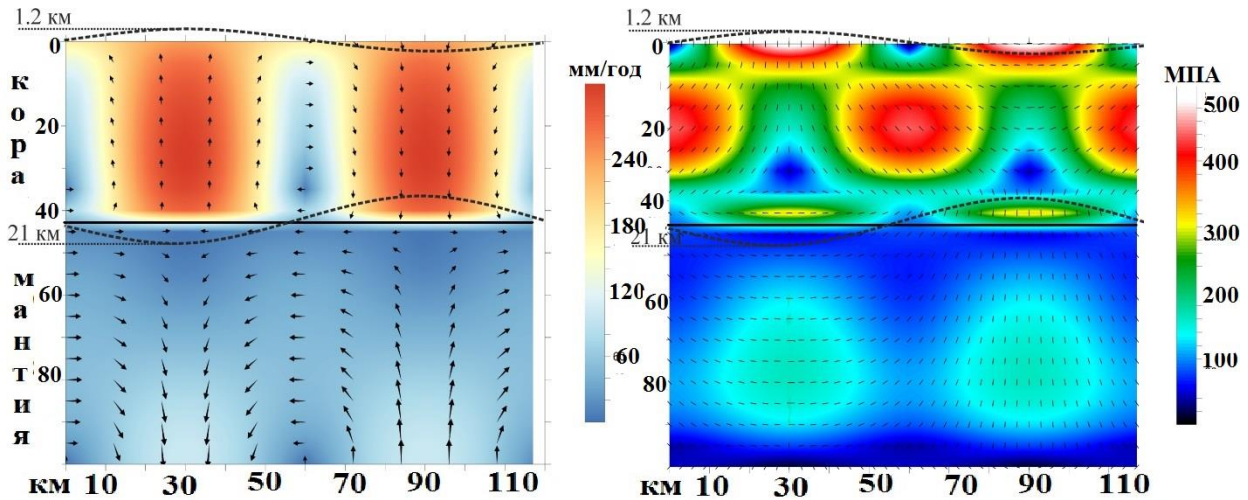


Рисунок 6 - Задача о деформации литосферы под влиянием астеносферной конвекции с экзогенным процессом по эрозионной модели. В левой колонке (а) абсолютные значения вектора скорости течения, с нанесёнными поверх ориентациями вектора скорости. В правой колонке (б) максимальные касательные напряжения, с нанесёнными поверх ориентациями оси σ_3 .

На рис. 6 показан результат включения в модели сильной эрозии (до 1 см/год). Формируется зона мощного, высокоскоростного нисходящего/восходящего потока, имеющего практически плоскую форму. Скорости в таких областях почти равномерно выдержаны по вертикали и заметно превышают таковые для денудационной модели – в центре восходящего тока 3 мм/год близ Мохо, 2.2 мм/год близ поверхности, в среднем – 2.8 мм/год при скорости конвекции 1 дм/год, что на порядок превышает полученные значения для первой модели

Раздел 2.3. Денудационный механизм формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия. В разделе представлена численная модель предлагаемого механизма формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия (подробнее о нём см. [Ребецкий, 2008]). Если в результате денудационных процессов участок коры будет испытывать восходящее движение, перемещаясь в область низких давлений, то в нём в результате разгрузки и в условиях горизонтального стеснения вещества коры это приведёт к формированию остаточных напряжений горизонтального сжатия. Автором создана численная модель в среде fortran. Для численного расчёта используется конечно-разностная схема по методике Ю.П. Стефанова [Стефанов, 2005], которая представляет собой модифицированную для применения в задачах геомеханики схему Уилкинса [Wilkins, 1972]. В рамках данного подхода тела модели являются

упруго-пластическими, причём используется специально адаптированный для геосреды неассоциированный закон пластического течения Друккера-Прагера-Николаевского.

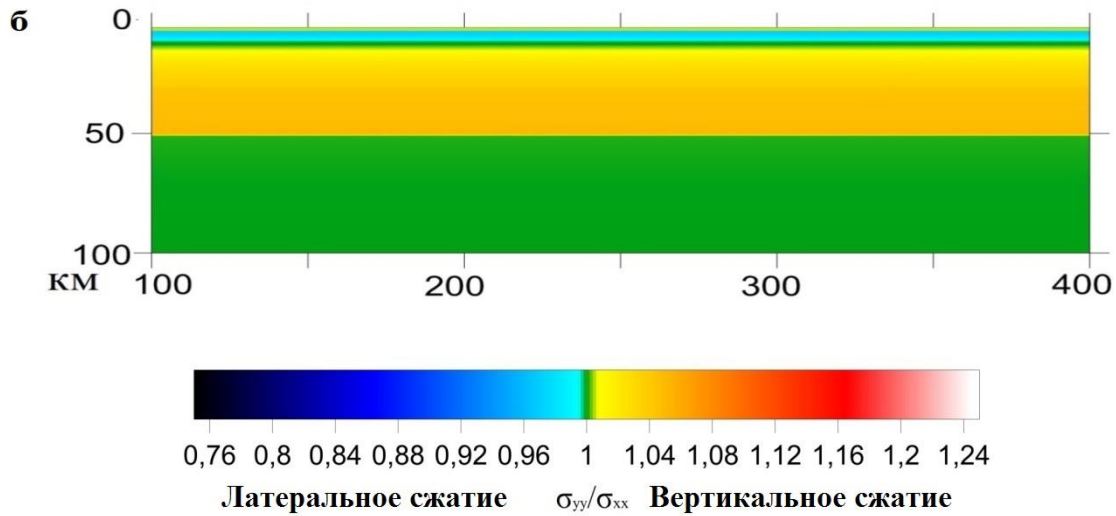


Рисунок 7 - Задача о денудации поверхности в модели упруго-пластического тела. Распределение по глубине отношения горизонтальных и вертикальных нормальных напряжений после денудации 1 км.

При амплитуде денудации от 1 км в модели I формировался слой мощностью более 3 км, где σ_{xx} напряжения превышали вертикальные, т.е. здесь имеет место режим горизонтального сжатия (см. рис. 7). Представленный механизм дополняет рассмотренные в предыдущих разделах особенности влияния поверхностных процессов на напряжённое состояние модели.

Выводы главы 2. Поверхностные процессы денудации в поднятиях и осадконакопления во впадинах приводят к замедлению формирования рельефа, но сопровождаются при этом ускорением процесса деформации коры и увеличением интенсивности внутрикоровых напряжений. Переход от стандартной формы учёта поверхностных процессов денудационного типа, пропорциональной амплитуде рельефа, на эрозию склонов гор, приводит к ещё большему (в пределах порядка) возрастанию скорости деформации коры и созданию геометрии течения блокового типа. Для упруго-пластической модели свойств коры учет поверхностных процессов приводит к появлению в верхней части поднятий (0-5 км) практически повсеместно режима горизонтального сжатия, а в коре прогиба – режима горизонтального растяжения.

Глава 3. Задача о формировании напряжённо-деформированного состояния литосферы в обстановке горизонтального сжатия. В данной модели (модель II, см. рис 3 и б) кора представлена двумя слоями, верхний из которых упругий (10-15 км), а нижний вязкий. Кора лежит на менее вязкой мантии (разделение мантии на литосферную часть и астеносферную не проводилось).

Как уже было сказано, в рамках текущей статьи вязкая реология аппроксимирует реально упруго-пластическое деформирование литосферы. При этом верхняя кора [Николаевский, 1983] находится в закритическом состоянии только зонах разломов, разделяющих ее на блоки, которые могут быть представлены упругим телом. В предыдущей задаче (модель I) земная кора была представлена единым слоем, в результате чего корректнее было представить её в виде вязкого тела (т.к. верхняя кора составляет относительно небольшую (меньше четверти) часть всей коры). В текущей задаче рассматривается НДС, формирующееся в коре в обстановке горизонтального сжатия, как результат влияния коллизии плит. В этих условиях основная часть силового воздействия передаётся именно через упругую верхнюю часть коры, поэтому в модели II (рис. 5) она фигурирует отдельно.

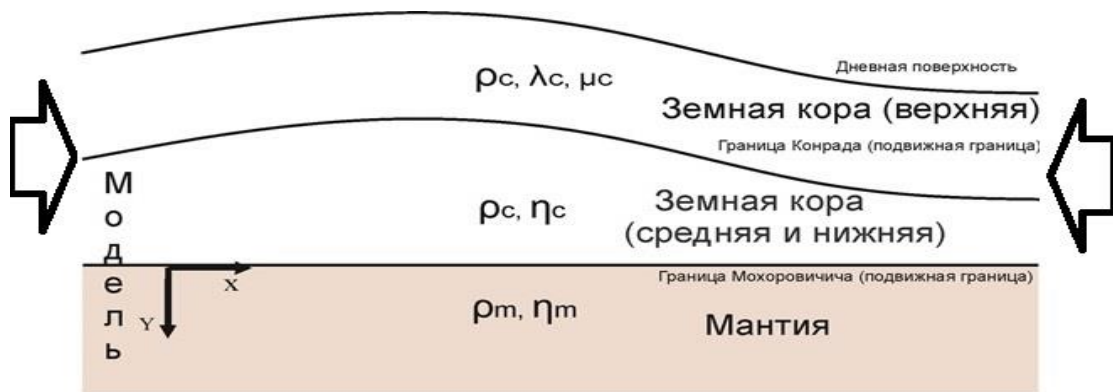


Рисунок 8 - Общая схема модели (задача о горизонтальном сокращении литосферы).

Этапы получения решения сходны с предыдущей задачей, поэтому здесь мы только кратко обрисуем последовательность построения решения. Деформации верхней коры будут рассматриваться в рамках балочной теории. Считается, что за счёт давления со стороны соседней плиты происходит потеря устойчивости балки при превышении эйлеровой (первой критической) силы. Для оценки значения этой силы с учетом влияния вязкой коры и мантии можно воспользоваться решением, приведенным в монографии [Тёркот, Шуберт, 1985].

В приложении к исследованию эпиплатформенного орогенеза будем считать, что потеря устойчивости балки происходит с той же длиной волны, что и в предыдущей задаче (равной размеру цикла хребет-впадина орогена). В отличие от предыдущей задачи, базовым возмущением является движение потерявшей устойчивость верхней коры. Положим, что кора сокращается с постоянной скоростью деформации $\dot{\epsilon}_{xx}^0$. Из элементарных геометрических соотношений следует:

$$\tilde{v}_y^0 = \beta L^2 |\dot{\epsilon}_{xx}^0|, \quad (11)$$

где \tilde{v}_y^0 - амплитуда вертикальной скорости движения осевой поверхности балки, а β для условий рассматриваемой геомеханической задачи в приложении к Алтаю может быть

прято равным 15, что дает скорости порядка 1-2 мм/год. В рамках балочного приближения корректно считать, что это и скорость верхней поверхности вязкой части модели. Условие (11) полностью аналогично ГУ на нижней границе предыдущей задачи. Однако теперь силовое возмущение задаётся на поверхности модели, а не на подошве. Не дублируя аналогичные предварительные рассуждения, выпишем ГУ для соответствующих подзадач. Для основной подзадачи, связанной с давлением балки:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_y &= \tilde{v}_y^0 & \tilde{\sigma}_{xy} &= 0 & (\text{верхняя граница}) \\ [\tilde{v}_x] &= 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 & [\tilde{\sigma}_{xy}] &= 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = 0 & (\text{внутренняя граница}) \\ \tilde{v}_x &= 0 & \tilde{v}_y &= 0. & (\text{на бесконечности}) \end{aligned}$$

В качестве второго условия на верхней границе было выбрано условие отсутствие проскальзывания между верхней и средней корой. Для задачи, связанной с искривлением границы Мохо:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_y &= 0 & \tilde{\sigma}_{xy} &= 0 & (\text{верхняя граница}) \\ [\tilde{v}_x] &= 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 & [\tilde{\sigma}_{xy}] &= 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = (\rho_m - \rho_c)g\tilde{\zeta}_m & (\text{внутренняя граница}) \\ \tilde{v}_x &= 0 & \tilde{v}_y &= 0. & (\text{на бесконечности}) \end{aligned}$$

По аналогии с предыдущей задачей, получим эволюционное уравнение для вертикального смещения дневной поверхности:

$$\tilde{\zeta}_m = C_m (\exp(\hat{v}_{ym}^2 \Delta \rho g t) - 1) \quad \text{при} \quad C_m = \frac{\hat{v}_{ym}^1 \tilde{v}_y^0}{\hat{v}_{ym}^2 \Delta \rho g}. \quad (12)$$

Кривые, определяемые выражениями (11) и (12) представлены на рис. 9. В качестве значения \hat{e}_{xx}^0 была взята величина 10^{-9} ед/год.

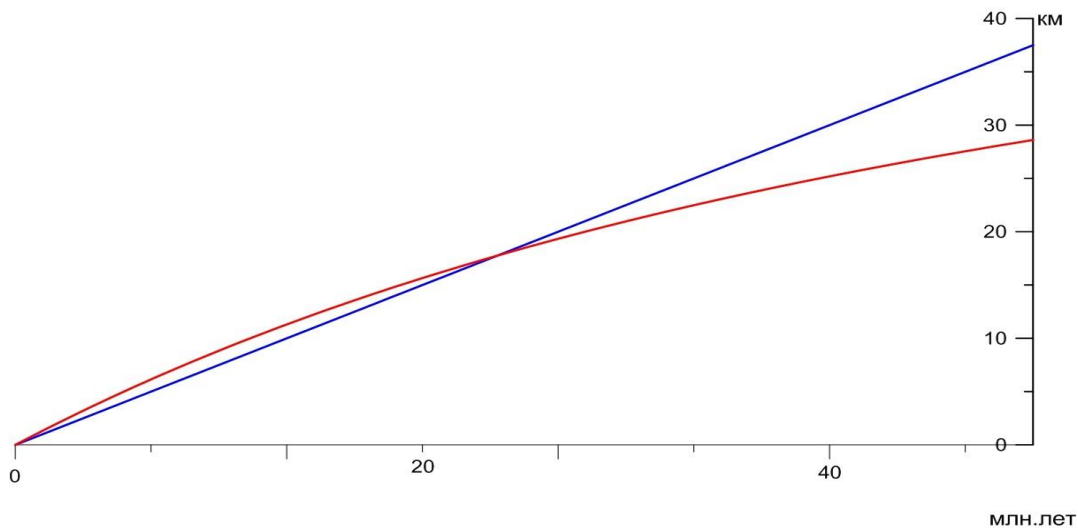


Рисунок 9 - Функции эволюции амплитуды рельефа границы Конрада (синим цветом) и подошвы коры (красным цветом) для модели с латеральным сокращением.

Существенным различием между структурой эволюции в текущей и предыдущей задачах, является отсутствие инверсионных процессов для рельефа, формирующегося на

границах модели (см. рис 9). Этот результат никак не связан с относительной простотой моделью, необходимой для проведения аналитического расчёта. По изложенной в статье методике были рассчитаны и более сложные модели, включающие, к примеру, среднюю кору как отдельное тело. Однако и они дали сходные результаты. Например, в статье [Cloetingh et al, 2002] получены сходные результаты для коры Иберии. Таким образом следует считать, что НДС литосферы, формирующееся в результате потери устойчивости упругой части коры в обстановке горизонтального сжатия не приводит к формированию корней/антикорней в горно-складчатой системе, что одно уже говорит против использования этого процесса для объяснения эпиплатформенного орогенеза.

Рассмотрим особенности напряжённого состояния (рисунок 8). В вязкой части модели в области прогиба мы наблюдаем область субвертикальной ориетации оси σ_3 на глубинах от 15 до 25 км. Ниже угол наклона оси σ_3 к горизонтальной оси повышается и ниже 25 км σ_3 становится субвертикально ориентированной. При этом в области поднятия субвертикальная ориентация σ_3 сохраняется на протяжении всего времени эволюции НДС. Для упругой верхней коры было использовано балочное решение, подробнее см. в соответствующем разделе. Приведём результаты для значения $E = 5$ ГПа и амплитуды рельефа 0.5 км, считая мощность верхней коры равной 10 км. Получим значение отношения продольной силы к площади сечения балки $P = 29$ ГПа, тогда как связанные с изгибом (без учёта P) напряжения σ_{xx} колеблются в пределах от 340 до -340 МПа. Это означает, что горизонтальные нормальные напряжения не меняют свой знак в вертикальном сечении балки. Т.е. всюду формируется напряжённое состояние типа горизонтальное сжатие.

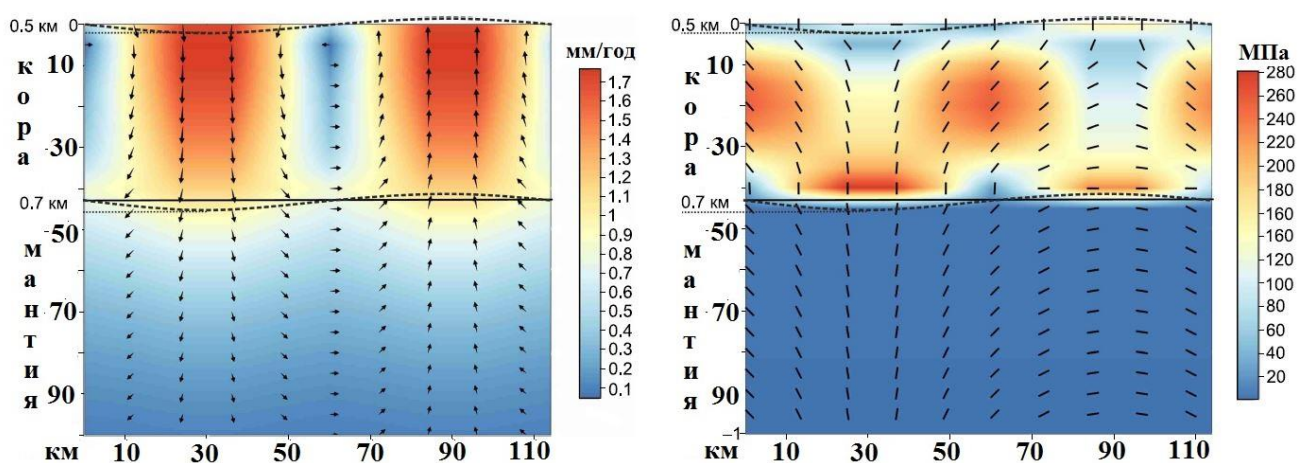


Рисунок 10 - Результаты моделирования (для указанных в тексте параметров) для вязкой части модели. Слева приведены абсолютные значения вектора скорости течения, с нанесёнными поверх ориентациями вектора скорости. Справа - максимальные касательные напряжения, с нанесёнными ориентациями оси σ_3 . Данные приведены для времени 0.23 млн.л.

Выводы главы 3. Результаты аналитического расчёта для модели формирования напряжённо-деформированного состояния континентальной литосферы при потере устойчивости верхней коры в условиях горизонтального сокращения (модель общелитосферной складки) показали, что режим нагружения, создающий общелитосферную складку сжатия, приводит к формированию в верхней – сейсмогенной части коры (0-15 км) режима горизонтального сжатия. Эта область соответствует упругой части задачи. В области зон опускания и поднятия верхней части средней коры формируется режим горизонтального сжатия и, соответственно, растяжения, что также не совпадает с тектонофизическими данными о природных напряжениях. Лишь в нижней половине модели формируется искомое строение поля напряжений. Напряжённое состояние для упругой и вязкой частей решения представлены на рисунке 3.8. 50% мощности земной коры (причём верхние, наиболее сейсмически активные) дают обратный природным данным геодинамический тип напряжённого состояния. Таким образом, результаты моделирования для созданной в главе 3 модели определённым образом противоположны таковым для модели главы 1.

Глава 4. Напряжённо-деформированное состояние системы литосфера-астеносфера в приближении трёхслойной вязкой модели с термогравитационной конвекцией в нижнем слое. На основании анализа предыдущих результатов моделирования была создана более сложная аналитическая модель эпиплатформенного орогенеза, включающая в себя конвектирующую астеносферу как самостоятельное тело. Литосфера представлена двумя слоями (кора и мантия) с вязкостями, отличающимися на два порядка, дополнительно введён третий слой (астеносфера), с вязкостью ниже также на два порядка чем у мантийной литосферы. В целом модель является развитием предложенной в Главе 1 и 2.

Структура решения (эволюционный подход) в данном случае остаётся тем же, однако решается система уравнений:

$$\sigma_{ij,j} + K^T \delta_{iy}(T - T^0) = 0, \quad (13)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma \delta_{ij} + \eta(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (14)$$

$$\rho v_{i,i} = 0 \quad (15)$$

$$v_i(T' + T^0)_{,i} = a(T' + T^0)_{,i,i}, \quad i, j = x, y, \quad (16)$$

где (13) – уравнения движения, записанное в квазистатическом приближении, (14) – уравнения связи для реологии тела ньютона, (15) – уравнение неразрывности. Член с постоянной K^T в (13) определяет силу плавучести, возникающую из-за отклонения термического поля T от начального T^0 . $K^T = -\rho g \alpha$, где α – коэффициент термического расширения. (16) – стационарное уравнение конвективного теплопереноса, a – коэффициент температуропроводности.

Рассматриваемая модель позволила детализировать структуру эволюции модели, рассмотренной в главе 1, выявив наличие специфических колебательных процессов в системе литосфера/астеносфера. На рис. 11 приведены эволюционные кривые, аналогичные таковым из предыдущих разделов. Первый этап характеризуется ростом поднятия над восходящим астеносферным током и впадины над нисходящим. Далее, в силу полной симметрии системы будем говорить об области над нисходящим током, где изначально литосфера погружается. Этот процесс продолжается (для приведённых выше параметров модели) 2 млн. лет, постепенно замедляясь (средняя скорость течения в коре порядка 0.4 мм/год). К его концу амплитуда погружения достигает 1 км. К концу данного этапа система достигает максимально изостатически нескомпенсированного состояния, в результате чего, под действием гравитационных сил происходит инверсия вертикальной компоненты скорости течения и погружение сменяется воздыманием (2 этап эволюции системы), продолжающийся следующие 10 млн. лет. Примерно на времени 4 млн. лет прогиб полностью выравнивается, происходит изостатическая инверсия, причём всей Земной коры, включая и границу Мохо.

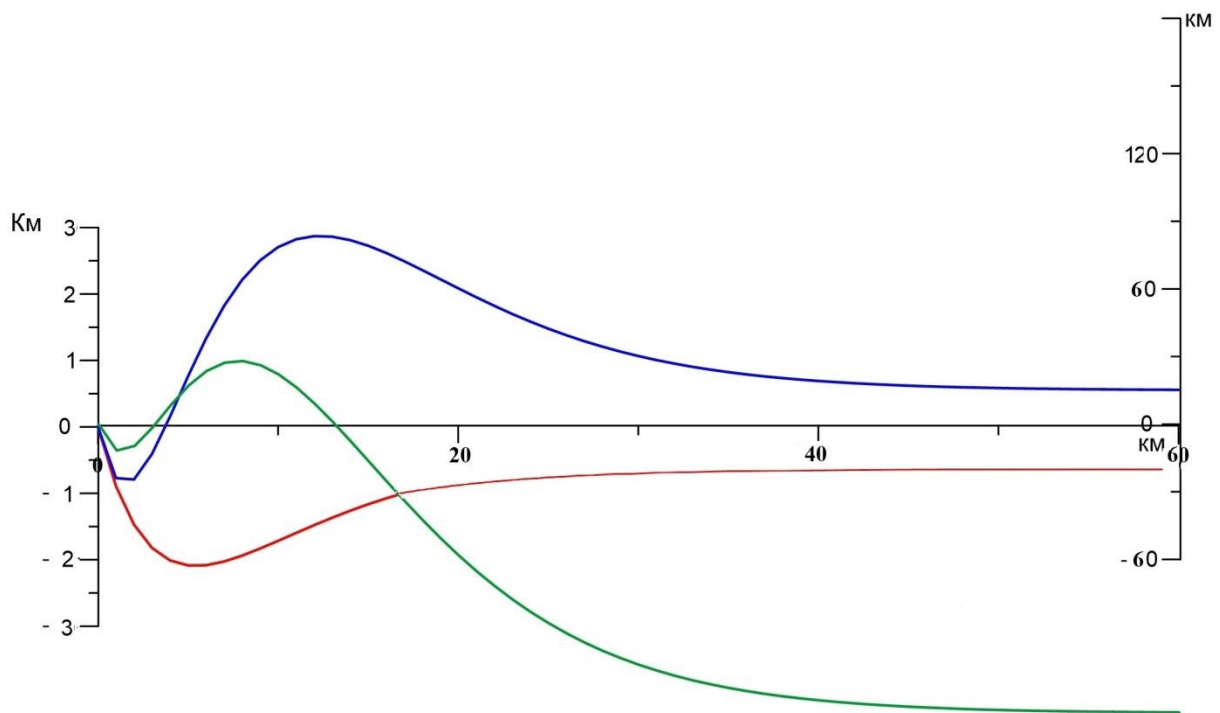


Рисунок 11 - Функции амплитуды погружения рельефа дневной поверхности (синим цветом, построена относительно левой вертикальной шкалы), подошвы коры (зелёным цветом, построена относительно левой вертикальной шкалы) и подошвы литосферы (красным цветом, построена относительно правой вертикальной шкалы).

К 12 млн. лет инверсионное поднятие достигает максимального значения в 3 км, после чего система переходит к последнему этапу, когда снова происходит погружение дневной поверхности и Мохо, однако при этом подошва литосферы испытывает

поднятие. Скорость погружения инверсионного поднятия снижается практически до нуля задолго до выравнивания поднятия и инверсионная форма рельефа (поднятие над нисходящим конвективным током) стабилизируется к 40-50 млн. лет с амплитудой около 800 м. Мохо же выравнивается на времени в 13 млн. лет и снова формирует впадину, которая, вместе с мантийной литосферой формирует корни у инверсионного поднятия, в области же восходящего конвективного тока формируются антикорни под инверсионной впадиной. Этим завершается активная эволюция орогена. Она состоит из 3-х этапов с двумя последовательными инверсиями – сначала течения во всей литосфере в целом, потом – преимущественно в Земной коре. Количество этапов строго совпадает с числом подвижных границ модели с перепадом плотности, а число инверсий – с количеством внутренних границ модели.

Выводы главы 4. Результаты моделирования по структуре напряжённого состояния продемонстрировала, в целом, соответствие с более простыми моделями (глава 1 и 2), но позволила более детально проследить этапы и структуру деформации модели. В качестве основного вывода необходимо отметить следующее: маломасштабная конвекция в астеносфере из-за наличия двух скачков плотности (кора-мантия, литосфера-астеносфера) приводит к двукратной инверсии вертикальных движений, как в области поднятия – горы, так и в области опускания – межгорная впадина кровли коры с формированием на стадии стабилизации деформаций потоков корового вещества из зоны впадины в зону поднятия. Особенности напряженного состояния литосферы и направленность вертикальных движений кровли и подошвы коры при разных условиях внешнего нагружения литосферы в целом связаны с достижением изостатической компенсации на кровле мантии и кровле астеносферы, которые имеют разные скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа обобщает ряд аналитических, полуаналитических и численных геодинамических моделей эпиплатформенного орогенеза. Результатом являются рассчитанные параметры напряжённого состояния моделей и их кинематика, представленные в дискретной временной развёртке. Эти параметры сравнивались с исходными тектонофизическими данными о современном напряжённом состоянии эпиплатформенных орогенов Центральной Азии. Степень соответствия, в первую очередь пространственного распределения геодинамических типов напряжённого состояния, позволила сделать заключения о возможности геодинамического процесса каждой модели сформировать внутриплитные орогены Центральной Азии.

Созданы модели 2 групп:

1. Модели формирования напряжённого состояния континентальной литосферы за счёт маломасштабной термогравитационной конвекции в астеносфере. Данные модели представлены в главах 1, 2 и 4. Результаты моделирования в этой группе являются для большей части пространства моделей соответствующими природным данным. Именно, были получено поле напряжения, в хребтах преимущественно геодинамического типа «горизонтального сжатия», а в области впадин – «горизонтального растяжения».

2. Модель формирования напряжённого состояния континентальной литосферы в условиях горизонтального сжатия и, как следствия, потери устойчивости упругой части земной коры. Полученные для этой модели особенности напряжённого состояния находятся в сильном несоответствии с природными данными.

Отдельно рассмотрен вопрос о форме учёта экзогенных (денудационно-аккумулятивных) процессов. Показана активная функция экзогенных процессов, наличие которых снижало амплитуду рельефа формирующегося орогена, но кратно повышало амплитуду внутрикоровых напряжений. При этом показано, что разный тип распределения сноса – склоновый и классический (с максимумом в области наибольшего рельефа), приводят к различному росту внутрикоровых напряжений, склоновая, «эрозионная» форма учёта экзогенных процессов приводит к большему росту напряжений. Также был исследован вопрос о генерации аномальных напряжений горизонтального сжатия. На примере численной модели денудации континентальной коры было показано, что подобные процессы могут формировать значительный по амплитуде уровень напряжений порядка 10-15 МПа и выше. Таким образом, экзогенный фактор необходимо должен рассматриваться в качестве самостоятельного геодинамического источника формирования аномального напряжения в земной коре.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Эволюция структуры течения и рельефа эпиплатформенных орогенов под воздействием мелкомасштабной астеносферной конвекции / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Вестник КРАУНЦ. — 2016. — № 1. — С. 257-290.
2. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Обратные задачи геодинамики и роль ротационных инерционных сил / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Вестник КРАУНЦ. — 2016. — № 2. — С. 88-93.
3. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования / Ю.Л. Ребецкий, В.В. Погорелов, Д.С. Мягков, В.А. Ермаков // Вестник КРАУНЦ. — 2018. — № 3. — С. 54-73.
4. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Математическая модель формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Геодинамика и тектонофизика. — 2019. — Т. 10, № 1. — С. 21-41. doi:10.5800/GT-2019-10-1-0402

Статьи в сборниках

1. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Обратная задача геодинамики - подбор механизма деформирования коры внутриконтинентальных орогенов на основе данных математического моделирования Азии / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Четвёртая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. — М.: ИФЗ. — 2016. — С. 323-328.
2. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Влияние экзогенных (аккумуляционно-денудационных) процессов на формирующееся напряженно-деформированное состояние литосферы / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Современная тектонофизика: методы и результаты. Материалы пятой молодежной тектонофизической школы-семинара. — 2017. — С. 278-284.
3. Мягков Д.С. Математическое моделирование колебательных процессов и формирования изостатического равновесия в коре эпиплатформенных орогенов / Д.С. Мягков // Современная тектонофизика. Методы и результаты Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. — 2019. — С. 170-174.
4. Мягков Д.С. Численное моделирование формирования аномального уровня напряжений горизонтального сжатия в верхней части континентальной коры / Д.С. Мягков // Прикладные аспекты динамической геологии / Материалы всероссийской научной

конференции, посвященной 110-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова (1909-1984). — 2019. — С. 169-171.

5. Мягков Д.С. Создание математических геодинамических моделей эпиплатформенного орогенеза в приложении к проблемам тектонофизики / Д.С. Мягков // Новые идеи в науках о Земле Материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. — 2019. — С. 68-69.
6. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Исследование формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов с учётом влияния экзогенных (эрозионно-аккумуляционных) факторов / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Проблемы тектоники континентов и океанов Материалы LI-го Тектонического совещания. Москва. — 2019. — С. 75-79.
7. Мягков Д.С. Математическое моделирование колебательных процессов и формирования изостатического равновесия в континентальной литосфере / Д.С. Мягков // Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева. Иркутск: ИЗК СО РАН. — 2019 г. — С.: 158-160.
8. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Модель формирования напряжённого состояния складчатого пояса в условиях горизонтального сжатия / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Материалы LII-го Тектонического совещания. — Москва. — 2020.

Тезисы конференций:

1. Мягков Д.С. Исследование особенностей эпиплатформенного орогенеза методами аналитического моделирования / Д.С. Мягков // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. — 2016. — С. 47.
2. Мягков Д.С. Аналитические модели формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов с максвелловской реологией / Д.С. Мягков // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. — 2017. — С. 56.
3. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Изучение особенностей формирования напряжённо-деформированного состояния в континентальной литосфере методами аналитического моделирования / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Четвертая Всероссийская конференция с международным участием "Триггерные эффекты в геосистемах". — ИДГ РАН. — 2017.
4. Мягков Д.С. Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния зоны субдукции Тохоку. Исследование влияния экзогенных и эндогенных факторов / Д.С. Мягков // Четвертая Всероссийская конференция с международным участием "Триггерные эффекты в геосистемах". — М.: ИДГ РАН. — 2017.

5. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Аналитические модели формирования эпиплатформенных орогенов Центральной Азии. Изучение влияния денудационно-аккумуляционных процессов / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Семинар «Геодинамика, геомеханика и геофизика». — Алтай. — 2017.
 6. Мягков Д.С. , Ребецкий Ю.Л. Исследование экзогенных и эндогенных факторов формирования напряжённо-деформированного состояния литосферы методами аналитического и численного моделирования / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // XIV Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская Научная Сессия. — Апатиты. — 2017.
 7. Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Моделирование напряжённо-деформированного состояния сред с различными геомеханическими и реологическими параметрами в приложении к задачам региональной геодинамики / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Сборник тезисов II Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара 16-21 апреля 2018 г. «Квази-3D модель электропроводности, температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита по результатам электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируруемыми источниками». — С. 15-16.
 8. Мягков Д.С. Аналитическое моделирование формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов / Д.С. Мягков // Международная Юбилейная научная конференция, посвященная 40-летию со дня образования Научной станции РАН в г. Бишкеке. — Бишкек. — 2018 г.
 9. Мягков Д.С. Математическое моделирование формирования аномальных напряжений горизонтального сжатия за счёт денудационных процессов / Д.С. Мягков, Ю.Л. Ребецкий // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2019. — № 16. — С. 403-407.
- Мягков Д.С. Математические модели влияния экзогенных процессов на напряжённо-деформированное состояние континентальной литосферы / Д.С. Мягков // Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов V международной конференции, Москва, 4-7 июня 2019 г. — М.: ГЕОС. — 2019. — С.: 134-135
10. Мягков Д.С. Численные и аналитические модели формирования напряжённого состояния системы хребет-впадина орогена в условиях горизонтального сжатия / Д.С. Мягков // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции. Москва, ИФЗ РАН, 28-29 октября 2020 г. — М.: ИФЗ РАН. — 2020. — С. 49.

Подписано в печать «___» августа 2022 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 100 шт. Заказ №__

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88