

Эволюция полей напряжений и динамической топографии в процессе суперконтинентального цикла

А.М. Бобров¹, А.А. Баранов ^{1, 2}, А.В. Чуваев ², R. Tenzer³

¹ - Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,

² - Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,

³ - Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University

Уравнения мантийной конвекции с континентами

уравнение неразрывности

$$\partial V_x / \partial x + \partial V_z / \partial z = 0, \quad (1)$$

уравнения переноса импульса

$$-\partial p / \partial x + \partial \tau_{xx} / \partial x + \partial \tau_{xz} / \partial z = 0 \quad (2)$$

$$-\partial p / \partial z + \partial \tau_{xz} / \partial x + \partial \tau_{zz} / \partial z = -RaT + RcC + Ra_{ph} \Delta \Gamma, \quad (3)$$

уравнение переноса тепла

$$T / \partial t + V_x \partial T / \partial x + V_z \partial T / \partial z = \partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial z^2 + H, \quad (4)$$

уравнение переноса концентрации континентального вещества

$$\partial C / \partial t + V_x \partial C / \partial x + V_z \partial C / \partial z = (\kappa_d / \kappa) \cdot (\partial^2 C / \partial x^2 + \partial^2 C / \partial z^2), \quad (5)$$

где компоненты тензора девиаторных вязких напряжений

$$\tau_{xx} = 2\eta \partial V_x / \partial x, \quad (6)$$

$$\tau_{zz} = 2\eta \partial V_z / \partial z, \quad (7)$$

$$\tau_{xz} = \eta (\partial V_x / \partial z + \partial V_z / \partial x), \quad (8)$$

η – безразмерная вязкость в данной точке (Бобров и Баранов, 2016; Бобров и Баранов, 2011).

Вязкость, зависящая от температуры и от скорости деформации материала в данной точке,

в общем виде описывается как

$$\eta = A^{-1/n} [\dot{\epsilon}]^{(1-n)/n} \exp[(E_a + PV)/(nRT)] \quad (9)$$

Зависимость вязкости от температуры, закон Аррениуса [Yoshida, 2012]

$$\eta_T = \exp(2E/(T + T_{bot}) - 2E/(T_{ref} + T_{bot})), \quad (10)$$

T - безразмерная наадиабатическая температура, $T_{ref} = 0.5$, $T_{bot} = 1$ (температура на дне мантии).

Здесь $E = \ln 104.5 = 10.36$, что соответствует энергии активации 431 кДж/моль (примерно соответствует энергии активации влажного оливина).

$\eta_T = \exp(20.72/(T+1)-20.72/(0.5+1))$ для верхней мантии и

$\eta_T = 30 \exp(20.72/(T+1)-20.72/(0.5+1))$ для нижней мантии. (11)

В океанической литосфере (выше 150 км) — помимо закона

Аррениуса учитывается также и пластический характер деформации вещества:

$$\eta_{litho} = \min(\tau/2\dot{\epsilon}, \eta_T) \text{ если } \eta_T \geq 30, \quad (12)$$

где τ - эффективное предельное напряжение (yield stress) [Yoshida, 2012].

Максимальные сдвиговые напряжения (второй инвариант тензора девиаторных напряжений)

$$\tau_{xz \max} = (0.5\tau_{xx}^2 + \tau_{xz}^2 + 0.5\tau_{zz}^2)^{1/2} \quad (13)$$

Толщина континентальной коры - 40 км, континентальная литосфера имеет мощность (вместе с корой) 130 км.

Кора континентов в модели обладает положительной плавучестью, что соответствует числу Рэлея $Ra_{c1} = -4 \times 10^7$.

Плавучесть океанической коры в нашей модели с глубины 80 км становится отрицательной (эклогитизация), что соответствует числу Рэлея $Ra_{c3} = 2 \times 10^7$. Ra_{c3} у океанической коры меняет знак на глубине около 80 км.

Для континентальной коры вязкость равна $\eta_T + 1000 \times C_1$, для континентальной литосферы $\eta_T + 500 \times C_2$.

Вязкость вещества переносят континентальные маркеры;

плавучесть переносят маркеры континентальной и океанической коры.

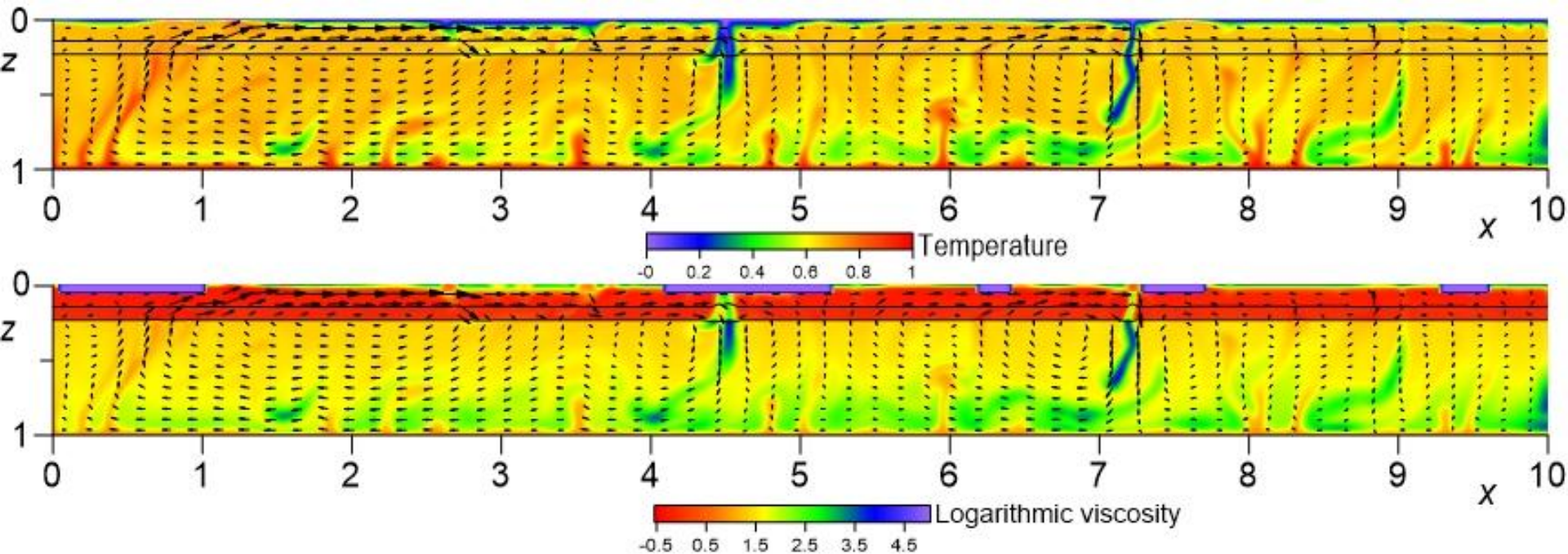
Программа для расчетов - 3 версия Citcom (<https://geodynamics.org/>).

Для двумерной модели взята прямоугольная область L: D = 10: 1 сетка 801 на 201 узлов,

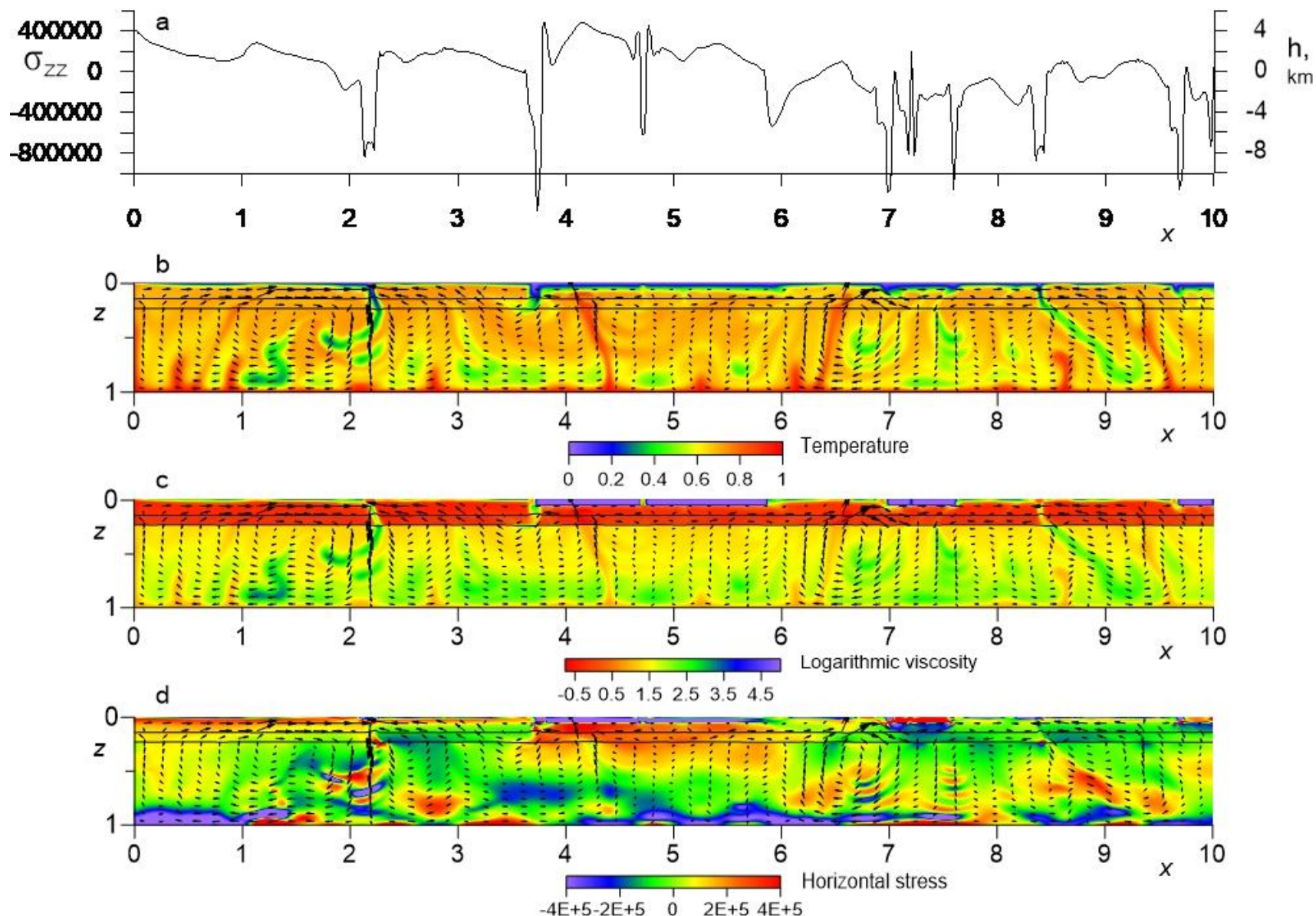
расчеты и модель опубликованы в статье: Baranov, A., Bobrov, A., Tenzer, R. Evolution of stress fields during the supercontinent cycle., 2022. *Geodesy and Geodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.01.004>.

Начальное состояние

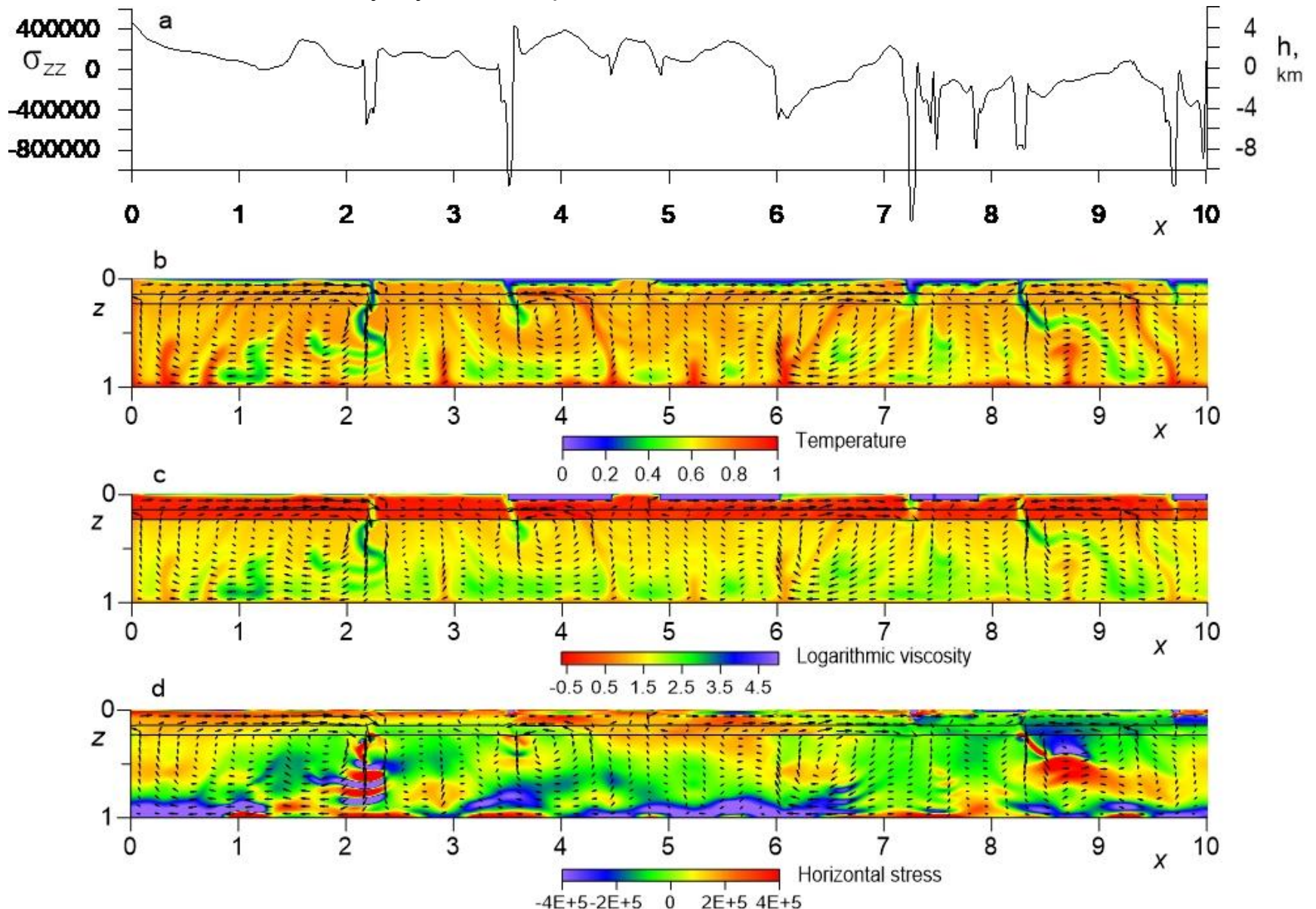
Плавучие континенты ставятся на раскрученную модель мантийной конвекции с неньютоновской реологией и океаническими плитами



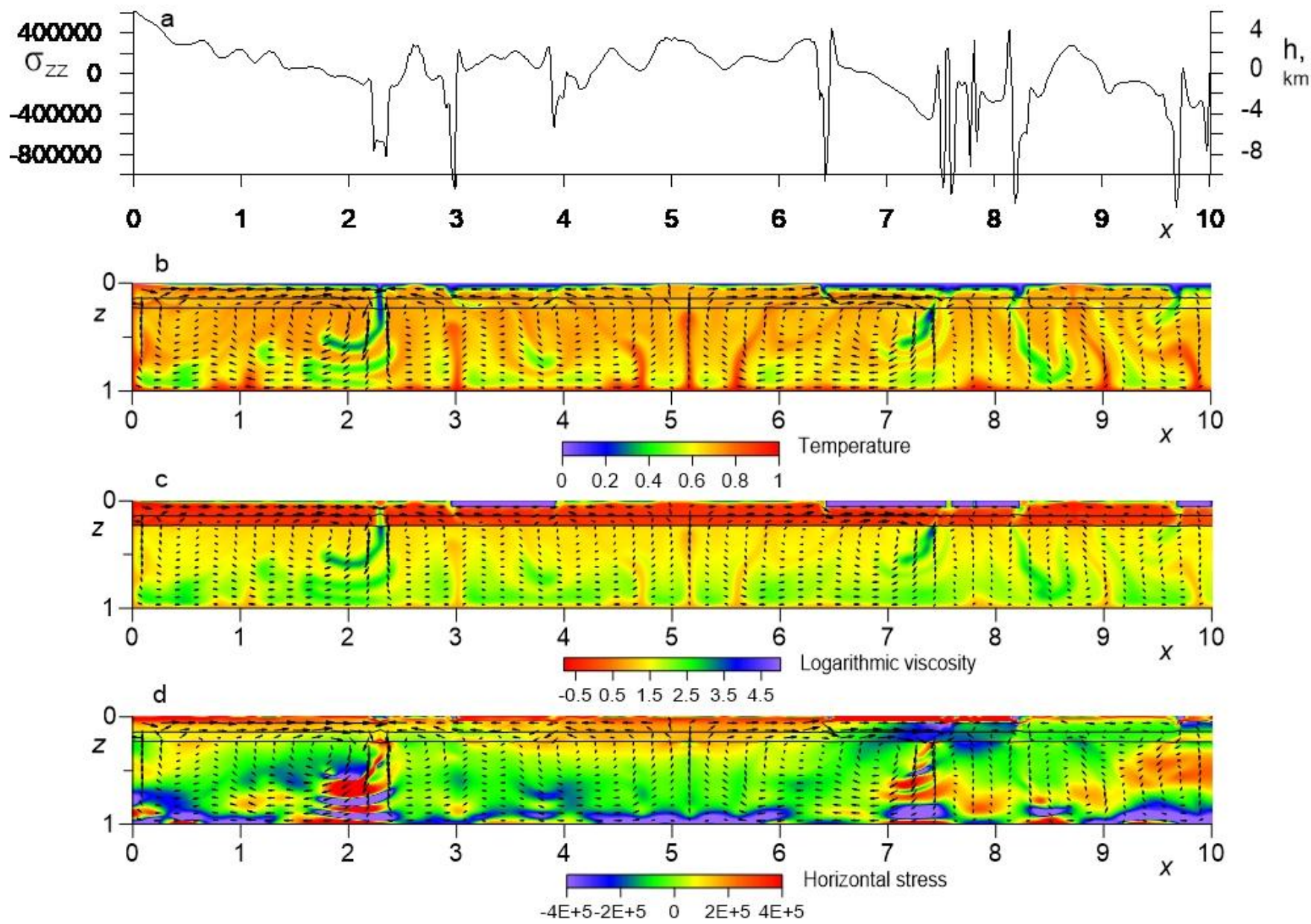
Левый суперконтинент находится в стадии перед распадом, напряжения в нем растягивающие, под ним в мантии сжимающие напряжения, правый суперконтинент недавно образовался, напряжения в нем сжимающие, а в мантии под ним растягивающие. Зоны субдукции в океане и внутриконтинентальные рифты дают провалы в динамической топографии, тогда как срединно-океанические хребты и коллизии континентов дают положительные аномалии топографии.



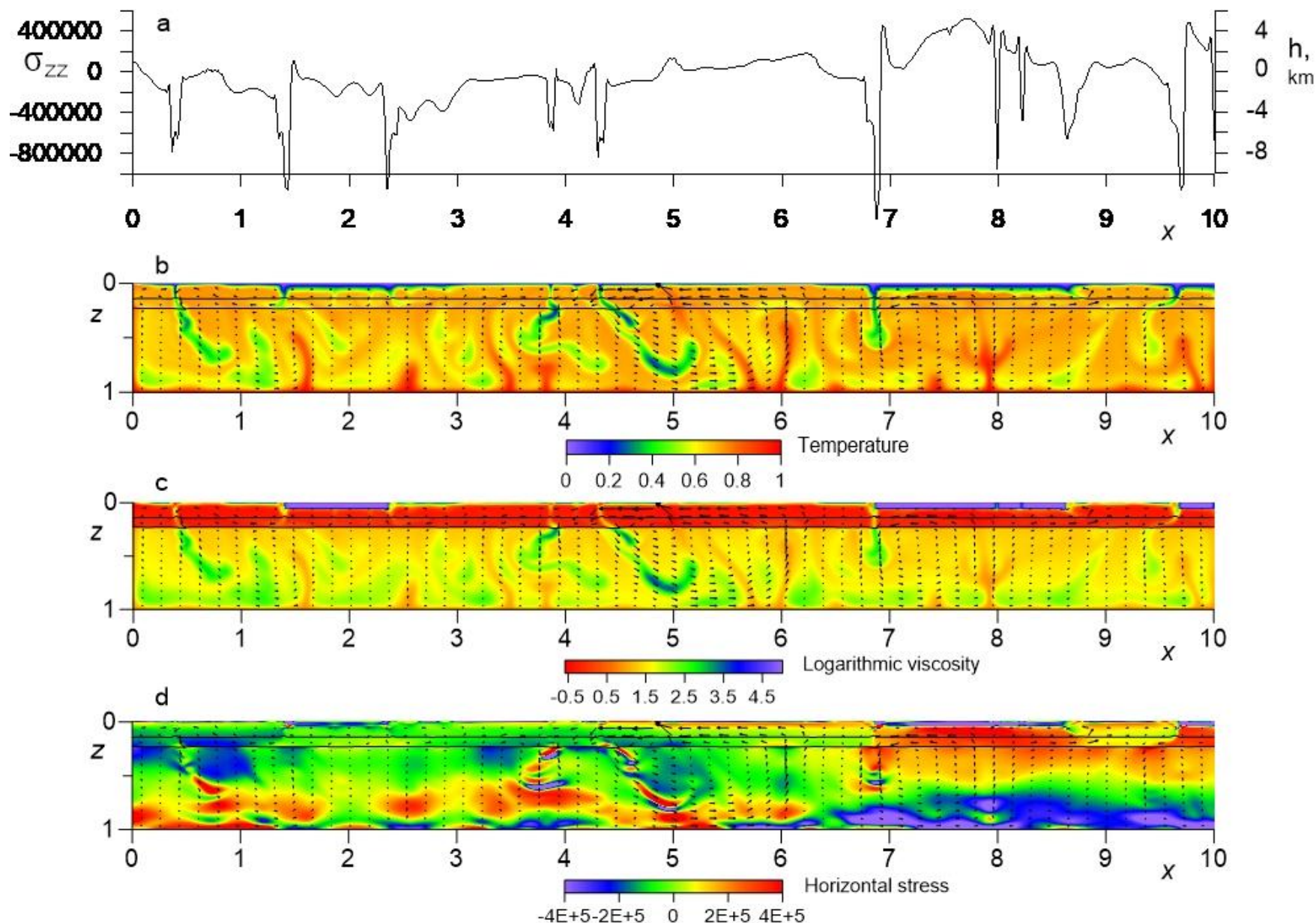
Левая пара континентов недавно распалась, между ними раскрывается молодой океан атлантического типа с срединным хребтом посередине, эти континенты еще приподняты плюмами, левый наехал на зону субдукции которая отступает от него влево (backrolling) в океан закрывающегося типа, континенты справа выступают из мантии существенно меньше и также наезжают на зоны субдукции, напряжения в континентах меняются по оси x .



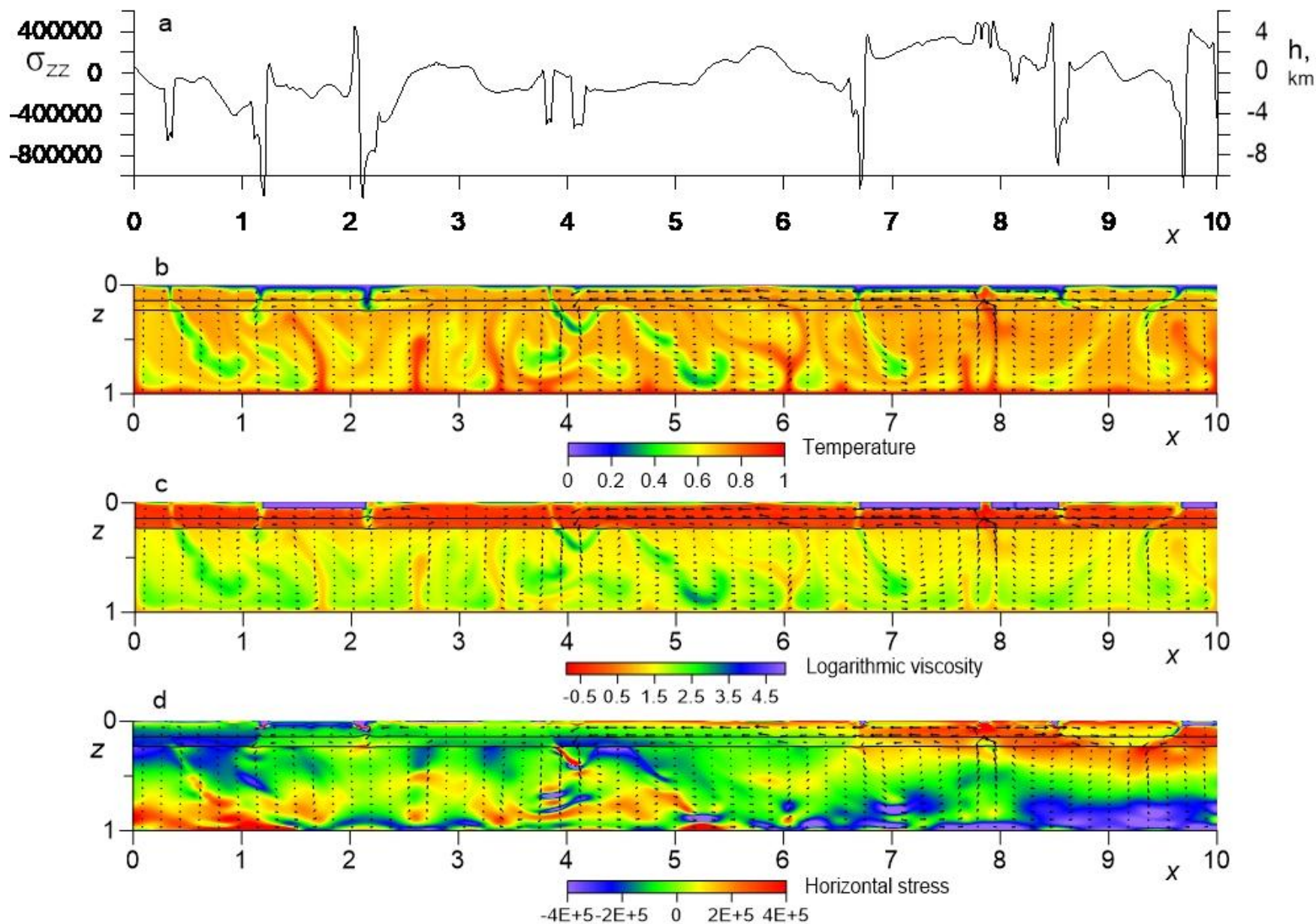
Левый континент сильно наклонил зону субдукции слева у края и готовится переехать срединный хребет закрывающегося океана, напряжения в нем сжимающие, правый суперконтинент недавно образовался (из 3 начальных континентов), субдукция в месте столкновения континентов (закрытого океана) прекращается, напряжения в нем сжимающие, а в мантии под ним напряжения сильно неоднородны, динамический рельеф сильно меняется.



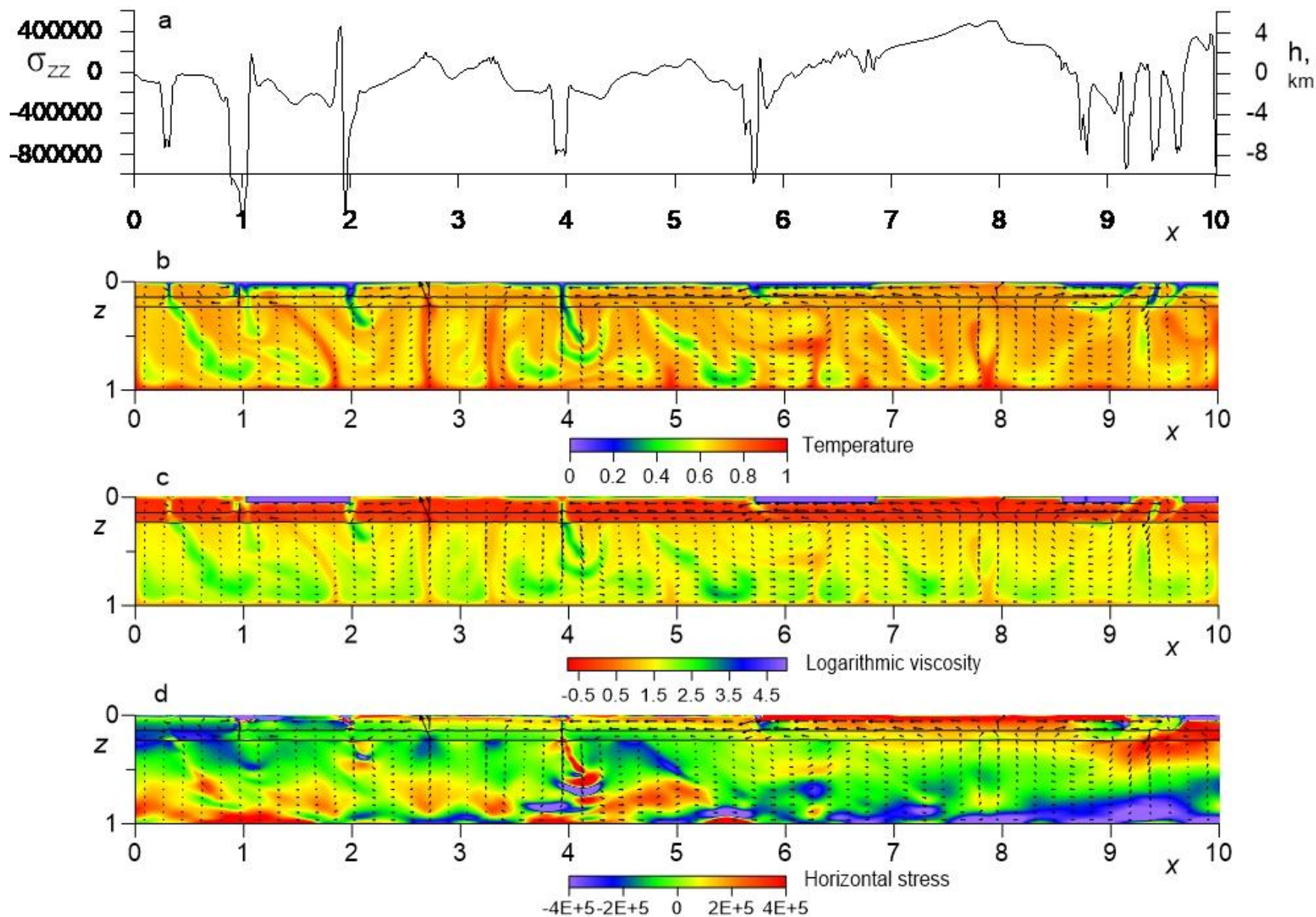
Правый суперконтинент близок к распаду и стоит высоко, у его краев зоны субдукции, под ним мантийные плюмы, напряжения в нем растягивающие, а в мантии под ним сжимающие (как на слайде 5 для правого суперконтинента), левый континент переехал срединный хребет и закрыл океан.



Правый суперконтинент начинает распадаться, напряжения в нем с растягивающих меняются на сжимающие, а в мантии под ним тоже сжимающие. Левый континент стоит на восходящем потоке, в нем растяжение.



Правый суперконтинент распался, его обломки опущены и свободно движутся в разные стороны, испытывая сжатие, между ними раскрывается океан атлантического типа и сформировался срединно-океанический хребет, слева между двумя континентами закрывающийся океан, в левом континенте напряжения неоднородны, под плюмом растяжение, в его правой части сжатие.

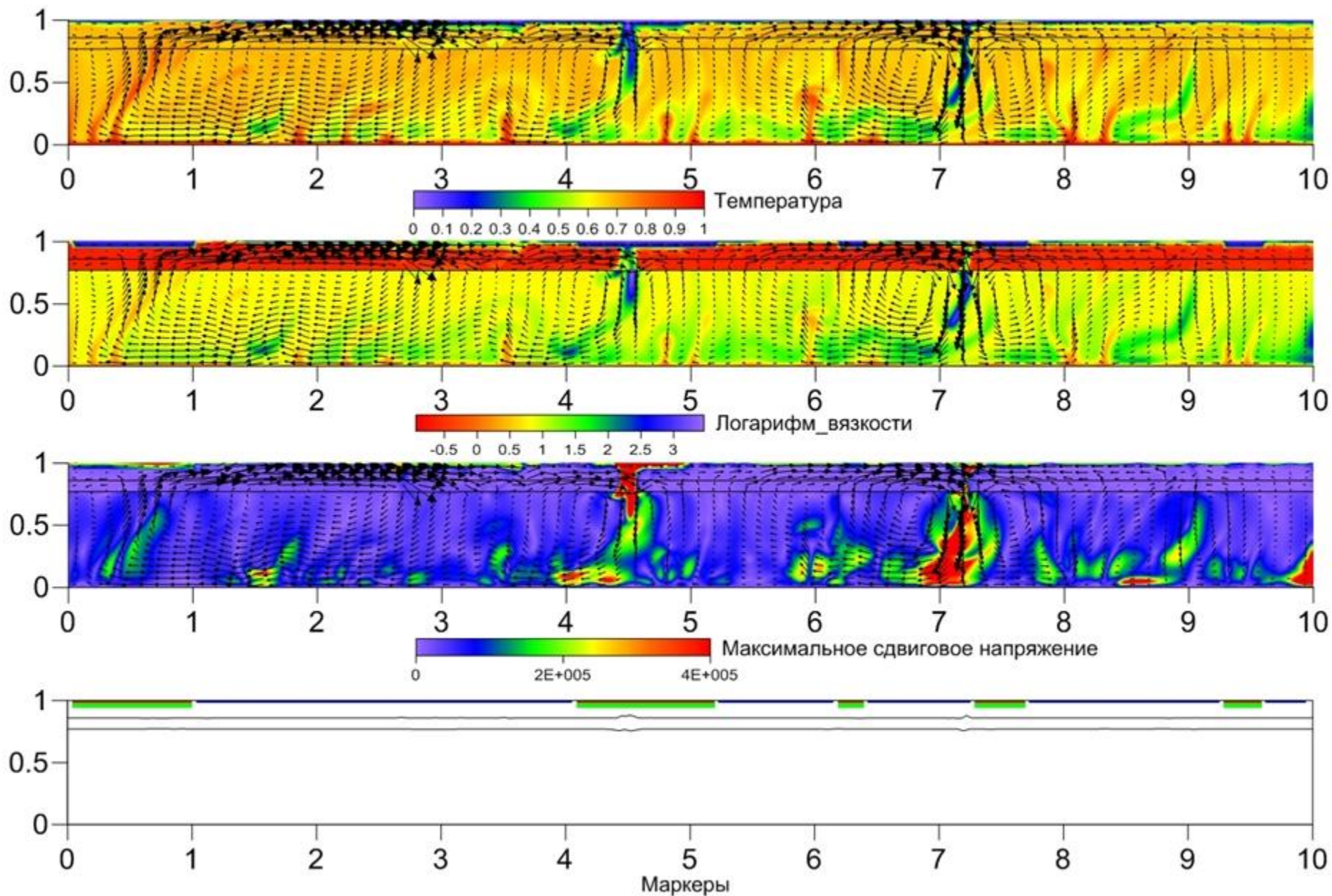


Выводы

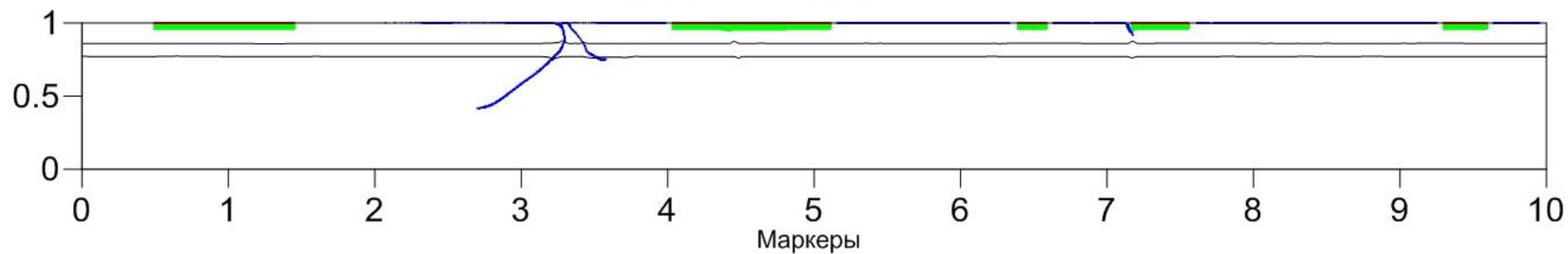
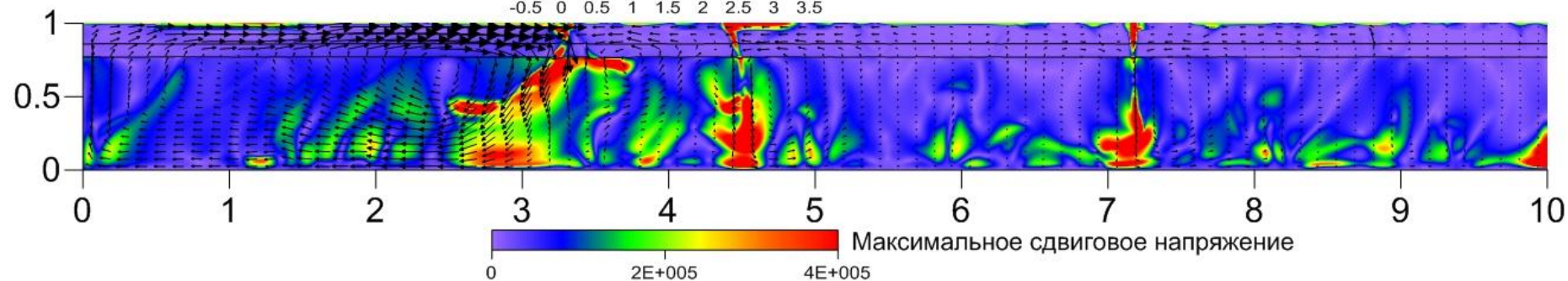
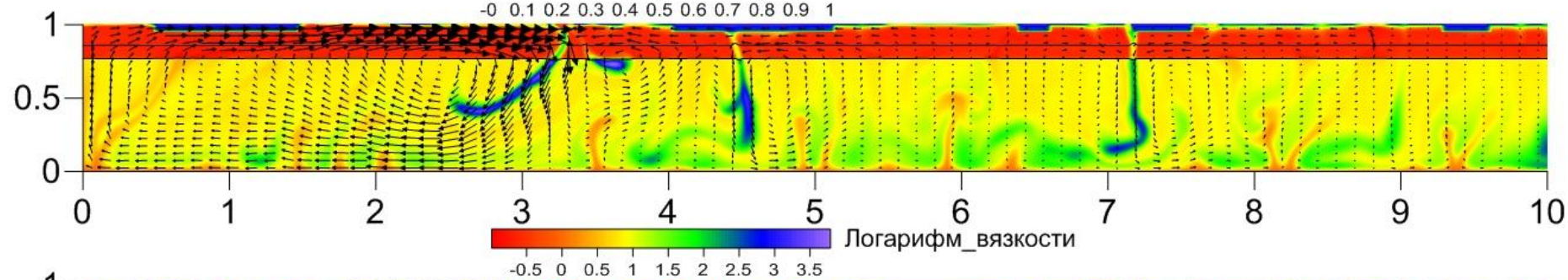
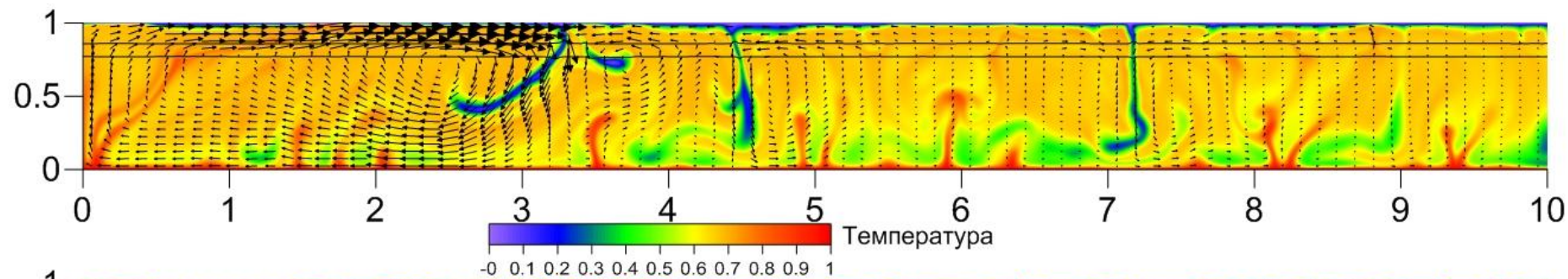
1. Модель показывает основные стадии суперконтинентального цикла: схождение и сжатие континентов, возникновение зон субдукции, перестройку мантийных течений и расхождение континентов после их растяжения, раскрытие и закрытие океанов, бэкроллинг зон субдукции, наезд движущихся континентов на зону субдукции и океанический хребет. Время жизни суперконтинента зависит от его размера.
2. В значительной части мантии надлитостатические горизонтальные напряжения находятся в пределах ± 25 МПа, тогда как горизонтальные напряжения вдоль зон субдукции и континентальных краин значительно выше.
3. Непосредственно перед распадом суперконтинента растягивающие горизонтальные напряжения в нем могут достигать -250 МПа. В то же время под суперконтинентом отчетливо проявляются сжимающие горизонтальные напряжения величиной 50-100 МПа. Причиной различия напряжений в суперконтиненте и подстилающей мантии является резкое различие их вязкости.
4. В процессе континентальных столкновений сжимающие напряжения могут достигать 130 МПа, а в пределах субконтинентальной мантии растягивающие надлитостатические напряжения составляют около -50 МПа.
5. Динамическая топография также отражает основные стадии суперконтинентального цикла и коррелирует с реальными значениями. Перед распадом и сразу после распада суперконтинента континенты испытывают максимальное поднятие. В суперконтинентальном цикле топографические высоты континентов обычно изменяются в интервале примерно $\pm 1,5$ км относительно среднего значения. Топографические максимумы орогенных образований высотой около 2-4 км обнаруживаются вдоль межконтинентальных коллизий, а также при взаимодействии соседних зон субдукции с континентальными краинами.

Рециркуляция океанической коры

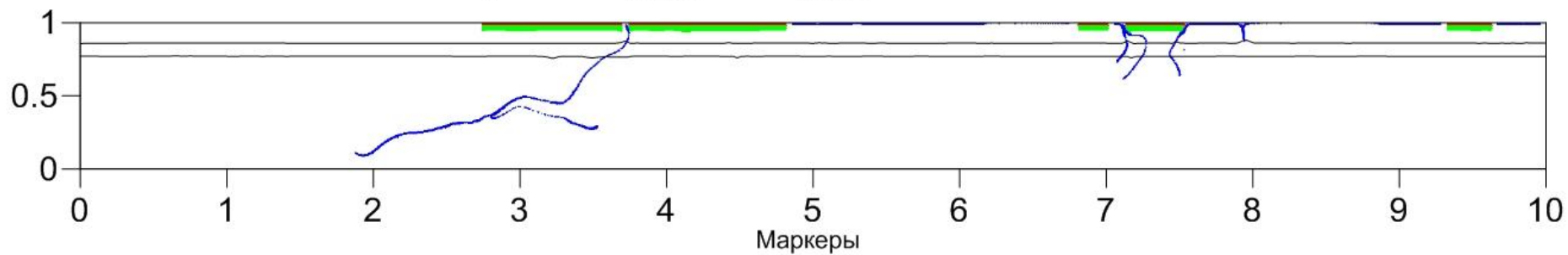
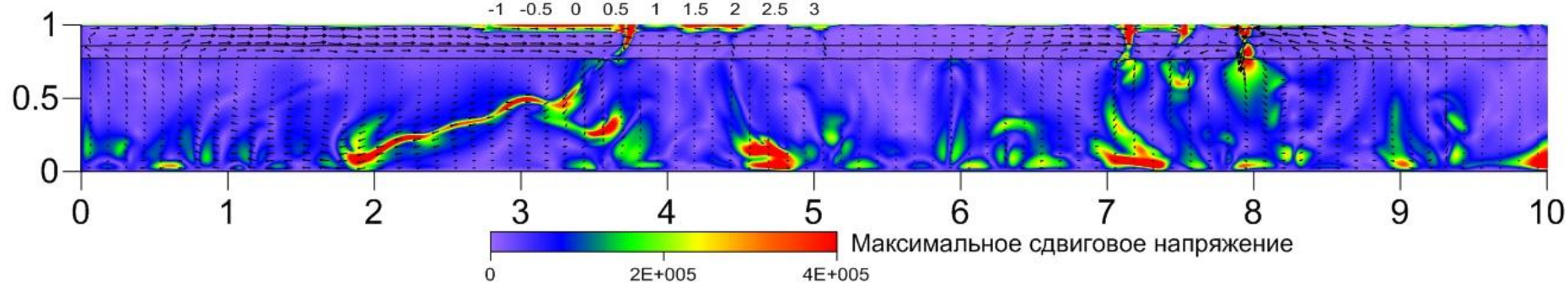
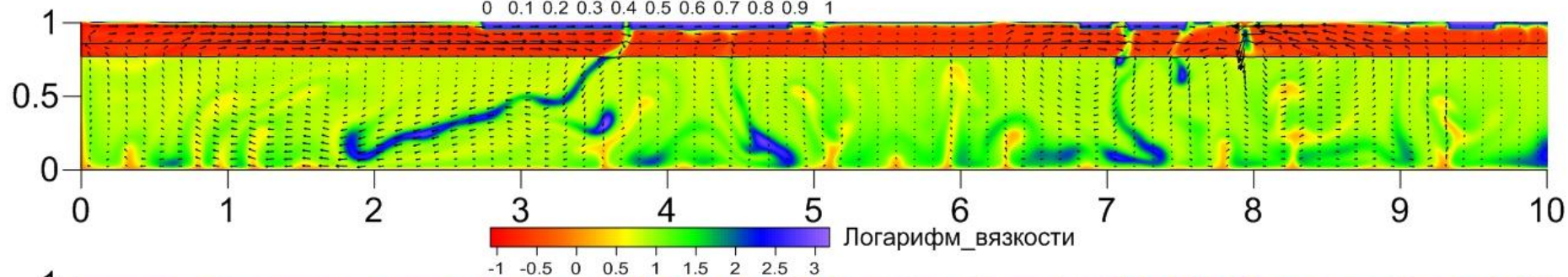
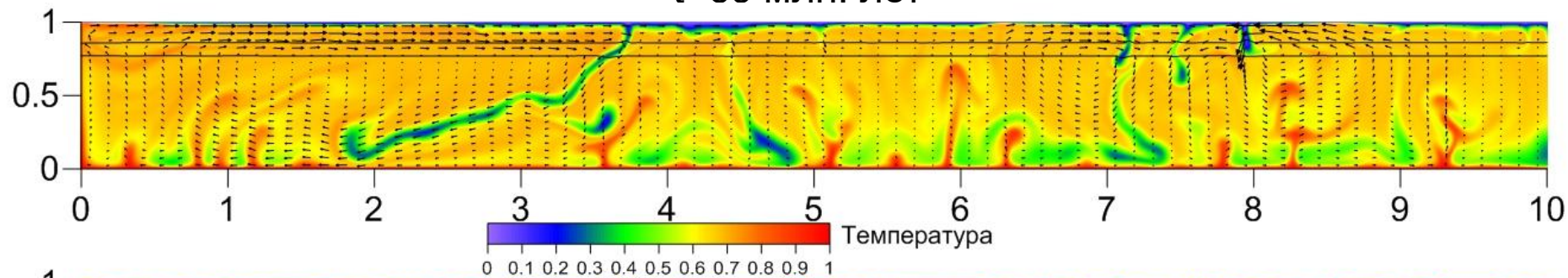
Начальное состояние $t=0$



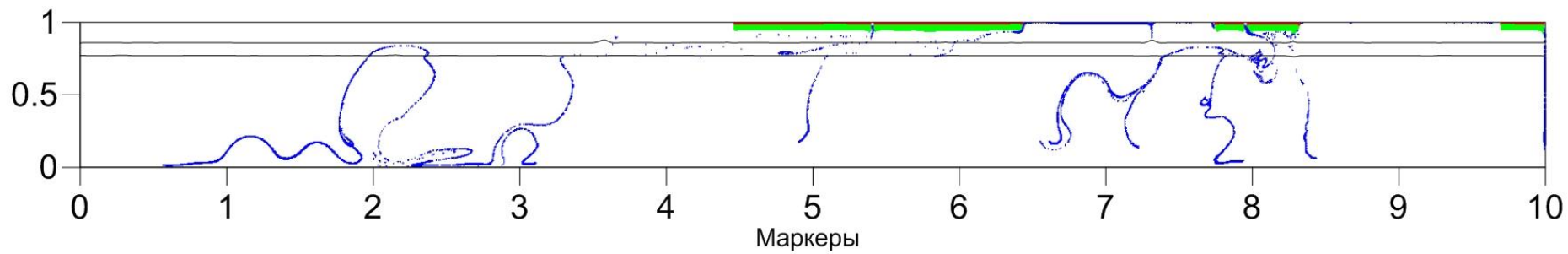
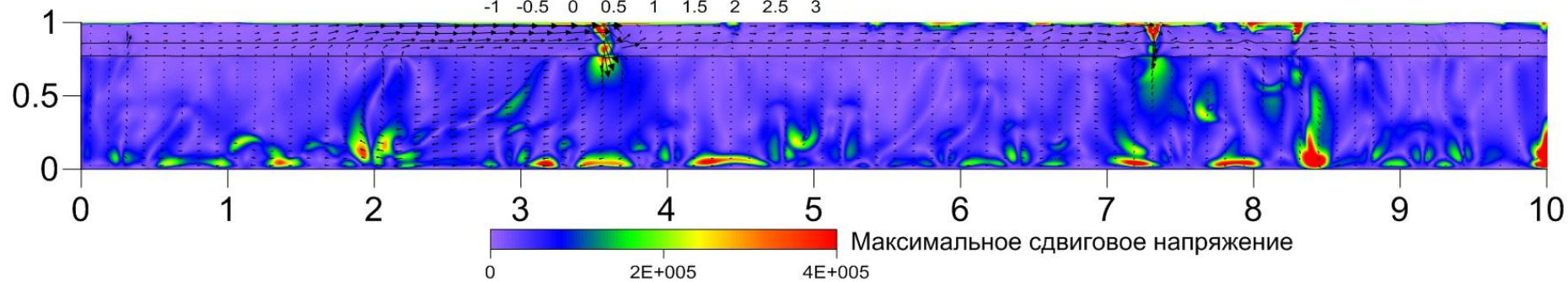
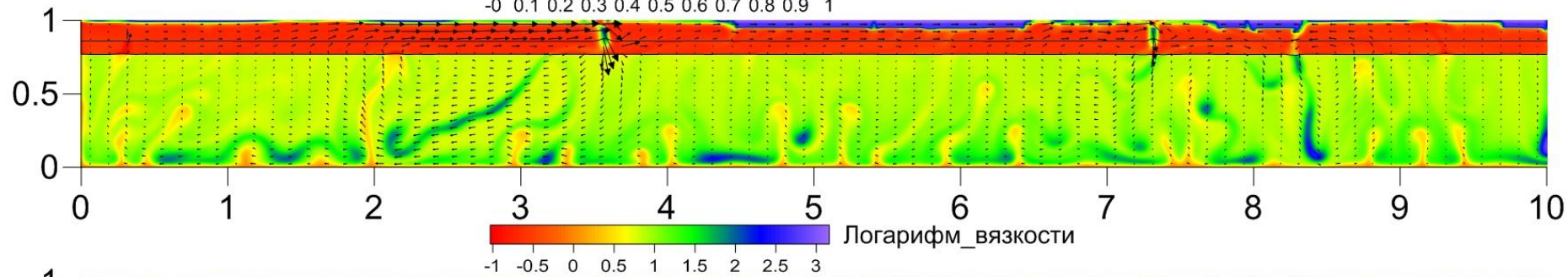
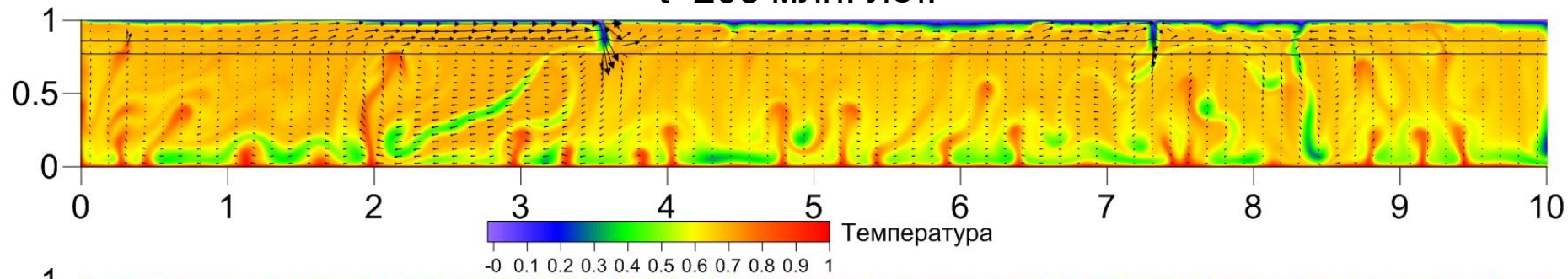
$t=24$ млн. лет.



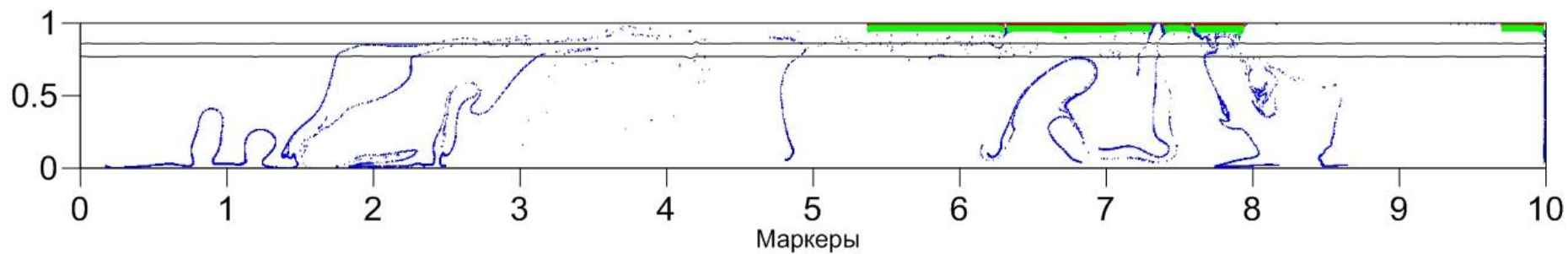
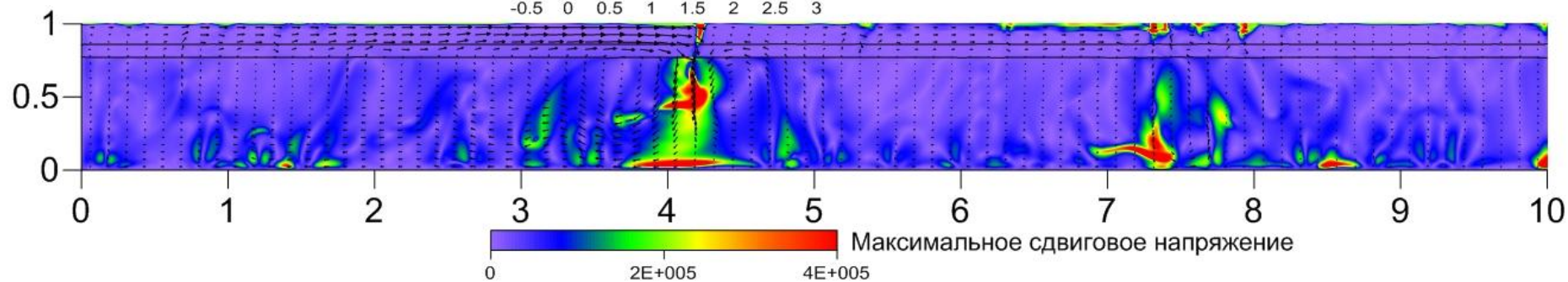
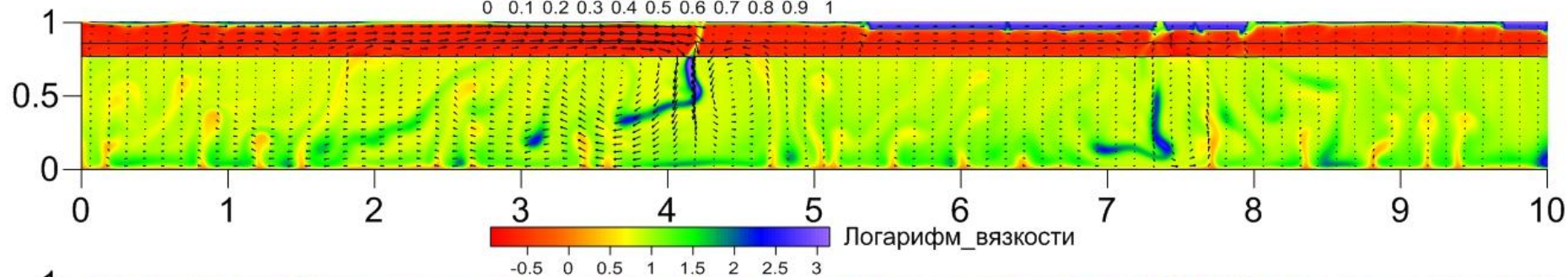
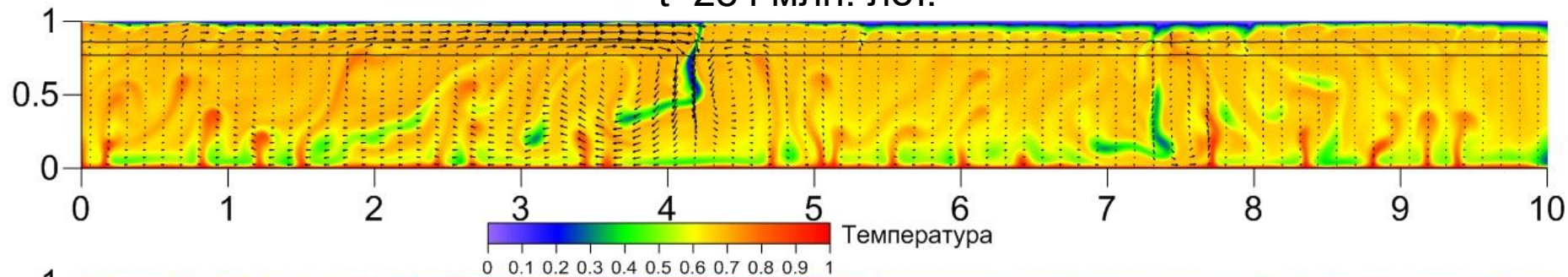
t=69 млн. лет



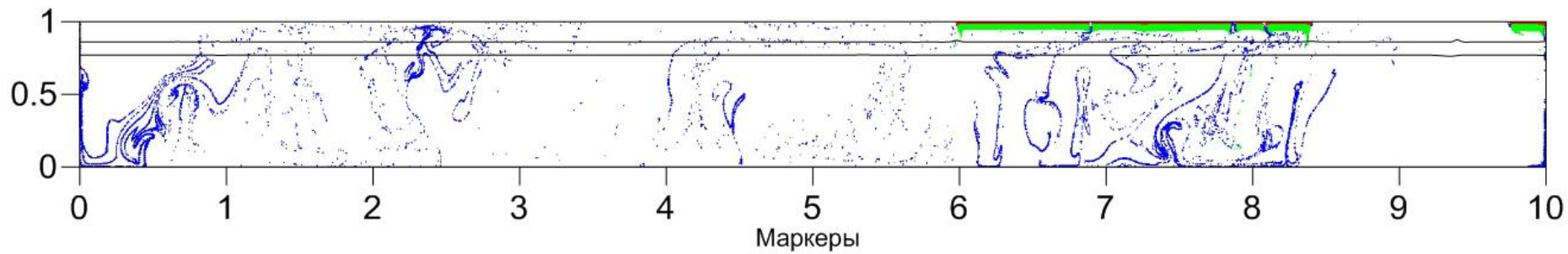
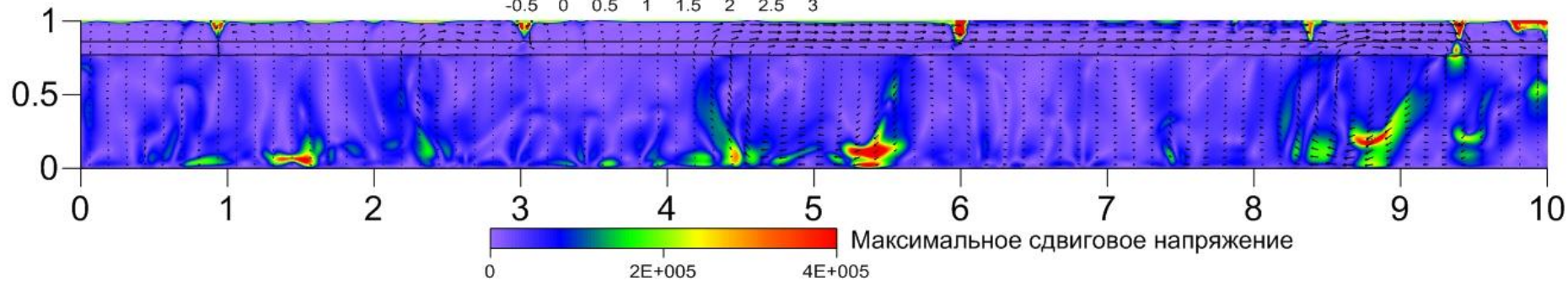
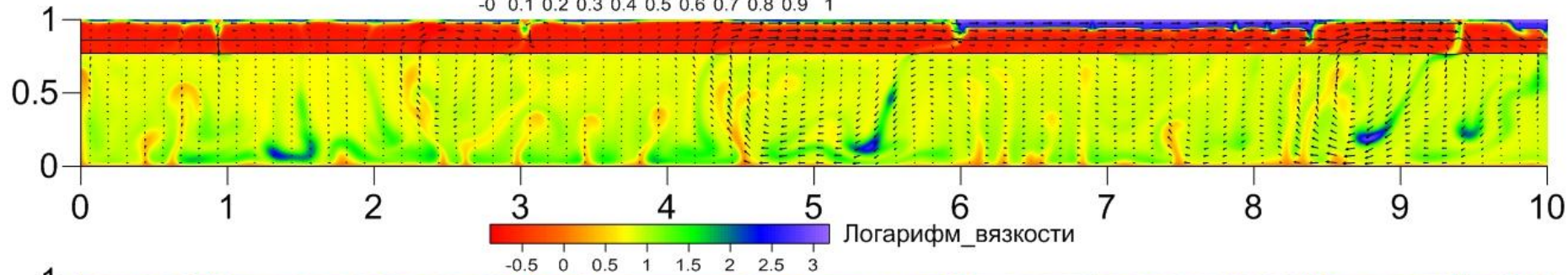
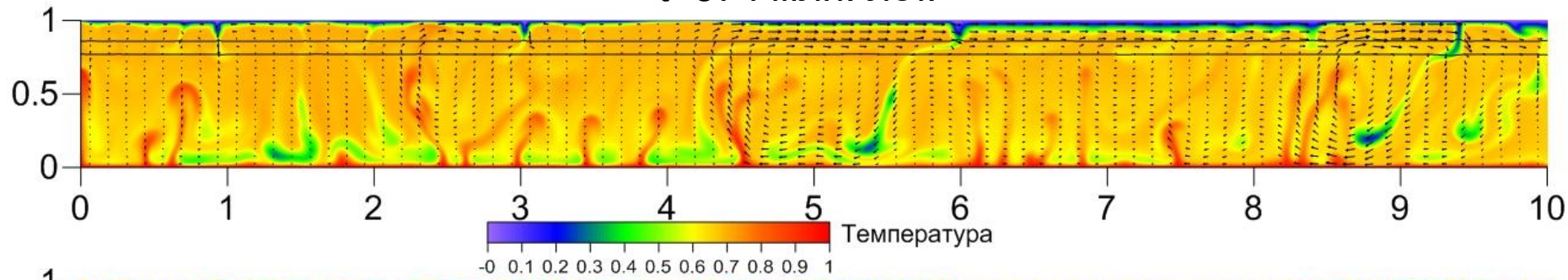
t=205 млн. лет.



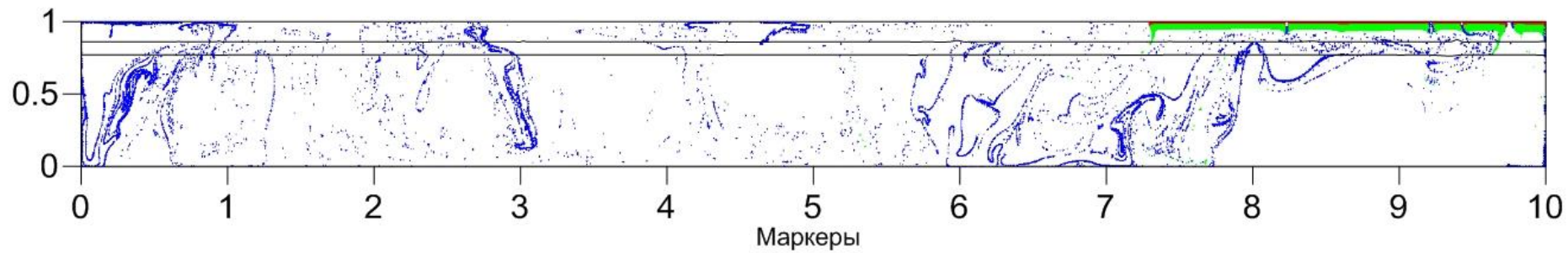
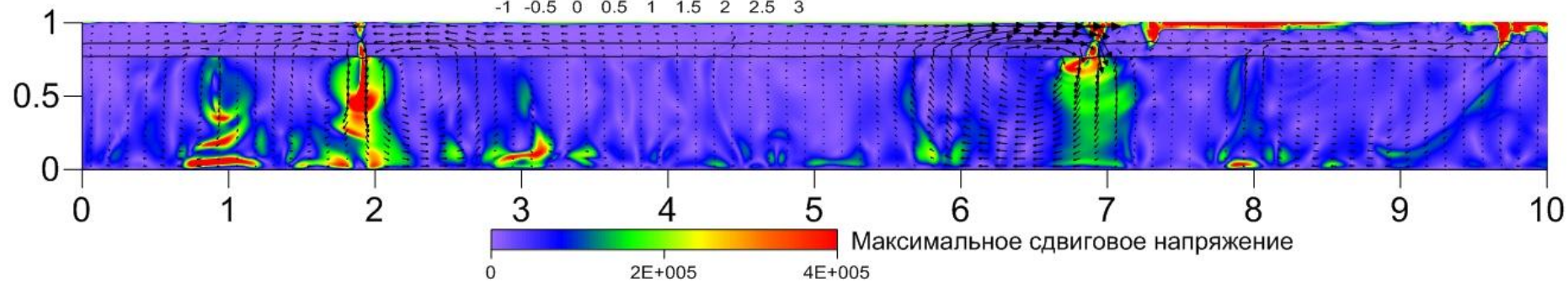
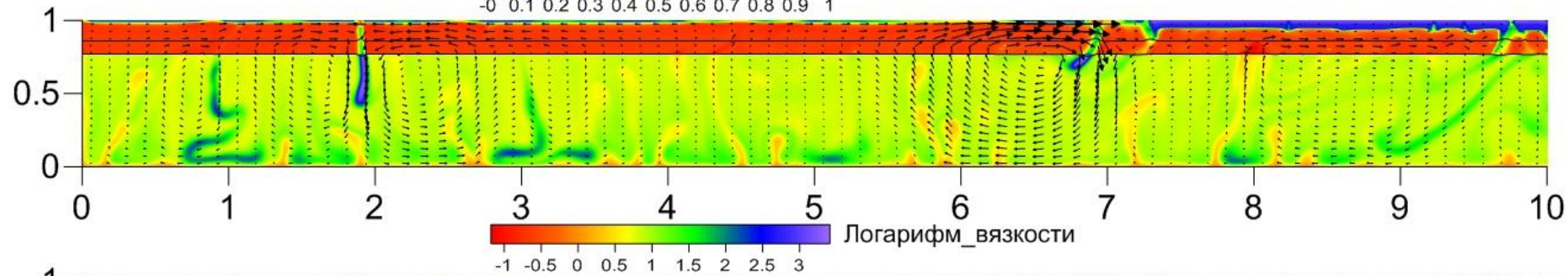
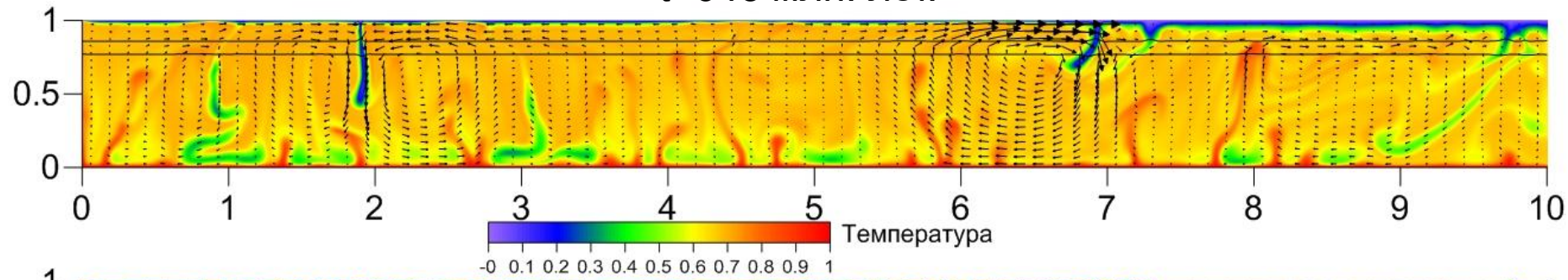
t=284 млн. лет.



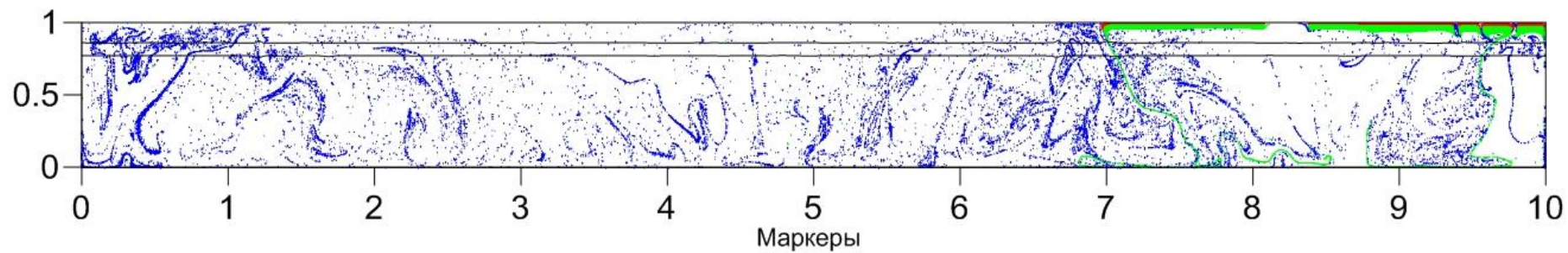
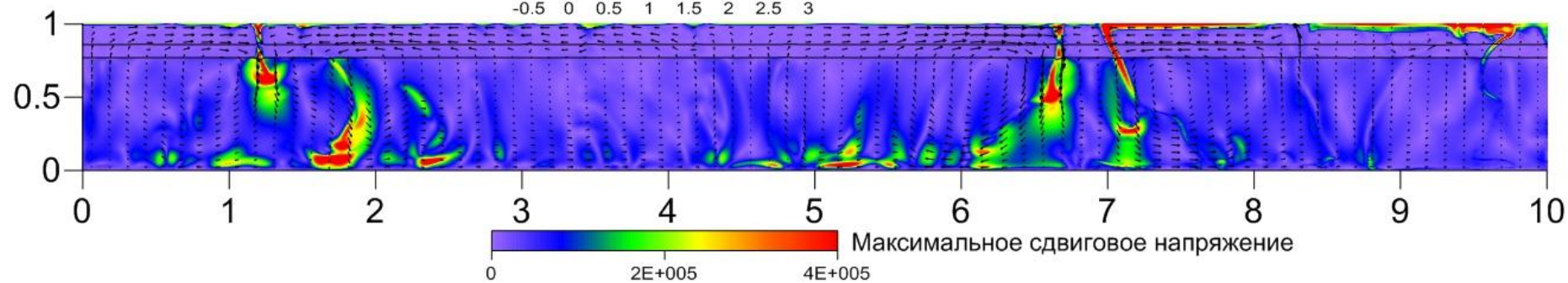
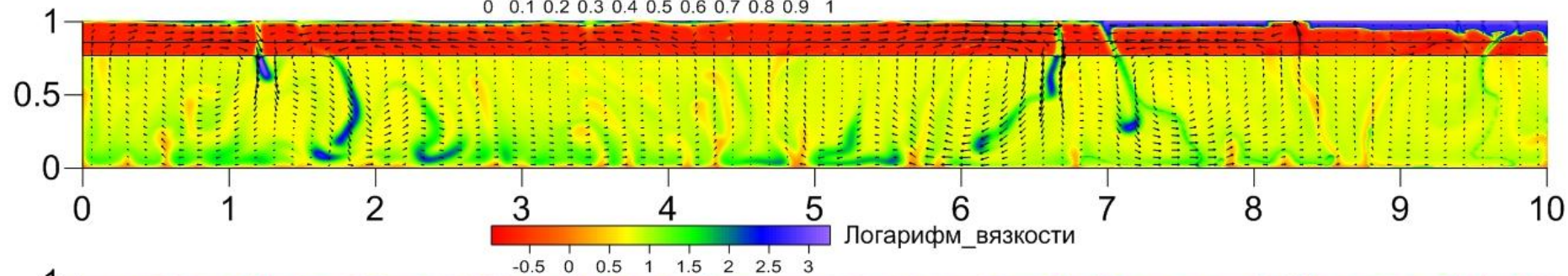
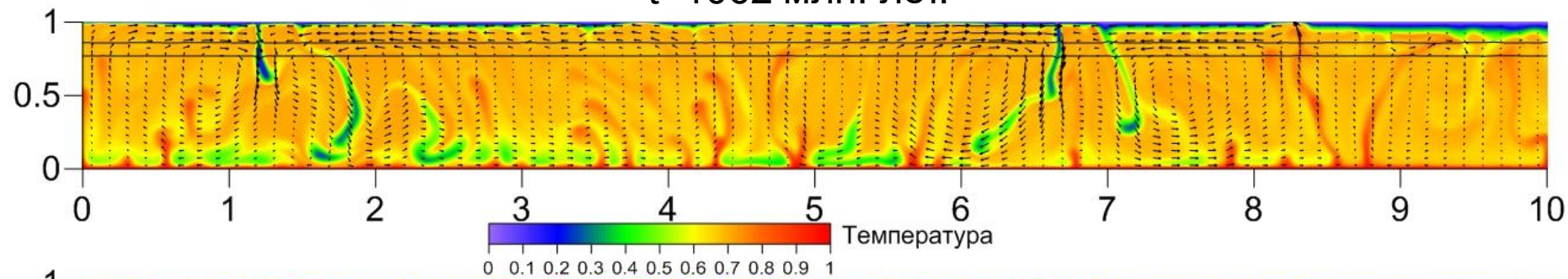
t=574 млн. лет.



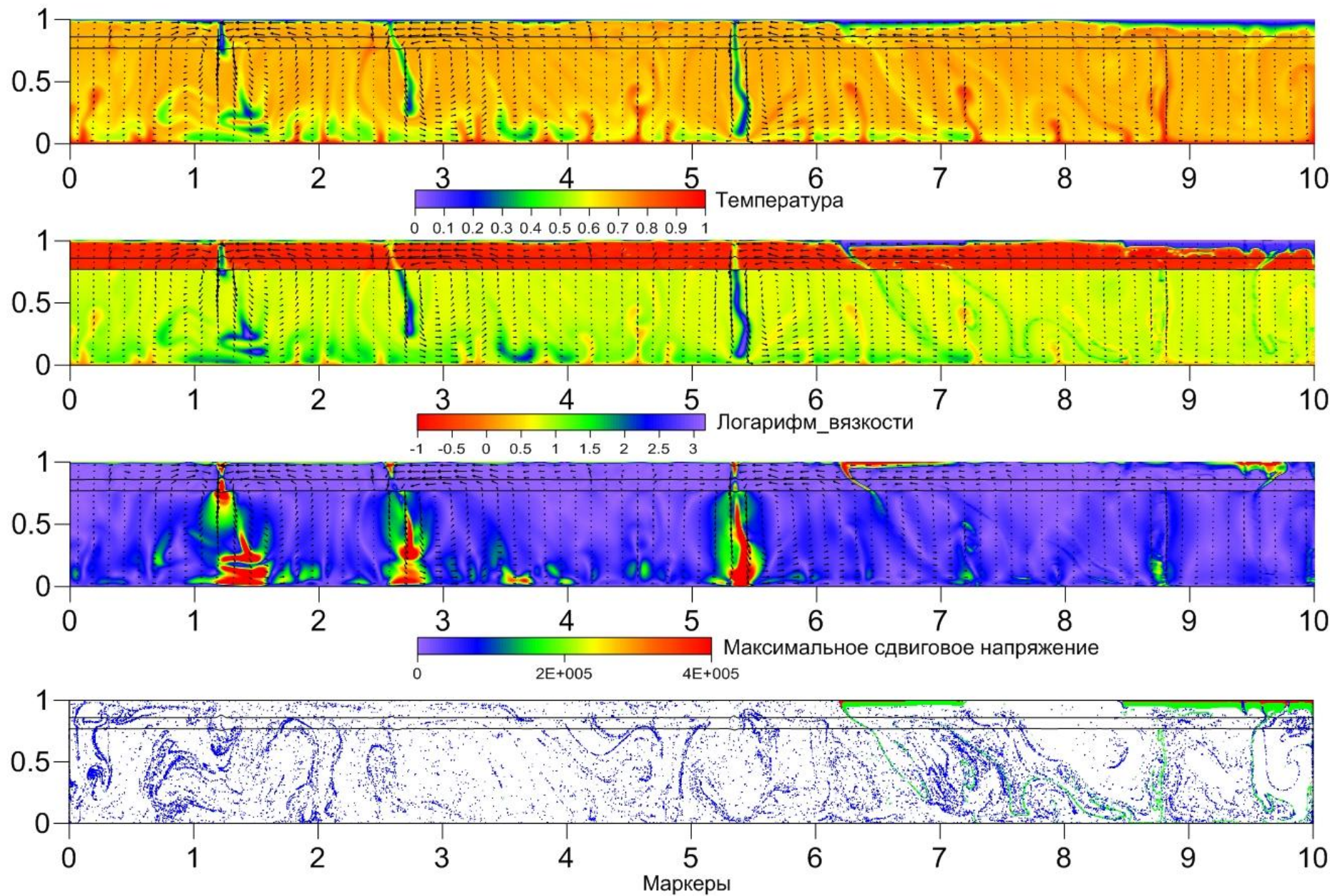
t=643 млн. лет.



$t=1062$ млн. лет.



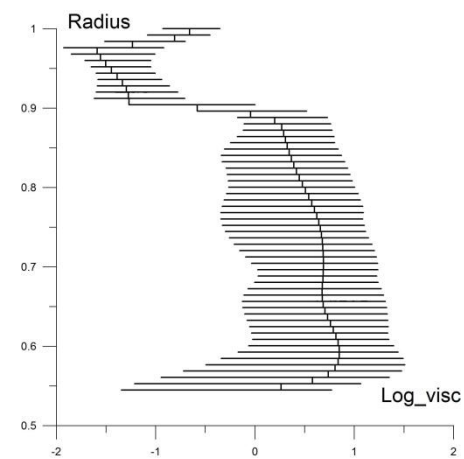
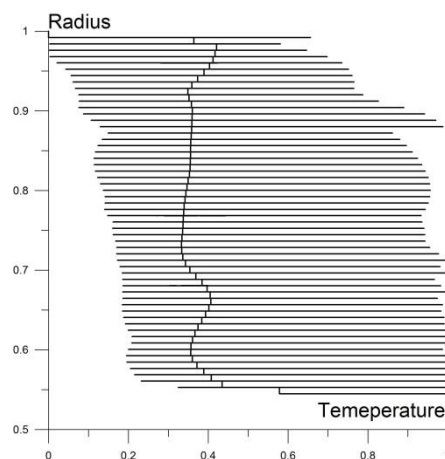
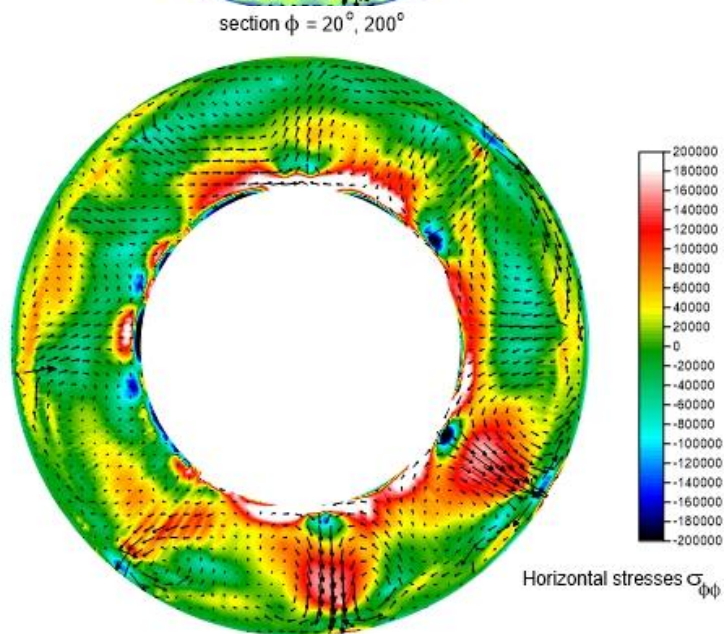
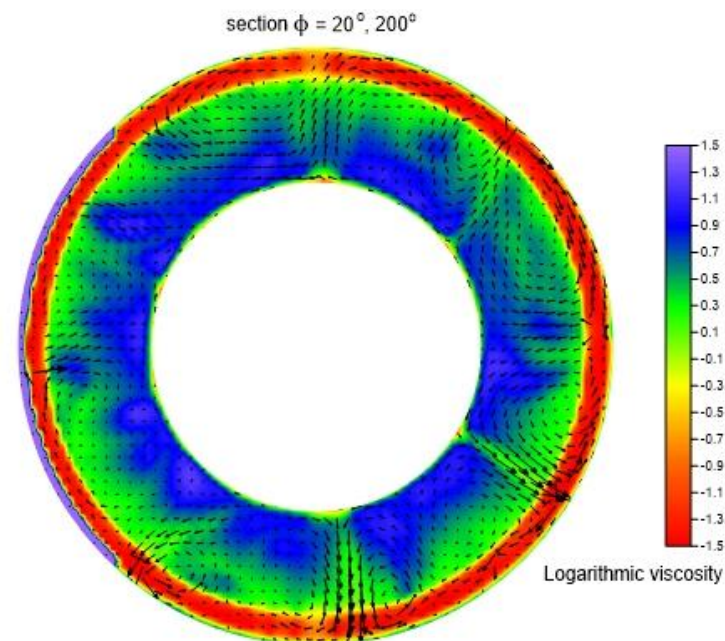
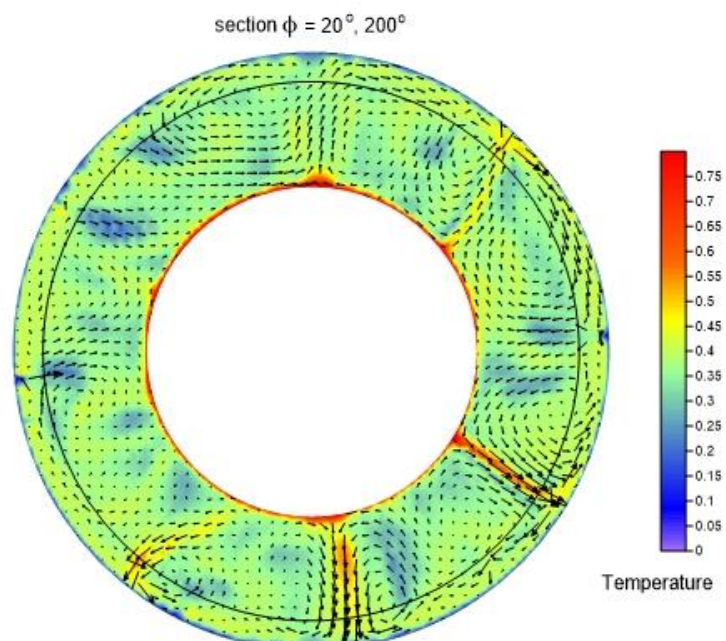
$t=1220$ млн. лет.



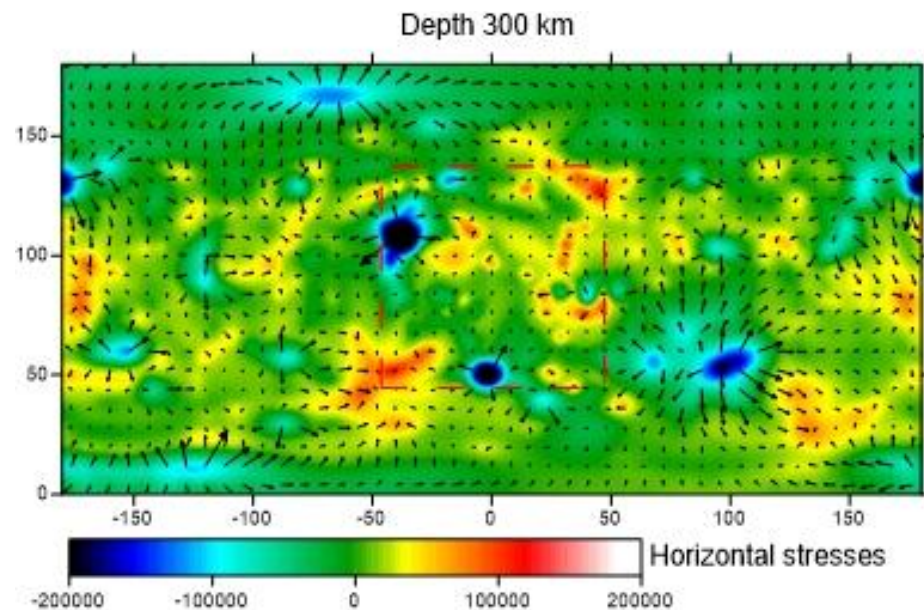
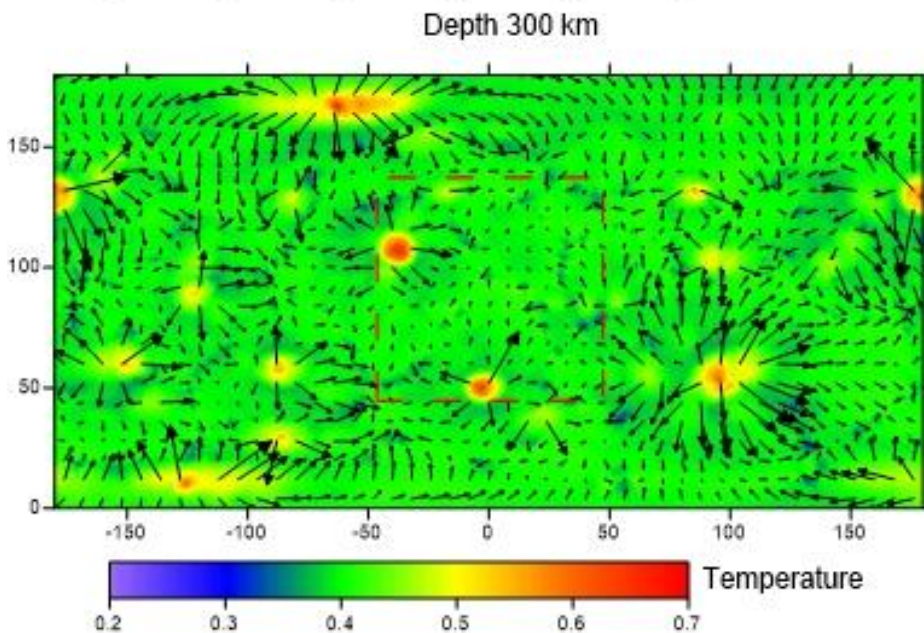
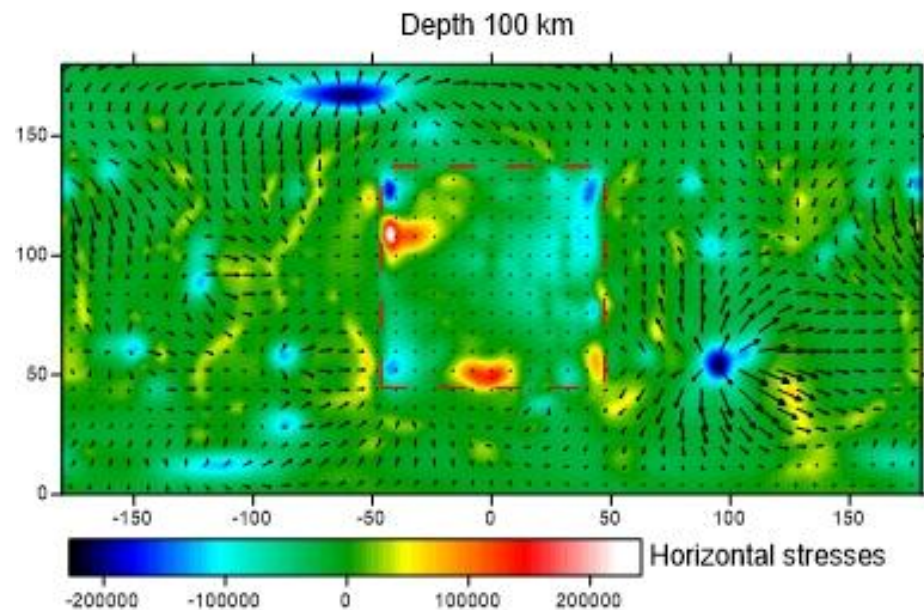
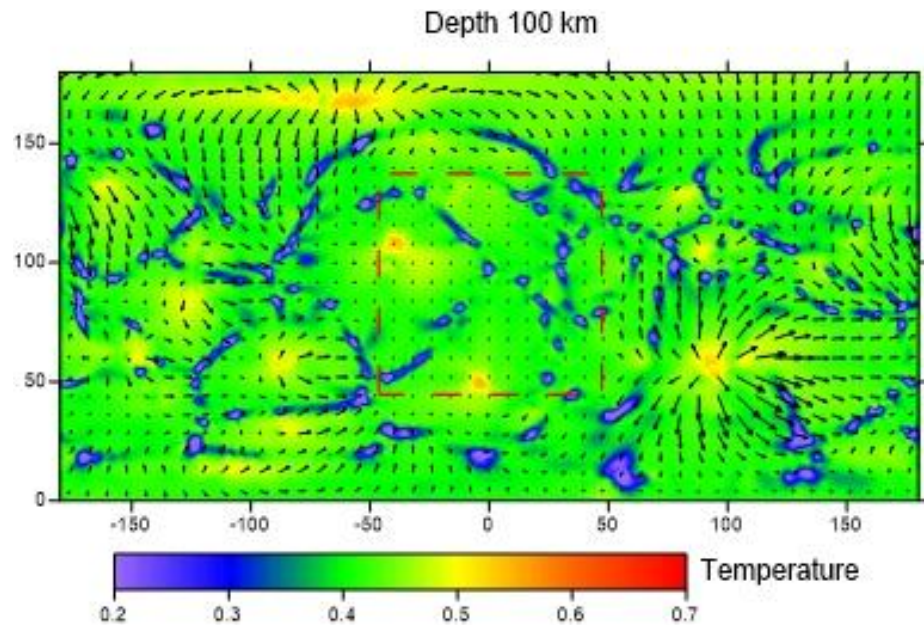
Выводы

1. Расчеты показывают, что континентальная кора и континентальная литосфера! **не тонет**, в то время как океаническая, несмотря на свою положительную плавучесть у поверхности, погружается вместе с океанической литосферой в мантию в зонах субдукции. В этом принципиальное отличие между ними, которое дает **двухмодовость (различие между континентами и океанами) всей геодинамики Земли. Этого нет ни на одной другой планете.**
2. Численно подтверждено явление рециркуляции океанической коры в мантии с повторным выходом ее на поверхность. При этом часть океанической коры остается налипшей на окраинах континентов и не тонет, сохраняясь длительное время (офиолиты).
3. Континенты моделируемые активными маркерами могут деформироваться под влияние мантийных течений, вещество континентальной литосферы может размываться течениями.
4. Максимальные сдвиговые напряжения достигают наибольших значений в областях погружающихся океанических слэбов, что подтверждает роль слэбов (сравнительно с восходящими плюмами) как основной силы, движущей мантийную конвекцию.

Сфера, начальное состояние, имплементация высоковязкого суперконтинента на развитую мантийную конвекцию

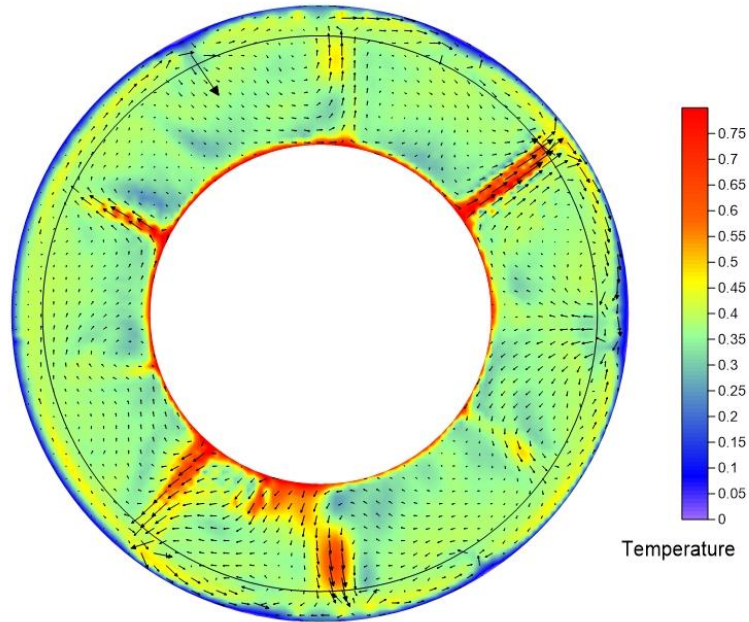


Сфера, начальное состояние $t=0$ млн. лет,
имплементация высоковязкого суперконтинента на развитую мантийную конвекцию

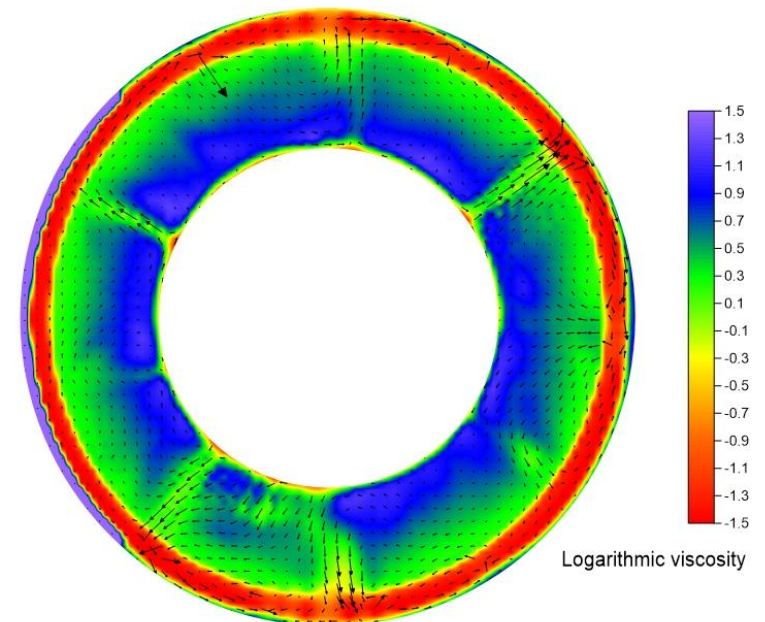


Сфера $t=230$ млн. лет после добавления суперконтинента, сечение по ϕ .

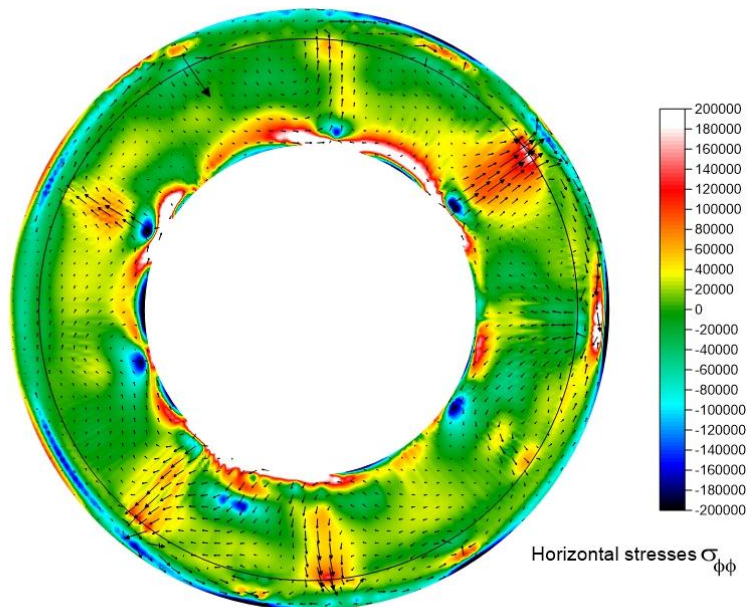
section $\phi = 20^\circ, 200^\circ$



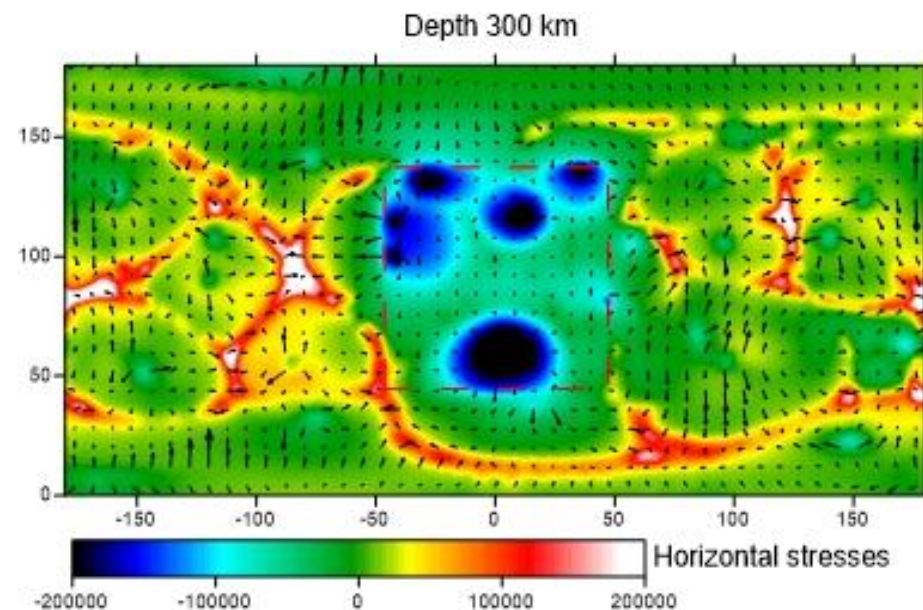
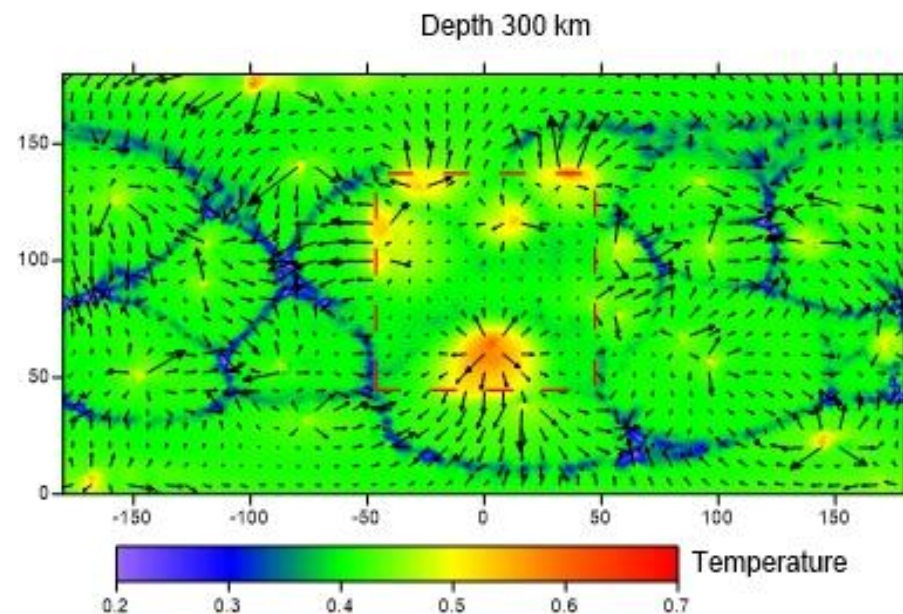
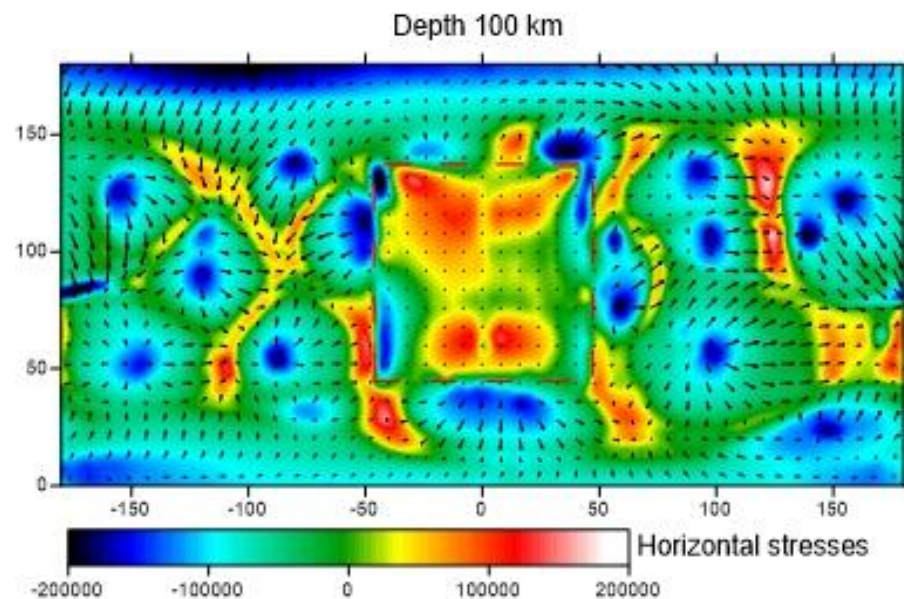
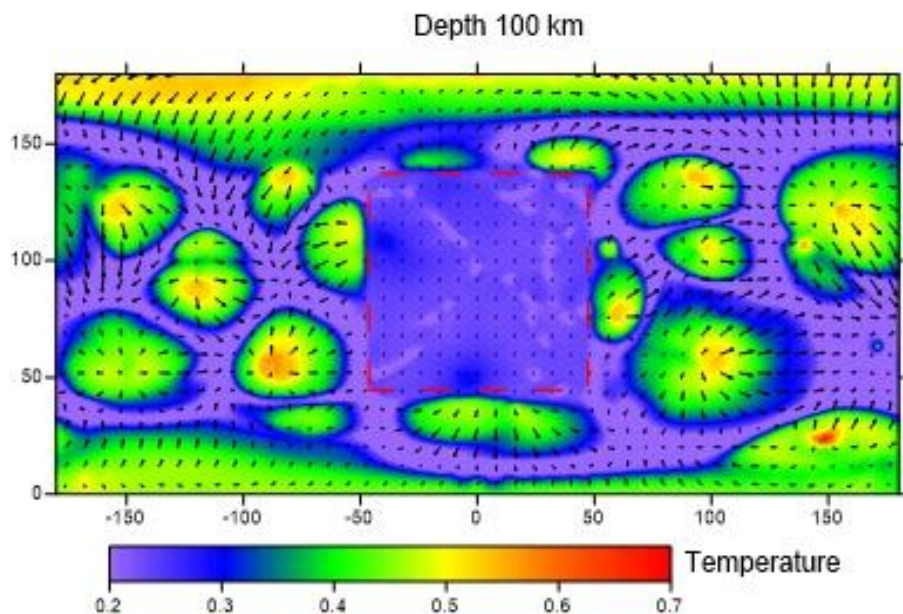
section $\phi = 20^\circ, 200^\circ$



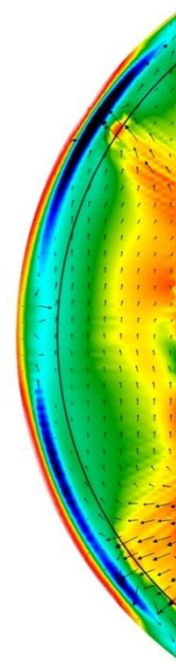
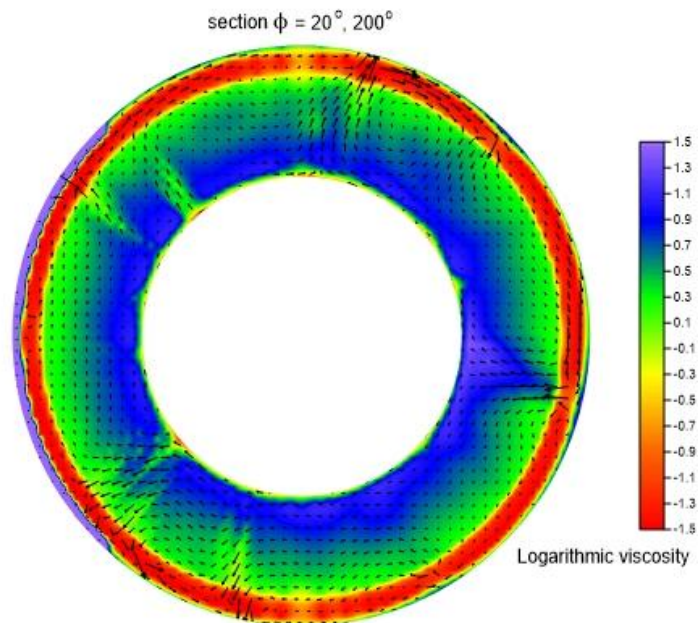
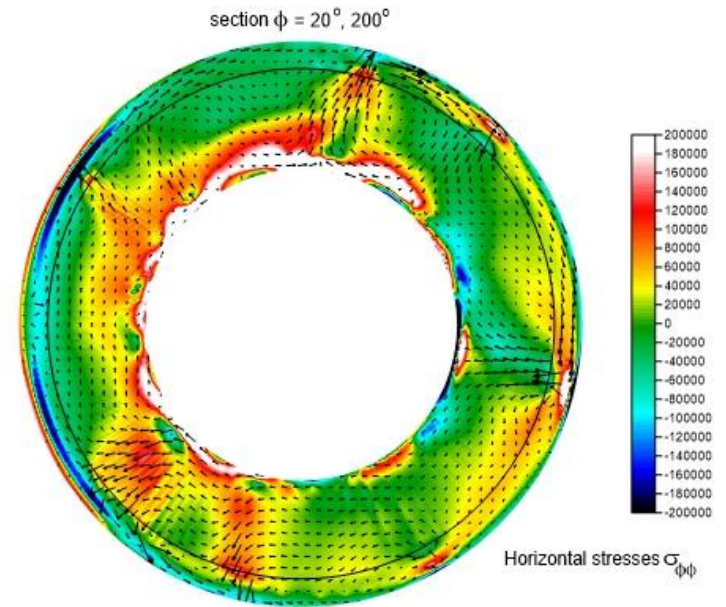
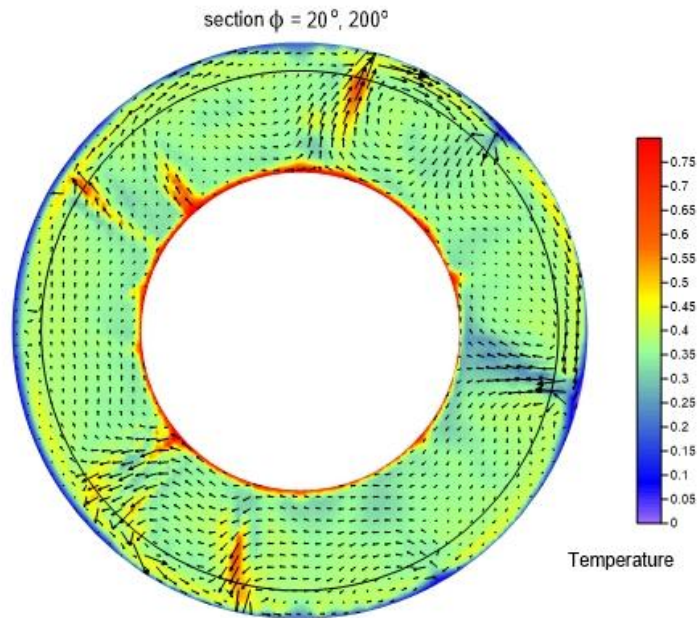
section $\phi = 20^\circ, 200^\circ$



Сфера $t=230$ млн. лет после добавления суперконтинента, сечения по глубине.

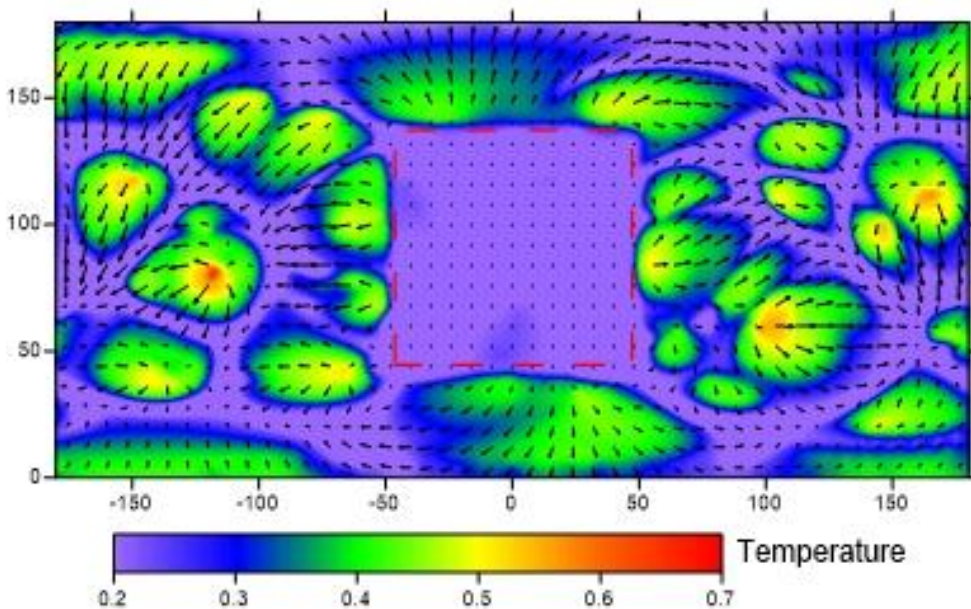


Сфера $t=460$ млн. лет после добавления суперконтинента, сечение по ϕ .

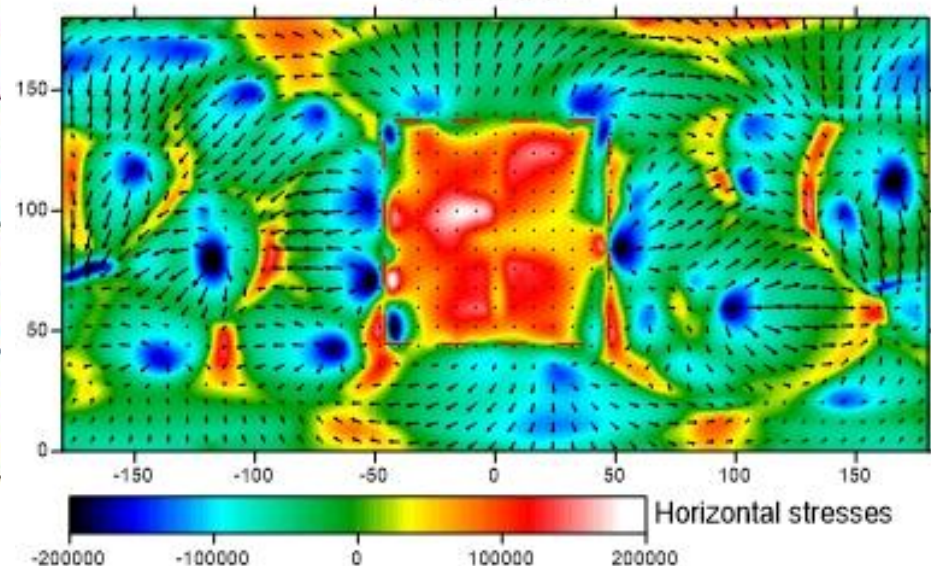


Сфера $t=460$ млн. лет после добавления суперконтинента, сечения по глубине.

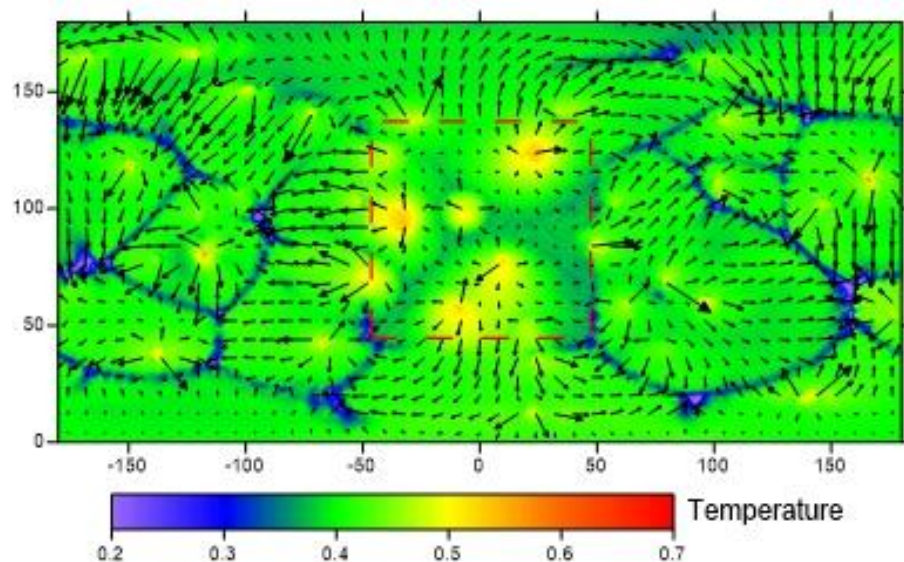
Depth 100 km



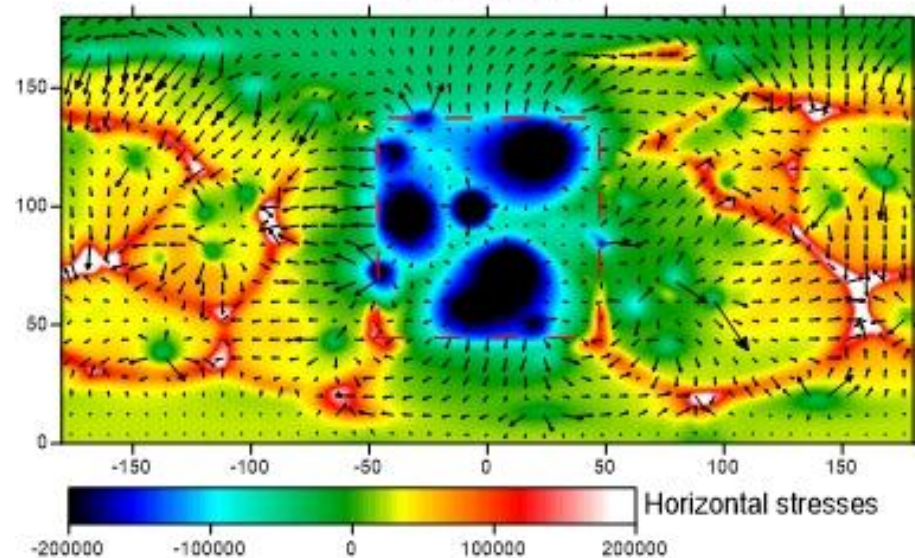
Depth 100 km



Depth 300 km



Depth 300 km



Выводы по сферической модели

1. Перед добавлением суперконтинента в значительной части мантии надлитостатические горизонтальные напряжения находятся в пределах ± 15 МПа, тогда как горизонтальные напряжения вдоль зон субдукции вокруг плюмов и континентальных окраин значительно выше (± 25 МПа и более).
2. Суперконтинент моделируется как недеформируемая, высоковязкая, неподвижная крышка по отношению к окружающей мантии и накладывается на хорошо развитую мантийную конвекцию.
3. После добавления неподвижного высоковязкого суперконтинента происходит перестройка мантийных течений под ним с появлением группы плюмов с увеличенными головами тогда как количество зон субдукции в океанической области немного увеличивается. При этом никаких больших плюмов под ним не возникло, а температура в субконтинентальной мантии на глубине 300 км выросла всего на 50-60 градусов.
3. Однако появившиеся мантийные плюмы под суперконтинентом существенно меняют структуру напряжений в области суперконтинента: в самом суперконтиненте горизонтальные напряжения растягивающие тогда как в мантии под ним сжимающие. Причиной различия напряжений в суперконтиненте и подстилающей мантии является резкое различие их вязкости.
4. После перестройки течений растягивающие надлитостатические горизонтальные напряжения в суперконтиненте достигают 20-30 МПа .
5. Под суперконтинентом в субконтинентальной мантии надлитостатические горизонтальные напряжения сжатия составляют 25-60 МПа.
7. Напряжения в сферической модели существенно меньше напряжений из двумерной модели из-за эффекта сферичности.

Спасибо за внимание