Высокоэффективные вычисления 3D — ползущих течений для оперативного моделирования соляного тектогенеза

Лунев Б. В., Абрамов Т. В.

лаборатория мат. моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН

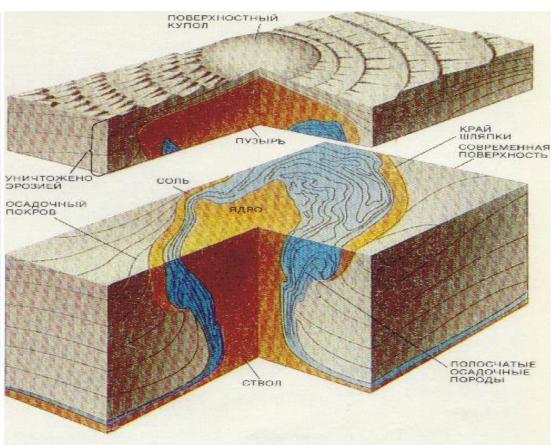
ПЕТРОМОДЕЛЬ-2014

#### Фотоснимок и геологическое строение соляного диапира



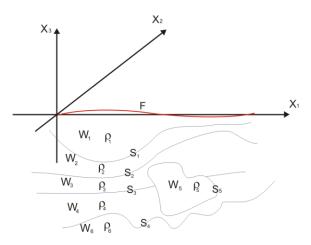
БОПЬШАЯ СОЛЯНАЯ ПУСТЫНЯ в Центральном Иране — область развития великолепных соляных диагиров. На аэрофотоснимке, сделанном А. Ганьсером, видна усеченияя вершина (диаметром 6 км) почти круглого диалира. Светпое ядро соли, покрытой гипоолой оболочкой, окружено тонкими кольцами более молодых эвапоритов: светпые соль и гипо чередуются с более темными глинистыми сланцами и мергелями. На передисм плане по краям диапира виден вытаценный им осадочный покров.

#### [Талбот & Джексон, 1987]



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 пузыре перевернута: соль перекрывается полосчатыми осадочными породами, являющимися промежуточными по возрасту и посоставу между солью и более молодыми покровами. На современной поверхности полосчатые породы образуют кольцевую структуру.

#### Постановка задачи



В координатах  $X_1, X_2, X_3$  однородно-вязкая, несжимаемая ньютоновская жидкость с кусочно-постоянной плотностью (  $\rho(\boldsymbol{x},t)=\rho_k$  для  $\boldsymbol{x}\in W_k$ ) занимает ограниченное свободной поверхностью  $F\left(\boldsymbol{x},t\right)=x_3-h\left(x_1,x_2,t\right)=0$ 

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

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

$$\rho_{(x,t)} = \rho_{(x_3,t)}^0 + \sigma_{(x,t)}, \ T_{(x,t)} = T_{(x_3,t)}^0 + \tau_{(x,t)},$$

$$P_{(\mathbf{x},t)} = P_{(x_3,t)}^0 + p_{(\mathbf{x},t)},$$
 где  $\rho_{(x_3,t)}^0,$   $T_{(x_3,t)}^0,$   $P_{(x_3,t)}^0$  —

характеристики гидростатического состояния, а

 $\sigma_{(x,t)}, \tau_{(x,t)}, p_{(x,t)}$  — их малые возмущения.

$$T_{ij}^0 = -\delta_{ij}P^0 = -\delta_{ij}\rho^0 gx_3.$$

#### Квазистационарная задача

отыскания  $\boldsymbol{v}$  и p по возмущению плотности  $\sigma$ ,

заданному на момент времени  $t_n$ :

$$(1) \qquad \rho_{(\boldsymbol{x},t_n)} = \rho_k \text{ для } \boldsymbol{x} \in W_k,$$

(1\*) 
$$\sigma_{(x,t_n)} = \rho_{(x,t_n)} - \rho_{(x_3,t_n)}^0$$
;

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

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

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 «скользкой границы» ("free slip conditions"):

$$(4\pi) \quad (v_3 = 0)_{x_3 = 0},$$

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

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

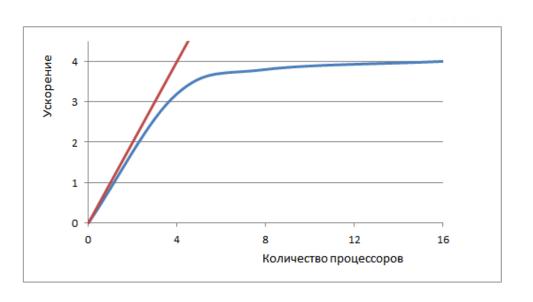
#### Эволюционные уравнения

определяющие эволюцию внутренних границ  $S_k$ 

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

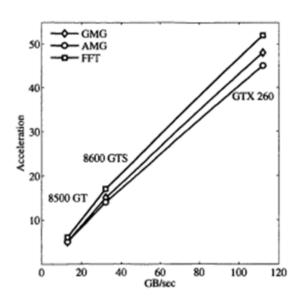
с начальными условиями –  $S_{k(x,t_0)}$ , ( $v_{(x,t_0)} = 0$ ).

#### 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

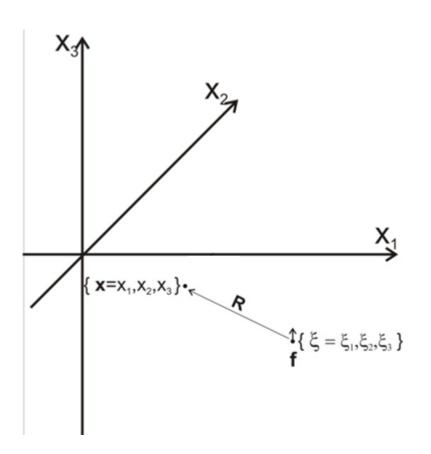
[Исмаил-Заде и др, 2000]



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



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

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

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

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

 $\delta_{i3}$  – 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

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

• Решаются эволюционные уравнения

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

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

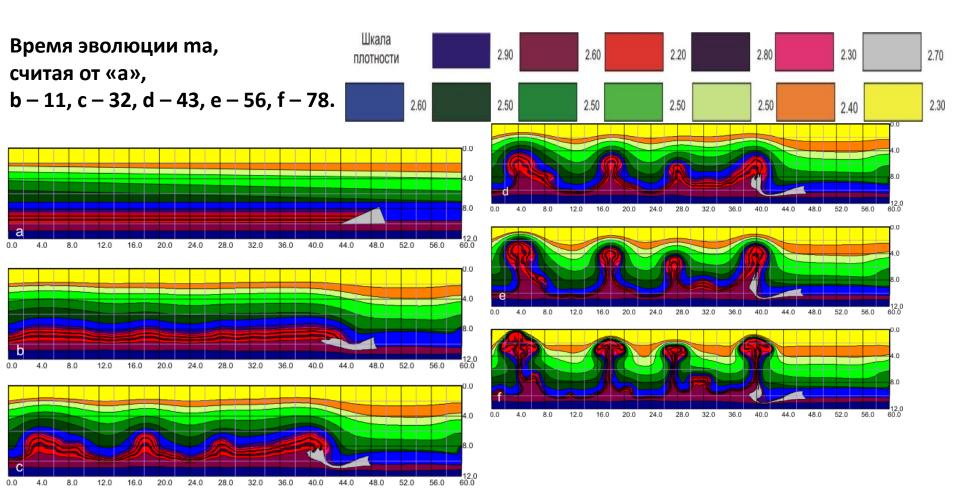


### Преимущества использования функции Грина

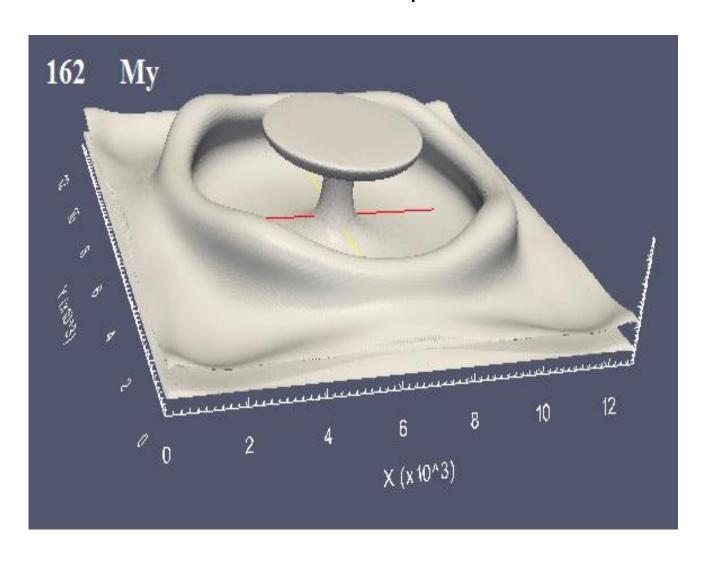
- Поле скорости вычисляется, как интеграл свертки
- Возможности понижения порядка сложности вычислений
- Удобство параллельной реализации
- Масштабируемость на сколь угодно большое число вычислительных узлов
- Лимитирующим ограничением является пиковая производительность устройства, а не пропускная способность памяти

# Всплывание многослойной «соль — ангидритовой» пачки ограниченной «рифом» и перекрытой косослоистой толщей

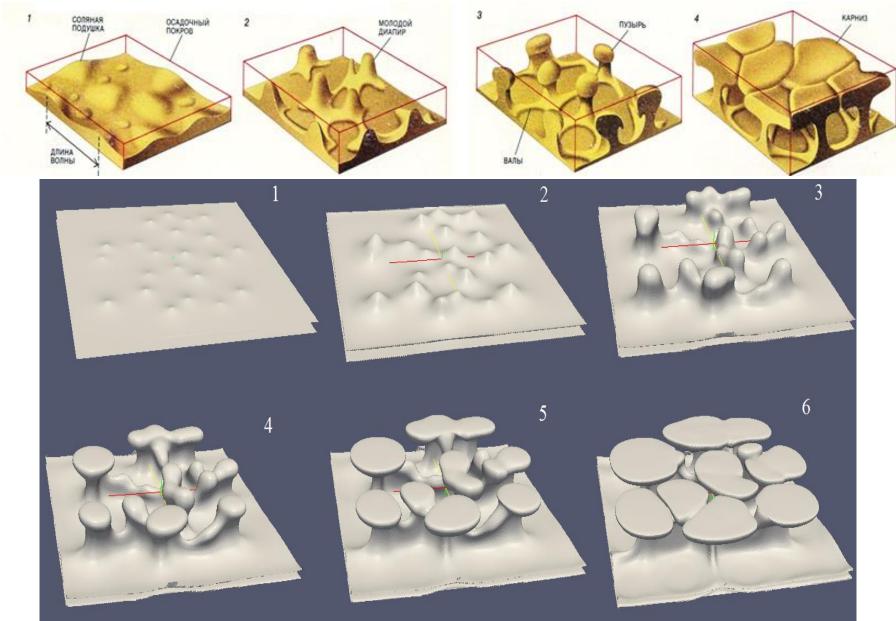
(размеры в км, плотность в г/куб.см)



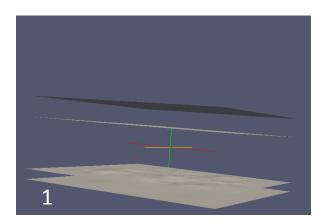
# Моделирование развития одиночного возмущения с явным описанием поверхности

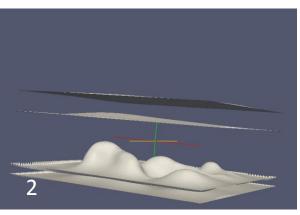


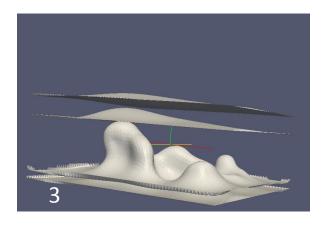
# Сопоставление результатов физического (Талбот & Джексон, 1987) и нашего численного моделирования

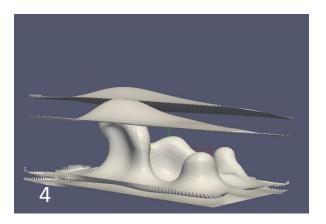


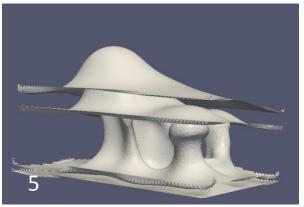
# Эволюция двуслойной модели

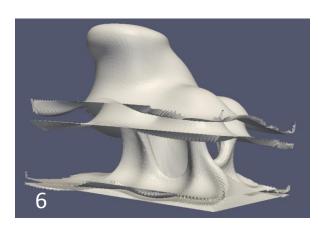




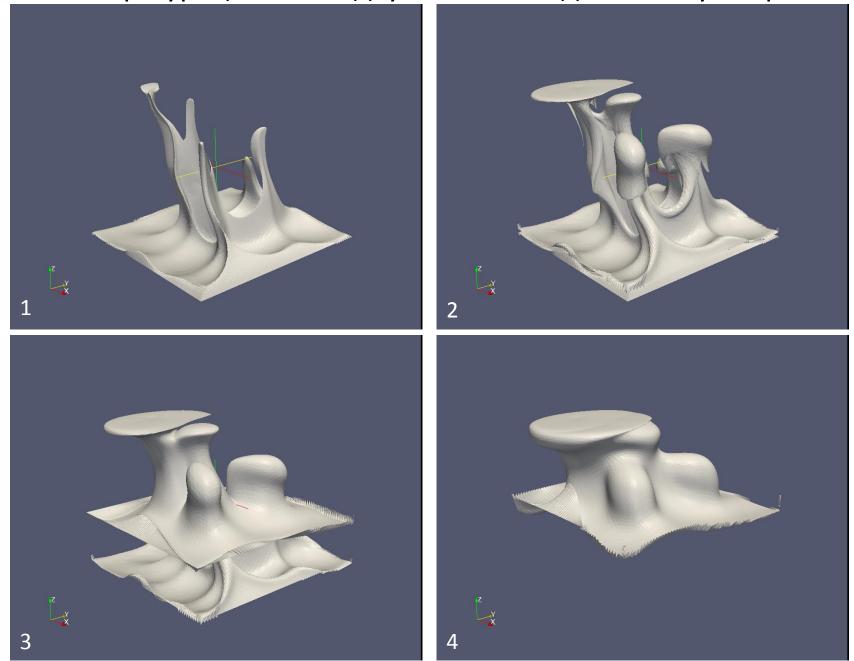




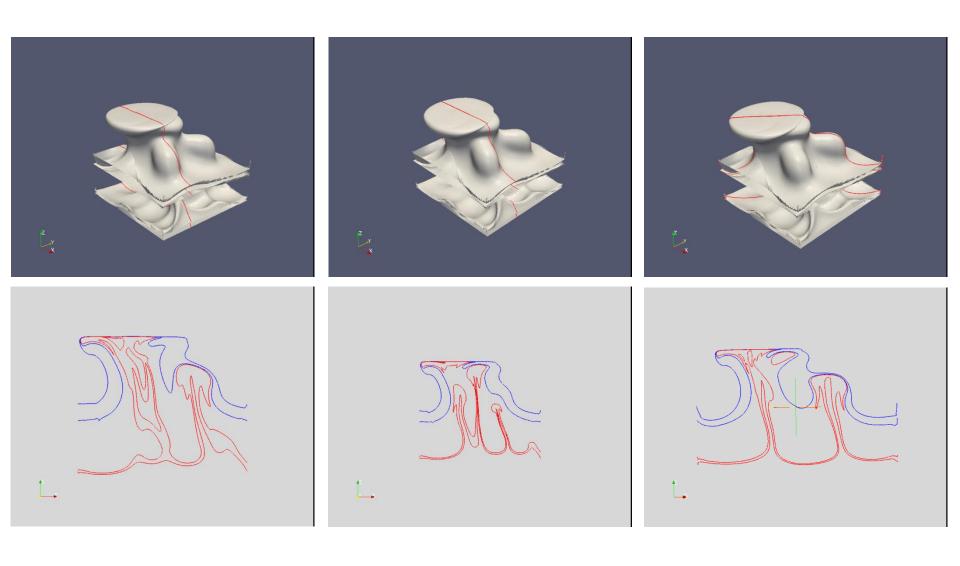




# Конфигурация слоев двуслойной модели снизу вверх



# Разрезы двуслойной модели



# Инверсионная складчатость в подсолевом комплексе по результатам современной сейсморазведки:

А – в Прикаспии (А.И. Тимурзиев, 2007)

Б – на бразильском шельфе (L. Thompson & C. Oftebro, 2011)

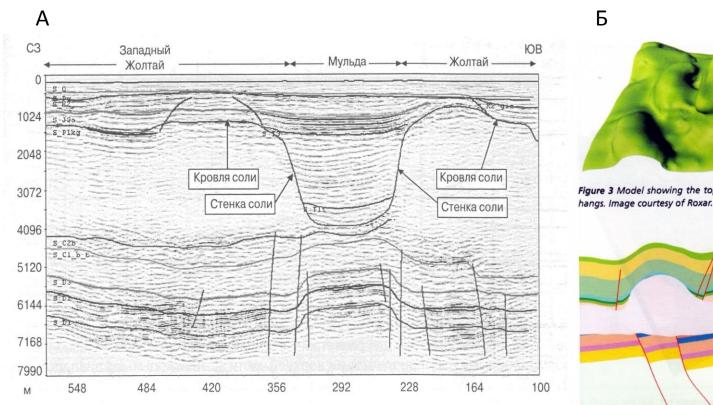


Рис. 1. Произвольное сечение через соляные диапиры Западный Жолтай и Жолтай и разделяющую их мульду, Еленовская площадь

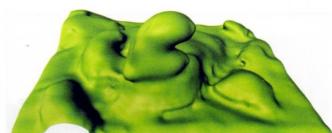


Figure 3 Model showing the top surface of a salt wall and diaper with over-

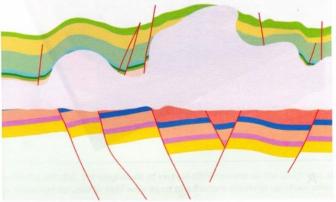
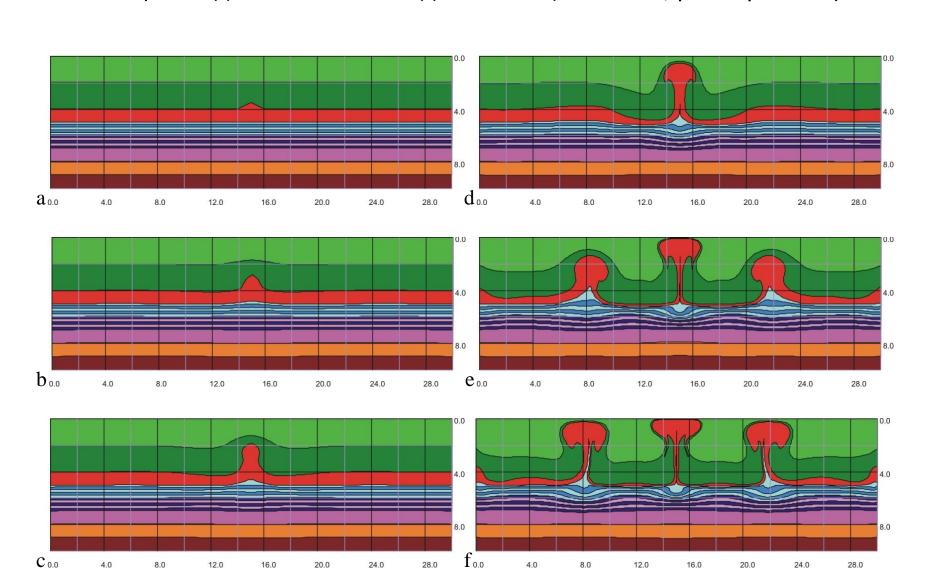
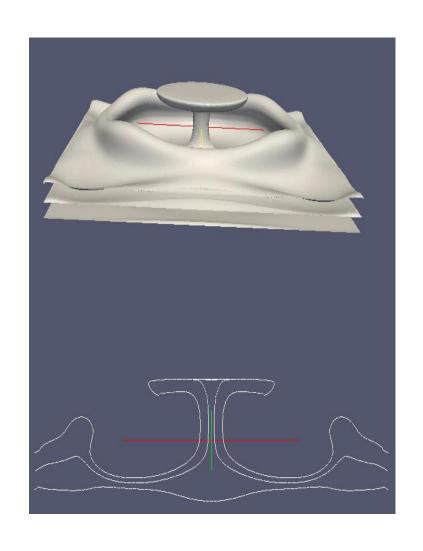


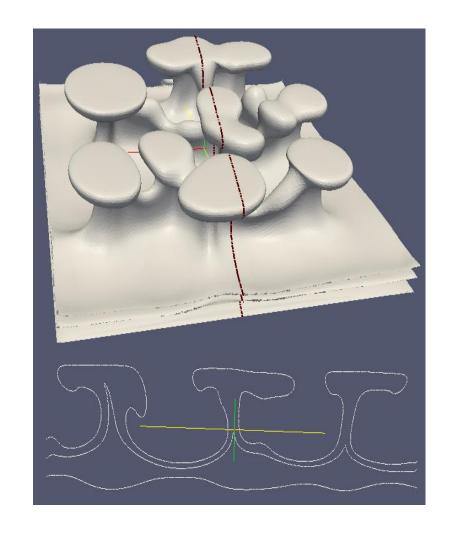
Figure 4 Cross-section of the full model, of which Figure 3 shows only the top salt horizon. This section shows the deformed post or supra-salt section (in greens) and the deformed salt body (grey) sitting on the rifted and eroded pre-salt section (pinks and blue). A complex model which can now be handled as a single entity. Image courtesy of Roxar.

Деформации «подсолевого» комплекса перекрывающие слои – 2.3 и 2.4 г/см3, всплывающий – 2.2 г/см3, подстилающие – от 2.5 до 2.6 г/см3 (последовательность стадий эволюции «а – f», размеры в км)

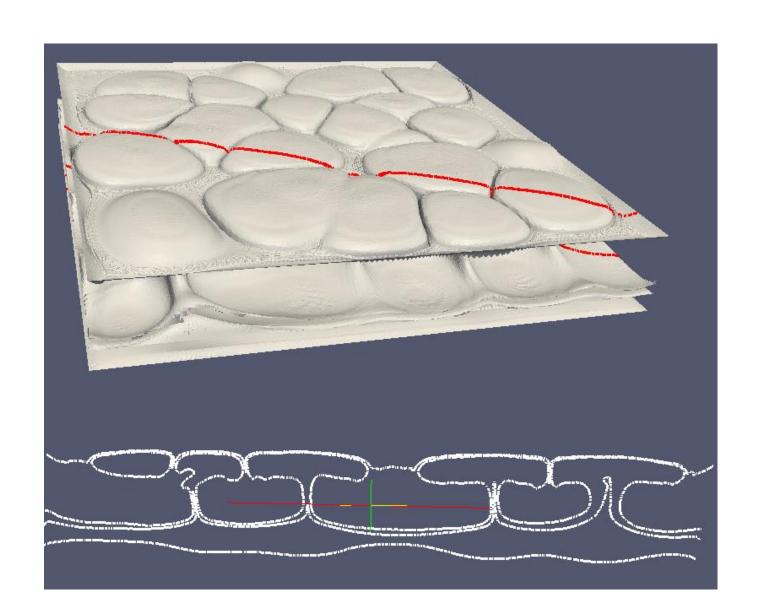


## Инверсионная складчатости в подсолевом слое





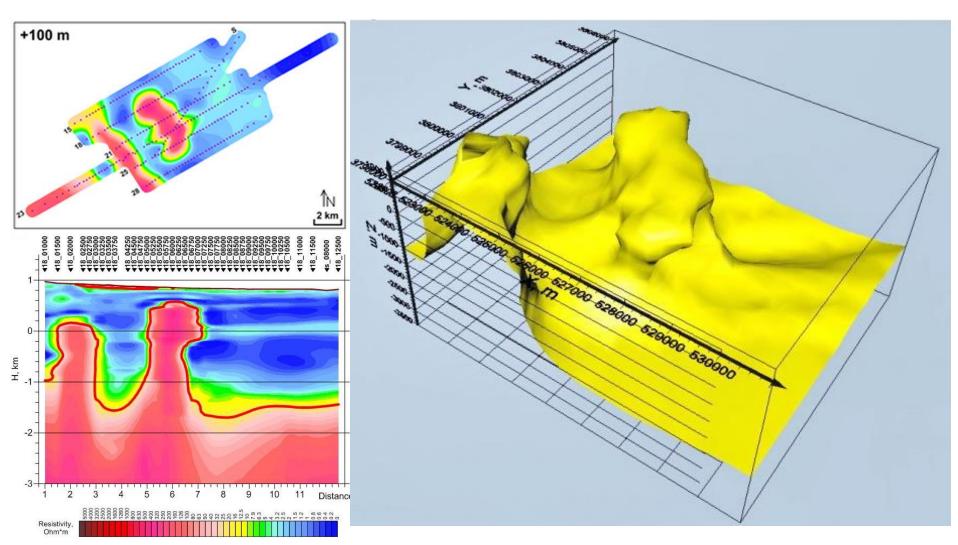
# Расчет на кластере НГУ



### Подбор 3D структуры

В 2013 году компания «Северо-Запад» совместно со своим иранским партнером <u>ZAP Consulting Engeneers</u> 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.

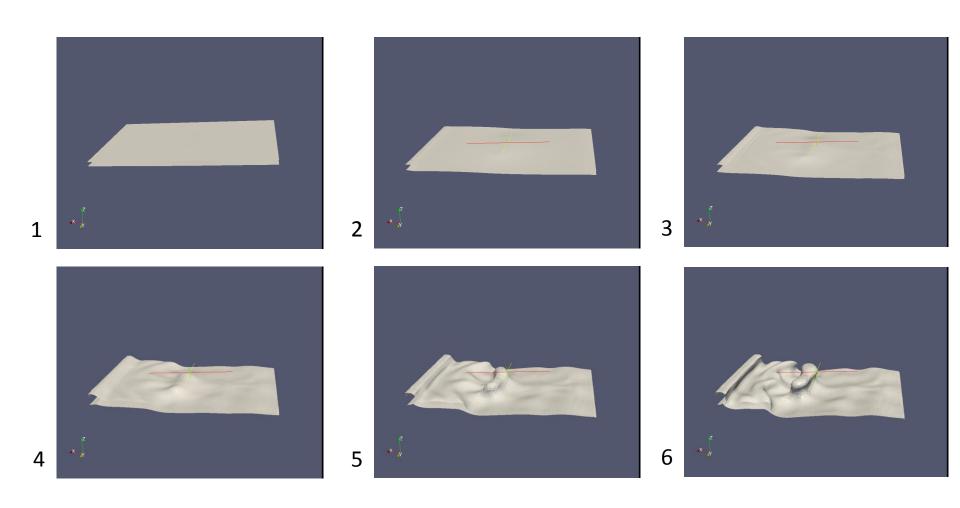
Опубликовано на <a href="http://nw-geo.ru/geophysics/oil-and-gas/izuchenie-solianogo-kupola-v-irane/">http://nw-geo.ru/geophysics/oil-and-gas/izuchenie-solianogo-kupola-v-irane/</a>



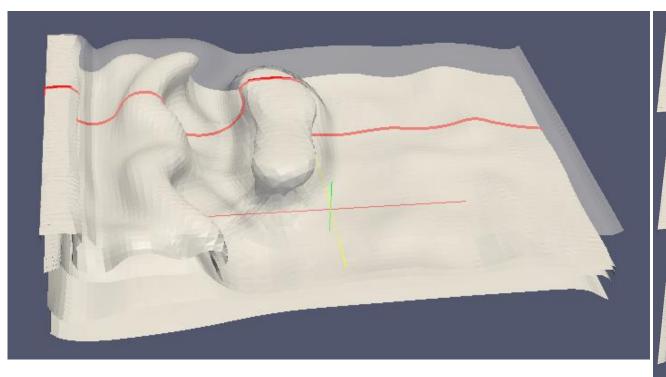


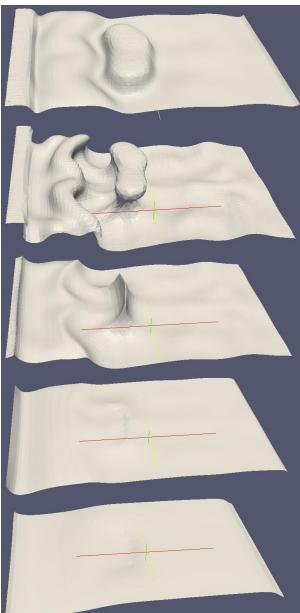


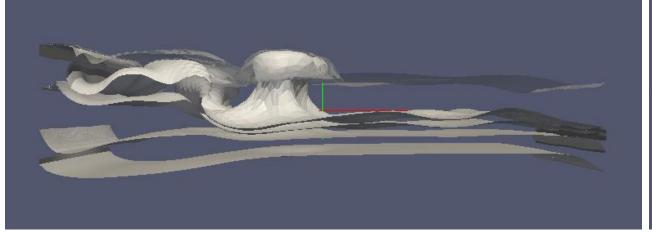
## Подбор 3D структуры: стадии эволюции



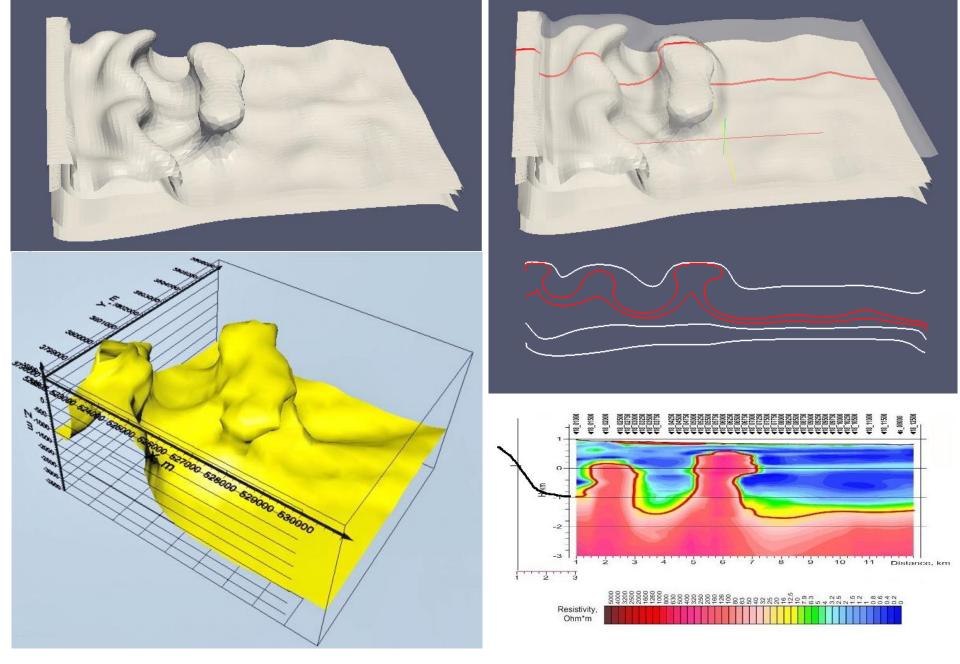
# Подбор 3D структуры: итоговое состояние



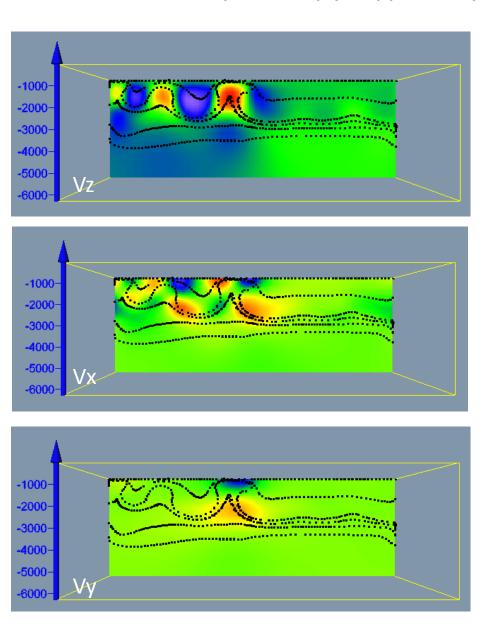


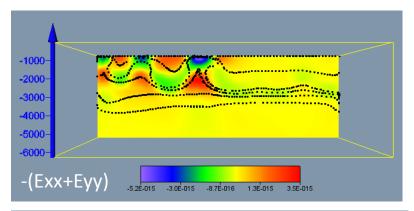


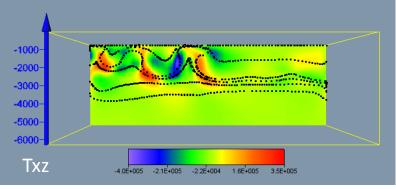
### Подбор 3D структуры: сопоставление с результатами геофизики

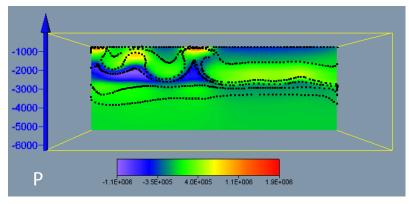


### Подбор 3D структуры: характеристики НДС по разрезу

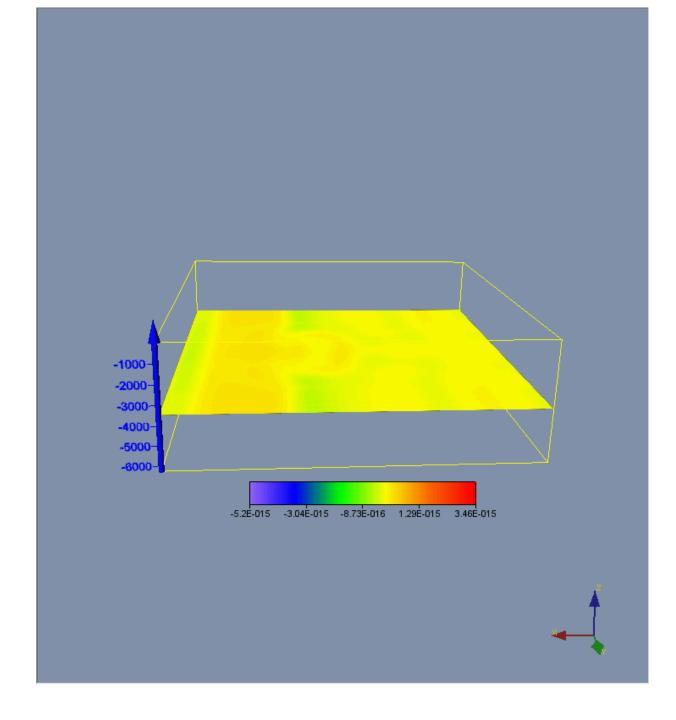








Подбор 3D структуры: деформация -(Exx+Eyy) снизу вверх



# Горизонтальная деформация на разных глубинах

