

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 Работы выполнены 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.,  
ИО заведующего лабораторией  
фундаментальных и прикладных проблем  
тектонофизики Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки Института физики Земли им.  
О. Ю. Шмидта Российской академии наук,

## **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 тектонофизическое 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, протекающими под воздействием тепловой энергии, поступающей из астеносферы. Поскольку на текущий момент ни один из предлагаемых методов объяснения этих структур не соответствует полученным в ходе тектонофизических наблюдений данным [Ребецкий, 2015], то возникает настоятельная потребность в исследовании вкладов всех возможных факторов в формирование наблюдаемого напряжённого-деформированного состояния (НДС) эпиплатформенных орогенов.

### **Цели и задачи исследований**

Основная цель выполненного исследования состояла в создании серии аналитических моделей формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов Центральной Азии. Результаты моделирования далее сверяются с результатами тектонофизических реконструкций напряжённого состояния Тянь-Шаня и Алтае-Саян и с прочим имеющимся комплексом геолого-геофизических данных по рассматриваемым структурам, на основании чего делается вывод об адекватности той или иной модели с позиции тектонофизики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создание вязких аналитических моделей формирования напряжённо-деформированного состояния орогена под влиянием термогравитационной мелкомасштабной 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 модели в программной среде matlab и 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. Аналитическая вид моделей позволил всесторонне изучить особенность структуры напряжённого состояния в зависимости от реологических, механических и геометрических параметров моделей. Показана существенная зависимость формирующегося напряжённо-деформированного состояния Земной коры от формы денудационно-аккумуляционных процессов.

Предложенный «эволюционный» метод позволил в аналитической форме получить решение для нестационарных моделей с геометрически нелинейной деформацией во времени. Успешный опыт моделирования позволяет предложить использовать подобную методику для решения широкого круга краевых задач геодинамики. Исследована структура формирующегося поля напряжений в моделях. Полученные закономерности могут быть использованы в дальнейшем при построении геодинамических моделей и интерпретации геофизических и тектонофизических данных.

### **Защищаемые положения**

1. Мелкомасштабная 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 в поднятиях и осадконакопления во впадинах приводят к замедлению формирования рельефа, но сопровождаются при этом ускорением процесса вынужденной конвекции в коре и увеличением интенсивности внутрикоровых напряжений.

3. Режим нагружения, создающий общелитосферную складку сжатия, приводит к формированию в верхней – сейсмогенной части коры (0-15 км) зон прогиба и поднятия напряженного состояния горизонтального сжатия, что не совпадает с тектонофизическими данными о природных напряжениях.

4. Режим нагружения литосферы в виде мелкомасштабной конвекции в астеносфере приводит к формированию напряженного состояния преимущественно (10-40 км) горизонтального сжатия в коре поднятия и растяжения в коре прогиба, что соответствует тектонофизическим данным о природных напряжениях.

5. Денудационные процессы в зонах поднятия приводят к формированию в верхней части коры режима горизонтального сжатия при отсутствии внешнего сокращения модели (по

результатам численных геомеханических расчетов на упругопластических моделях).

### **Теоретическое и практическое значение**

Построенные в результате проведенного 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 напряженно-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, шести глав, заключения, списка литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объём работы составил 140 листов, 41 рисунок, 2 таблицы. Список литературы содержит 80 источников.

### **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

### Глава 1. Метод аналитического моделирования в приложении к проблемам геодинамики.

#### Современное состояние изучения эпиплатформенных орогенов Центральной Азии с позиций тектонофизики и геодинамики.

Проблема происхождения эпиплатформенных орогенов представляет особенный интерес, так как, с одной стороны, по данным структурам накоплено большое количество и геологических [Хаин, Ломизе, 1995; Белоусов, 1989; Буртман, 2012] и тектонофизических данных. С другой – простые схемы, объясняющие механизм их формирования [Cloetingh et al., 2002] за счет простого латерального сжатия, не подтверждаются как современными данными о закономерностях распределения напряжений в коре [Ребецкий, 2014], так и численными моделями [Mikhailov et al., 1999; Тимошкина и др., 2010]. Распространённость эпиплатформенных орогенов на территории России (Алтай, Саяны) и постсоветского пространства (Тянь-Шань) придаёт необходимости создания подобной модели практическую важность. Такая модель могла бы лечь в основу более детальных региональных тектонофизических моделей, на основе которых, в первую очередь, можно было бы выполнять прогноз сейсмической опасности.

На текущий момент существуют самые разнообразные модели формирования эпиплатформенных орогенов. Говоря о геодинамических источниках данного процесса, следует выделить внешние, по отношению к участку литосферы, деформирование которой приводит к возникновению орогена, и внутренние, связанные с перераспределением энергии в самом рассматриваемом участке литосферы. В качестве первых рассматриваются, в основном, термогравитационная мелкомасштабная конвекция в астеносфере, формирующая вынужденное течение в вышележащем искомом участке литосферы и коллизионное давление на окраины литосферной плиты со стороны иных плит, вызывающее деформацию внутренней части искомой плиты в обстановке латерального сжатия. 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, проистекающими 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]. С целью уточнения сделанных в этих работах выводов были проведены дополнительные исследования по созданию набора моделей «геодинамический процесс-НДС литосферы» как первого этапа в решении обратной задачи о механизме формирования внутриплитных орогенов, удовлетворяющем тектонофизическим данным.

Последние могут и должны выступать в качестве источника ключевых априорных данных для решения обратных задач геодинамики, совместно со всем комплексом геолого-геофизических данных. При этом данные о напряжённом состоянии как правило достаточно генерализированы и дают единую картину напряжённого состояния крупных участков геологических структур, поэтому их использование при моделировании методически предпочтительно именно для тех регионов и структур, где нет единой общей геодинамической модели региона.

Поскольку рассматриваемые нами геодинамические проблемы относятся к эволюционным задачам, когда необходимо проследить во времени развитие деформационной структуры, то их решения с применением численных методов требует значительных вычислительных ресурсов (компьютерные кластеры и фреймы), а также времени десятки часов – несколько суток. В силу этого обстоятельства изучение влияния различных факторов на конечный результат становится трудно обозримой задачей. Построение подобных аналитических решений особенно в приложении к эволюционным задачам, когда исследуется процесс деформирования, всегда является уникальным. Сами эти решения в силу простоты расчетов аналитических выражений позволяют быстро исследовать большой комплекс варьируемых параметров или различных краевых условий. Кроме того аналитические решения иногда позволяют просто «увидеть» характер влияния того или иного параметра, получив для него специальные соотношения. Все результаты расчетов, которые будут ниже приведены, выполнены на основе таких аналитических решений.

### **Глава 1.1. Задача о влиянии мелкомасштабной астеносферной конвекции. Эволюционный метод получения решения.**

Модели литосферы рассчитывались в рамках приближения сплошной среды. Структура моделей в начальный момент времени для рассматриваемых задач приведена на рис. 1. В модели с влиянием астеносферной конвекцией (модель I) литосфера представлена двумя слоями (кора и мантия) с вязкостями, отличающимися на два порядка, а 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 литосфере, а не сама задача об астеносферной конвекции. В обзорной работе [Добрецов и др., 2013] приведены характерные скорости конвективного процесса, составляющие первые см/год.



Рис. 1. Схема модели I (задача о влиянии астеносферной конвекции).

В текущем исследовании моделируются сверхмедленные процессы в литосфере (характерные времена которых первые десятки млн.лет). Поэтому 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.  $\rho$  – плотность,  $\eta$  – динамическая вязкость,  $\delta$  – символ Кронекера.

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

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

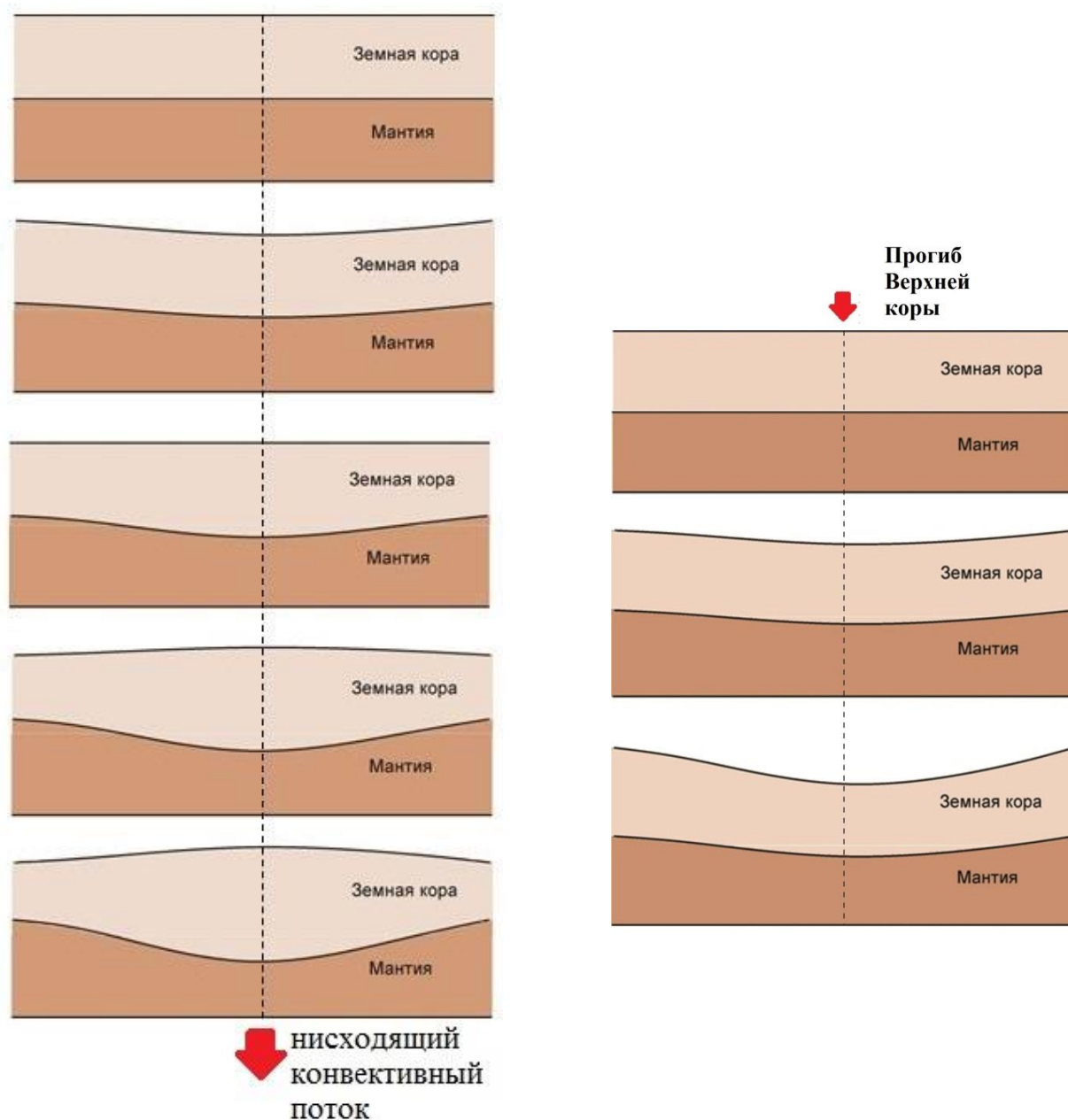


Рис. 2. Основные этапы деформации рассматриваемых моделей.

Решение уравнений (4) будет искоматься методом Фурье, применение которого базируется на вышеупомянутой латеральной гармонической периодичности моделей. Введём пространственную частоту  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны системы (латеральный размер цикла хребет - впадина). Гармоничность периодичности означает возможность представления базовых механических функций системы (компоненты вектора скорости, тензора деформации и напряжений) в виде:  $v_y(x, y) = \tilde{v}_y(y) \cos(kx)$  (5)

для прочих величин – аналогично.

Теперь опишем структуру эволюционного метода построения решения. Наибольшую сложность при этом представляет необходимость записывать ГУ на искривлённых деформациями границах модели (подчеркнём, что, в отличие от нижней, прочие границы деформируемы), а именно – на дневной поверхности и границе Мохо. Поскольку при задаваемой мощности коры 40 км и характерной длине цикла хребет-впадина для орогенов Центральной Азии более 100 км (в данном исследовании будет взята величина 120 км) амплитуда формирующегося рельефа на подвижных границах не будет превышать первые километры, то имеется возможность использовать подход Лява [Love, 1911].

Методика получения эволюционных кривых 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 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).

Далее, несложно установить характер влияния, оказываемого на систему искривлением отдельной границы. В силу исходной симметрии базового возмущения, границы также будут искривляться по гармоническому закону.

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,  $\zeta$  - амплитуд рельефа.

Теперь, 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, имеет, с учётом реологии тел модели и (10), вид:

$$\tilde{v}_x = 0 \quad \tilde{v}_y = v_0 \quad (\text{нижняя граница})$$

$$[\tilde{v}_x] = 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{xy}] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = 0 \quad (\text{внутренняя граница})$$

$$\tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad \tilde{\sigma}_{yy} = 0. \quad (\text{верхняя граница})$$

ГУ для второй подзадачи (возмущение – искривление внутренней границы), вытекает из (12), здесь, очевидно,  $\Delta\rho = \rho_m - \rho_c$ . Имеем:

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

$$[\tilde{v}_x] = 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{xy}] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = (\rho_m - \rho_c)g\tilde{\zeta}_m \quad (\text{внутренняя граница})$$

$$\tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad \tilde{\sigma}_{yy} = 0. \quad (\text{верхняя граница})$$

Аналогично, ГУ для третьей, связанной с искривлением поверхности, подзадачи:

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

$$[\tilde{v}_x] = 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{xy}] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = 0 \quad (\text{внутренняя граница})$$

$$\tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad \tilde{\sigma}_{yy} = \rho_c g \tilde{\zeta}_c. \quad (\text{верхняя граница})$$

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

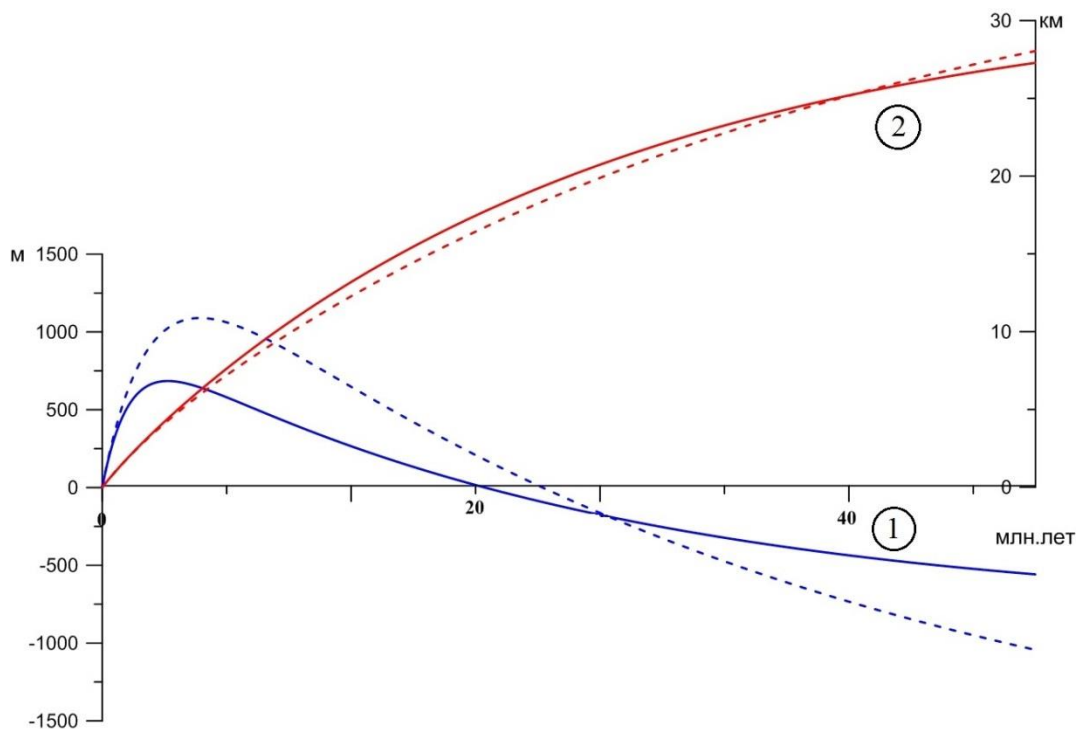


Рис. 3. Функции эволюции амплитуды рельефа дневной поверхности (синим цветом, построена относительно левой вертикальной шкалы) и подошвы коры (красным цветом, построена относительно правой вертикальной шкалы) для модели I. Пунктирной линией обозначены кривые, построенные без учёта влияния экзогенных процессов. Для кривых, обозначенных сплошной линией,  $\lambda = 0.1$

Далее могут быть выписаны эволюционные уравнения (подробный вывод приведён в [Мягков, Ребецкий, 2016]), на основании которых составляется результирующее решение краевой задачи:

$$\dot{\zeta}_c = \hat{v}_{yc}^1 v_0 + \hat{v}_{yc}^2 \Delta \rho g \zeta_m + \hat{v}_{yc}^3 \rho_c g \zeta_c. \quad (8.a)$$

$$\dot{\zeta}_m = \hat{v}_{ym}^1 v_0 + \hat{v}_{ym}^2 \Delta \rho g \zeta_m + \hat{v}_{ym}^3 \rho_c g \zeta_c. \quad (8.б)$$

Для дневной поверхности и границы Мохо соответственно. Решение системы (8), дополненное вышеуказанными начальными условиями (плоские границы в начальный момент времени), даёт выражения для амплитуд рельефа в явном виде, это и есть искомые эволюционные кривые:

$$\begin{cases} \zeta_c = C_{0c} + \Delta \rho g \hat{v}_{yc}^3 (C_{1c} \exp(\gamma_1 t) + C_{2c} \exp(\gamma_2 t)) \\ \zeta_m = C_{0m} + (\gamma_1 - \rho_c g \hat{v}_{yc}^2) C_{1m} \exp(\gamma_1 t) + (\gamma_2 - \rho_c g \hat{v}_{yc}^2) C_{2m} \exp(\gamma_2 t) \end{cases} \quad (9)$$

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.

На рис. 3 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/см<sup>3</sup>,  $\rho_m = 3.1$  г/см<sup>3</sup>,  $\eta_c = 3.3 \cdot 10^{22}$  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. 2. 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  $\sigma_3$  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  $\tau_{max}$  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  $\sigma_3$  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  $\tau_{max}$ ). 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.

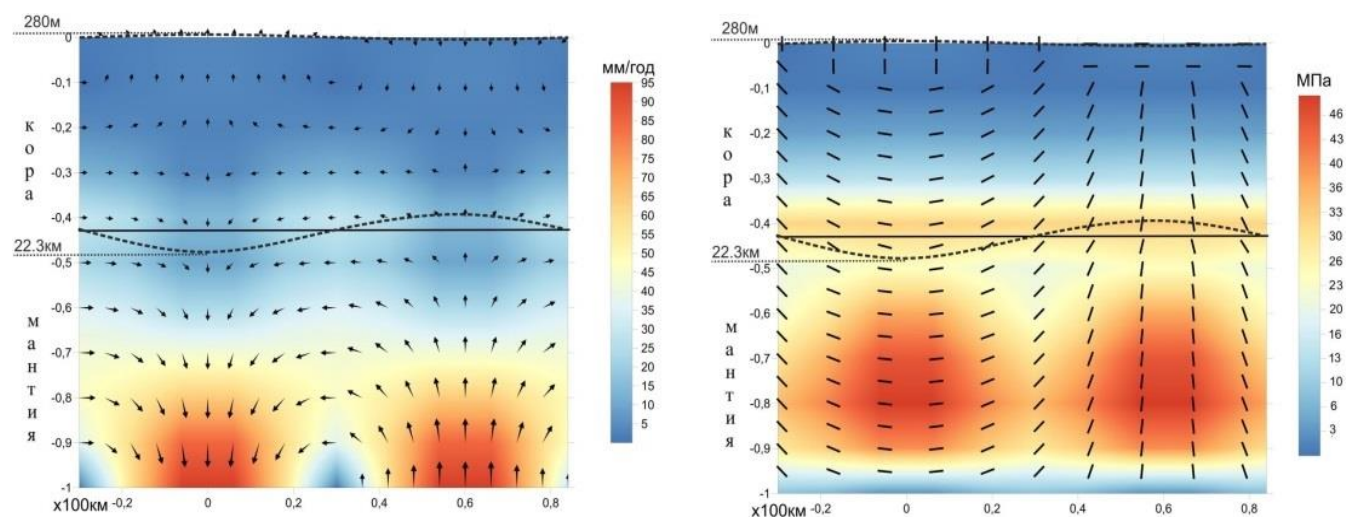


Рис. 4. Результаты моделирования (для указанного в тексте набора параметров) для модели I. Слева приведены абсолютные значения вектора скорости течения, с нанесёнными поверх ориентациями вектора скорости. **Абсолютные значения скорости в коре увеличены в 100 раз.** Справа - максимальные касательные напряжения, с нанесёнными поверх ориентациями оси  $\sigma_3$ . Данные приведены для значения времени **50** млн.л.

## Глава 2. Экзогенные процессы.

### 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, замедляя, конечно, рост амплитуды рельефа со временем, однако повышая скорости движения материала в геодинамической системе, особенно – близ поверхности, что, в свою очередь, приводит и к росту напряжений в среде. Отсюда вытекает необходимость учёта экзогенных процессов в рамках используемой модели.

Вопрос о способе математической формализации данных процессов на текущий момент достаточно хорошо изучен, как с позиций согласованности с геологическими данными [Culling, 1960], так и с физико-теоретических позиций [Blatt et al., 1972; Ahnert, 1970]. Существует большое количество численных моделей связи горообразования и экзогенных процессов [Thieulot et al, 2014]. Наиболее часто применяемая при решении геодинамических задач, подобных рассматриваемой в данной статье, математическая модель аккумуляционно-денудационных процессов предполагает зависимость между скоростью изменения амплитуды рельефа за счёт сноса/накопления осадков и формой рельефа в виде:

$$\dot{\zeta} = \lambda \Delta \zeta, \quad (17)$$

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

Специально отметим, что форма уравнений (17) определяет именно денудацию горных поднятий, а не эрозию их склонов. Форма уравнений удобна тем, что она позволяет задать столь разные поверхностные процессы в виде простой гармонической функции. На самом деле в исследуемых нами центрально-азиатских орогенах на вершинах хребтов сохранился пенеплен, 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. 2). Естественно ожидать сильное влияние денудации на амплитуду формирующегося рельефа, для сравнения, на рис. 3

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 изменению темпа эволюции модели, а именно – несколько ускоряют достижения системой основных структурных точек эволюции (так, выравнивание доинверсионных форм рельефа происходит за 2.9 вместо 5.6 млн.лет).

### **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, а не от лапласиана, как ранее. Данная модель гораздо лучше, с геологической точки зрения, соответствует реальным процессам для склоновой области орогена, но не вполне подходит для центральных зон депрессий рельефа. Поэтому для геомеханических моделей конкретных регионов корректнее сочетать предложенные подходы, в рамках же данной работы они, необходимо, исследуются изолированно.

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

$$\dot{\zeta} = C_e \zeta_{,x}, \quad (18)$$

где  $x$  – латеральная координата, а  $C_e$  – коэффициент, аналогичный  $\lambda$ . Ввести (14) в систему (9), однако, не представляется возможным также непосредственно, как и (11), т.к. соотношение (14) не удовлетворяет соотношениям симметрии (6) базовой модели. Это, в свою очередь, означает невозможность решения поставленной задачи в аналитической форме, соответственно чему решение искалось численно (методом конечных разностей).

Переход от стандартной формы учёта поверхностных процессов денудационного типа, пропорциональной амплитуде рельефа, на эрозию склонов гор, приводит к ещё большему (в пределах порядка) возрастанию скоростей вынужденной конвекции в коре и созданию структуры течения блокового типа с резкой сменой знака течения в вертикальном направлении.

### **Глава 3. Задача о формировании напряжённо-деформированного состояния литосферы в обстановке горизонтального сжатия**

В данной модели (модель II, см. рис 5) 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.

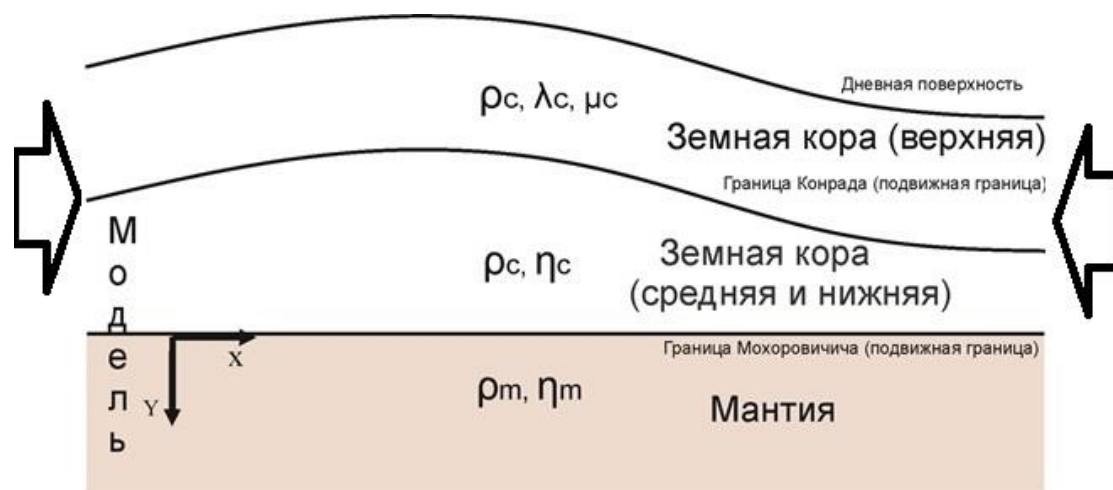


Рис. 5. Схема модели II (задача о горизонтальном сокращении литосферы).

Структура решения текущей задачи строится сходным с предыдущей образом, 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 устойчивость балки происходит с той же длиной волны, что и в предыдущей задаче (равной размеру цикла хребет-впадина). В отличие от предыдущей задачи (модель I), базовым возмущением модели II является движение потерявшей устойчивость верхней коры. Положим,

что кора сокращается с постоянной скоростью деформации  $\dot{\epsilon}_{xx}^0$ . Из элементарных геометрических соотношений следует:

$$\tilde{v}_y^0 = \beta L^2 |\dot{\epsilon}_{xx}^0|, \quad (10)$$

где  $\tilde{v}_y^0$  - амплитуда вертикальной скорости движения осевой поверхности балки, а  $\beta$  для условий рассматриваемой геомеханической задачи в приложении к Алтаю может быть прямо 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 (10) полностью аналогично (5) для предыдущей задачи. Однако теперь базовое 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:

$$\tilde{v}_y = \tilde{v}_y^0 \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad (\text{верхняя граница})$$

$$[\tilde{v}_x] = 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{xy}] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = 0 \quad (\text{внутренняя граница})$$

$$\tilde{v}_x = 0 \quad \tilde{v}_y = 0. \quad (\text{на бесконечности})$$

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

$$\tilde{v}_y = 0 \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad (\text{верхняя граница})$$

$$[\tilde{v}_x] = 0 \quad [\tilde{v}_y] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{xy}] = 0 \quad [\tilde{\sigma}_{yy}] = (\rho_m - \rho_c)g\tilde{\zeta}_m \quad (\text{внутренняя граница})$$

$$\tilde{v}_x = 0 \quad \tilde{v}_y = 0. \quad (\text{на бесконечности})$$

По аналогии с предыдущей задачей, выпишем уравнение для определения второй эволюционной кривой (граница Мохо):

$$\dot{\zeta}_m = \hat{v}_{ym}^1 \tilde{v}_y^0 + \hat{v}_{ym}^2 \Delta \rho g \tilde{\zeta}_m. \quad (11)$$

Так же, рельеф в начальный момент времени полагается плоским. Решение (21) запишем в виде:

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

Кривые, определяемые выражениями (11) и (12) представлены на рис. 6. В качестве значения  $\dot{\epsilon}_{xx}^0$  была взята величина  $10^{-9}$  ед/год.

Существенным моментом, определяющим различие между структурой эволюции в текущей и предыдущей задачах, является отсутствие инверсионных процессов для рельефа,

формирующегося на границах модели (см. рис 6). 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. Кроме того, существуют и численные модели, согласные с рассматриваемой здесь. 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.

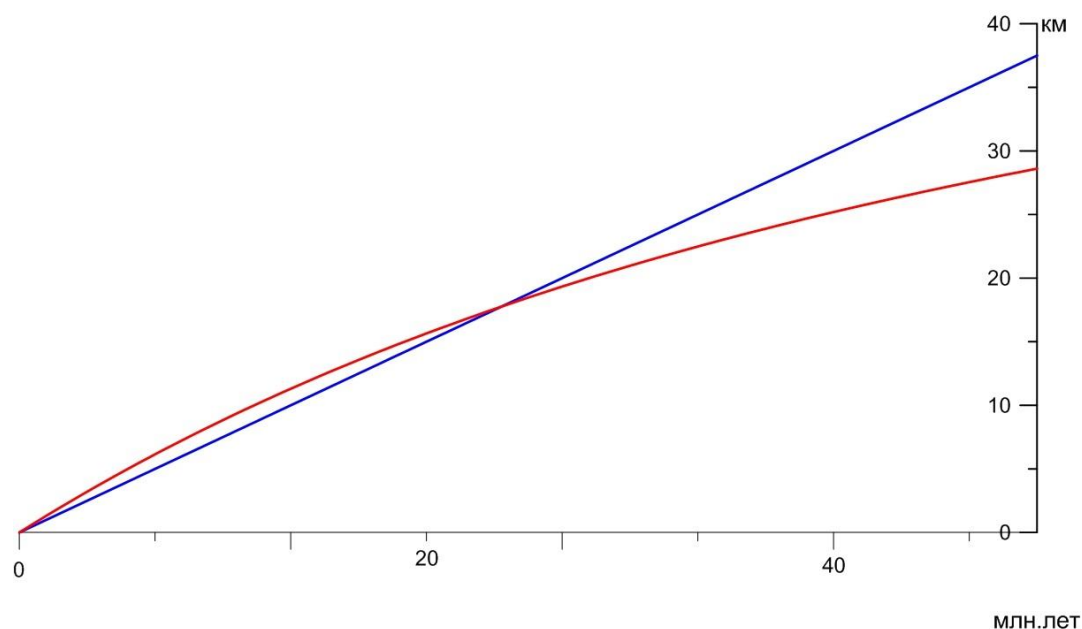


Рис. 6. Функции эволюции амплитуды рельефа границы Конрада (синим цветом) и подошвы коры (красным цветом) для модели II.

Рассмотрим эволюцию напряжённого состояния, полученного для данной модели. Структура течения здесь не представляет особого интереса, на рис. 7 она достаточно явно дана и не требует отдельных пояснений. Напряжённое же состояние имеет достаточно сложную структуру, связанную с тем, что составляющая (23) нарушает исходную латеральную симметрию НДС. На начальной стадии в области прогиба мы наблюдаем область субвертикальной ориентации оси  $\sigma_3$  на глубинах от 15 до 25 км. Уже, впрочем, на ранней стадии эволюции модели (3.3 млн.л., рис. 2, строка 2) мы видим, что угол наклона оси  $\sigma_3$  к горизонтальной оси снижается, а далее (13 млн.л., рис. 2, строка 3) и вовсе  $\sigma_3$  становится

субгоризонтально ориентированной. При этом в области поднятия субгоризонтальная ориентация  $\sigma_3$  сохраняется на протяжении всего времени эволюции НДС. Отметим, что смена режима напряжённого состояния связана, конечно, с ролью составляющей (23), которая линейно возрастает со временем, тогда как оставшаяся составляющая поля напряжения релаксирует, как и для предыдущей модели. Для верхней коры было использовано балочное решение, подробнее см. в соответствующем разделе.

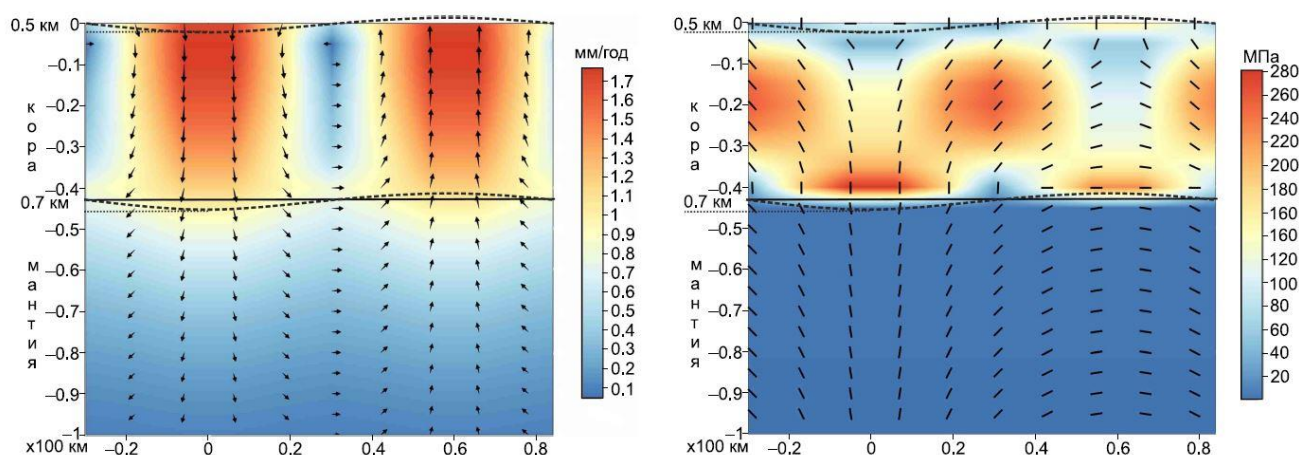


Рис. 7. Результаты моделирования (для указанного в тексте набора параметров) для модели II. Слева приведены абсолютные значения вектора скорости течения, с нанесёнными поверх ориентациями вектора скорости. Справа - максимальные касательные напряжения, с нанесёнными поверх ориентациями оси  $\sigma_3$ . Данные приведены для значения времени **0.23** млн.л.

#### **Глава 4. Модель формирования напряжённо-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов под влиянием мелкомасштабной термогравитационной астеносферной конвекции.**

На основании анализа предыдущих результатов моделирования была создана более сложная аналитическая модель эпиплатформенного орогенеза, включающая в себя конвектирующую астеносферу как самостоятельное тело. Структура модели в начальный момент времени для рассматриваемых задач приведена на рис. 8. 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 2.

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

$$\sigma_{ij,j} + K^T \delta_{iy}(T - T^0) = 0, \quad (19)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma \delta_{ij} + \eta(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (20)$$

$$\rho v_{i,i} = 0 \quad (21)$$

$$v_i(T' + T^0)_{,i} = a(T' + T^0)_{,i,i}, \quad i, j = x, y, \quad (22)$$

где (19) – уравнения движения, записанное в квазистатическом приближении, (20) – уравнения связи для реологии тела ньютона, (21) – уравнение неразрывности. Член с постоянной  $K^T$  в (19) определяет силу плавучести, возникающую из-за отклонения термического поля  $T$  от начального  $T^0$ .  $K^T = -\rho g \alpha$ , где  $\alpha$  – коэффициент термического расширения. (22) – стационарное уравнение конвективного теплопереноса,  $a$  – коэффициент температуропроводности.

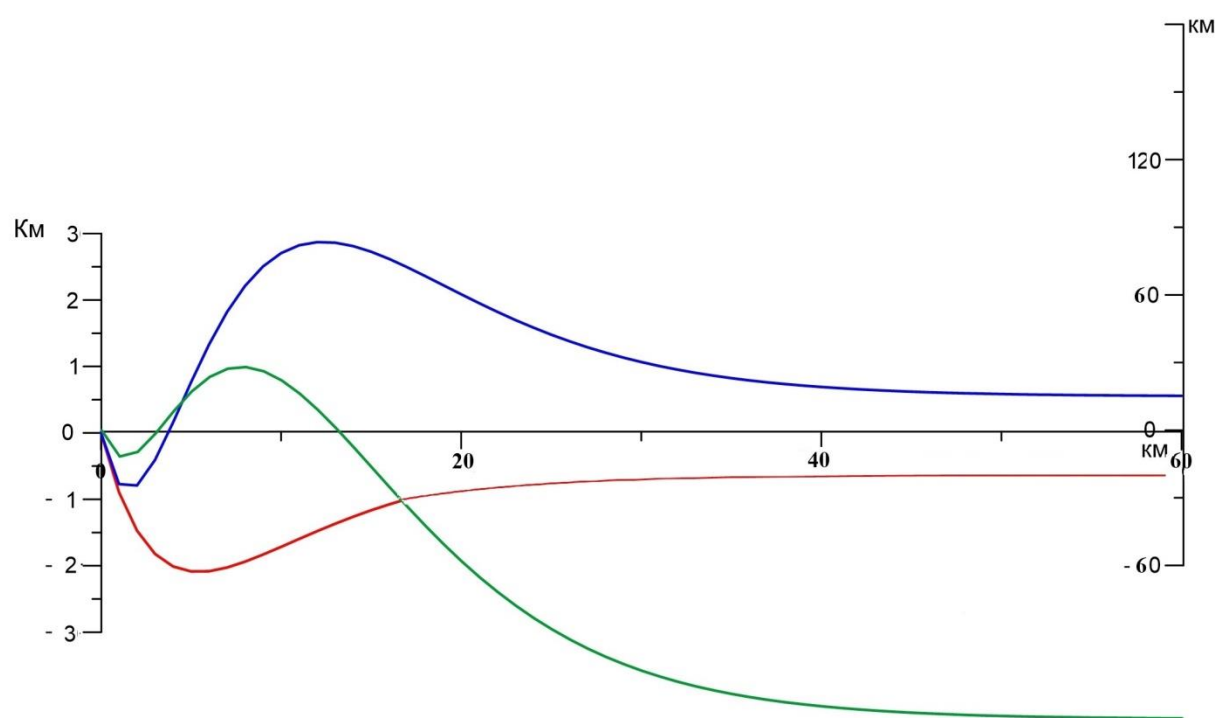


Рис. 8. Функции эволюции амплитуды рельефа дневной поверхности (1, построена относительно левой вертикальной шкалы) и подошвы коры (2, построена относительно правой вертикальной шкалы) для расширенной модели I.

Рассматриваемая модель позволила детализировать структуру эволюции модели, рассмотренной в [Мягков, Ребецкий, 2016, 2019], выявив наличие специфических колебательных процессов в системе литосфера/астеносфера. Рассмотрим эволюцию напряжённого состояния, полученного для данной модели. Структура течения здесь для литосферы не отличается принципиально от таковой из работы [Мягков, Ребецкий, 2019], движение же вещества астеносферы практически не подлежит природной верификации.

На рис. 8 приведены эволюционные кривые, полностью аналогичные таковым из предыдущих разделов. Полученные результаты показывают, что наличие дополнительной плотностной границы в модели (граница астеносфера/литосфера) усложняет эволюцию модели, представленную в разделе 2. В области нисходящего конвективного тока общее погружение литосферы на первом этапе деформации модели сменяется изостатической инверсии всей Земной коры и также верхней части литосферы. Далее только Последняя, вместе с нижней частью Земной коры, испытывают изостатическое погружение, после чего система приходит к состоянию изостазии. Подошва литосферы, при этом, погружается монотонно.

## 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. Также полученные решения могут быть использованы при решении обратных задач геодинамики.

Созданы модели 2 групп:

1. Модели формирования напряжённого состояния континентальной литосферы за счёт мелкомасштабной 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. В верхней коре геодинамический тип напряжённого состояния всюду горизонтального сжатия, в средней и нижней коре чередуются по высоте области горизонтального растяжения и сжатия.

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. Представленные выводы относительно разных видов ввода экзогенных процессов в модель могут быть использованы при создании региональных аналитических и численных геодинамических моделей. 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.

Важным результатом является полученная последовательность этапов деформации литосферы и их связь с количеством имеющихся в ней контрастных плотностных границ. На примере моделей с мелкомасштабной астеносферной конвекцией оказано, что при изменении рельефа подошвы литосферы последняя достигает изостазии через прохождение нескольких этапов последовательного формирования инверсионных форм рельефа на её плотностных границах, количество которых совпадает с количеством контрастных подвижных плотностных границ.



**СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при  
Минобрнауки России**

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.

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.

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.

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**

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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:**

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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.