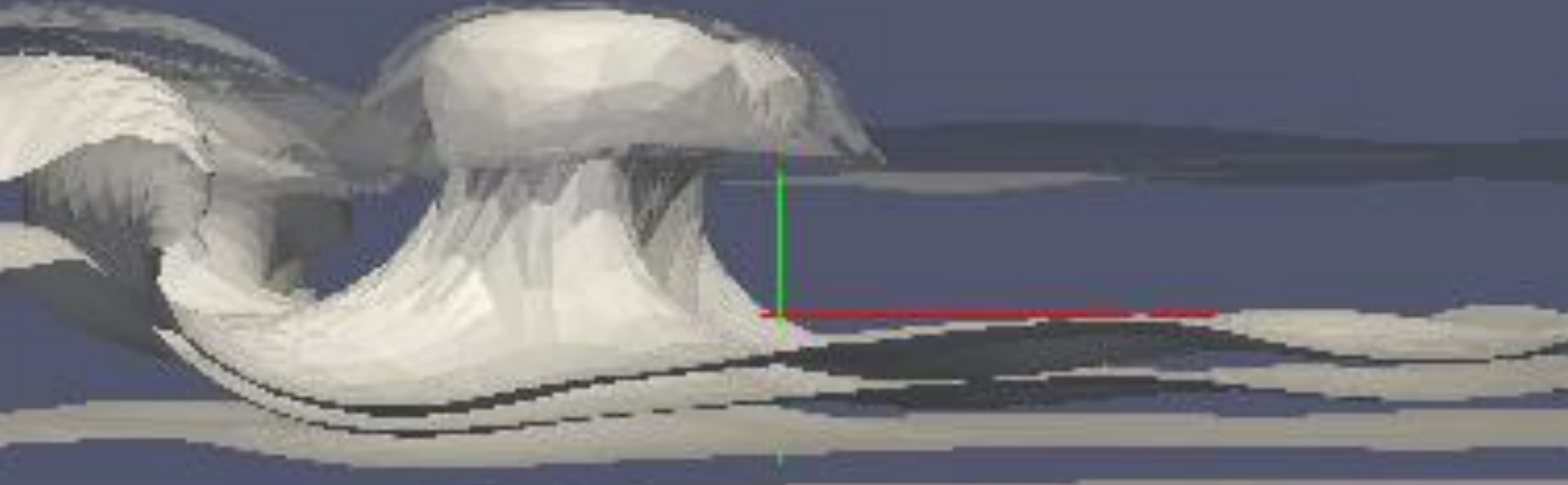


Моделирование соляного диапиризма расчетом трехмерных ползущих течений с использованием технологии параллельных вычислений CUDA® на GPU

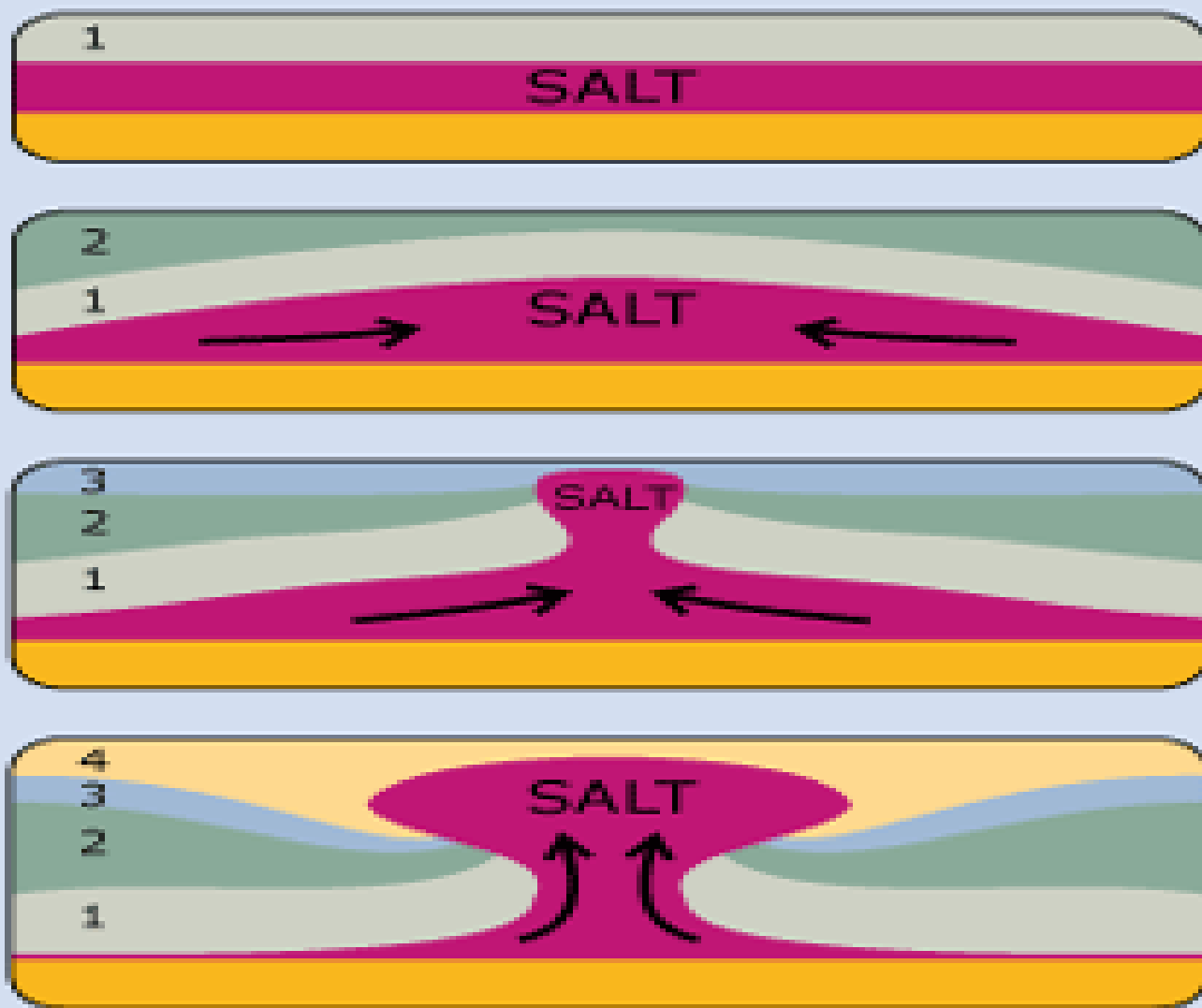


Абрамов Т. В., Лунев Б.В.
лаборатория мат. моделирования природных нефтегазовых систем
ИНГГ СО РАН

**XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому
моделированию и информационным технологиям**

г. Тюмень, 29-31 октября 2014 г.

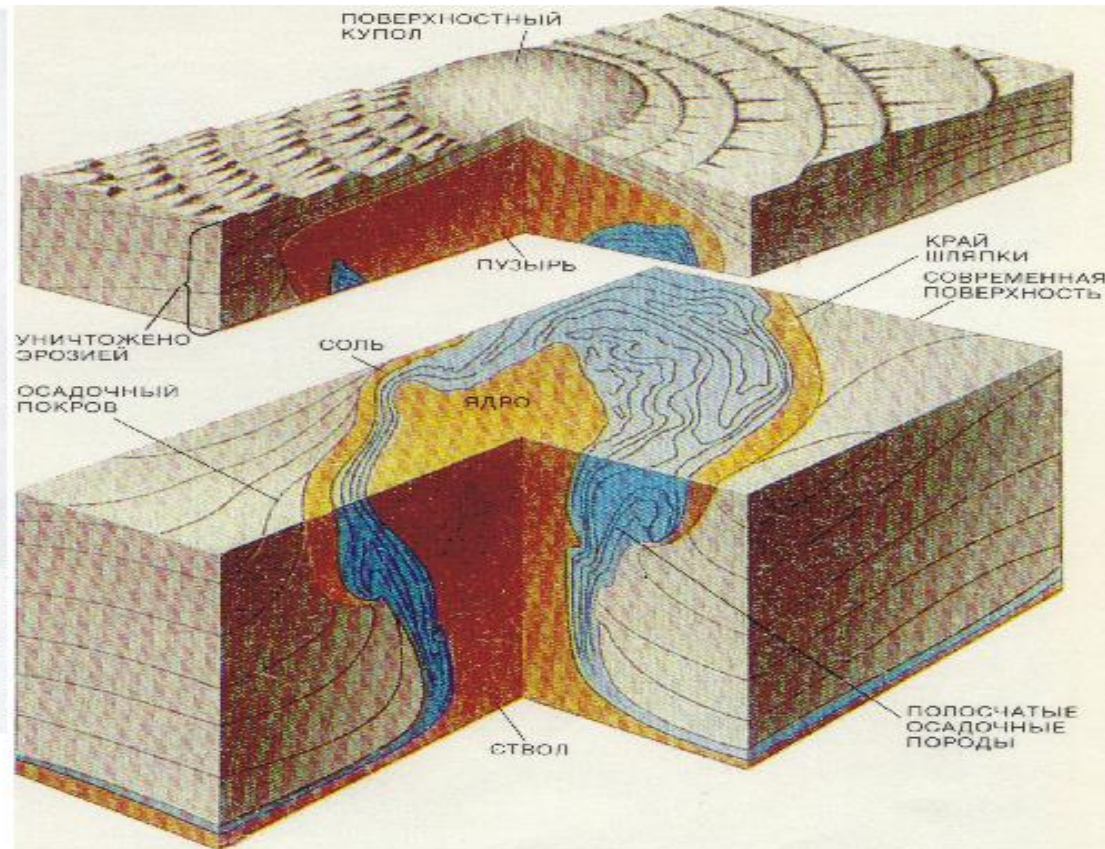
Схема процесса



Фотоснимок и геологическое строение соляного диапира



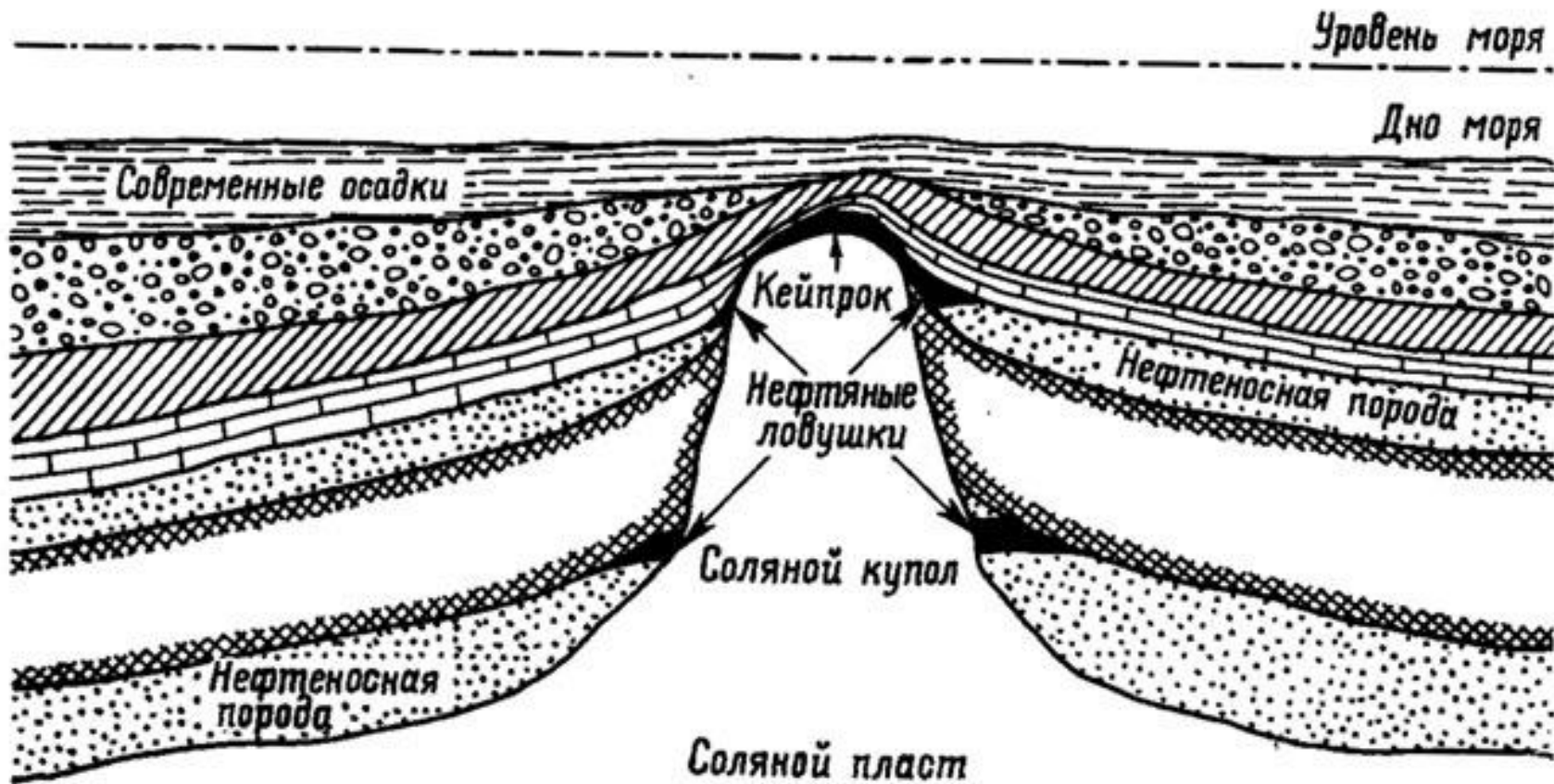
БОЛЬШАЯ СОЛЯНАЯ ПУСТЫНЯ в Центральном Иране — область развития величайших соляных диапиров. На аэрофотоснимке, сделанном А. Гансером, видна усеченная вершина (диаметром 6 км) почти круглого диапира. Светлое ядро соли, покрытой гипсовой оболочкой, окружено тонкими кольцами более молодых эвапоритов: светлые соль и гипс чередуются с более темными глинистыми сланцами и мергелями. На переднем плане по краям диапира виден вытесненный им осадочный покров.



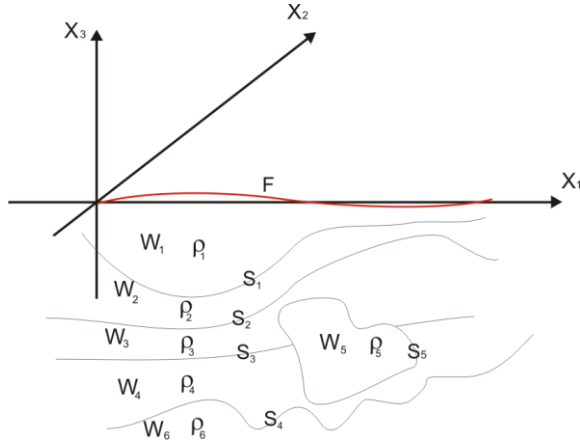
ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА грибообразного диапира в Большой Соляной пустыне, проявившаяся благодаря эрозии. Исходя из картины поверхностных особенностей и результатов своих моделей, авторы описали глубинную структуру диапира и структуру его вершины, разрушенной эрозией. Первоначальная последовательность слоев в пузырях перевернута: соль перекрывается полосчатыми осадочными породами, являющимися промежуточными по возрасту и по составу между солью и более молодыми покровами. На современной поверхности полосчатые породы образуют кольцевую структуру.

[Талбот & Джексон, 1987]

Образование нефтяных ловушек соляными диапирами



Постановка задачи



В координатах X_1, X_2, X_3 однородно-вязкая, несжимаемая ньютоновская жидкость с кусочно-постоянной плотностью ($\rho(\mathbf{x}, t) = \rho_k$ для $\mathbf{x} \in W_k$) занимает ограниченное свободной поверхностью

$$F(\mathbf{x}, t) = x_3 - h(x_1, x_2, t) = 0$$

полупространство $x_3 \leq h(x_1, x_2, t)$ ($\{\mathbf{x}\} = \{x_1, x_2, x_3\}$,

t – время, $\mathbf{n}$ – нормаль к F), находясь под действием нормальной силы тяжести $\mathbf{g} = \{0, 0, g\}$, $g = \text{const} < 0$.

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \rho_{(x_3, t)}^0 + \sigma(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{T}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{T}_{(x_3, t)}^0 + \boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t),$$

$$P(\mathbf{x}, t) = P_{(x_3, t)}^0 + p(\mathbf{x}, t), \quad \text{где} \quad \rho_{(x_3, t)}^0, \quad \mathbf{T}_{(x_3, t)}^0, \quad P_{(x_3, t)}^0 \quad -$$

характеристики гидростатического состояния, а

$\sigma(\mathbf{x}, t)$, $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}, t)$, $p(\mathbf{x}, t)$ – их малые возмущения.

$$T_{ij}^0 = -\delta_{ij}P^0 = -\delta_{ij}\rho^0 g x_3.$$

Квазистационарная задача

отыскания $\mathbf{v}$ и p по возмущению плотности σ , заданному на момент времени t_n :

$$(1) \quad \rho(\mathbf{x}, t_n) = \rho_k \text{ для } \mathbf{x} \in W_k,$$

$$(1^*) \quad \sigma(\mathbf{x}, t_n) = \rho(\mathbf{x}, t_n) - \rho_{(x_3, t_n)}^0;$$

$$(2) \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$(3) \quad \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p = -\sigma \mathbf{g}.$$

Условия для свободной поверхности F

$$(4) \quad \frac{DF}{Dt} = 0,$$

$$(5) \quad (\mathbf{T} \cdot \mathbf{n})_F = 0,$$

допускают линеаризацию путем так называемого «сноса на невозмущенную поверхность», приводящего к условиям «скользящей границы» (“free slip conditions”):

$$(4л) \quad (v_3 = 0)_{x_3=0},$$

$$(5л) \quad (T_{31} = T_{32} = 0)_{x_3=0},$$

$$(5л^*) \quad (T_{33} = -\rho^0 |g| h)_{x_3=0}.$$

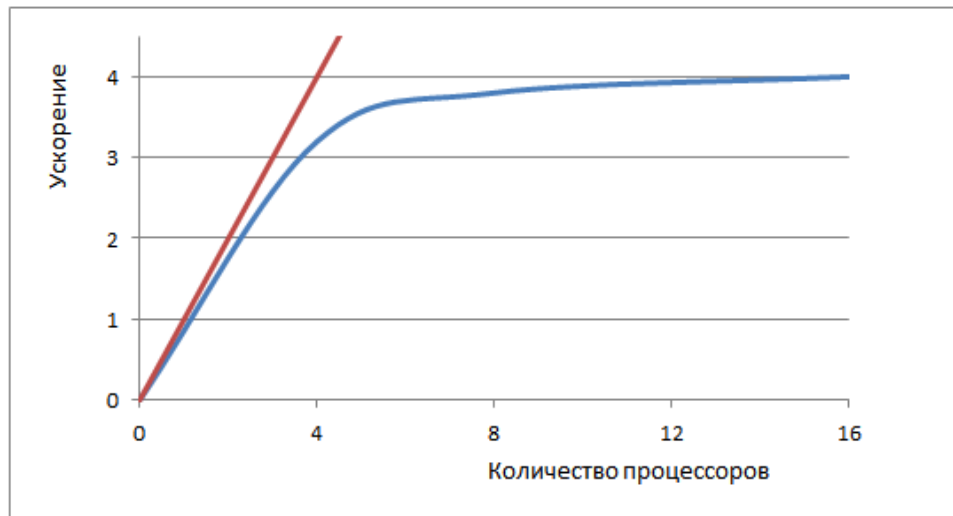
Эволюционные уравнения

определяющие эволюцию внутренних границ S_k

$$(6) \quad \frac{\partial S_k}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla S_k = 0,$$

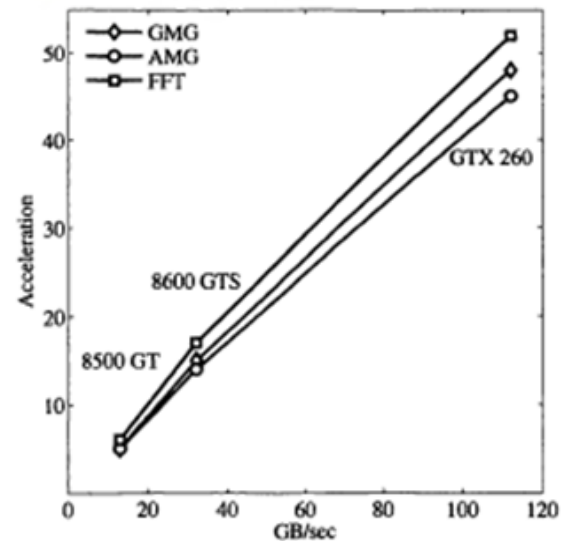
с начальными условиями – $S_{k(x, t_0)}$, ($\mathbf{v}(x, t_0) = 0$).

Ограничения разностных методов



а) График зависимости ускорения от количества процессоров, полученный при решении системы ЛАУ методом Холесского с 3000 неизвестных. Красным обозначен теоретический рост производительности, синим — практический. Уменьшение прироста производительности связано с частыми обменами данными

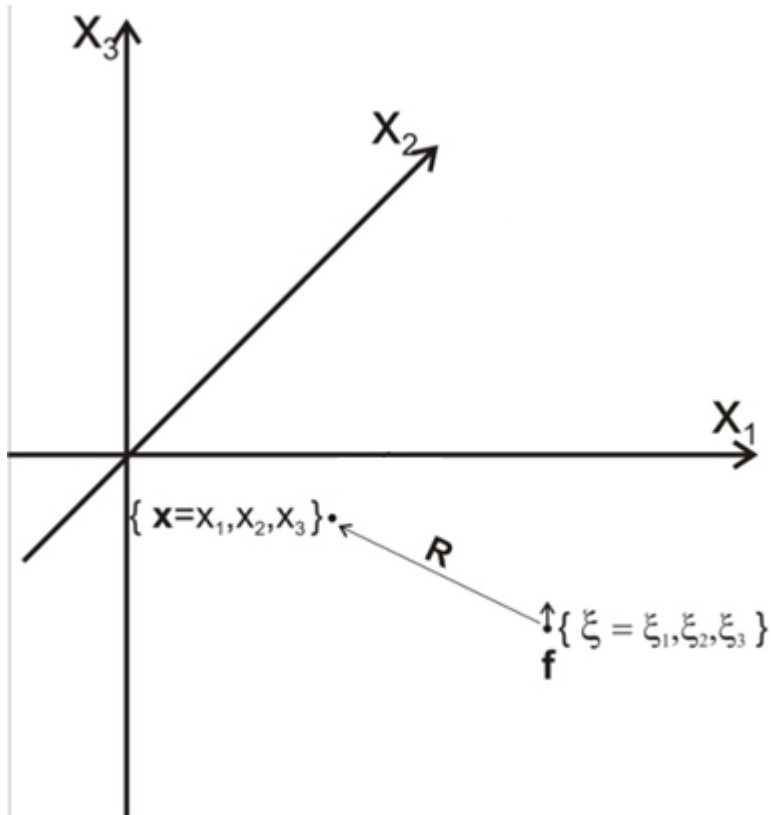
[Исмаил-Заде и др, 2000]



б) График зависимости ускорения от пропускной способности памяти при решении задачи сеточными методами. На графике GMG — геометрический многосеточный метод, AMG — алгебраический многосеточный метод, FFT — метод редукции. Очевидна линейная зависимость ускорения от пропускной способности памяти видеокарт

[Демидов и др, Казанский Государственный Университет]

Стационарная задача для сосредоточенной силы



$$(1) \quad \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p = -\mathbf{f}^\circ,$$

$$(2) \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$(3) \quad (v_3 = \tau_{31} = \tau_{32} = 0)_{x_3=0}.$$

$$\mathbf{f}^\circ = \delta_{i3} \delta_{(x-\xi)},$$

δ_{i3} – дельта Кронекера,

$\delta_{(x-\xi)}$ – дельта функция Дирака в точке с координатами $\{\xi\}$.

$V_{(x,\xi)}$ – решение задачи (1 – 3)

Расчет ползущего течения – общая схема

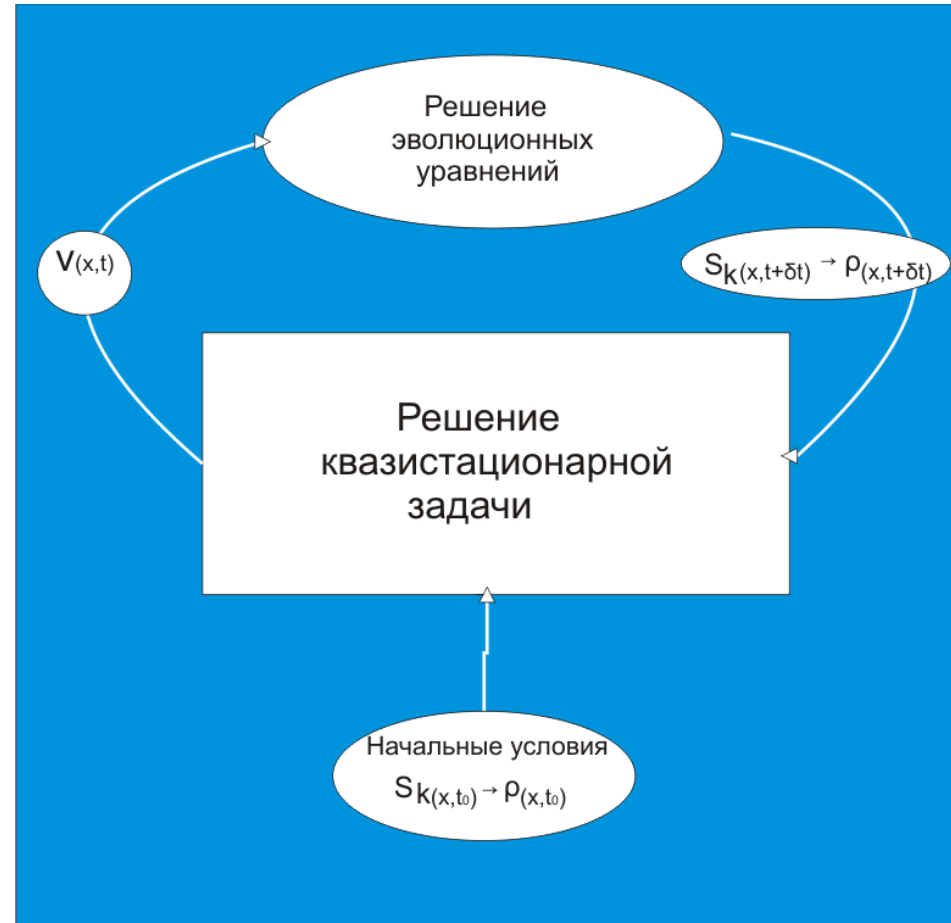
- На каждой итерации решается стационарная задача, где поле течения находится как интеграл свертки

$$v_{i(x)} = g \iiint \sigma_{(\xi)} V_{i(x,\xi)} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3$$

- Решаются эволюционные уравнения

$$\frac{\partial S_k}{\partial t} + v \cdot \nabla S_k = 0,$$

$$S_{k(x,t_0)}, v_{(x,t_0)} = 0$$



Преимущества использования функции Грина

- Поле скорости вычисляется, как интеграл свертки
- Возможность расчета поля течения только на границах тел
- Возможность понижения порядка вычислительной сложности
- Масштабируемость большое число вычислительных узлов
- Снижение требований к пропускной способности памяти

Реализация вычислений

Источник

m^a – аномальная масса

ξ_1 – координата по x

ξ_2 – координата по y

ξ_3 – координата по z



Приемник

x_1 – координата по x

x_2 – координата по y

x_3 – координата по z

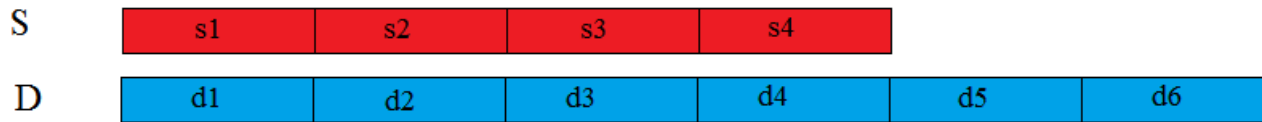
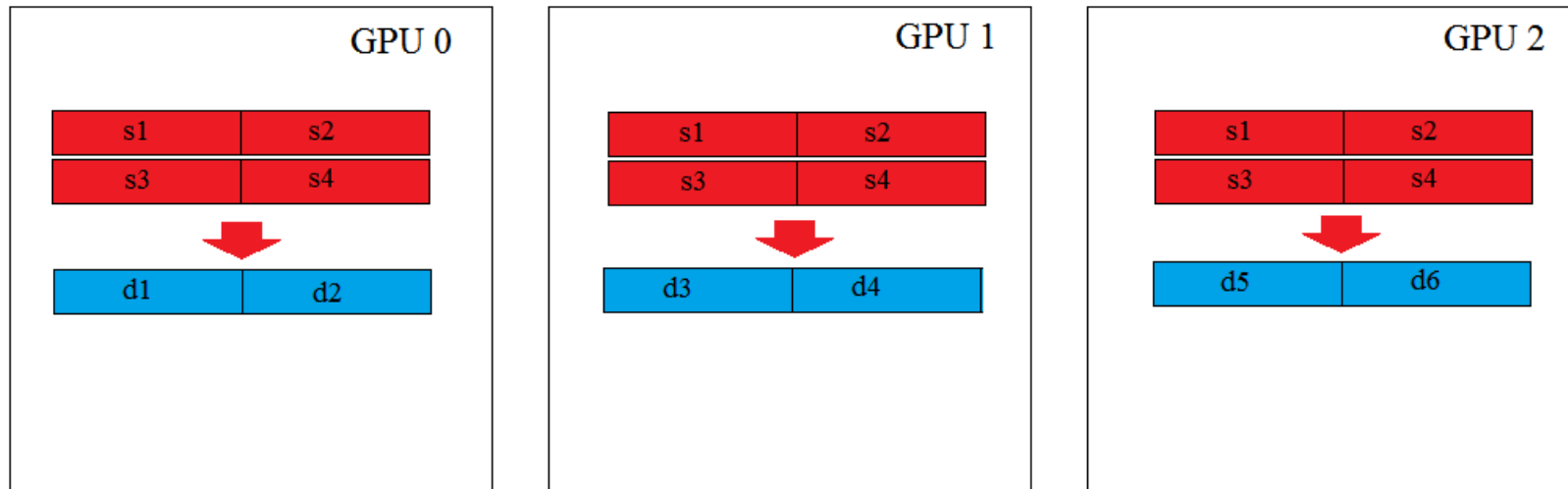
v_1 – скорость по x

v_2 – скорость по y

v_3 – скорость по z

$$\bar{v}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^s m_{a(\bar{\xi})} * \bar{f}(\bar{x}, \bar{\xi})$$

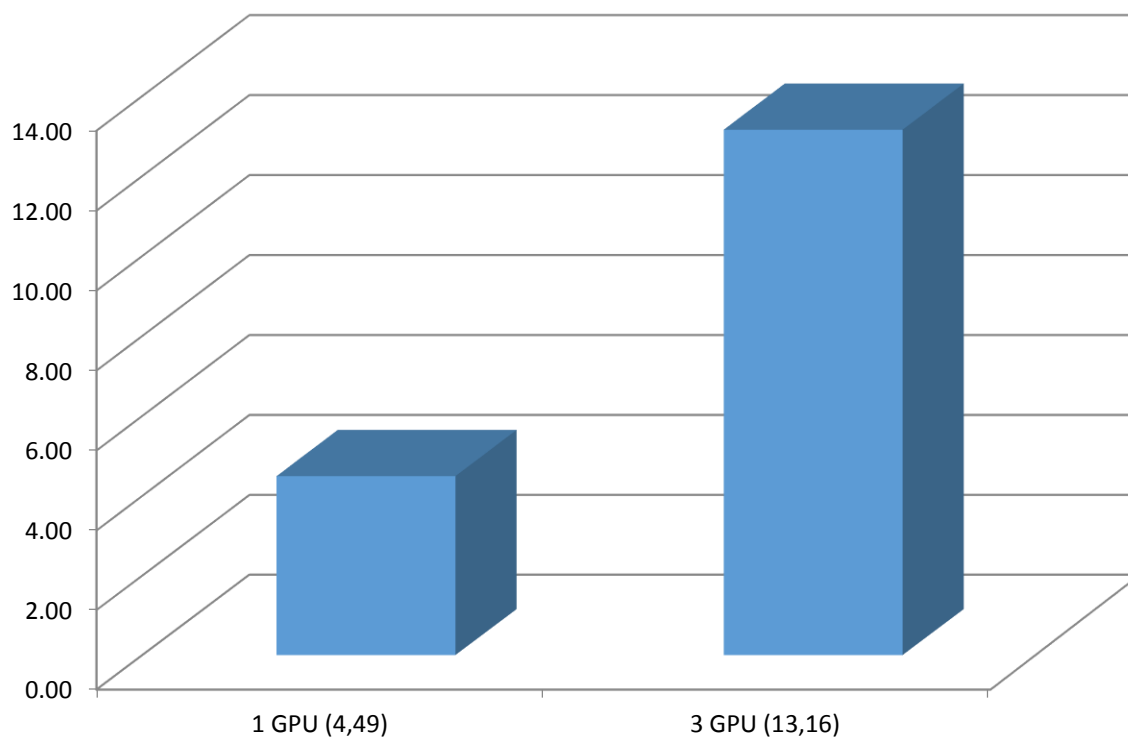
Схема расчета на нескольких GPU



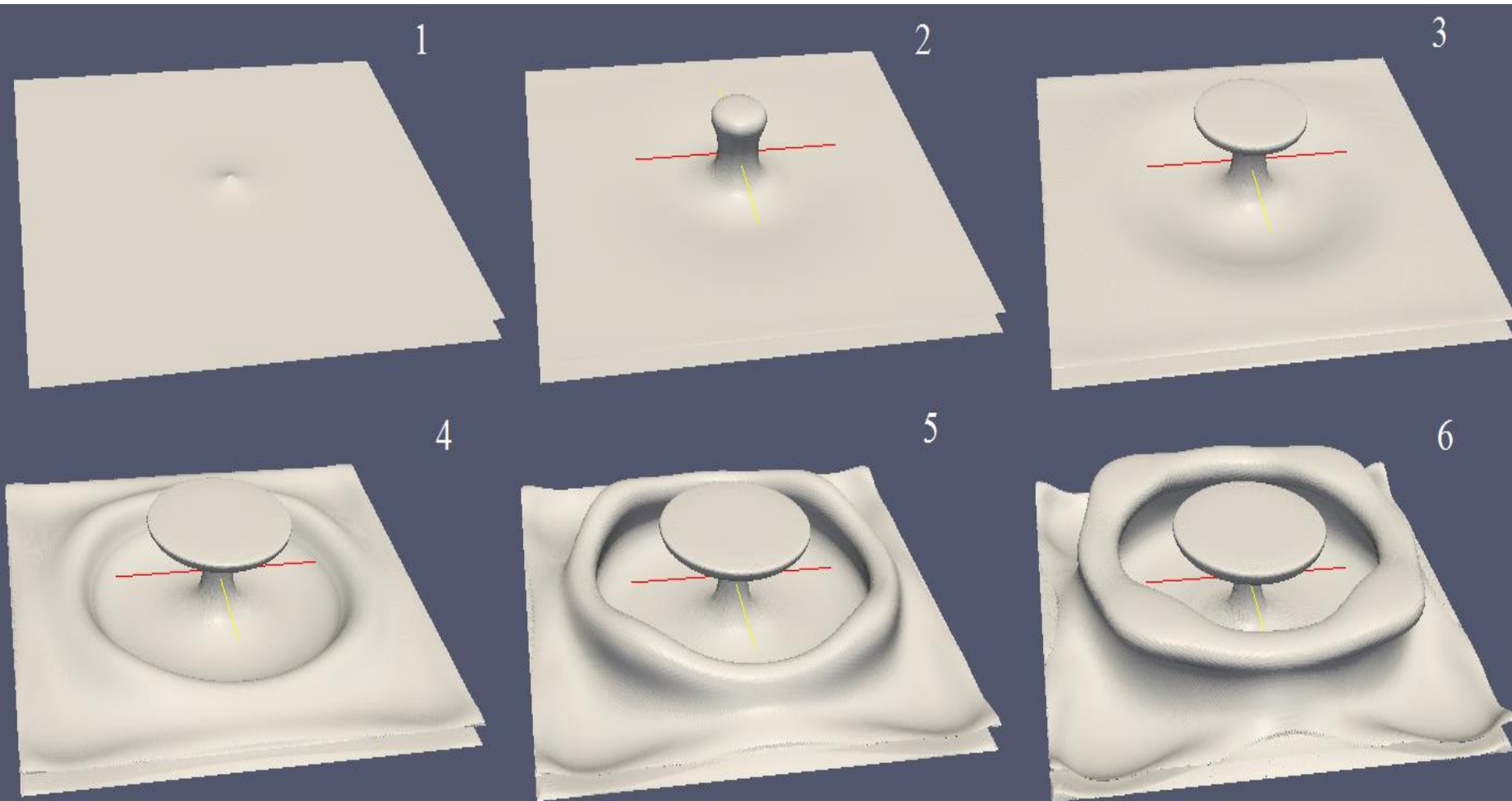
HOST

Оценка производительности при использовании нескольких GPU

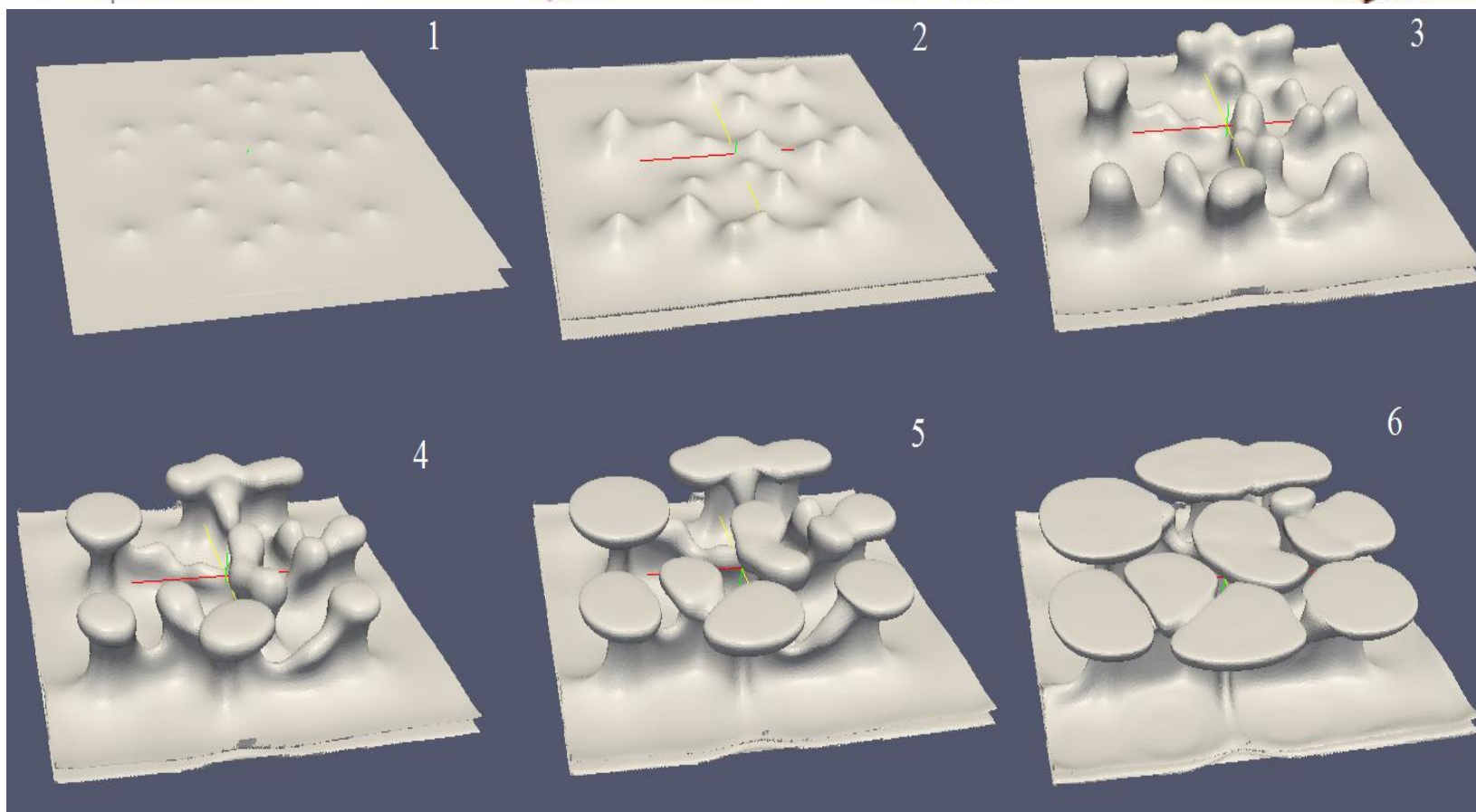
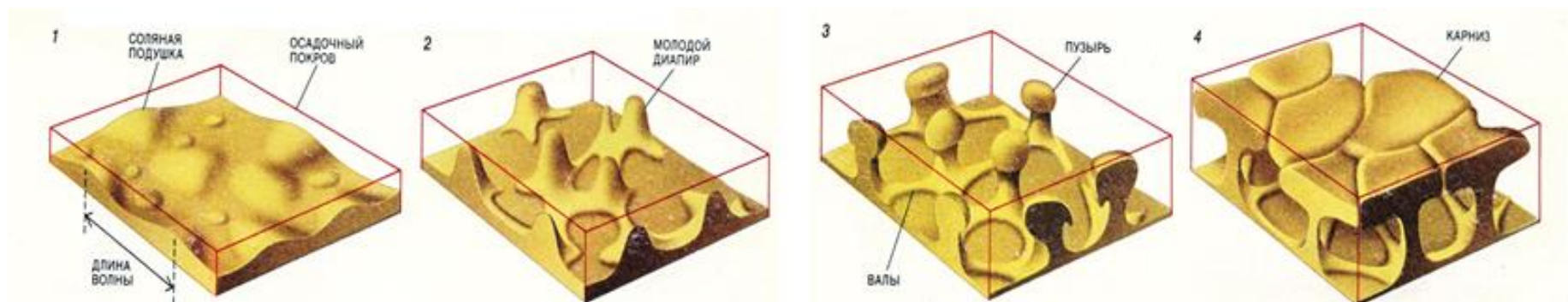
**Производительность,
млрд. вычислений функции Грина в секунду**



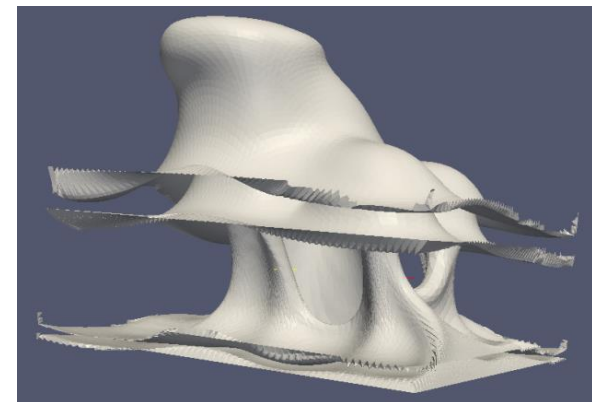
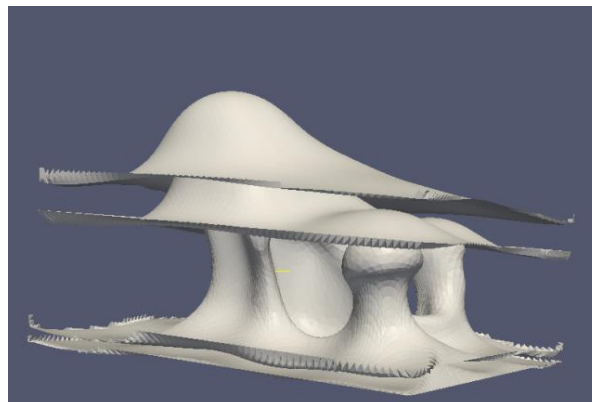
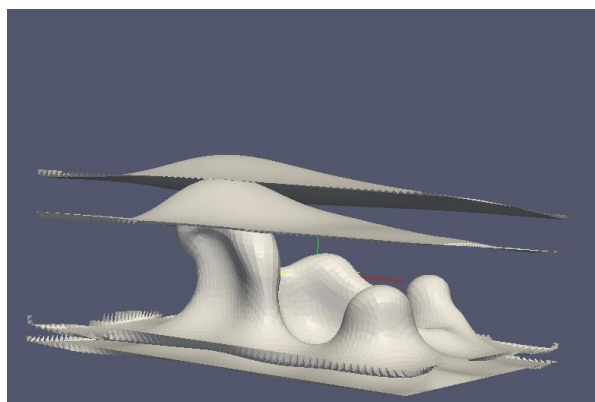
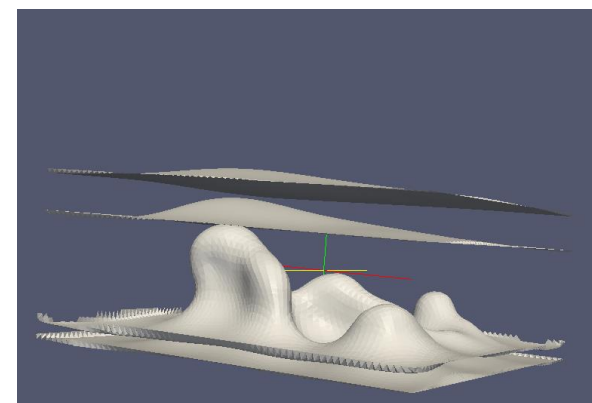
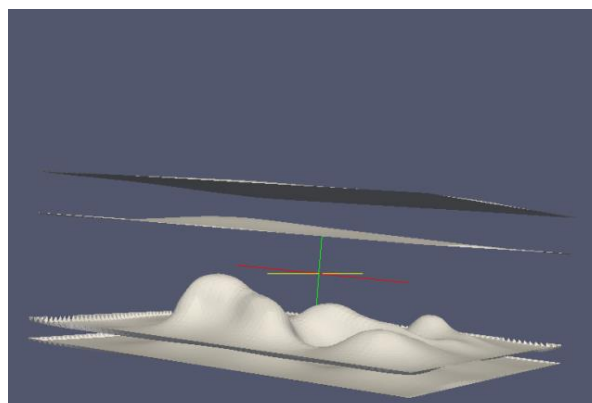
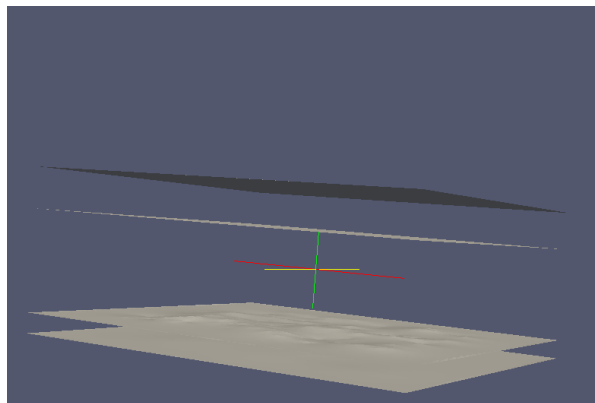
Примеры расчетов – развитие одиночного возмущения на различных стадиях



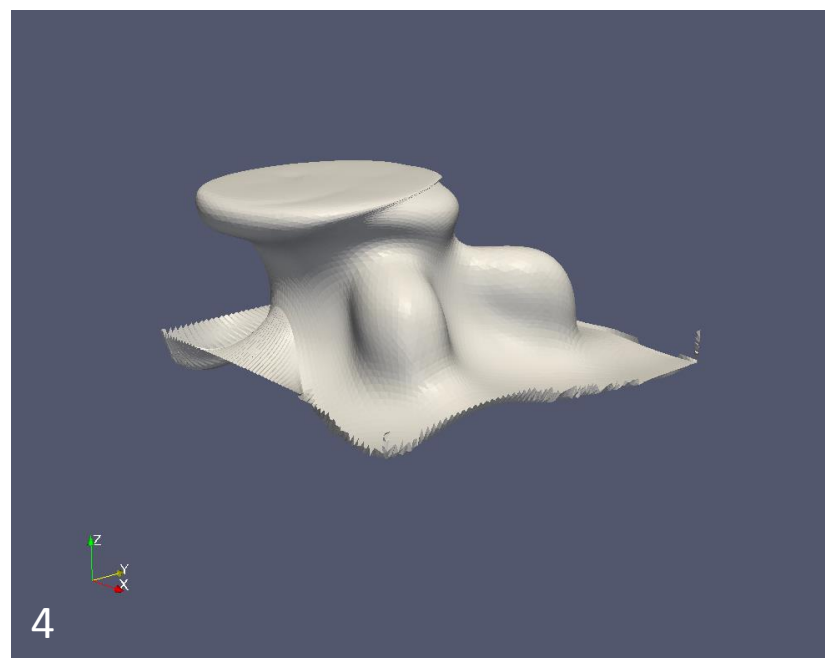
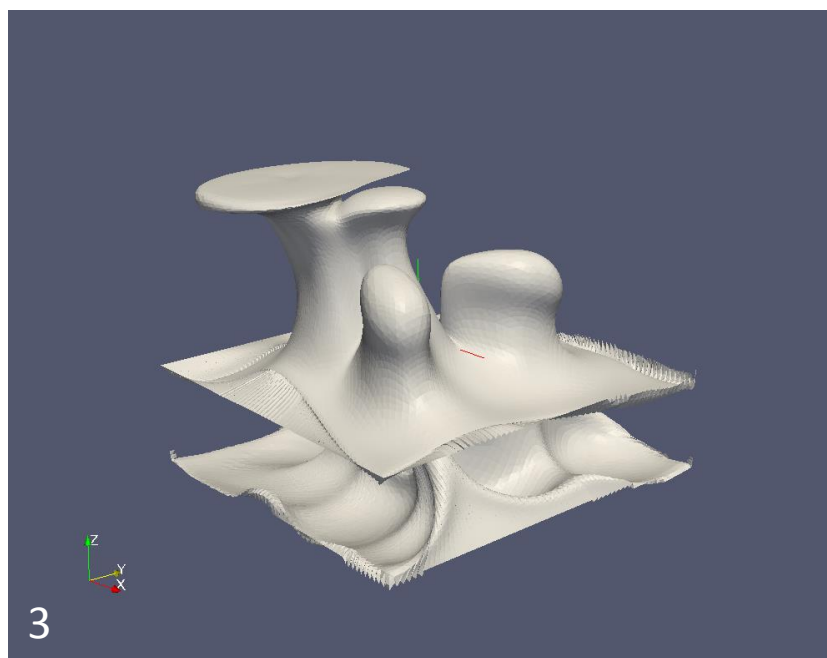
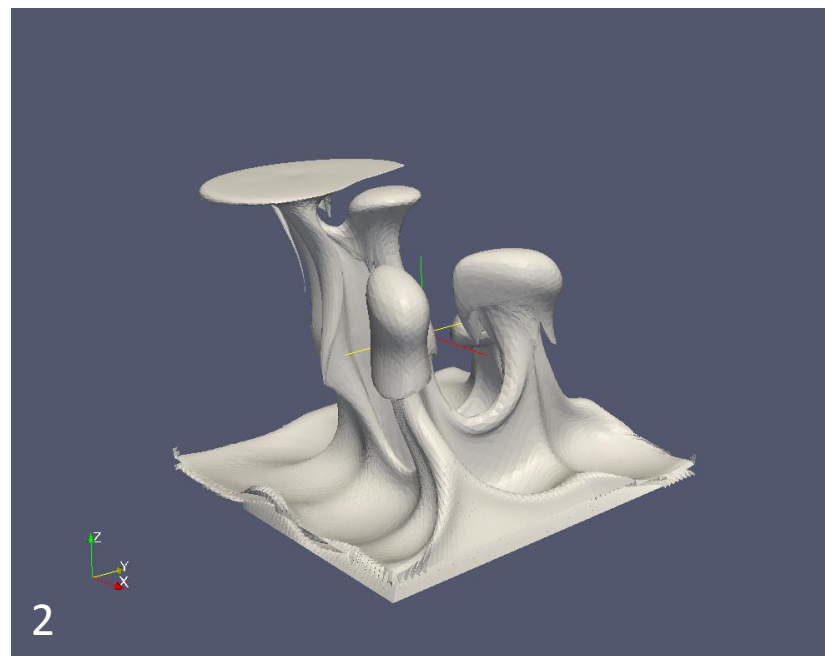
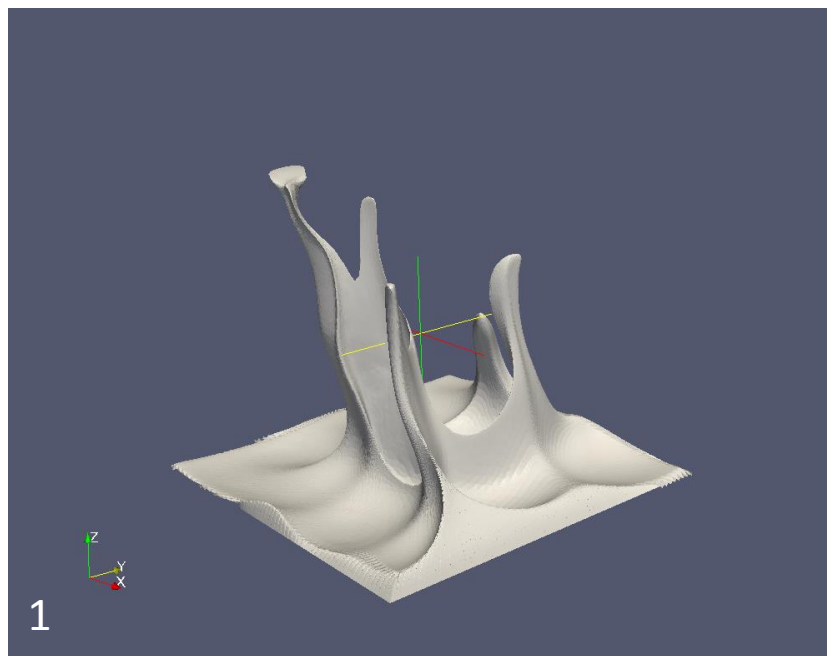
Сопоставление результатов физического (Талбот & Джексон, 1987) и нашего численного моделирования



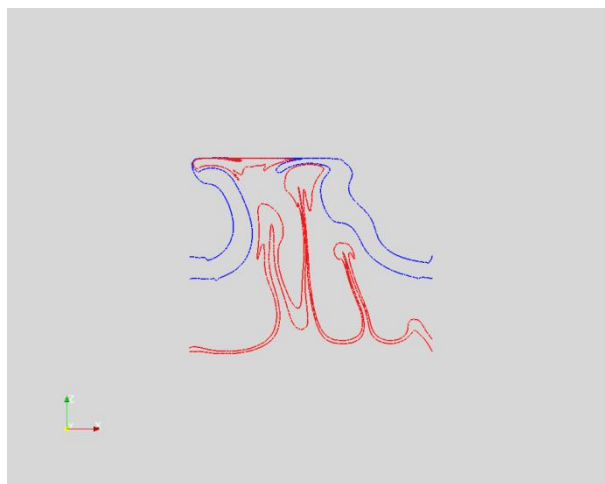
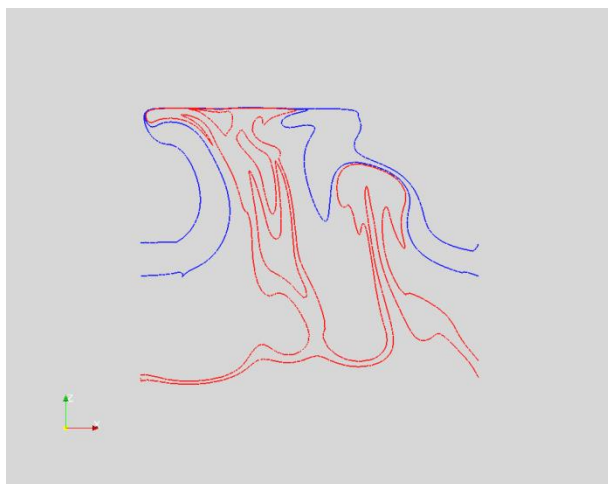
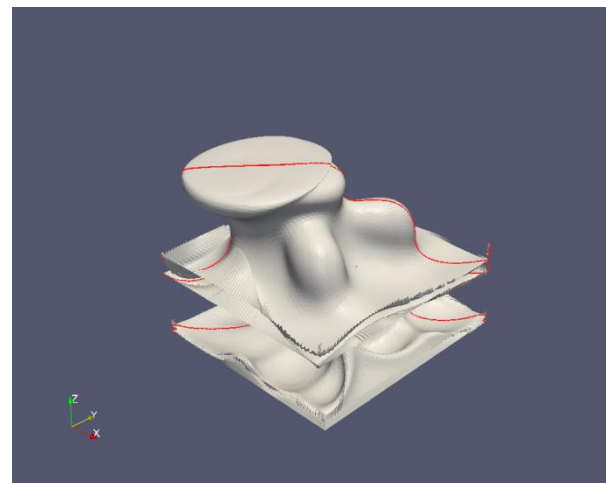
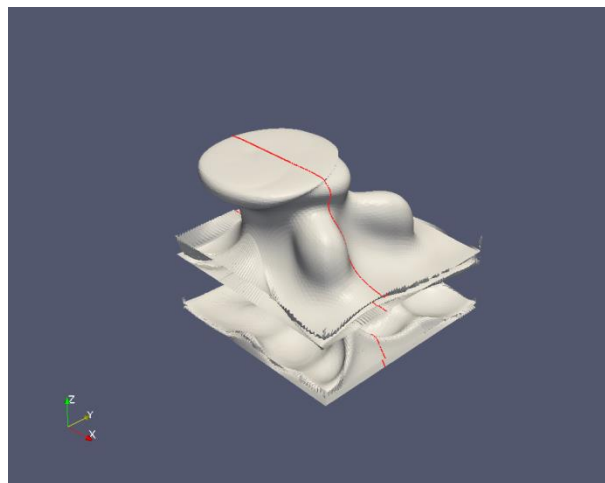
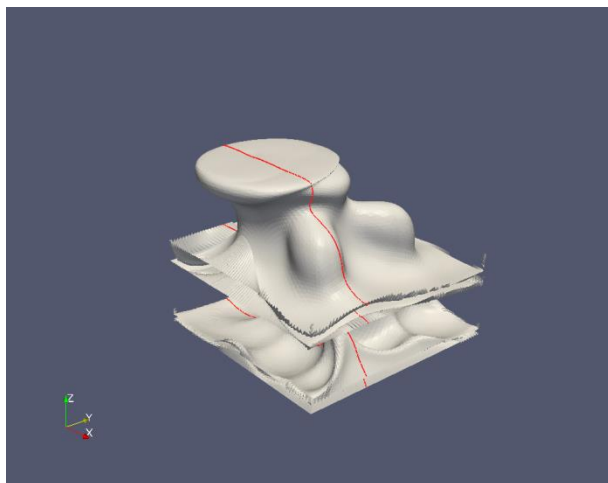
Эволюция двуслойной модели



Конфигурация слоев двуслойной модели снизу вверх



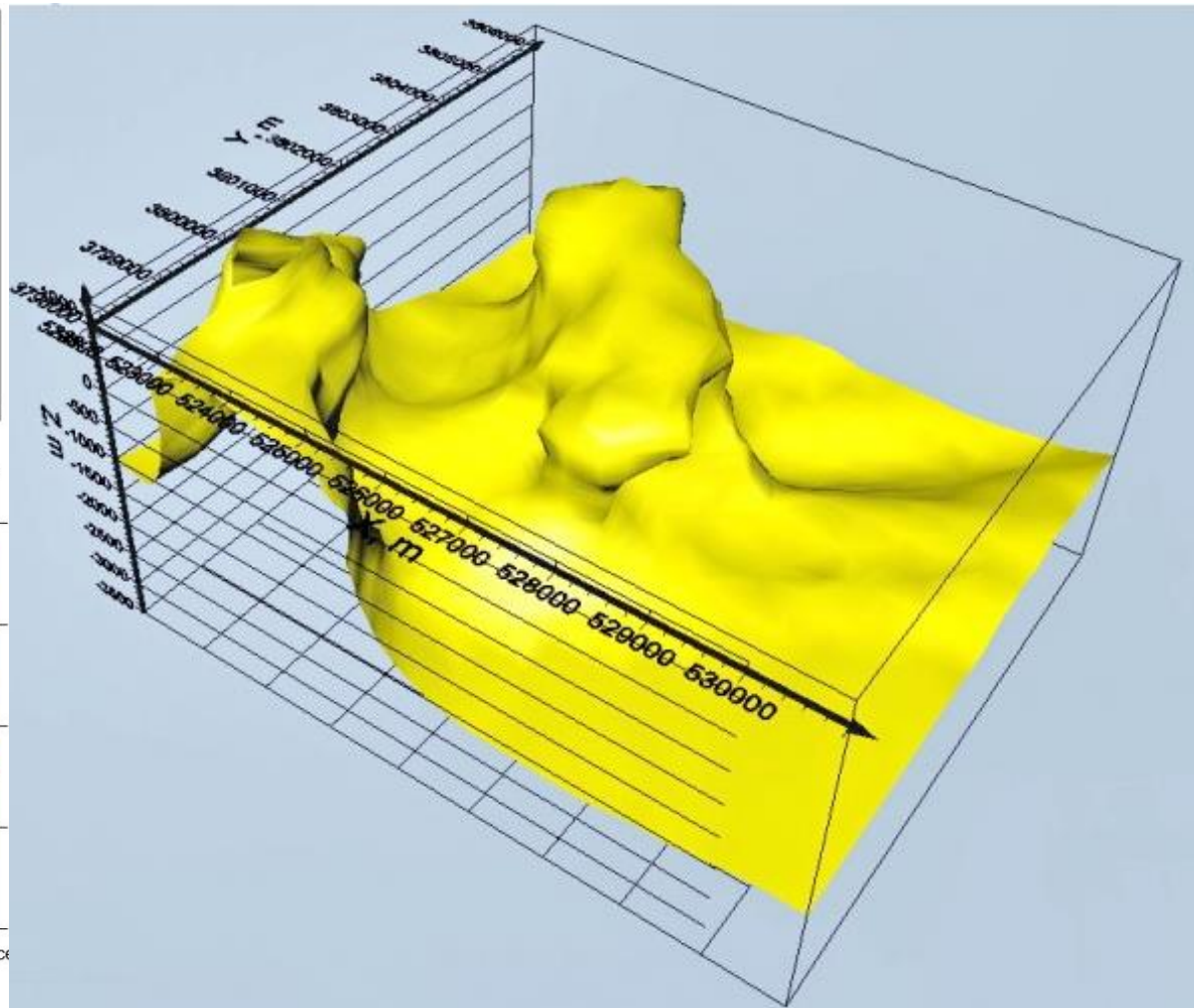
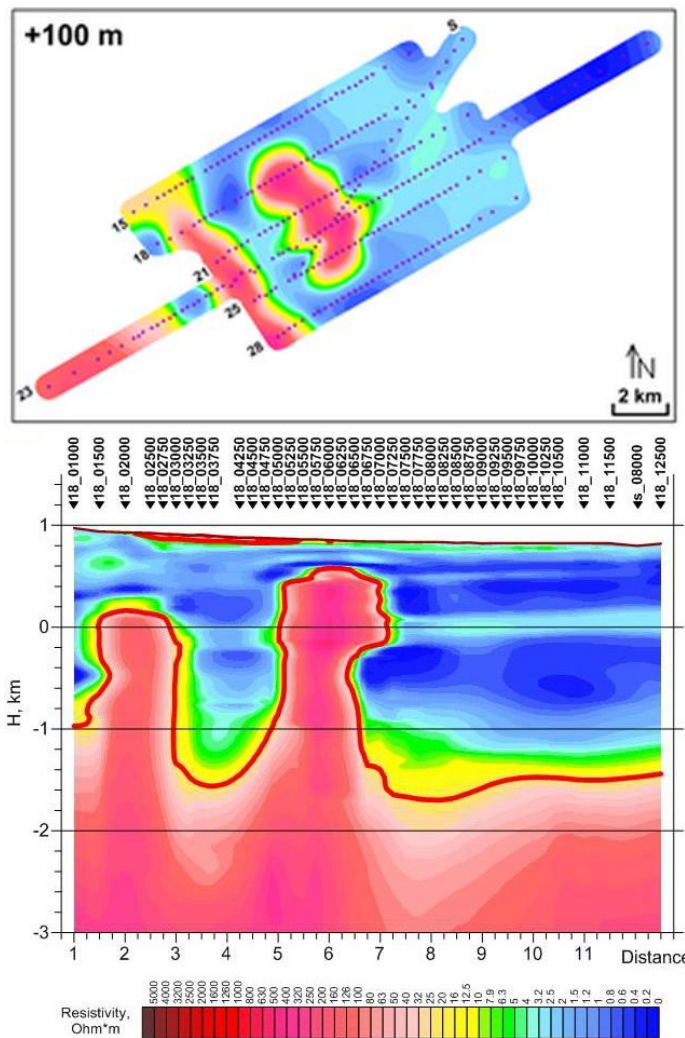
Разрезы двуслойной модели



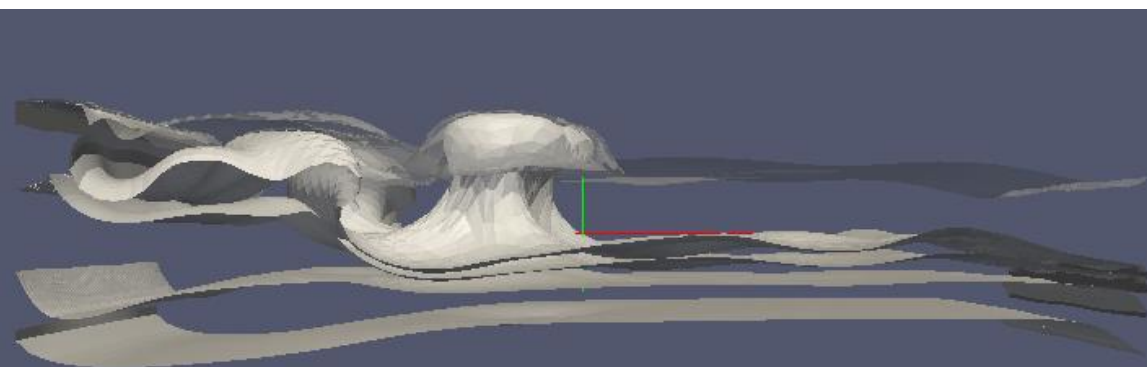
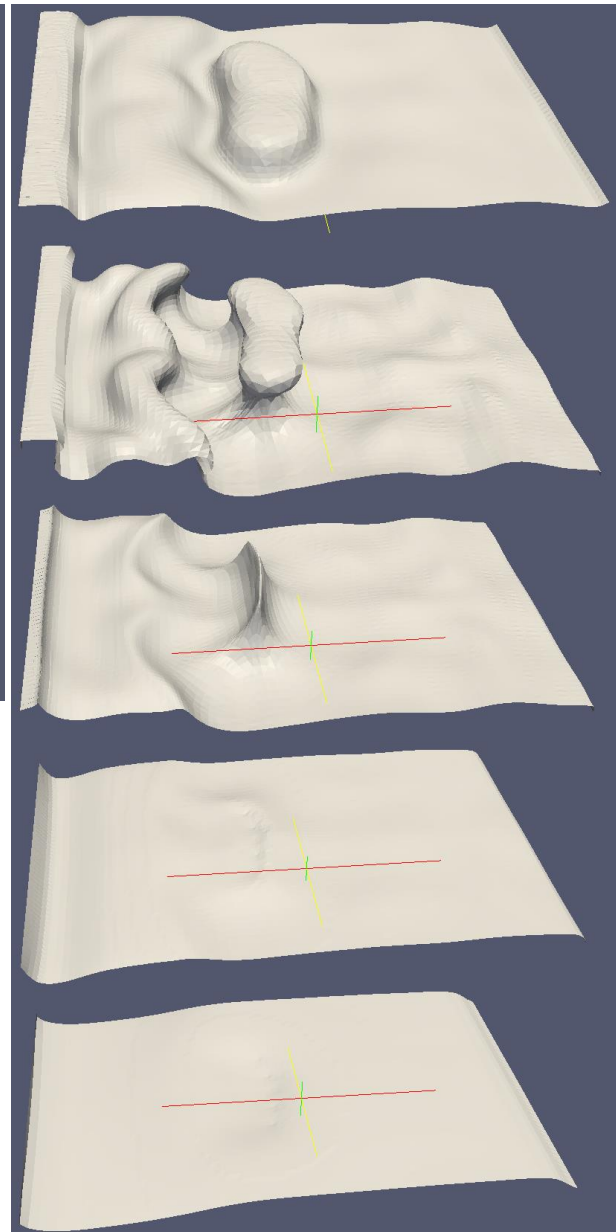
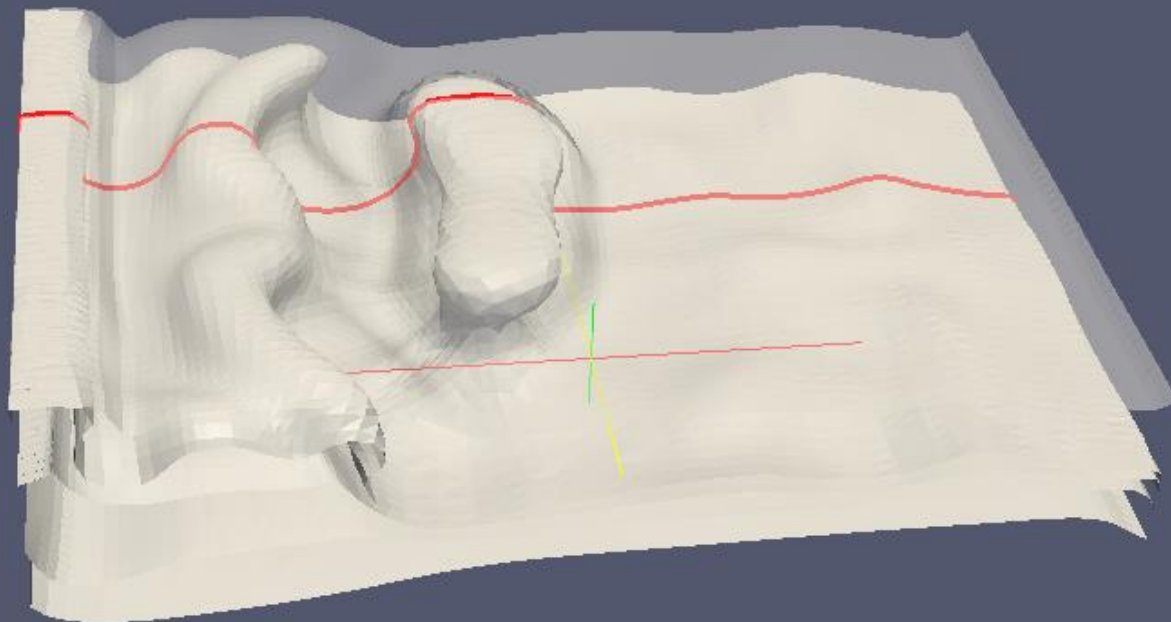
Подбор 3D структуры

В 2013 году компания «Северо-Запад» совместно со своим иранским партнером [ZAP Consulting Engineers](http://www.zap-consulting.com) проводили площадные электроразведочные и гравиразведочные работы на одном из соляных куполов в центральном Иране. Требовалось изучить геометрию и свойства соляного тела для проектирования и строительства в нем первого на Ближнем Востоке газового хранилища в соляном куполе. Построена 3D-модель соляного тела.

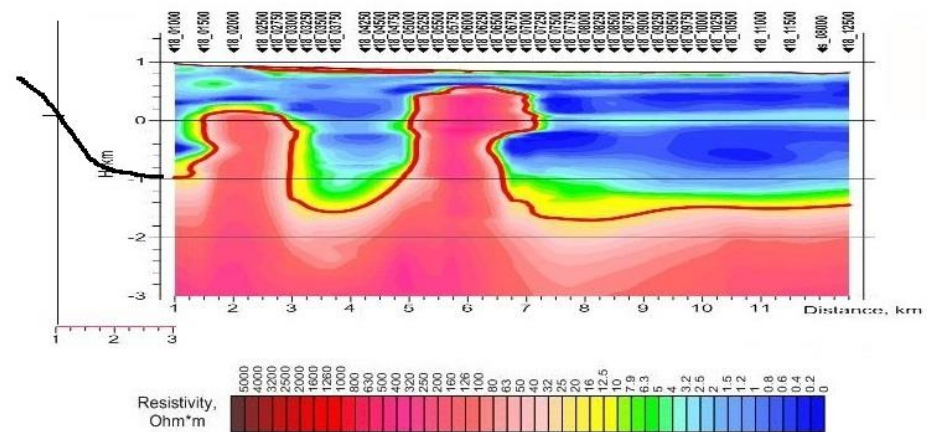
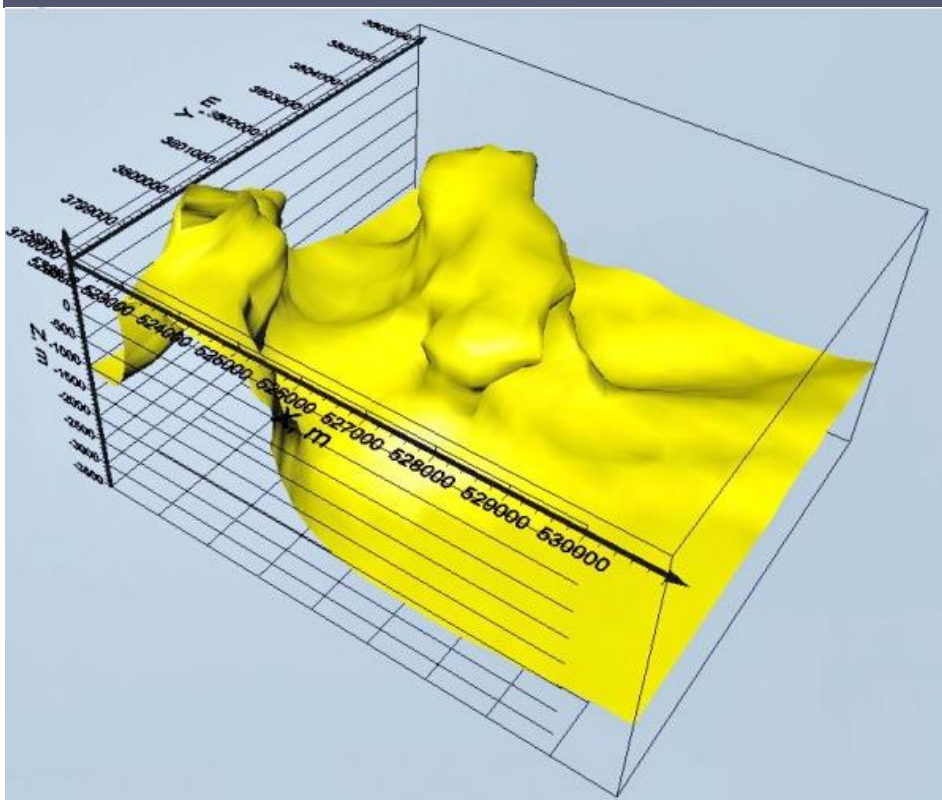
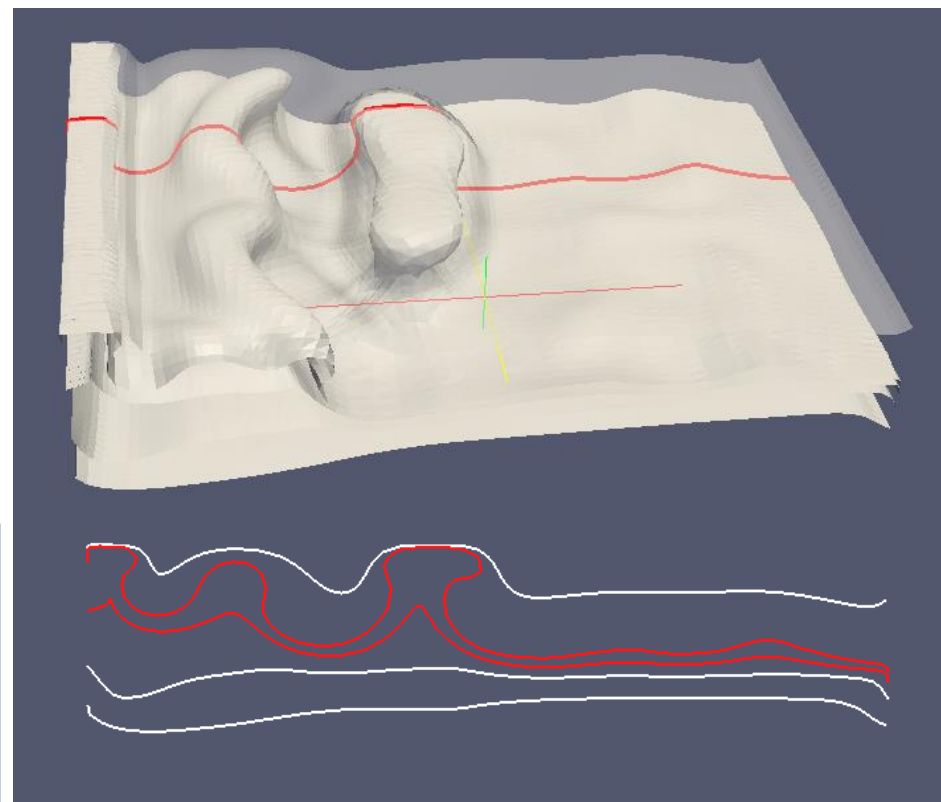
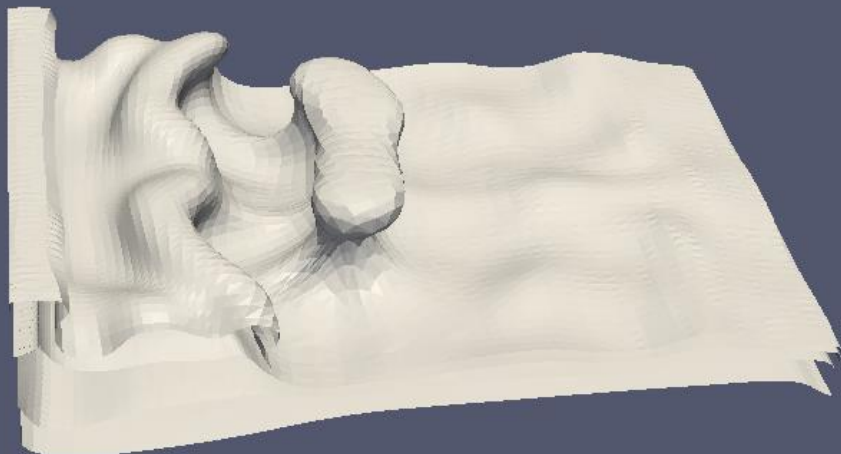
Опубликовано на <http://nw-geo.ru/geophysics/oil-and-gas/izuchenie-solianogo-kupola-v-irane/>



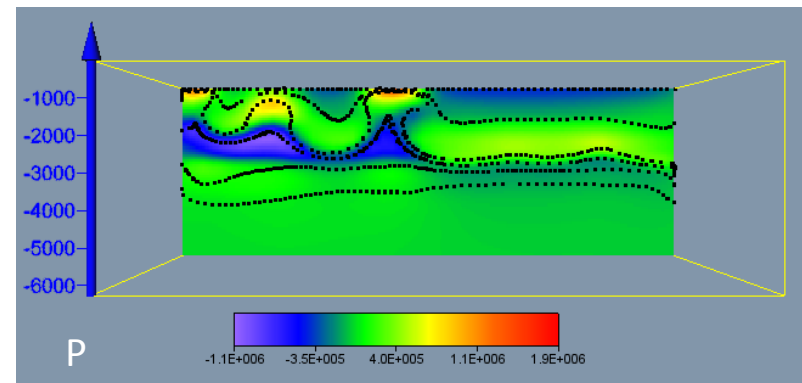
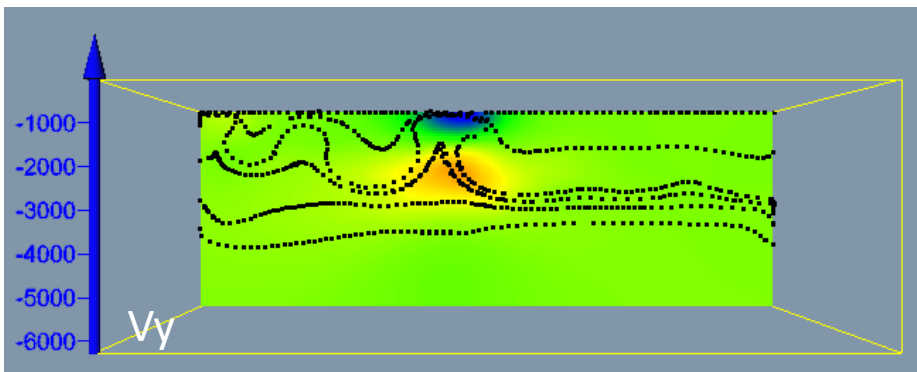
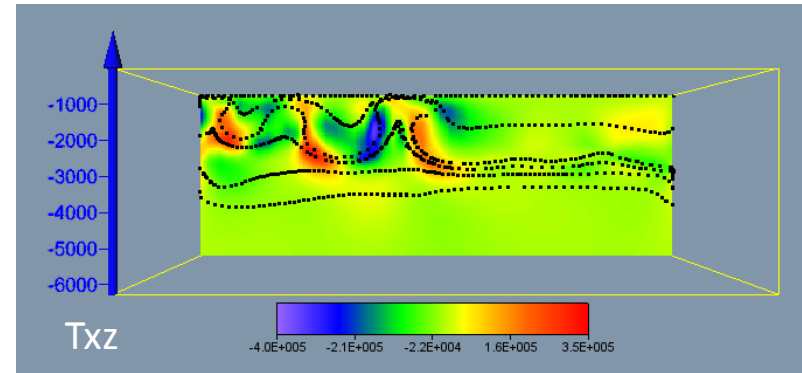
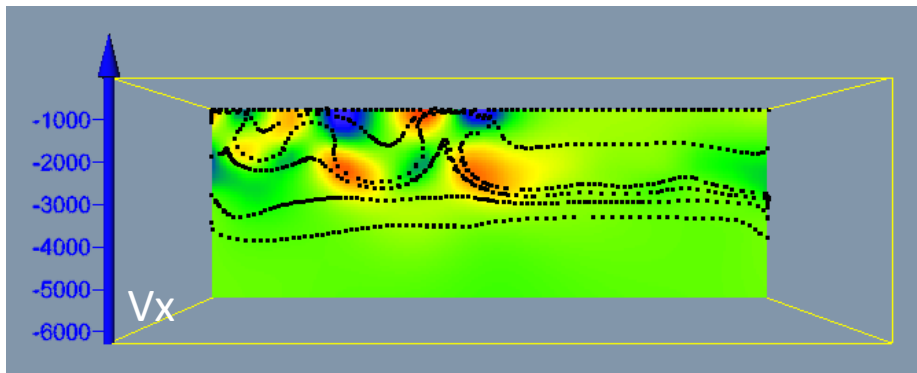
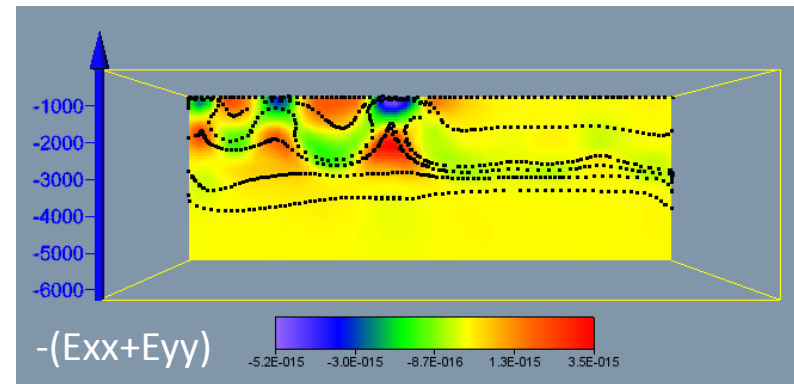
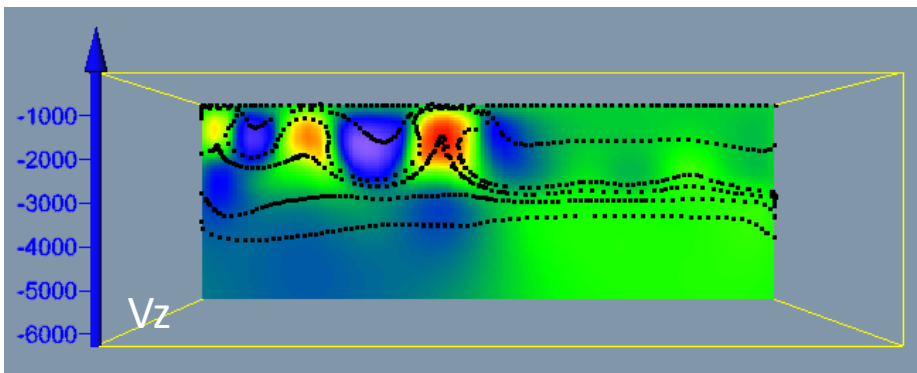
Подбор 3D структуры: итоговое состояние



Подбор 3D структуры: сопоставление с результатами геофизики



Подбор 3D структуры: характеристики НДС по разрезу





Благодарю за внимание!