



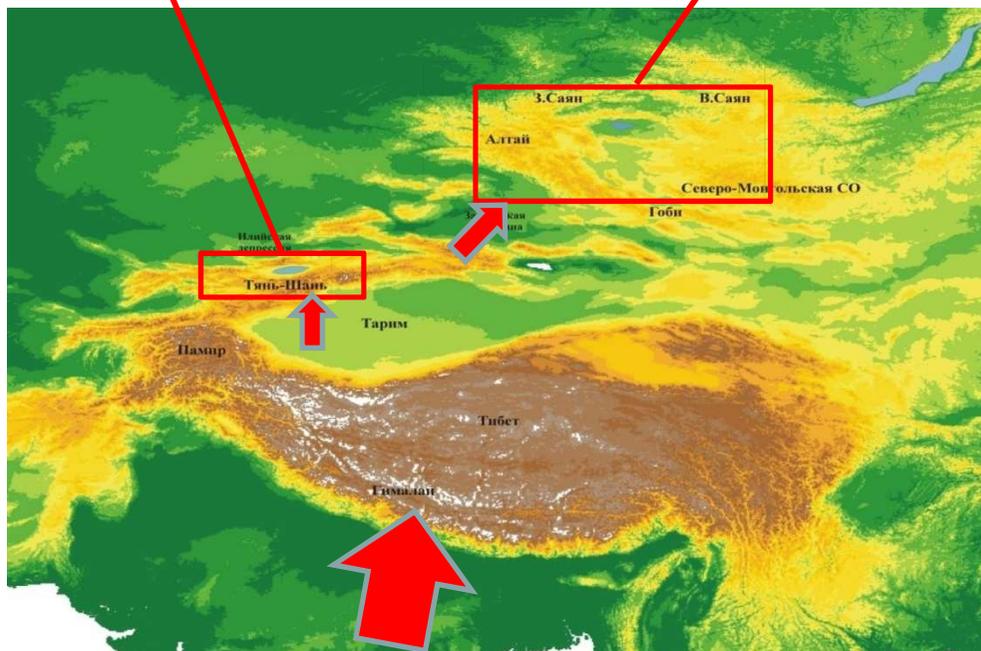
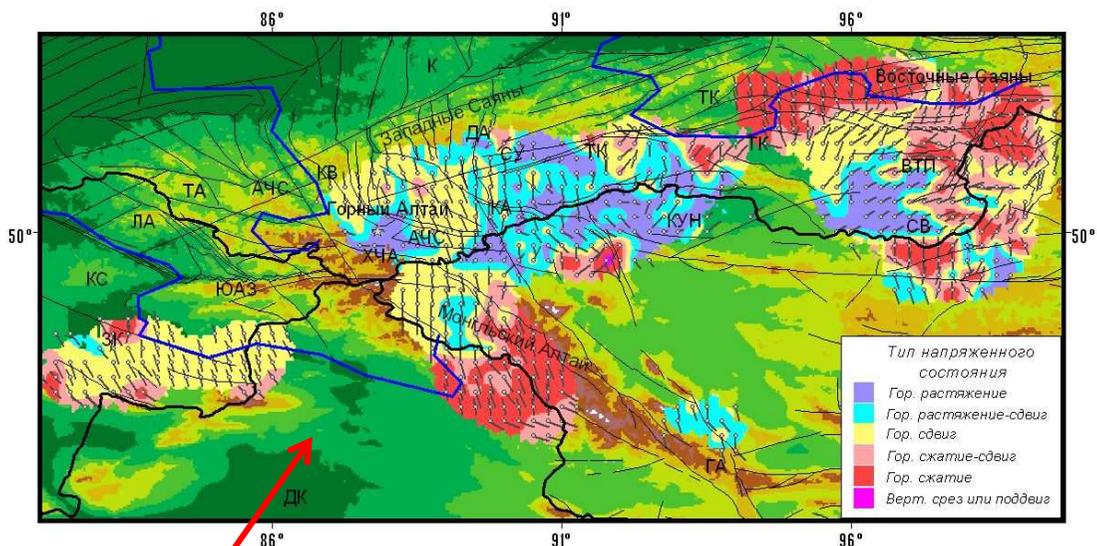
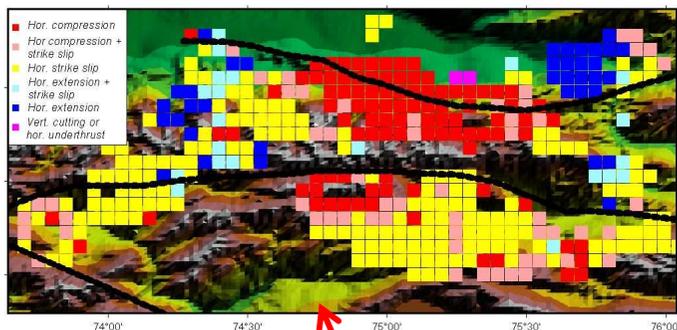
Ю.Л.Ребецкий, Москва, ИФЗ РАН, reb@ifz.ru



ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЗМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОРЫ ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНОГО ОРОГЕНА

- Определение **механизмов деформирования** крупных участков коры – обратная задача геодинамики
- **Единственность** ее решения связана с шириной спектра параметров, по которым производится сопоставление природного объекта и теоретической модели.
- Для выявления механизма, ответственного за формирование антиподных динамо пар (геодинамических режимов) в коре горных поднятия и крупные прогибов, сопоставлялись:
 - 1) кинематика кровли коры;
 - 2) геометрия границ кровли и подошвы коры;
 - 3) характер напряженного состояния, выраженный в ориентации главных осей напряжения.

Тип геодинамического режима



Схемы режимов напряженного состояния и кинематических типов коры по К.И.Кузнецовой [1995]

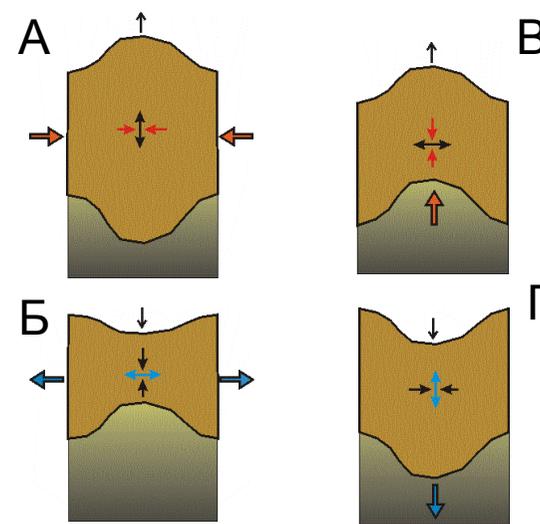
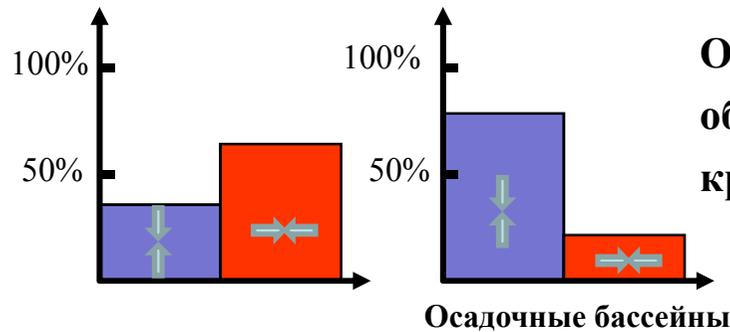


Схема А – 75 %	Схема В – 25 %
Схема Б – 67 %	Схема Г – 33 %

Данные замеров *in situ* напряжений в горных породах

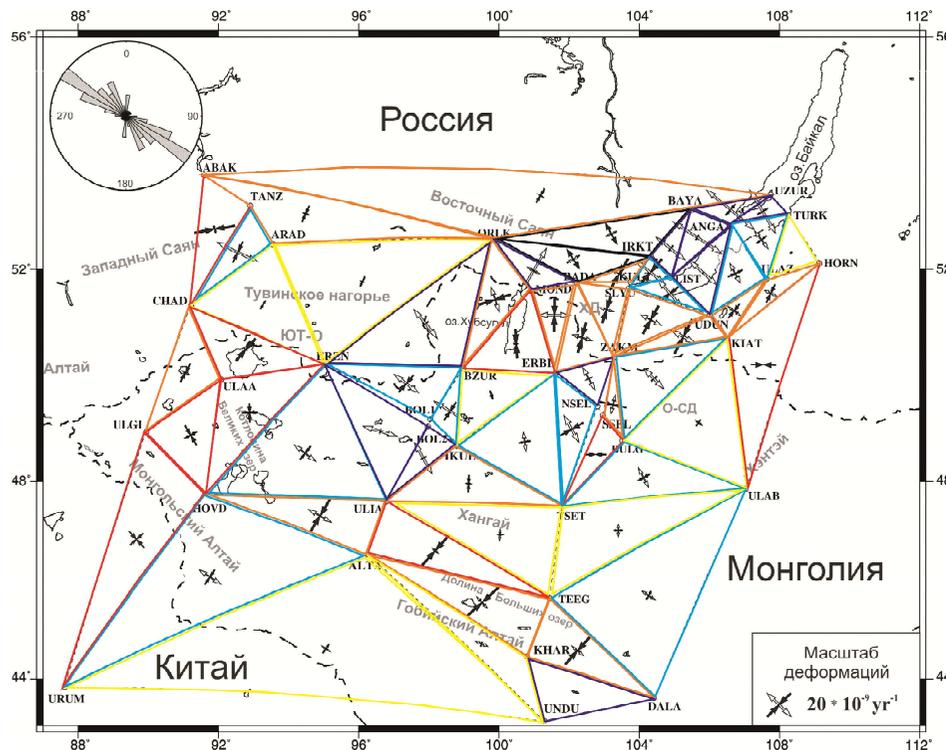


Области горизонтального сжатия преобладают над областями горизонтального растяжения в кристаллическом фундаменте в горных поднятиях.

[Марков, 1972].

Данные GPS-измерений

Центральная Азия Саньков и др. 2011



Геологические наблюдения

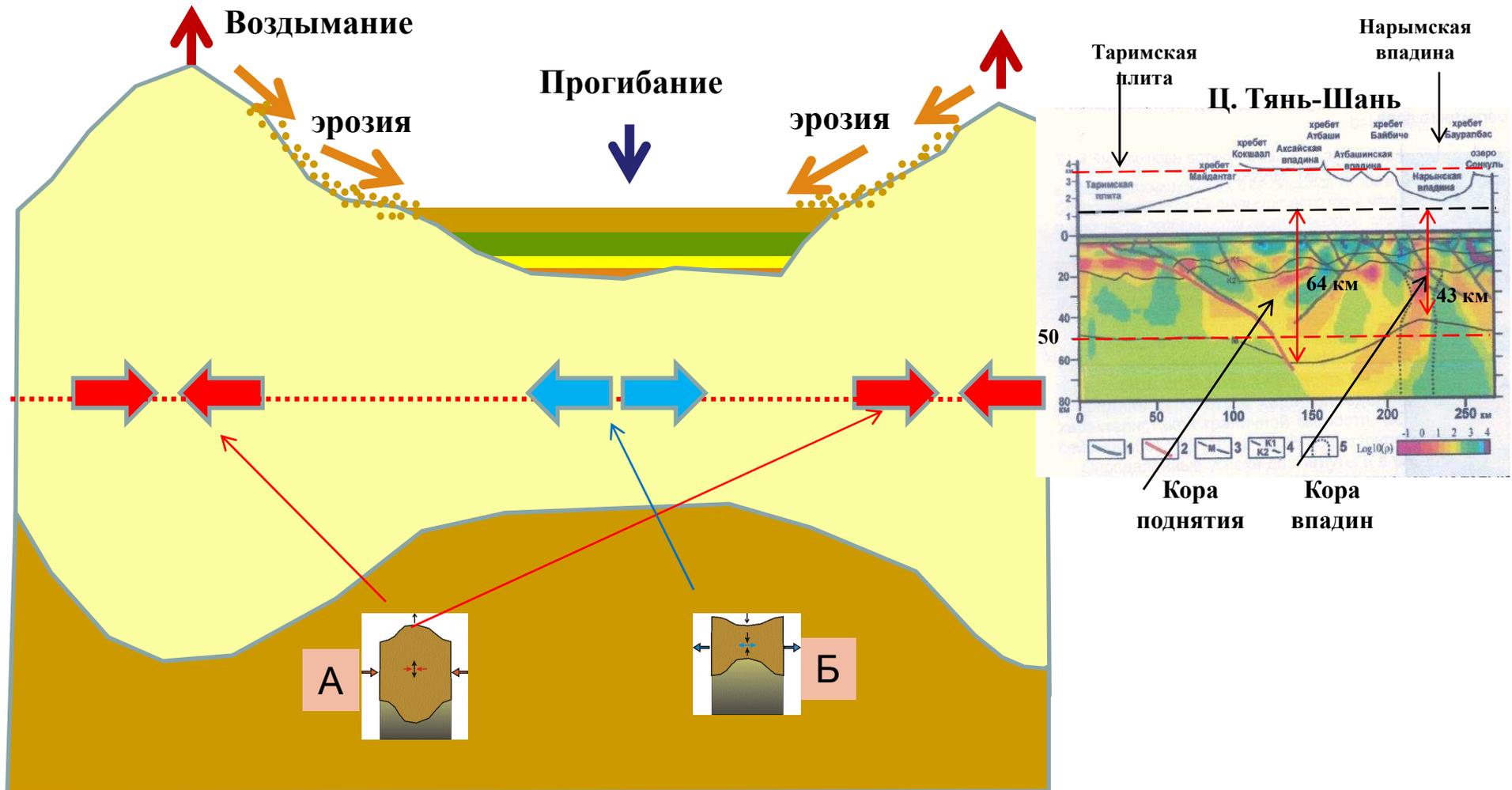
Обращает на себя внимание теснейшая **связь между процессами опускания и поднятия** сопряженных участков земной коры, которая проявляется на всем протяжении истории рассматриваемой области... предположить, что причинами, обуславливающими их развитие, могут быть только процессы перемещения магматических масс в глубоких частях коры.

Структура земной коры.., 1960, Муратов, с. 134

... простые открытые мелкие складки приурочены к синклиналям I и II порядков, а **более напряженная мелкая складчатость** наблюдается в пределах **антиклинальных складок**. ... в крупных антиклинориях породы всех участвующие в разрезе формаций **дислоцированы сильнее**, чем в синклинориях.

Неоднородность тектоносферы.., 1986, Е.А.Рогожин, стр. 82, 90-91

Динамо-пары горно-складчатых областей



- 1) Для внутриконтинентальных орогенов наблюдается **сопряженное расположение** напряженно-деформированных состояний коры по схемам А и Б .
- 2) В большинстве случаев поднятиям кровли коры отвечают корни ее подошвы, а прогибам кровли – антикорни.
- 3) Геофизические данные показывают, что кора участков поднятия обладает несколько **меньше плотностью** относительно средних значений, а кора прогибов **немного большую плотность**.
- 4) Длительное существование поднятий и опусканий всегда **сопровождается процессом денудации поверхности** с эродируемыми мощностями сопоставимыми или даже многократно превышающими современные мощности гор (Лисицин, Н.Л.Добрецов) при этом области поднятий, являются источником сноса, а области опускания - накопителем эродируемого материала.

Исследуемые механизмы деформирования

1) Внешнее воздействие на подошве литосферы

Со стороны литосферы (астеносферы) на кору действуют вертикальные силы, создающие **разный кинематический механизм движения и разный режим напряженного состояния** в коре поднятий и котловин

2) Внешнее боковое воздействие

В обстановке внешнего горизонтального сжатия формируются области поднятия и прогибания из-за механической **потери устойчивости верхней упругой части коры.**

Дополнительные факторы, требующие учета

3) Рельеф внешних и внутренних границ литосферы.

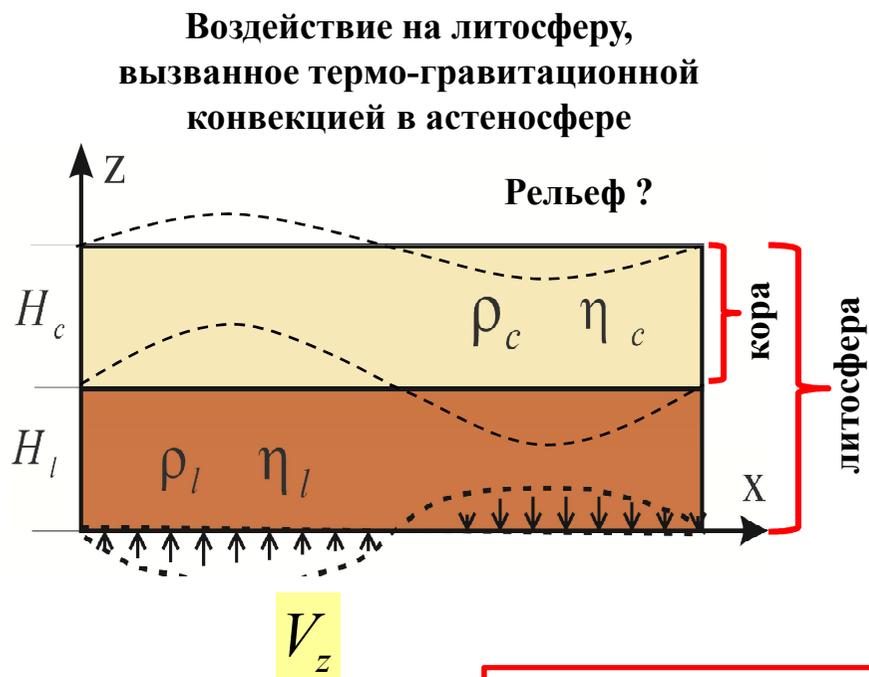
В процессе течения, вызванного внешними воздействиями, происходит формирование рельефа кровли и подошвы коры, что должно приводить к **отклонению от изостатической компенсации** в литосфере и возникновению течений, стремящегося восстановить изостазию.

4) Поверхностные процессы массопереноса.

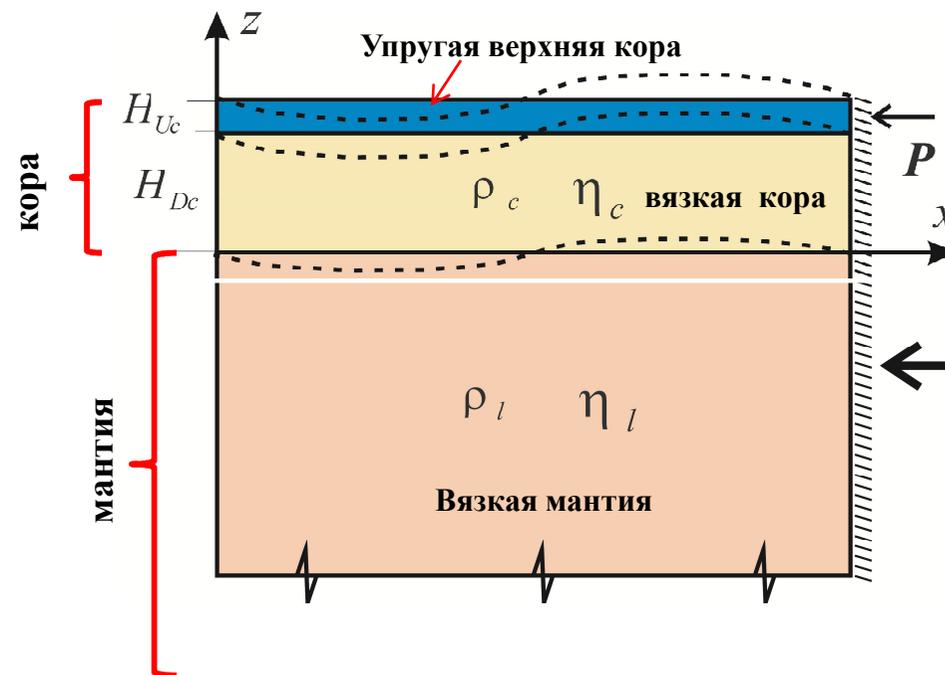
Процесс **денудацией и осадконакопления**, происходящие на поверхности коры, следует рассматривать как один из возможных факторов, определяющих особенности напряженного состояния участков поднятия и прогибов.

Механизмы формирования динамо-пар в коре

1) Возмущение подошвы литосферы



2) Горизонтальное сокращение литосферы и мантии



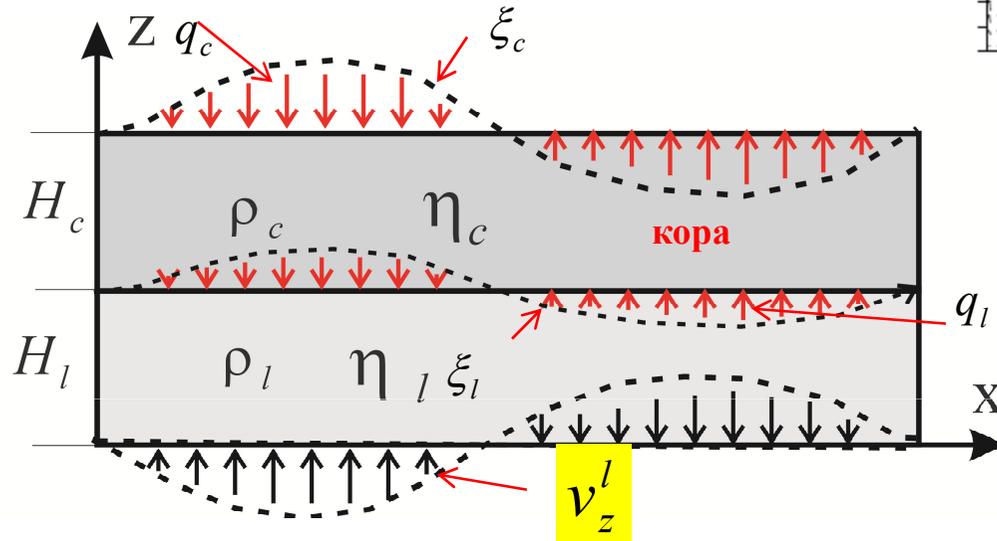
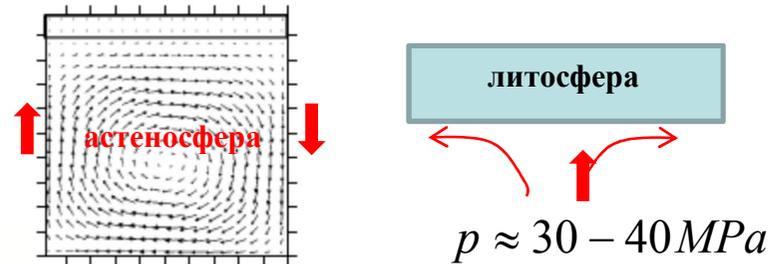
На характер течения и напряженное состояние коры будет влиять

$$\eta_c \gg \eta_l \quad \rho_c < \rho_l$$

**Влияние вертикальных движений на
напряженное состояние в литосфере**

Механизм воздействия, обусловленный конвекцией в астеносфере

Вертикальные течения на подошве литосферы обусловлены давлением на ее подошве, создаваемым астеносферной конвекцией



ξ_c, ξ_l Рельеф кровли и подошвы коры

$\xi_{c0}, \xi_{l0} > 0$ Амплитуды рельефа кровли и подошвы коры

$$\xi_c = \xi_{c0} \sin kx \quad \xi_l = \xi_{l0} \sin kx$$

$$q_c = -q_{c0} \sin kx \quad q_l = -q_{l0} \sin kx$$

$$q_{c0} = \rho_c g \xi_{c0} \quad q_{l0} = (\rho_l - \rho_c) g \xi_{l0}$$

Расчет ведется в рамках **идей Эйлера** на течение. Краевые условия в **приближении Лява** учитывают влияние рельефа на плоской границе слоя

$$\left. \begin{aligned} z = H_c \quad \sigma_{zz}^c &= q_c & \sigma_{xz}^c &= 0 \\ z = -H_l \quad v_z^l &= V_0 \sin(kx) & \sigma_{xz}^l &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$z = 0 \quad v_z^c = v_z^l \quad v_x^c = v_x^l \quad \sigma_{xz}^c = \sigma_{xz}^l$$

$$\sigma_{zz}^l - \sigma_{zz}^c = q_l(x)$$

Вязкость

$$\eta_c = 10^{23} \text{ Па сек}$$

$$\eta_l = 10^{21} \text{ Па сек}$$

Плотность

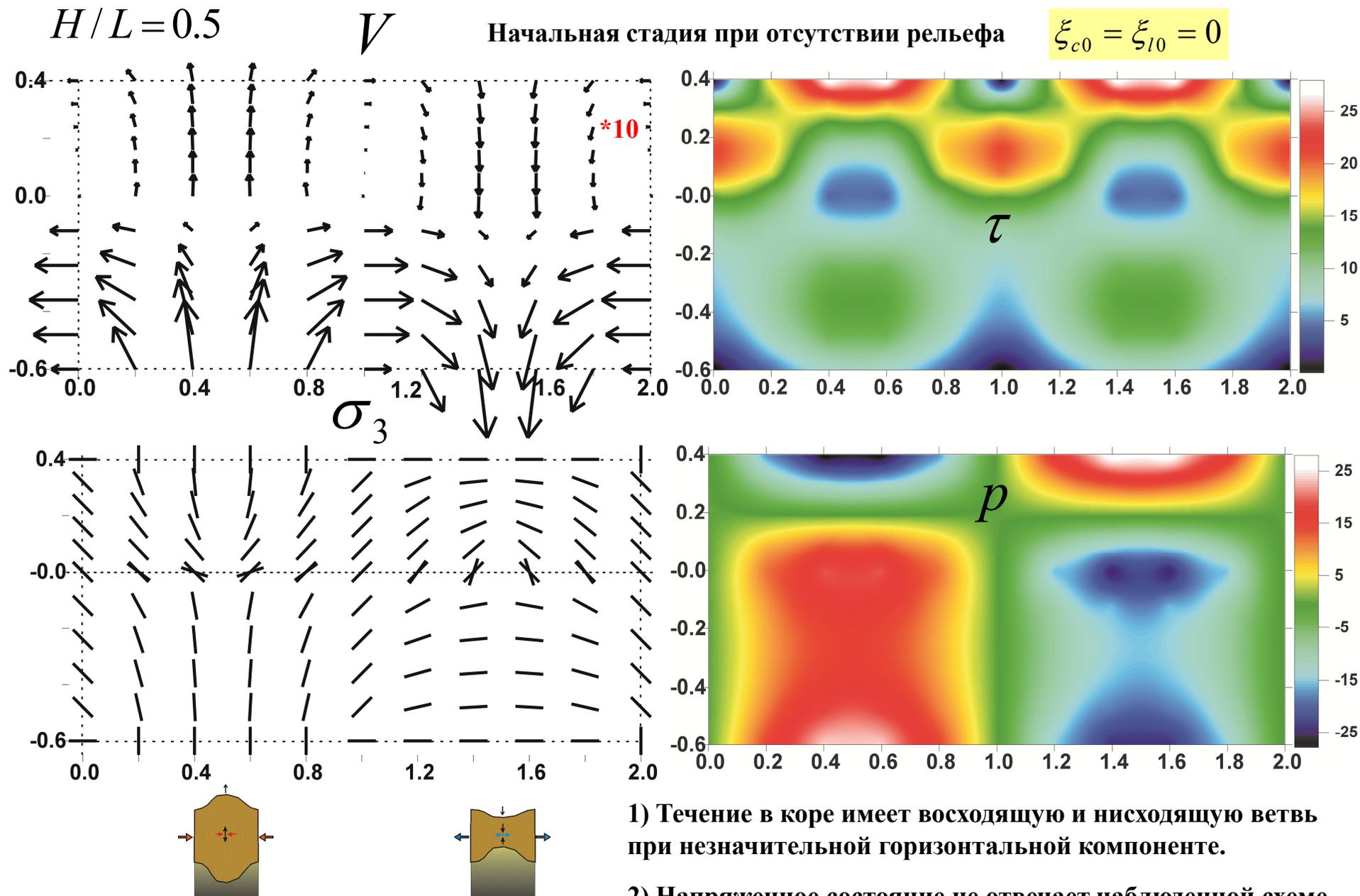
$$\rho_c = 2.7 \text{ Г/см}^3$$

$$\rho_l = 3.3 \text{ Г/см}^3$$

При расчетах следует учитывать не только рельеф кровли коры, но и рельеф ее подошвы

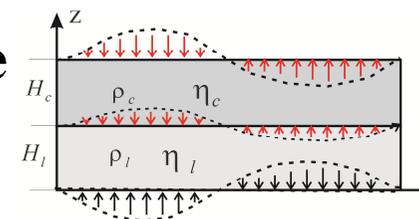
Вязкая реология не отвечает природным свойствам пород верхней и средней коры и используется с целью построения аналитического решения

Литосфера под воздействием астеносферной конвекции



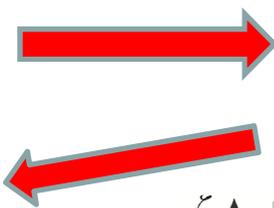
- 1) Течение в коре имеет восходящую и нисходящую ветвь при незначительной горизонтальной компоненте.
- 2) Напряженное состояние не отвечает наблюдаемой схеме.

Влияние рельефа на течение в литосфере



Уравнения, связывающие вертикальную компоненту скорости на границах коры с ее рельефом и скоростью течения на подошве литосферы

$$\left. \begin{aligned} v_z^c(H_c, x) &= (\lambda_a V_0 + \lambda_c \zeta_{c0} + \lambda_l \zeta_{l0}) \sin kx \\ v_z^c(0, x) &= (\kappa_a V_0 + \kappa_c \zeta_{c0} + \kappa_l \zeta_{l0}) \sin kx \end{aligned} \right\}$$



Эволюционные уравнения

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_{c0} = \lambda_a V_0 + \lambda_c \zeta_{c0} + \lambda_l \zeta_{l0} \\ \dot{\zeta}_{l0} = \kappa_a V_0 + \kappa_c \zeta_{c0} + \kappa_l \zeta_{l0} \end{cases}$$

$$d\ddot{\zeta}_{c0} + Ad\dot{\zeta}_{c0} + Bd\zeta_{c0} = CV_0$$

$$\zeta_{c0} = V_0 [A_1 e^{r_1 t} + A_2 e^{r_2 t} + \chi_c]$$

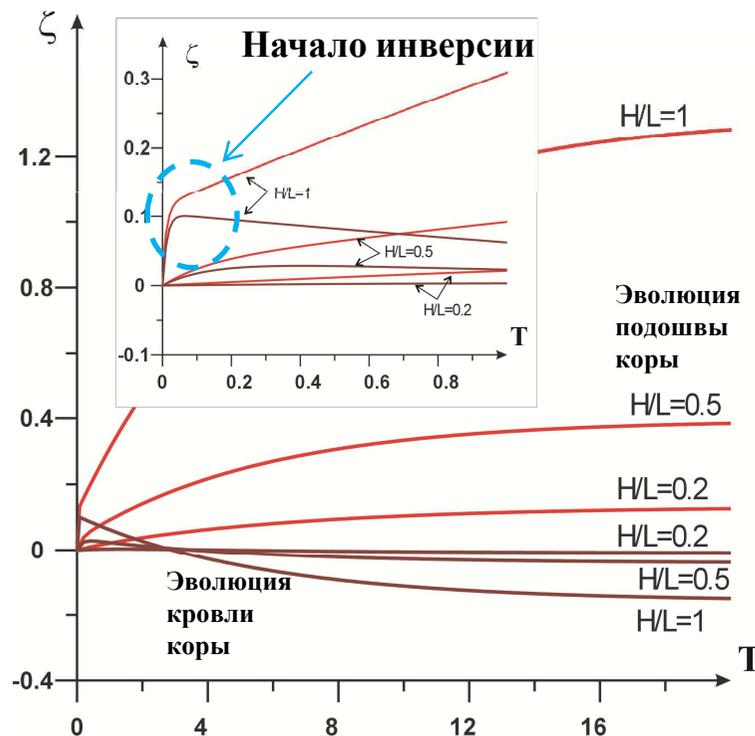
$$\zeta_{l0} = \frac{V_0}{\lambda_l} \begin{bmatrix} A_1 (r_1 - \lambda_c) e^{r_1 t} + A_2 (r_2 - \lambda_c) e^{r_2 t} \\ -(\lambda_a + \lambda_c \chi_c) \end{bmatrix}$$

$$\chi_c = (\kappa_a \lambda_l - \lambda_a \kappa_l) / (\lambda_c \kappa_l - \lambda_l \kappa_c)$$

$$r_i = 0.5 \left[(\lambda_c + \kappa_l) + (-1)^i \sqrt{(\lambda_c + \kappa_l)^2 - 4(\lambda_c \kappa_l - \lambda_l \kappa_c)} \right]$$

Начальные условия

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{c0}|_{t=0} &= 0 \\ \zeta_{l0}|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} A_1 &= \frac{\lambda_a + r_2 \chi_c}{r_1 - r_2} & A_2 &= -\frac{\lambda_a + r_1 \chi_c}{r_1 - r_2} \\ \lambda_c, \lambda_l, \kappa_c, \kappa_l &< 0 & \lambda_a, \kappa_a &> 0 \end{aligned}$$

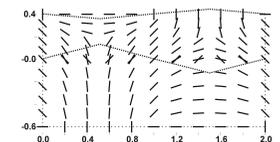
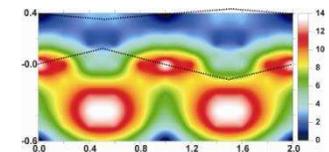
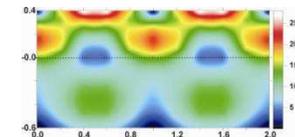
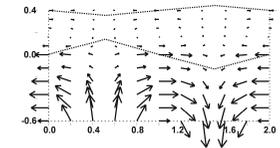
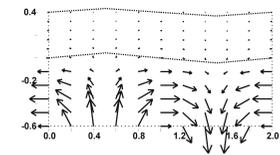


В процессе формирования течения в литосфере происходит **инверсия в эволюционном развитии рельефа** кровли коры

ВЫВОДЫ

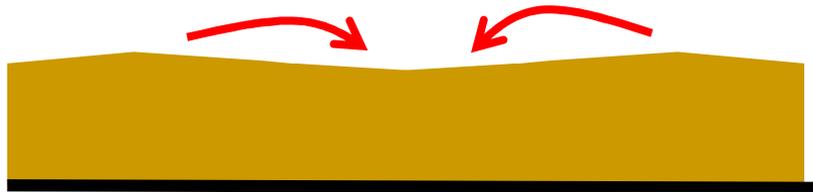
о влиянии рельефа на течение в литосфере

- 1) Под воздействием течения на подошве литосферы, задаваемому по закону гармонической функции, происходит формирование рельефа поверхности коры и ее подошвы.
- 2) На первой фазе формирования рельефа над восходящей ветвью конвекции в астеносфере возникает поднятие как на подошве коры, так и на ее поверхности. Длительность этой фазы до 1.5 млн. лет (в данных параметрах задачи).
- 3) На второй фазе повышенная плотность пород, возникающая у подошвы коры над восходящей ветвью конвекции в астеносфере, приводит к инверсии движения на поверхности коры. Происходит формирование корней гор и антикорней впадин.
- 4) В коре максимальный уровень девиаторных напряжений возникает на начальной стадии течения (25 МПа) с расположением локальных максимумов как вблизи подошвы (над нисходящей и восходящей ветвями), так и вблизи кровли (на участке смены знака течения).
- 5) В процессе развития рельефа как до, так и после инверсии кровли коры (через 5 млн. лет) происходит постепенное снижение уровня девиаторных напряжений до 13-14 МПа. Максимумы на до инверсионной стадии перемещаются к подошве коры, а на после инверсионной располагаются у подошвы на участках смены знака течения.
- 6) В коре поднятий оси сжатия субгоризонтальны в верхней ее части и субвертикальны в нижней. В коре прогибов имеет место противоположный закон ориентации оси максимального сжатия



Влияние **поверхностных процессов на
напряженное состояние в литосфере**

Влияние денудации и осадконакопления на течение в коре



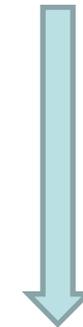
Массоперенос вдоль кровли коры, связанный с процессами денудации, эрозии и осадконакоплением зависит как от амплитуд рельефа, так и от его градиента.

Скорость поверхностных процессов

Скорость массопереноса – дифференциал Лапласа по латеральным координатам

$$v_d = \lambda_d \zeta_{c,xx} = -k^2 \lambda_d \zeta_c$$

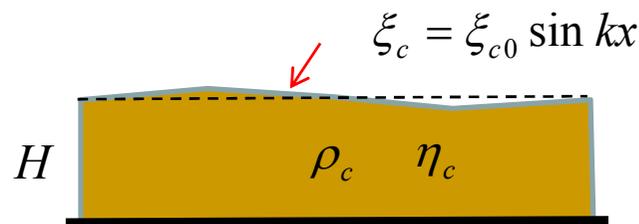
$$\zeta_c = \zeta_{c0} \sin kx \quad \lambda_d > 0$$



$$v_d = -k^2 \lambda_d \zeta_c$$

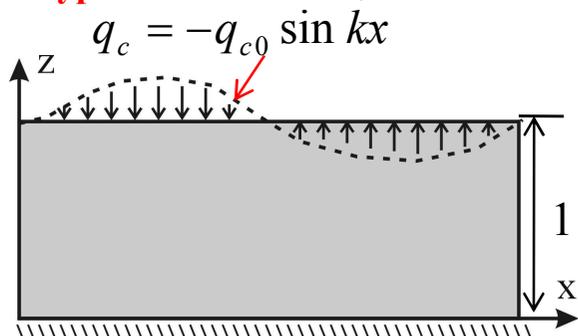
Коэффициент λ_d и имеет размерность 1/сек и может быть оценен из натуральных данных для областей орогенов. Для горных стран со средними высотами 3-5 км (Альпы – Гималаи) усредненная скорость денудационных процессов составляет 0.3-0.5 мм/год .

Исследование влияние массопереноса на кровле коры на течение и ее напряженное состояние



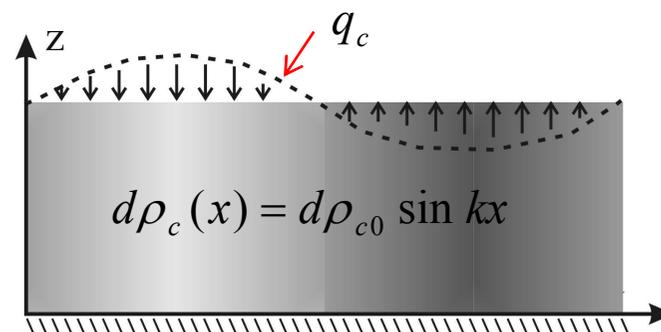
ξ_c Рельеф кровли коры
 $\xi_{c0} > 0$ Амплитуды рельефа кровли коры

Рельеф кровли коры без наличия внешних и внутренних уравнивающих сил



$$q_{c0} = \rho_c g \xi_{c0} > 0$$

Рельеф кровли коры **уравновешен** латеральной неоднородностью плотности



Вязкость коры

$$\eta_c = 10^{23} \text{ Па сек}$$

$$\left. \begin{array}{l} z = 1 \quad \sigma_{zz} = q_c \quad \sigma_{xz} = 0 \\ z = 0 \quad v_z = 0 \quad \sigma_{xz} = 0 \end{array} \right\}$$

Краевые условия в приближении Лява учитывают влияние рельефа на плоской границе слоя

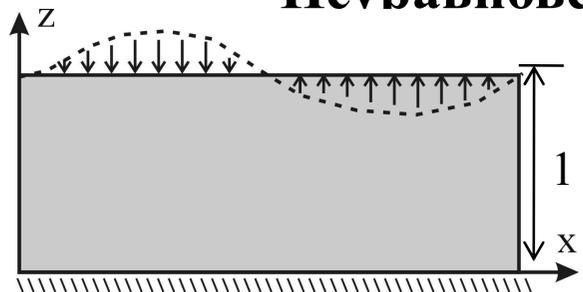
Высоты рельефа определяются требованием

$$\left. \begin{array}{l} z = 1 \\ v_z = 0 \end{array} \right\}$$

Рельефа кровли коры «не уравновешен», поэтому со временем подвержен вязкому растеканию.

Рельефа кровли коры «уравновешен», поэтому со временем менее подвержен вязкому растеканию.

Неуравновешенный рельеф кровли коры



Эволюционное уравнение для «неуравновешенного» рельеф кровли коры **без действия** поверхностных процессов

Вязкое растекание

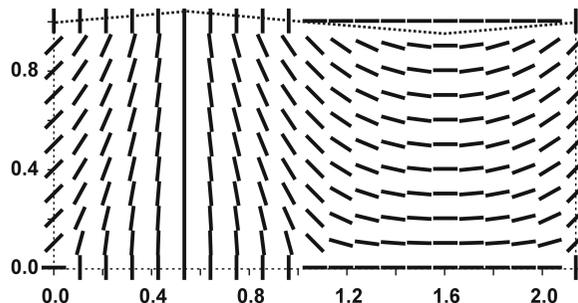
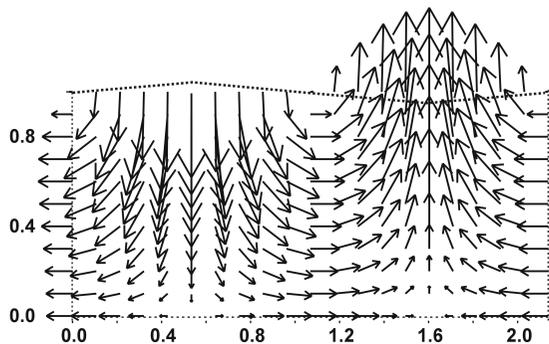
$$\begin{cases} \dot{\zeta}_{c0} = v_{c0} \\ v_{c0} = \lambda_c \zeta_{c0} \end{cases} \quad \lambda_c > 0$$

$$\dot{\zeta}_{c0} = v_{c0}$$

$$\Rightarrow \dot{\zeta}_{c0} = -\lambda_c \zeta_{c0}$$

Эволюционное уравнение

$$\dot{\zeta}_{c0} = -\lambda_c \zeta_{c0}$$



$$\zeta_{c0} = \zeta_{c0}^0 \exp^{-\lambda_c t}$$

Эволюционное уравнение для «неуравновешенного» рельеф кровли коры **при действии** поверхностных процессов

Вязкое растекание +
поверхностные процессы

$$\dot{\zeta}_{c0} = v_{c0} + v_{d0}$$

Эволюционное уравнение

$$\Rightarrow \dot{\zeta}_{c0} = -\lambda_c \zeta_{c0} - k^2 \lambda_d \zeta_{c0}$$

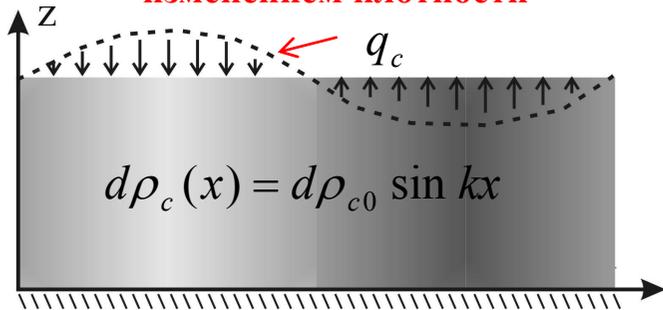
В случае «неуравновешенного» рельеф кровли коры поверхностные процессы **ускоряют** уменьшение амплитуд рельефа **без прямого влияния** на скорости внутрикорового течения – **рельеф полностью нивелируется**

$$\zeta_{c0} = \zeta_{c0}^0 \exp^{(\lambda_c - k^2 \lambda_d) t}$$

Влияние поверхностных процессов в случае «уравновешенного» рельефа кровли коры

Рельеф уравновешен латеральным

изменением плотности



Эволюционное уравнение без влияния
поверхностных процессов

$$(\dot{\zeta}_{c0})_{cr} = v_{c0} + v_{\rho0} = 0$$

$$v_{\rho} = v_{\rho0} \sin kx$$

Вязкое растекание +
влияние плотности

$$v_{\rho0} = -\lambda_{\rho} d\rho_{c0} \quad \lambda_{\rho} > 0$$

Вязкое растекание + влияние плотности

Эволюционное уравнение
без влияния
поверхностных процессов

+ поверхностные процессы

$$\dot{\zeta}_{c0} = v_{c0} + v_{\rho0} + d\dot{\zeta}_{c0}$$

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_{c0} &= d\dot{\zeta}_{c0} \\ \zeta_{c0} &= \zeta_{c0}^0 + d\dot{\zeta}_{c0} \end{aligned}$$

$$d\dot{\zeta}_{c0} = v_{cd0} + v_{d0}$$

$$v_{cd0} = \lambda_c d\zeta_{c0}$$

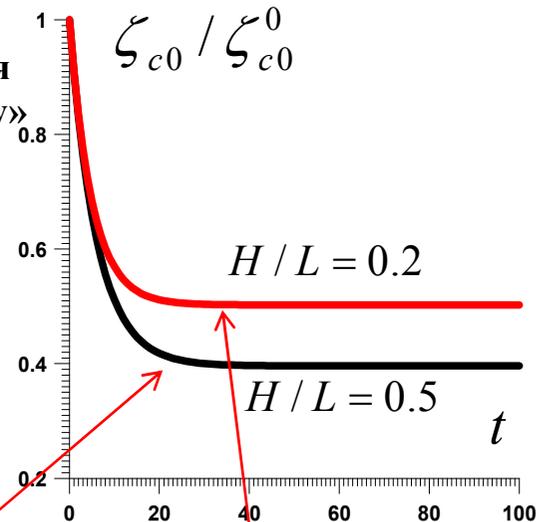
При отклонении рельефа от «уравновешенного»
состояния в коре **возникает течение**, стремящееся
вернуть рельеф к начальному «уравновешенному»
положению

$$v_{d0} = -k^2 \lambda_d (\zeta_{c0}^0 + d\zeta_{c0}) \quad \lambda_c - k^2 \lambda_d < 0$$

Эволюционное уравнение

$$d\dot{\zeta}_{c0} = -k^2 \lambda_d (\zeta_{c0}^0 + d\zeta_{c0}) + \lambda_c d\zeta_{c0}$$

$$d\zeta_{c0} = \frac{k^2 \lambda_d}{\lambda_c - k^2 \lambda_d} \left[1 - \exp^{(\lambda_c - k^2 \lambda_d)t} \right] \zeta_{c0}^0$$



$$\lambda_c = -0.0658$$

$$\lambda_c = -0.102$$

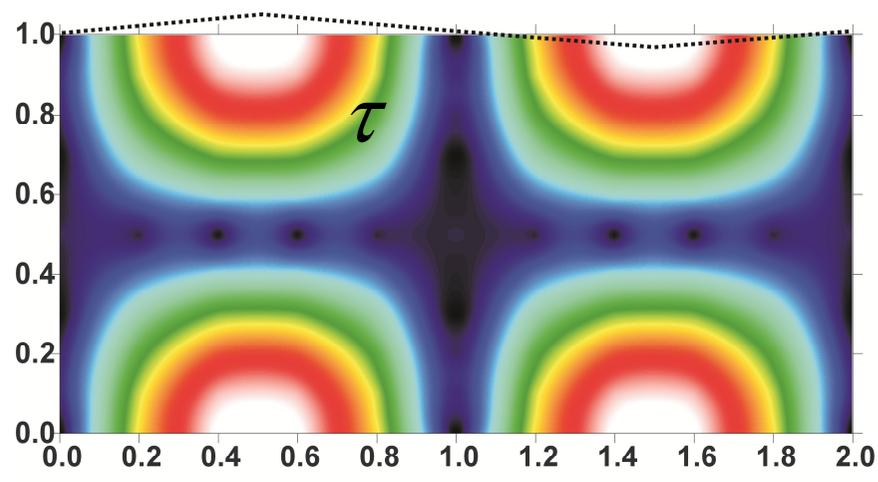
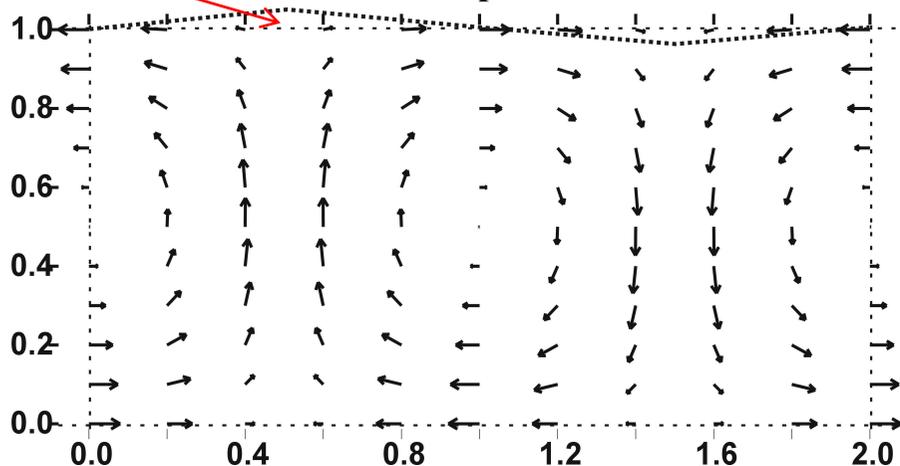
$$k^2 \lambda_d < 0.1 A^{-1}$$

Кора латерально-неоднородная по плотности

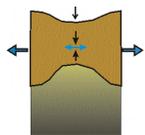
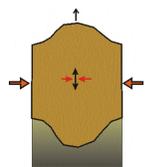
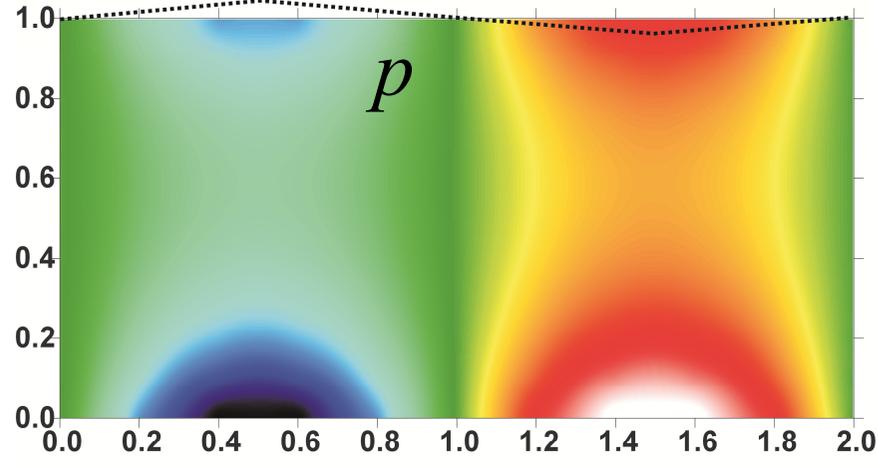
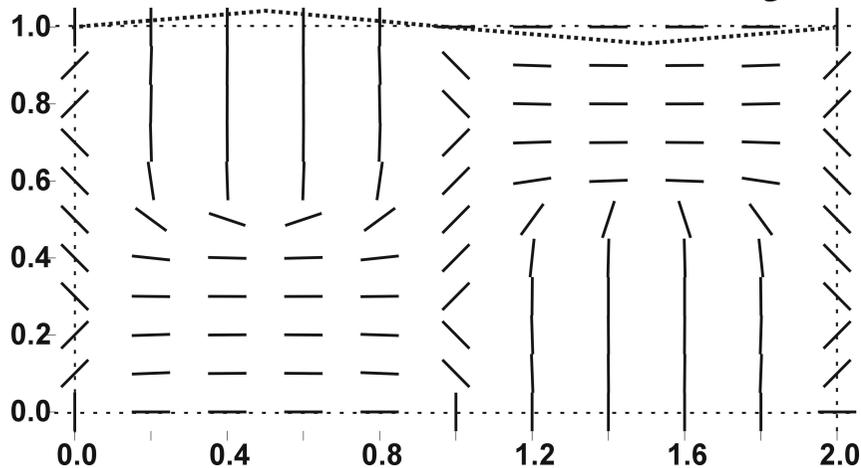
$H/L = 0.5$

$\zeta_{c0} = 0.95 km$

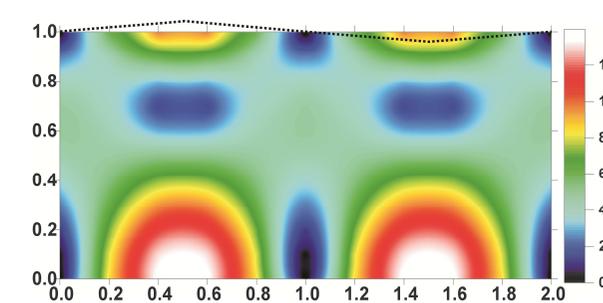
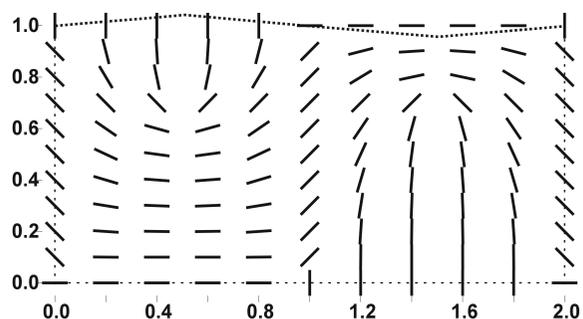
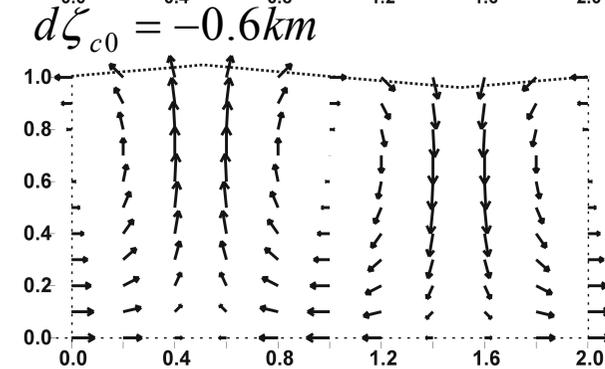
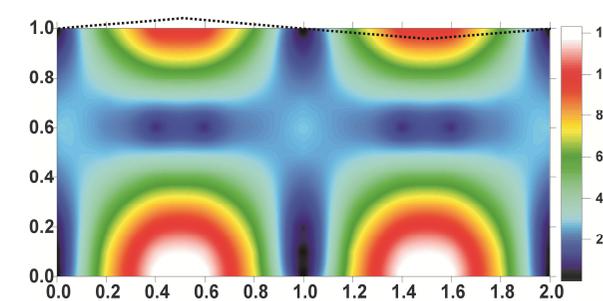
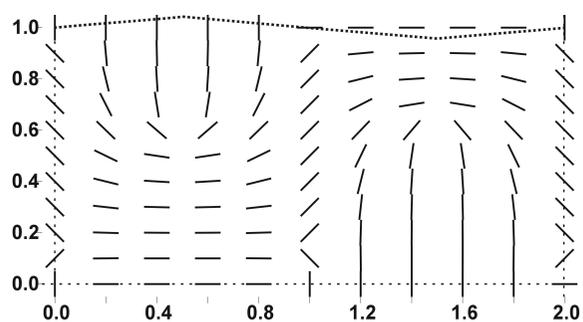
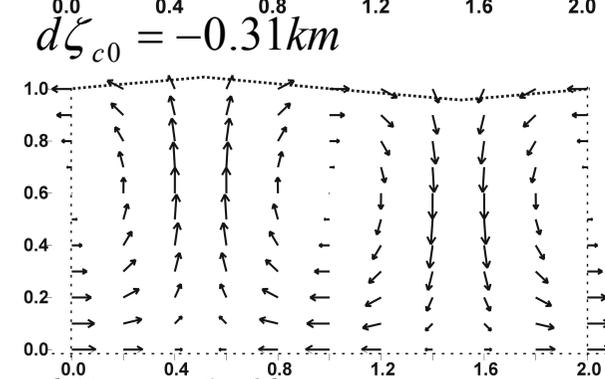
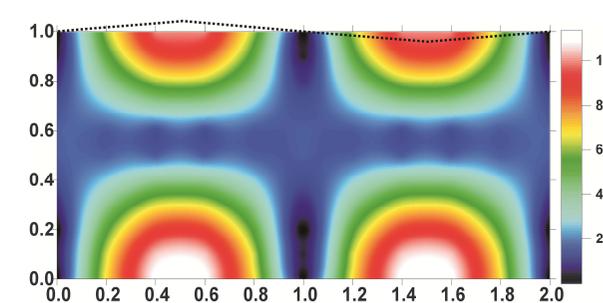
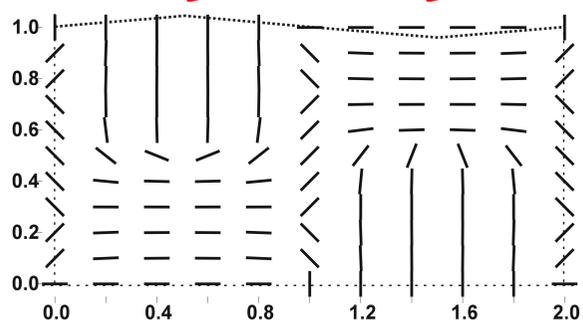
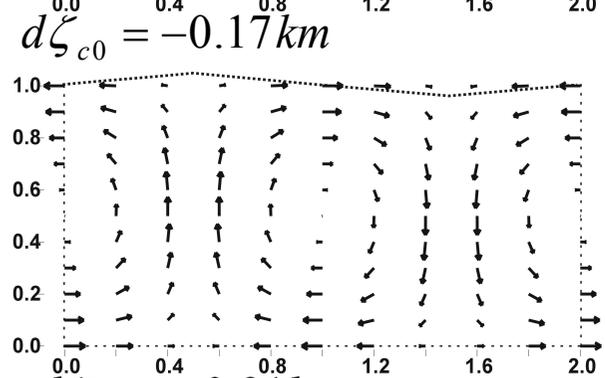
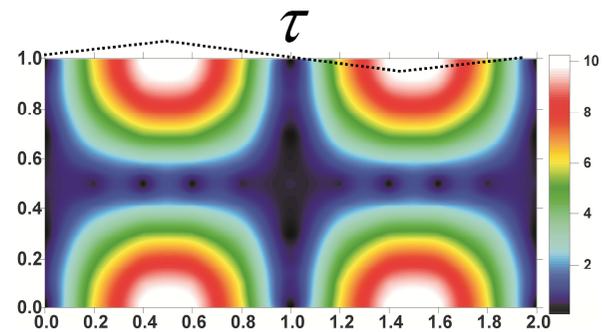
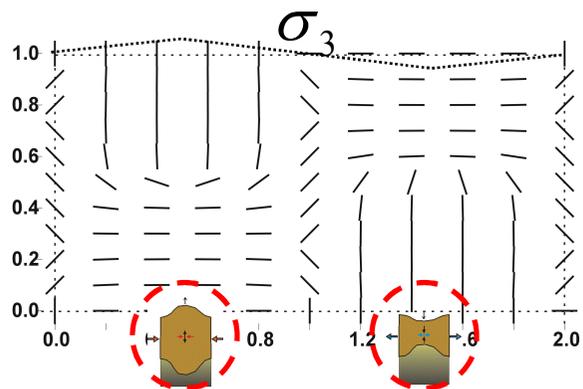
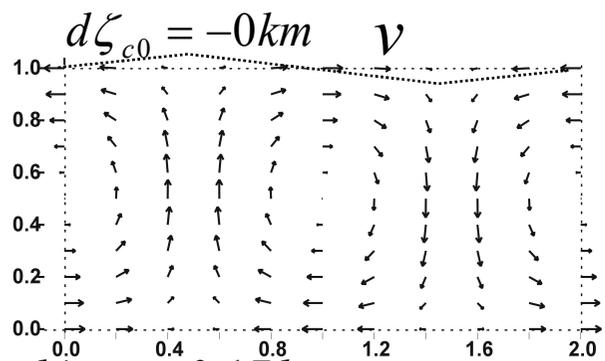
Вектора течения



Оси максимального сжатия σ_3



В нижней части коры ориентация осей максимального сжатия соответствует наблюдаемой схеме напряженного состояния.

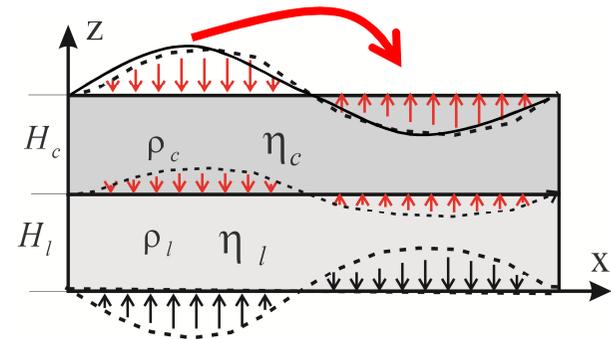


Влияние поверхностные процессы на литосферное течение

Эволюционные уравнения

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_{c0} = \lambda_a V_0 + \lambda_c \zeta_{c0} + \lambda_l \zeta_{l0} + d\dot{\zeta}_{c0} \\ \dot{\zeta}_{l0} = \kappa_a V_0 + \kappa_c \zeta_{c0} + \kappa_l \zeta_{l0} \\ d\dot{\zeta}_{c0} = -k^2 \lambda_d (\zeta_{c0} + d\zeta_{c0}) + \lambda_c d\zeta_{c0} \end{cases}$$

Дополнительные члены, связанные с действием поверхностных процессов



$\zeta_{c0} = Ae^{rt}$ Предполагаемый вид временной зависимости амплитуды перемещения кровли

$d\dot{\zeta}_{c0} + (k^2 \lambda_d - \lambda_c) d\zeta_{c0} = k^2 \lambda_d Ae^{rt}$

$$d\zeta_{c0} = Ce^{-(k^2 \lambda_d - \lambda_c)t} + \frac{k^2 \lambda_d}{k^2 \lambda_d - \lambda_c} \zeta_{c0}$$

Начальные условия

$t = 0 \quad \zeta_{c0}, d\zeta_{c0} = 0 \rightarrow C = 0$

Поверхностные процессы в виде денудации и осадконакопления, несколько уменьшая амплитуды рельефа, существенно увеличивают скорости внутрикорового течения

$$\begin{cases} \left(\frac{-\lambda_c}{k^2 \lambda_d - \lambda_c} \right) \dot{\zeta}_{c0} = \lambda_a V_0 + \lambda_c \zeta_{c0} + \lambda_l \zeta_{l0} \\ \dot{\zeta}_{l0} = \kappa_a V_0 + \kappa_c \zeta_{c0} + \kappa_l \zeta_{l0} \dots \dots \dots \end{cases}$$

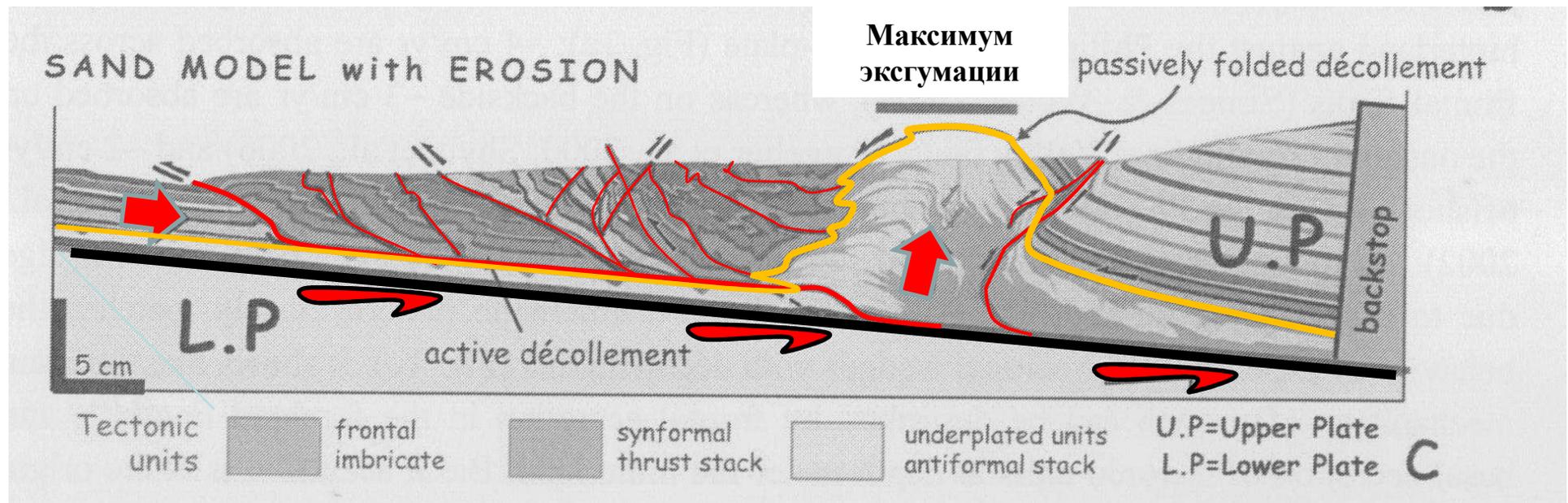
ВЫВОДЫ

о влиянии поверхностных процессов на течение в литосфере

- 1) В случае неуравновешенного рельефа процессы денудации и осадконакопления приводят к ускорению нивелирования рельефа без увеличения скоростей течения в коре и без увеличения уровня напряжений.**
- 2) В случае, когда формирование рельефа поддерживается внешними или внутренними силами процессы денудации и осадконакопления увеличивают скорость течения в коре и повышают уровень девиаторных напряжений на 20-20%.**

Роль денудации поверхности в формировании внутреннего течения в геосреде

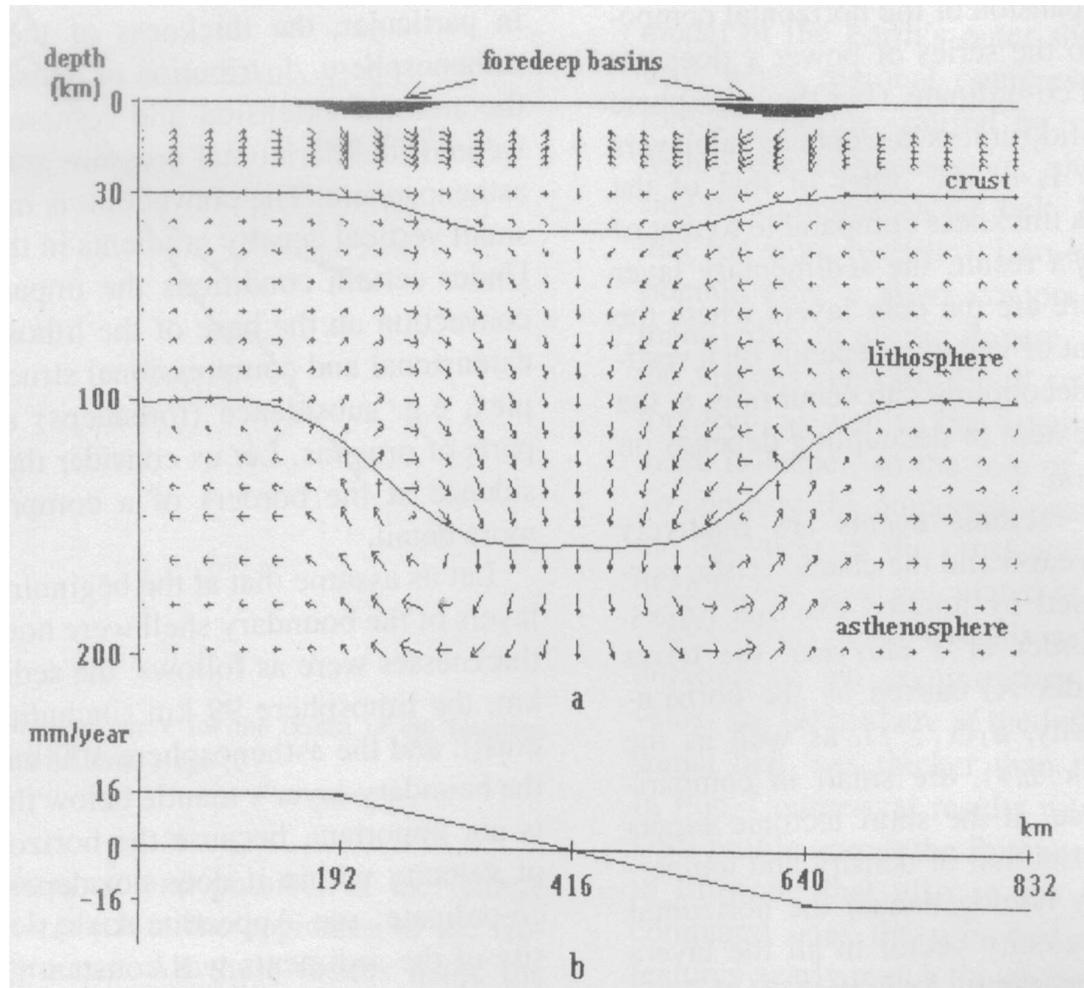
В районах с мощной континентальной корой **эрозионно-денудационные процессы** могут выступать в роли важнейших причин, определяющих литостатическое давление и температуру на определенных глубинах, т.е. параметры, обуславливающие образование тех или иных минеральных ассоциаций. **К.Оллиер, 1981**



Реализация в моделях условий эрозии наиболее быстро развивающихся форм рельефа резко изменяет ход деформационного процесса.

- 1) Прекращается развитие конуса сжатия в области упора.
- 2) Весь объем песка, располагавшийся в нижней части модели начинает поступать к участку, поверхность которого испытывает эрозию.
- 3) На участке эрозии наблюдаются сверх интенсивные вертикальные перемещения.
- 4) Все участки модели вне области вертикального течения резко замедляют свое развитие.

Численное моделирование деформаций литосферы при мелкомасштабной конвекции в астеносфере



+

- 1) Формирование в коре участков поднятий корней.
- 2) Возникновение параллельно с поднятиями прогибов.
- 3) Горизонтальное сжатия в коре поднятий.

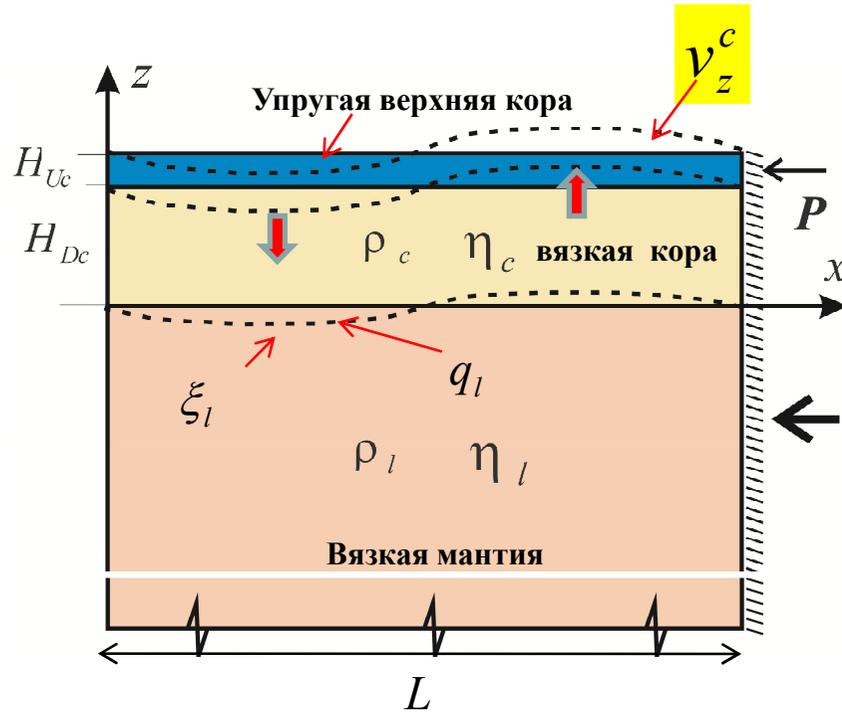
-

- 1) Скорости течения в коре и мантии близки по амплитудам при перепаде вязкости в два порядка ?
- 2) Отсутствие антикорня в коре прогибов?
- 3) Поступательность процесса формирования рельефа без фаз инверсии или периодических колебаний?

[Mikhailov et al., 1999; Тимошкина и др., 2010]

**Влияние горизонтальных движений на
напряженное состояние в литосфере**

Механизм воздействия, обусловленный потерей устойчивости горизонтально сжимаемой литосферы



Краевые условия в приближении Лява для напряженного состояния литосферы, вызванного вертикальным движением кровли нижней коры из-за потери устойчивости упругой верхней коры

$$\begin{aligned}
 z = H_{Dc} & \quad v_z^{Dc} = V_0 \quad \sigma_{xz}^{Dc} = 0 \\
 z = -\infty & \quad v_z^l = v_x^l = 0 \\
 z = 0 & \quad v_z^{Dc} = v_z^l \quad v_x^{Dc} = v_x^l \quad \sigma_{xz}^{Dc} = \sigma_{xz}^l \\
 & \quad \sigma_{zz}^l - \sigma_{zz}^{Dc} = q_l(x)
 \end{aligned}$$

$$V_0 = 0.5L\dot{\varepsilon}_{xx}^1$$

$$\dot{\varepsilon}_{xx}^1 < 0$$

Заданная скорость деформаций горизонтального сокращения

Напряженное состояние однородного горизонтального сокращения

$$\sigma_{xx}^i = \eta_i \dot{\varepsilon}_{xx}^1 \quad \sigma_{yy}^i = 0.5\sigma_x^i \quad \sigma_{zz}^i = \sigma_{xz}^i = 0$$

ξ_{Dc}, ξ_l Рельеф кровли и подошвы нижней коры

$\xi_{Dc0}, \xi_{l0} > 0$ Амплитуды рельефа кровли и подошвы нижней коры

$$\xi_l = \xi_{l0} \sin kx \quad \xi_{Dc} = \xi_{Dc0} \sin kx$$

$$q_l = -q_{l0} \sin kx \quad q_{l0} = (\rho_l - \rho_c)g\xi_{l0}$$

Вязкость

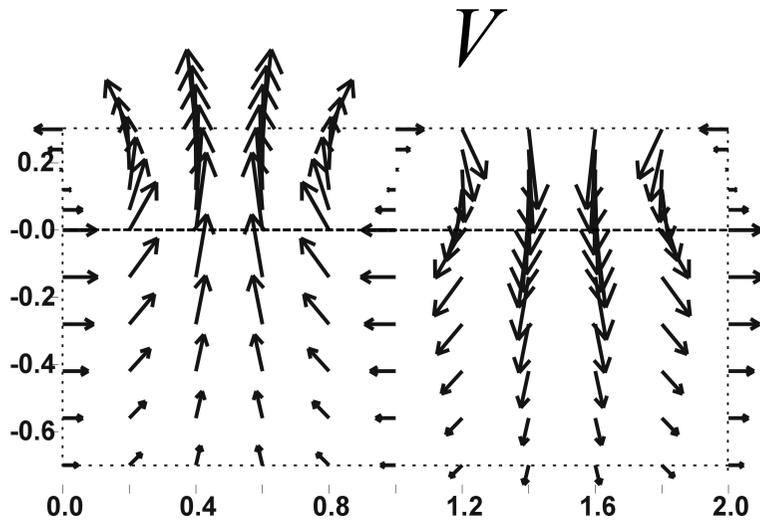
$$\begin{aligned}
 \eta_c &= 10^{23} \text{ Па сек} \\
 \eta_l &= 10^{21} \text{ Па сек}
 \end{aligned}$$

Плотность

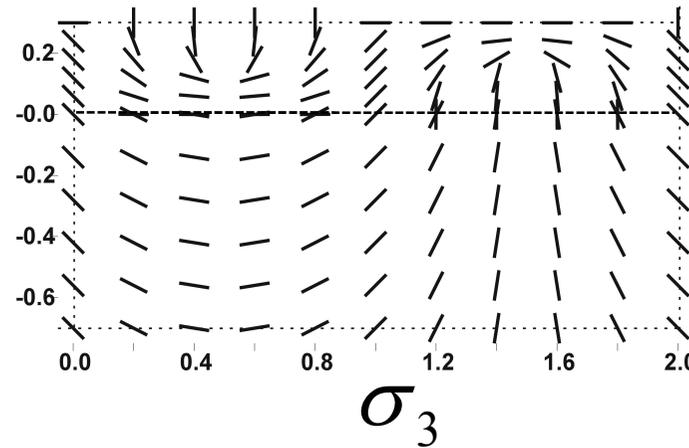
$$\begin{aligned}
 \rho_c &= 2.7 \text{ Г/см}^3 \\
 \rho_l &= 3.3 \text{ Г/см}^3
 \end{aligned}$$

При расчетах следует учитывать рельеф подошвы коры

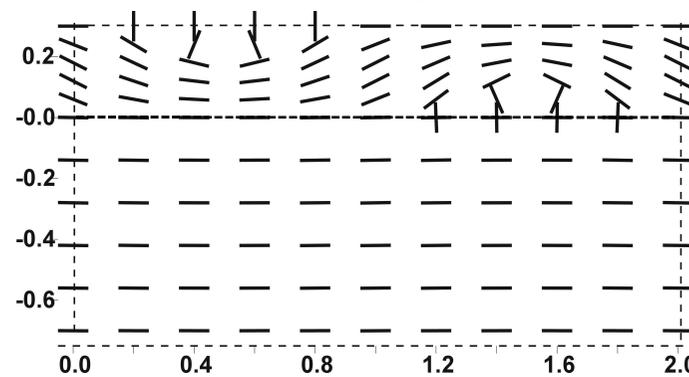
Литосфера в условиях горизонтального сжатия



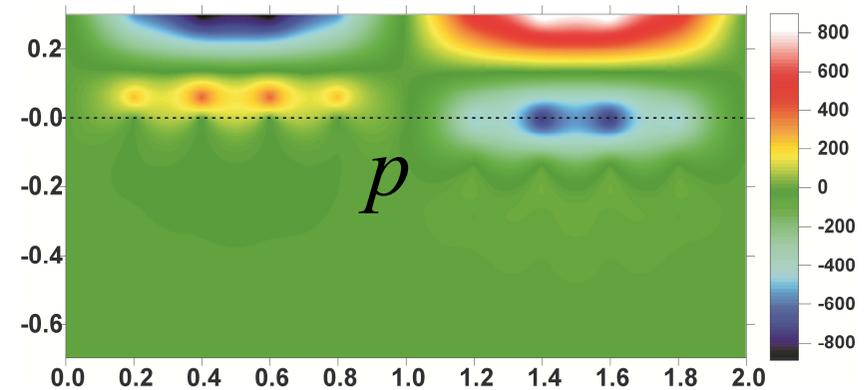
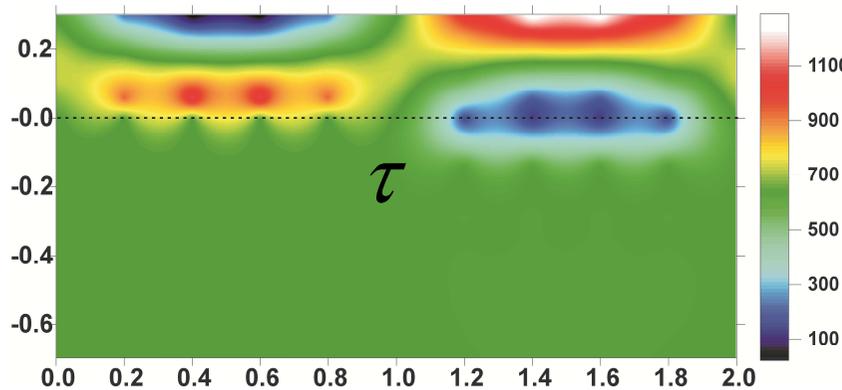
Движения кровли и подошвы нижней коры задается движением упругой верхней коры



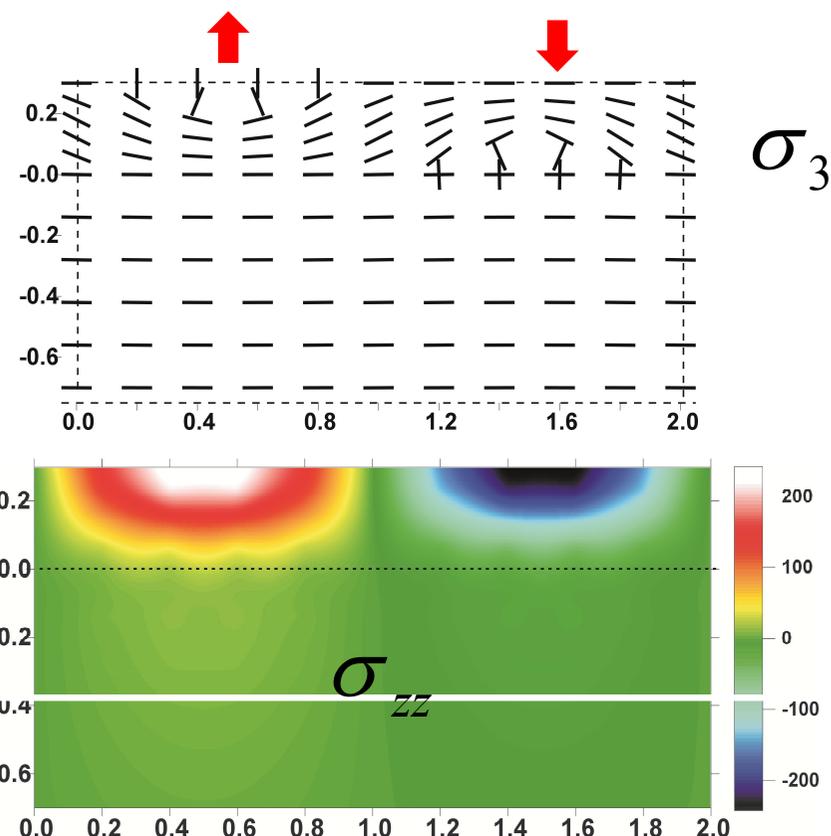
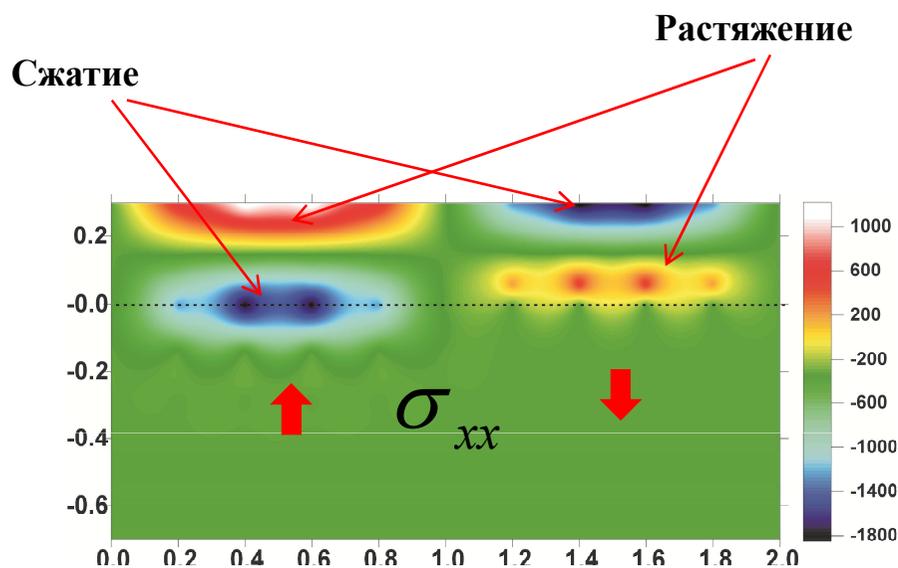
Напряженное состояние **без учета** напряжений от однородного гор, сокращения



Напряженное состояние **с учетом** напряжений от однородного гор, сокращения



Литосфера в условиях горизонтального сжатия



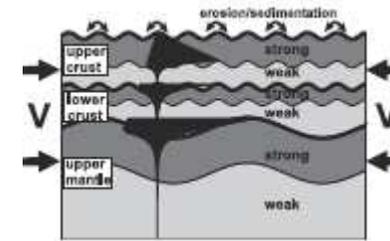
Нижняя вязкая кора в условиях, когда верхняя упругая теряет устойчивость, получает напряженное состояние близкое к балочному при продольном изгибе:

Верхний слой нижней коры участка поднятия – горизонтально растянут и формирующиеся в нем растяжение не компенсирует общее горизонтальное сжатие

Верхний слой нижней коры участка прогиба – горизонтально сжат, что дополняется еще и общим горизонтальным сжатием

Уровень напряжения горизонтального сжатия в коре участков прогибов показывает, что его **невозможно инверсировать** поверхностными процессами.

Численное моделирование деформаций литосферы в условиях горизонтального сжатия



TECTONICS, VOL. 21, NO. 5, 1041, doi:10.1029/2001TC901031, 2002

Lithospheric folding in Iberia

S. Cloetingh,¹ E. Burov,² F. Beekman,¹ B. Andeweg,¹ P. A. M. Andriessen,¹
D. Garcia-Castellanos,¹ G. de Vicente,³ and R. Vegas³

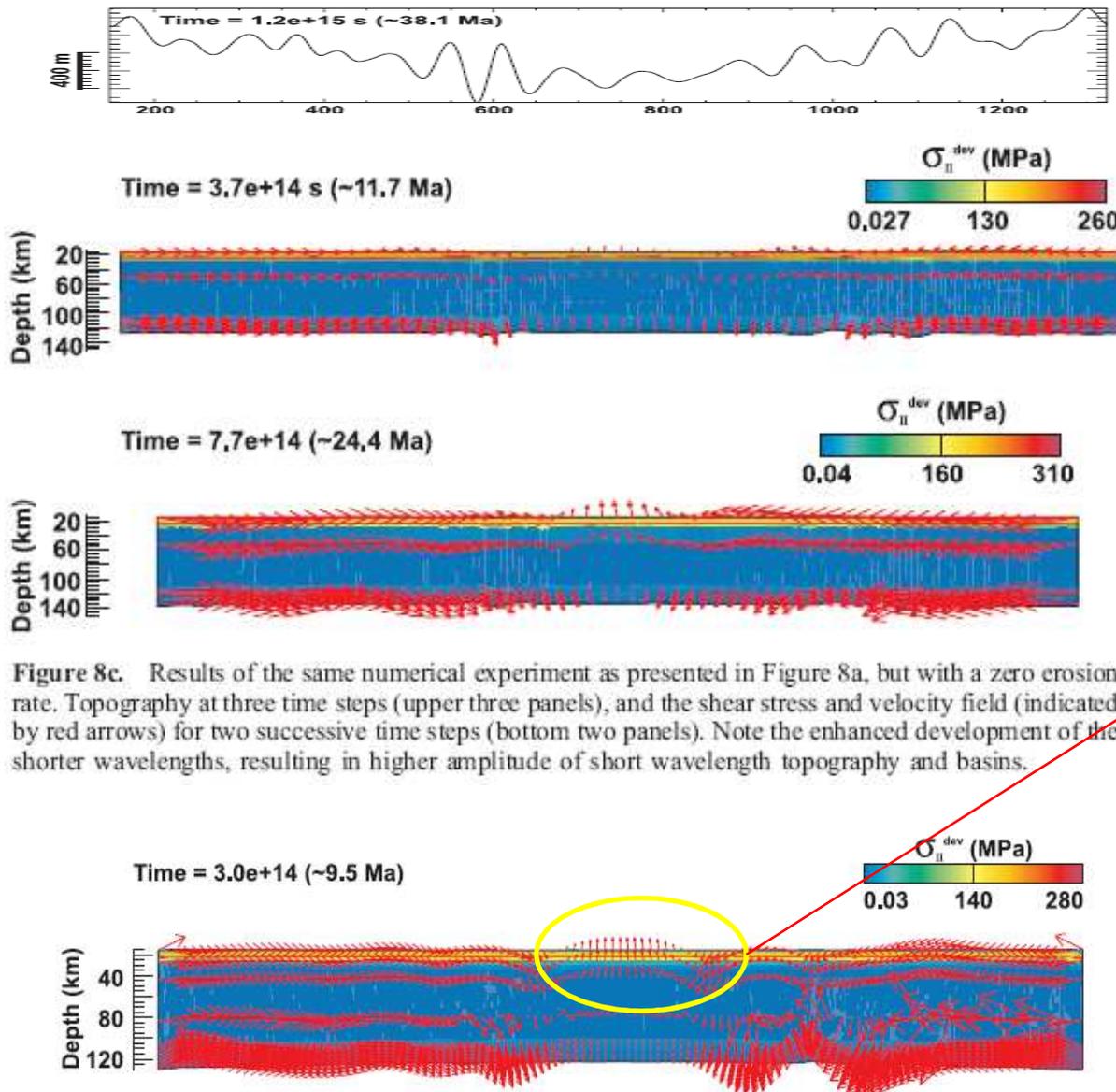
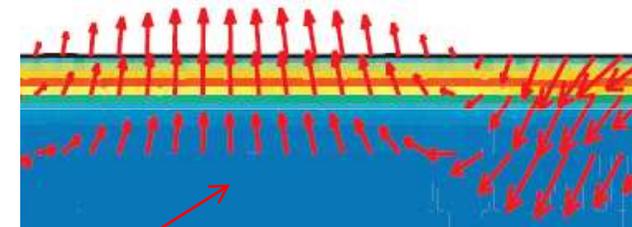


Figure 8c. Results of the same numerical experiment as presented in Figure 8a, but with a zero erosion rate. Topography at three time steps (upper three panels), and the shear stress and velocity field (indicated by red arrows) for two successive time steps (bottom two panels). Note the enhanced development of the shorter wavelengths, resulting in higher amplitude of short wavelength topography and basins.



- 1) В коре движения кровли и подошвы имеют одну направленность – горы не имеют корней, а впадины - антикорней.
- 2) Кора как для участков поднятий, так и для участков впадин испытывает горизонтальное укорочение.

ВЫВОДЫ

по механизму горизонтального сжатия

- 1) Напряженное состояние коры не соответствует наблюдаемой схеме**
- 2) В коре областей поднятия не формируется корень, а в коре прогибов – антикорень.**
- 3) Напряжения в верхней коре прогнозируются подобными напряжениям в нижней коре и могут быть получены в дальнейшем.**
- 4) Поверхностные процессы не могут изменить состояние нижней коры, т.к. течение в ней связано с движениями упругой верхней коры, а оно в свою очередь связано с горизонтальным сокращением.**
- 5) Поверхностные процессы способны повлиять на напряженное состояние верхней упругой коры, необходимы оценки этого влияния.**

ВЫВОДЫ

по механизму вертикального течения на подошве литосферы

- 1) Течение в литосфере, вызванное вертикальной составляющей движения ее подошвы из-за действия астеносферного течения, создает **инверсионных механизм** формирования рельефа кровли коры.
- 2) На завершающей фазе формирования рельефа в верхней части коры участков поднятия имеет место горизонтальное сжатие, а для участков прогиба – вертикальное сжатие, что **соответствует наблюдаемому природному состоянию**, но в нижней части коры этого соответствия нет.
- 3) В коре поднятия формируется корень, а в коре прогиба – антикорень, что **соответствует природному объекту**.
- 4) Увеличение длины латеральной периодичности астеносферной конвекции приводит к утонению области похожести напряженного состояния коры наблюдаемой схеме.
- 5) Учет влияние поверхностных процессов приводит к появлению гармонической от времени периодичности процесса формирования рельефа кровли коры, который во времени затухает. (в дальнейшем решение с учетом поверхностных процессов будет получено).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

- 1) Механизм вертикального движения подошвы литосферы создает в коре **напряженное состояние и формирует ее геометрию**, более близкую к природному, чем механизм горизонтального сжатия
- 2) При действии механизма горизонтального сжатия не возникают корни и антикорни.
- 3) Денудация поверхности коры для активных стадий формирования рельефа создает в ней **дополнительные течения и напряжения**, приводящие к увеличению горизонтального сжатия для участков поднятия и горизонтального растяжения для участков прогибов.

Влияние на напряженное состояние коры денудации и осадконакопления при учете упругой сжимаемости горных пород

Закон сохранения массы в эйлеровых представлениях

$$\frac{D\rho^0}{Dt} = \frac{\partial\rho^0}{\partial t} + (\tilde{v}_i\rho^0)_{,i} = 0 \quad \dot{\rho} = 0$$

$$\tilde{v}_z\rho^0_{,z} + \theta\rho^0 = 0 \quad \theta = v_{i,i}$$

$$\theta = \rho^0 g \tilde{v}_z / K \quad \rho^0_{,z} \neq 0$$

Реологическое уравнение

$$2\eta(\tilde{\varepsilon}_{ij} - \delta_{ij}\tilde{\theta}/3) = \tilde{\sigma}_{ij} + \delta_{ij}\tilde{P}$$

Уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0$$

Уравнение течения возмущенного состояния в безразмерном виде

$$\Delta(\Delta\tilde{v}_z - R_b\tilde{v}_{z,z}) = 0 \quad R_b = \frac{\rho g H}{K}$$

Дополнительный член - упругая сжимаемость

Собственное значение уравнения

