


Воздействие льда и воды  
на оффшорные структуры и  
прибрежные зоны Баренцева моря:  
**натурные измерения  
и численное моделирование**

Чл.-корр. РАН, профессор,  
зав. каф. информатики МФТИ **Петров И.Б.**;  
аспирантка МФТИ *Фаворская А.В.*;  
аспирант МФТИ *Миряха В.А.*




# План доклада



# План доклада

- Перечень поставленных задач:
  1. Соударение айсберга с конструкцией.
  2. Соударение тороса с конструкцией или бортом корабля.
  3. Соударение борта корабля со льдиной.
  4. Соударение киля тороса с морским дном или подводным трубопроводом.
  5. Воздействие штормовых волн на береговую зону Арктических морей.
- Численное моделирование ледяных торосов.
- Сейсморазведка арктического шлейфа.
- Столкновение ледокола с торосом.
- Численное моделирование в геологии.
- Численное моделирование задач о соударении.
- Сеточно-характеристический метод.



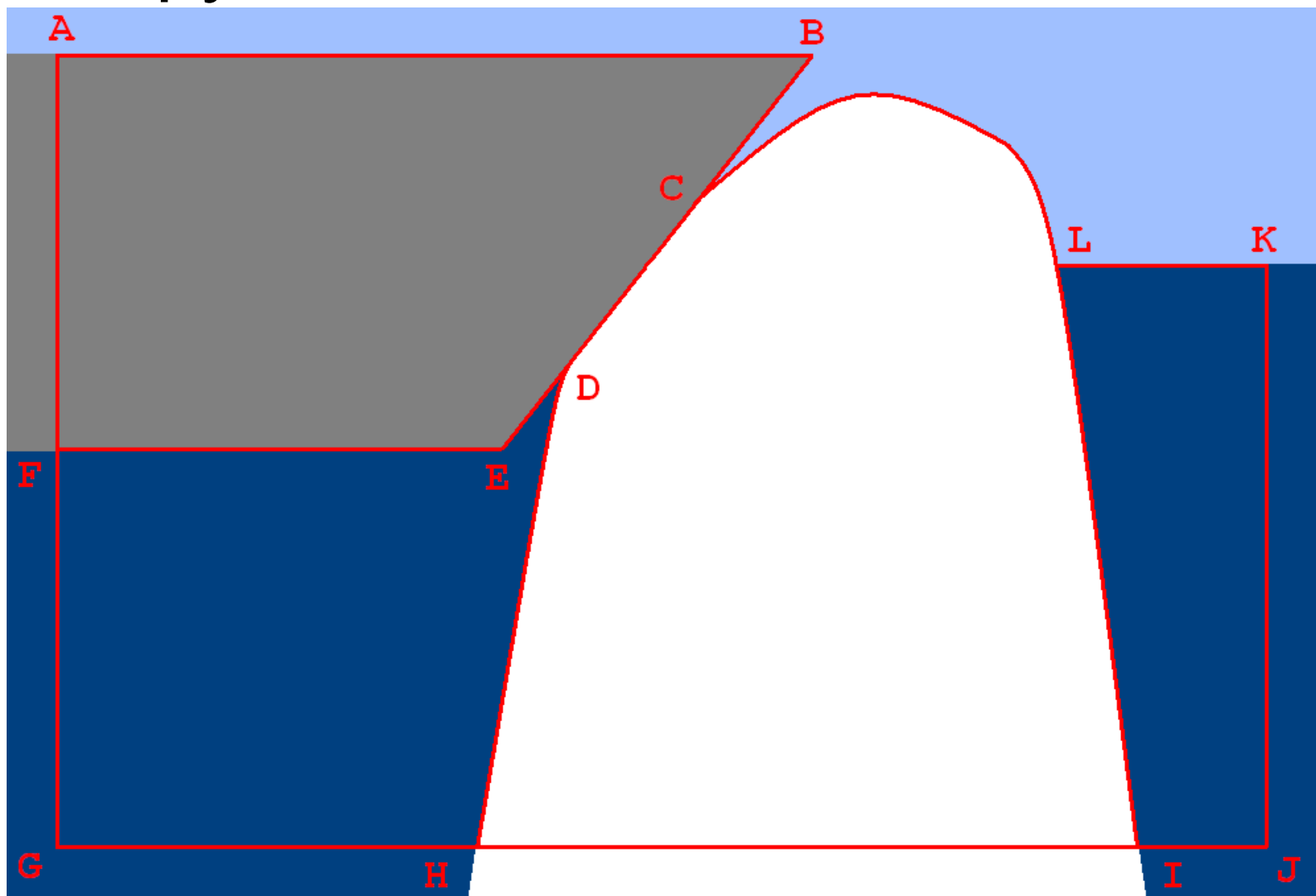
# **Задача 1. Соударение айсберга с конструкцией**



# Соударение айсберга с конструкцией. План работ.

- Формулировка входных данных для расчета задачи о соударении айсберга с конструкцией (**UNIS**):
  1. Характеристики дрейфа айсбергов в Баренцевом море,
  2. Форма и размеры айсбергов Баренцева моря,
  3. Температура льда внутри айсбергов и температура воды,
  4. Упругие модули льда,
  5. Характеристики вязкости и ползучести,
  6. Прочностные характеристики.
- Оценки напряженного состояния плавающих айсбергов типичных форм. Расчет движения айсберга при приближении к конструкции (**UNIS, ВНИИГАЗ**).
- Расчет смятия льда и характеристик пятна контакта при соударении айсберга с жесткой конструкцией. Анализ влияния различных направлений удара и вращения айсберга (**МФТИ, NTNU**).

# Соударение айсберга с конструкцией. Постановка задачи.



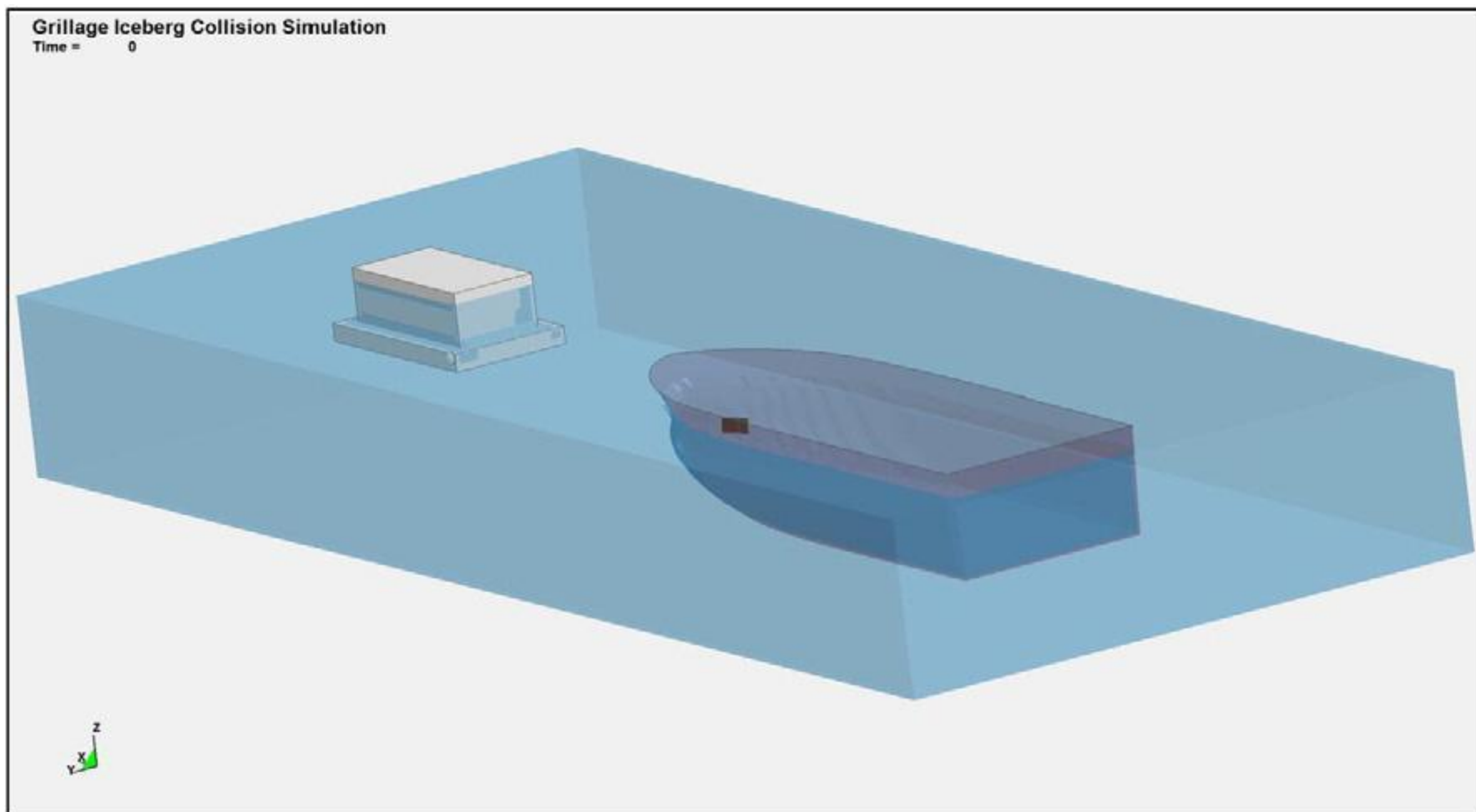


# Соударение айсберга с конструкцией. Постановка задачи.

- ABC - Граница конструкции с воздухом.  
Условие свободной границы.
- DEF - Контактная граница конструкции с водой.  
Условие свободного скольжения.
- AF - Рассчитываемая граница конструкции.  
Неотражающее граничное условие.
- CD - Контактная граница конструкции и айсберга.  
Условие динамического трения, или полного слипания, или свободного скольжения.
- CL - Граница айсберга с воздухом.  
Условие свободной границы.
- DH, IL - Контактная граница айсберга с водой.  
Условие свободного скольжения.
- HI - Рассчитываемая граница айсберга.  
Неотражающее граничное условие.
- FGH, IJK - Рассчитываемая граница воды.  
Неотражающее граничное условие.
- KL - Граница воды с воздухом. Условие свободной границы.

# Столкновение айсберга с танкером


*R.E. Gagnon, J. Wang* Numerical simulations of a tanker collision with a bergy bit incorporating hydrodynamics, a validated ice model and damage to the vessel // Cold regions. Science and Technology, 2012.



# Фотография повреждений корабля

*R.E. Gagnon, J. Wang* Numerical simulations of a tanker collision with a bergy bit incorporating hydrodynamics, a validated ice model and damage to the vessel // Cold regions. Science and Technology, 2012.





**Задача 2.  
Соударение  
тороса  
с конструкцией  
или бортом  
корабля**

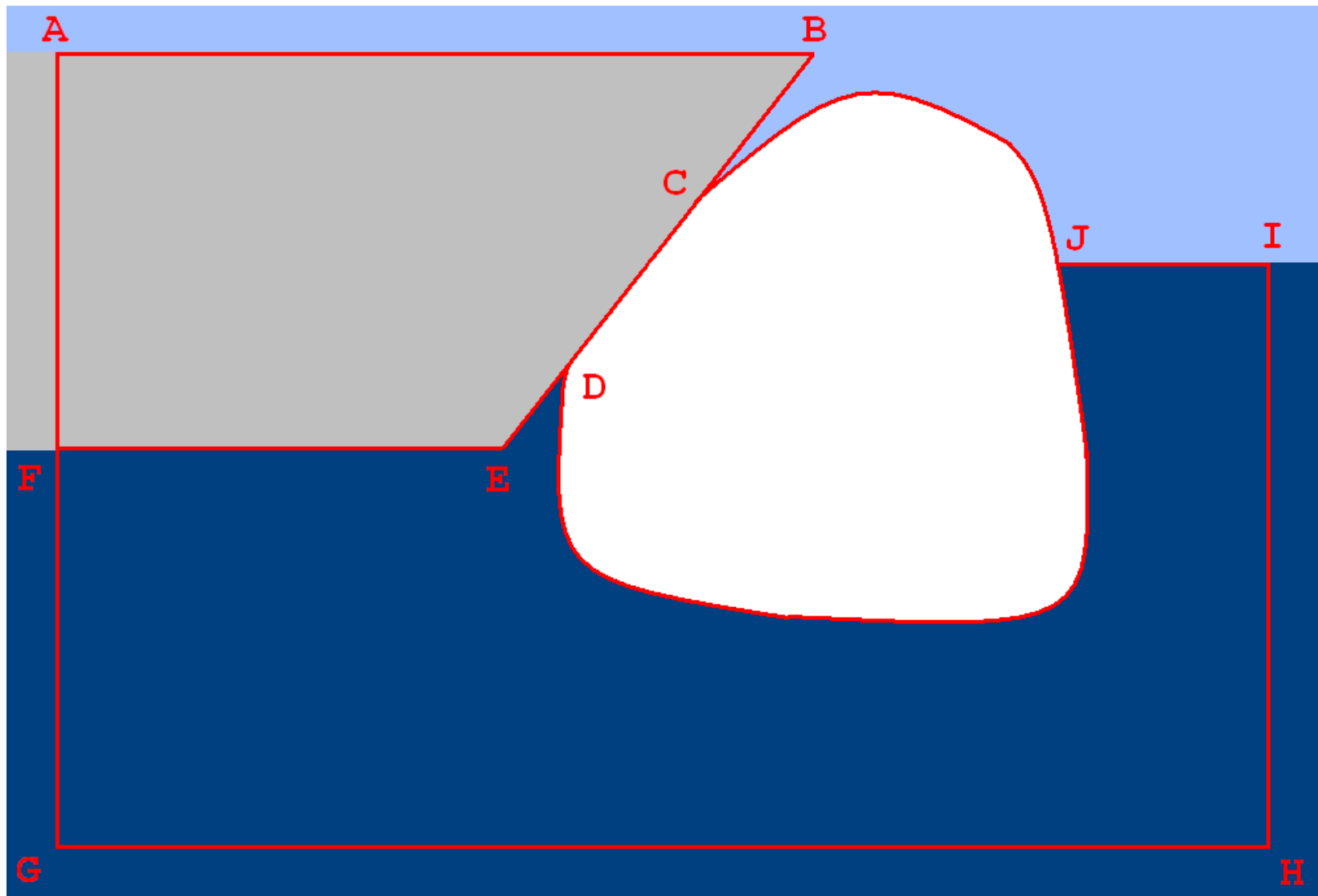




# Соударение тороса с конструкцией или бортом корабля. План работ.

- Формулировка входных данных для расчета задачи о соударении тороса с конструкцией (**UNIS**):
  1. Характеристики дрейфа льда в Баренцевом море,
  2. Размеры и структура торосов морского льда в Баренцевом море,
  3. Температура блоков льда внутри торосов,
  4. Прочностные характеристики блоков льда и мест смерзания блоков льда друг с другом.
- Расчет ледовых нагрузок и разрушения тороса при его соударении с жесткой конструкцией и/или бортом корабля (**МФТИ, NTNU**).


# Соударение тороса с конструкцией или бортом корабля. Постановка задачи.



# Соударение торо́са с конструкцией или бортом корабля. Постановка задачи.

- ABC - Граница корабля (конструкции) с воздухом.  
Условие свободной границы.
- DEF - Контактная граница корабля (конструкции) с водой.  
Условие свободного скольжения.
- AF - Рассчитываемая граница корабля (конструкции).  
Неотражающее граничное условие.
- CD - Контактная граница корабля (конструкции) и торо́са.  
Условие динамического трения, или полного слипания, или свободного скольжения.
- CJ - Граница торо́са с воздухом.  
Условие свободной границы.
- DJ - Контактная граница торо́са с водой.  
Условие свободного скольжения.
- IJ - Граница воды с воздухом.  
Условие свободной границы.
- FGHI - Рассчитываемая граница воды.  
Неотражающее граничное условие.





# **Задача 3. Соударение борта корабля с льдиной**

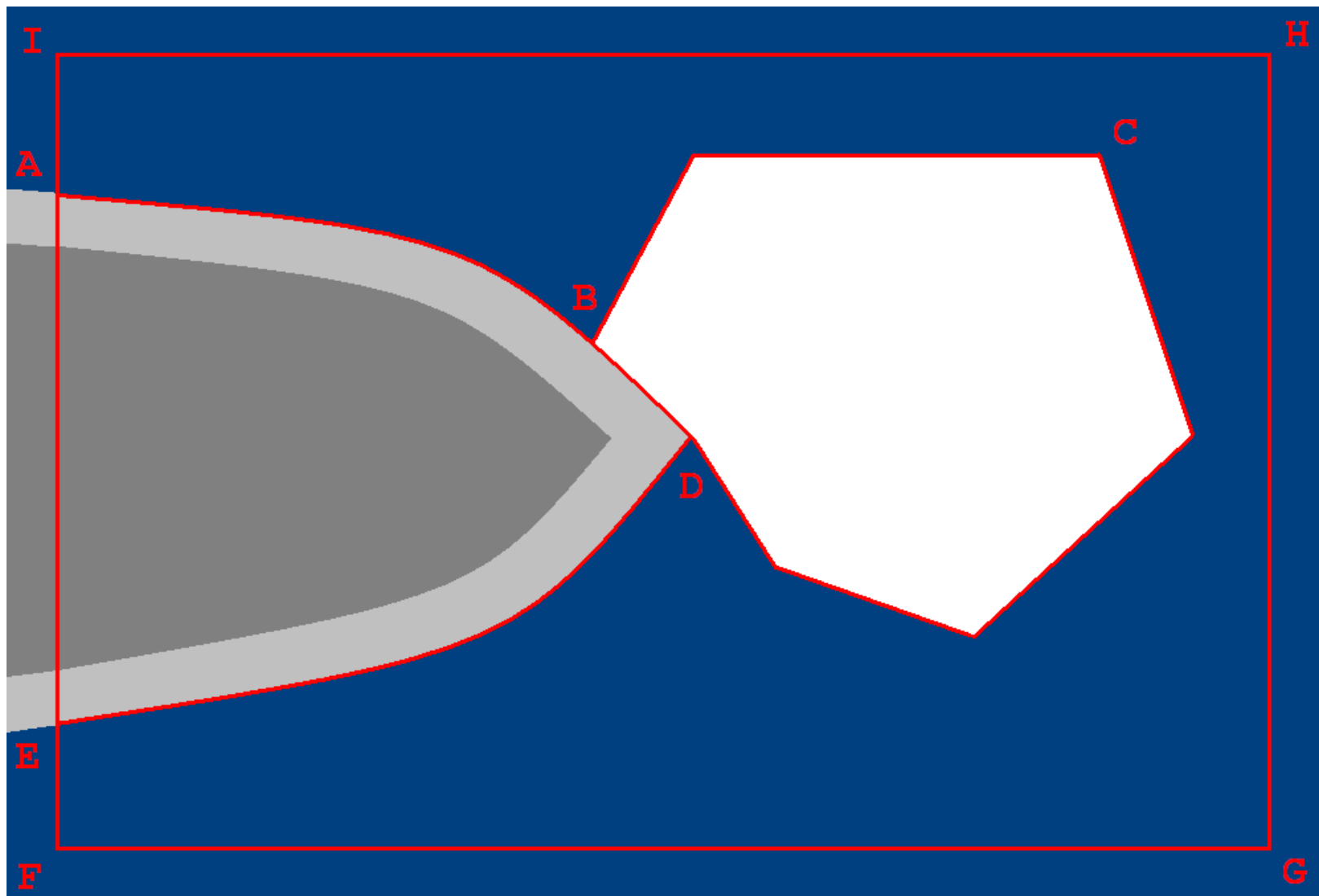
copy/past.ru



# Соударение борта корабля с льдиной. План работ.

- Формулировка входных данных для расчета задачи о соударении борта корабля с льдиной (**UNIS**):
  1. Характеристики дрейфа льда в Баренцевом море,
  2. Размеры и форма льдин,
  3. Распределение температуры и солености по толщине и площади льдин,
  4. Зависимость упругих характеристик морского льда от температуры и солености,
  5. Прочностные характеристики дрейфующего морского льда Баренцева моря.
- Расчет ледовых нагрузок на борт корабля при соударении с льдинами различного размера и формы. Исследование влияния стеснения льда на характеристики соударения. (**МФТИ, NTNU**)

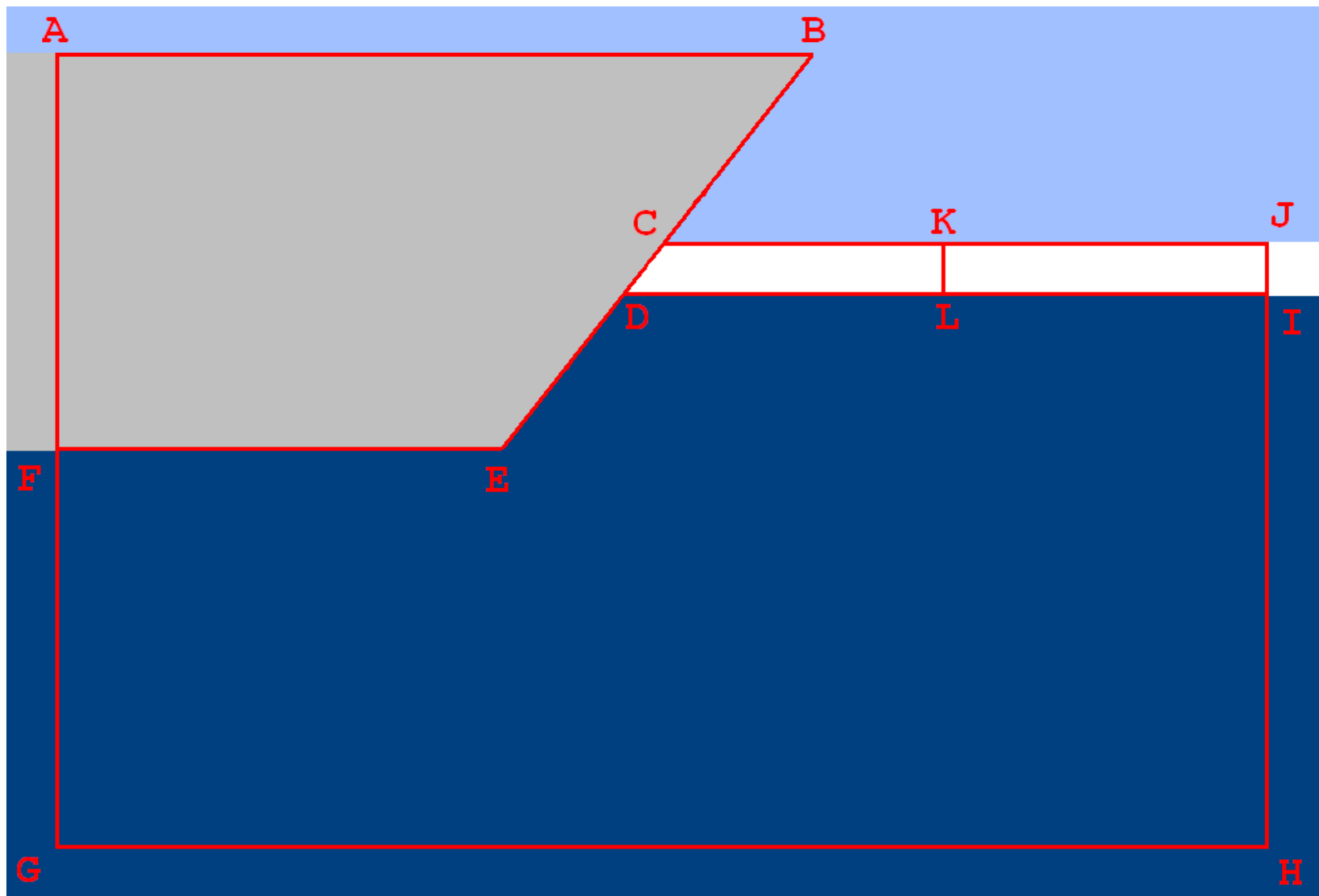
# Соударение борта корабля с льдиной. Постановка задачи.



# Соударение борта корабля с льдиной. Постановка задачи.


- АВ, DE - Контактная граница корабля с водой. Условие свободного скольжения.
- АЕ - Рассчитываемая граница корабля. Неотражающее граничное условие.
- ВD - Контактная граница корабля и льдины. Условие динамического трения, или полного сцепления, или свободного скольжения.
- ВСD - Контактная граница льдины с водой. Условие свободного скольжения.
- EFGHIA - Рассчитываемая граница воды. Неотражающее граничное условие.

# Соударение борта корабля с льдиной. Постановка задачи 2.



# Соударение борта корабля с льдиной. Постановка задачи 2.

- ABC - Граница корабля с воздухом. Условие свободной границы.
- DEF - Контактная граница корабля с водой.  
Условие свободного скольжения.
- AF - Рассчитываемая граница корабля.  
Неотражающее граничное условие.
- CD - Контактная граница корабля и льдины. Условие динамического трения, или полного слипания, или свободного скольжения.
- SKJ - Граница льдины с воздухом. Условие свободной границы.
- DLI - Контактная граница льдины с водой.  
Условие свободного скольжения.
- KL - Контактная граница отколовшейся части льдины и остальной части льдины. Условие динамического трения, или полного слипания, или свободного скольжения.
- IJ - Рассчитываемая граница льдины.  
Неотражающее граничное условие.
- FGHI - Рассчитываемая граница воды.  
Неотражающее граничное условие.



**Задача 4.  
Соударение килля  
тороса  
с морским дном  
или подводным  
трубопроводом**

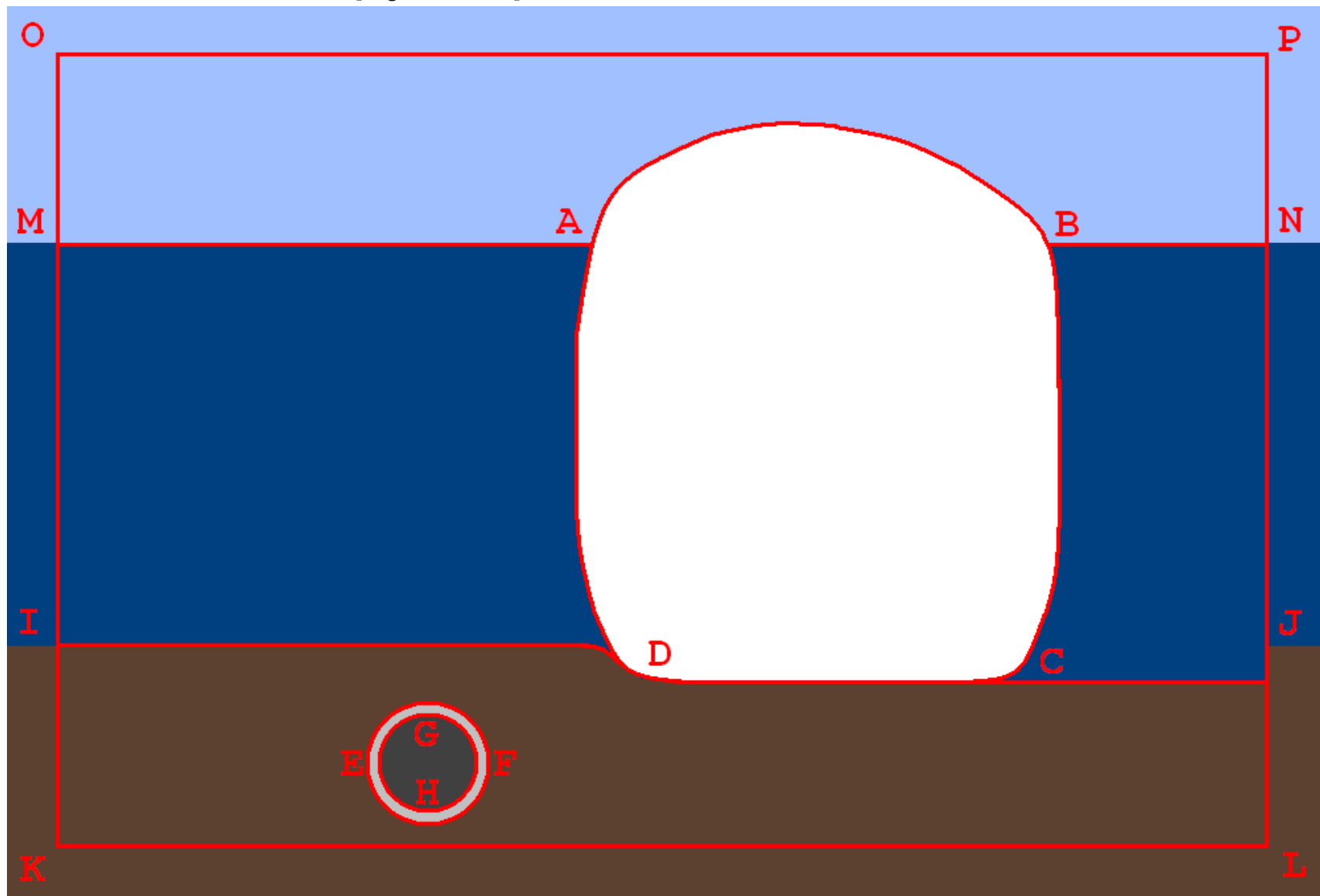




# Соударение киля тороса с морским дном или подводным трубопроводом. План работ.

- Формулировка входных данных для расчета задачи о соударении киля айсберга или тороса с донным грунтом и/или подводным трубопроводом (**МГУ, ВНИИГАЗ, UNIS**):
  1. Характеристики дрейфа льда в Байдарацкой губе Баренцева моря,
  2. Расчет дрейфа льда на акватории Байдарацкой губы при характерных направлениях ветра и течений
  3. Данные о структурных особенностях килей торосов
  4. Формулировка сценариев воздействия килей айсбергов и торосов на донный грунт и трубопровод
  5. Данные о донных грунтах (плотность, сцепление, угол внутреннего трения)
- Расчет напряженного состояния грунта и трубопровода при внедрении ледового киля (**МФТИ, NTNU**).

Соударение кия тороса с морским дном или подводным трубопроводом. Постановка задачи.

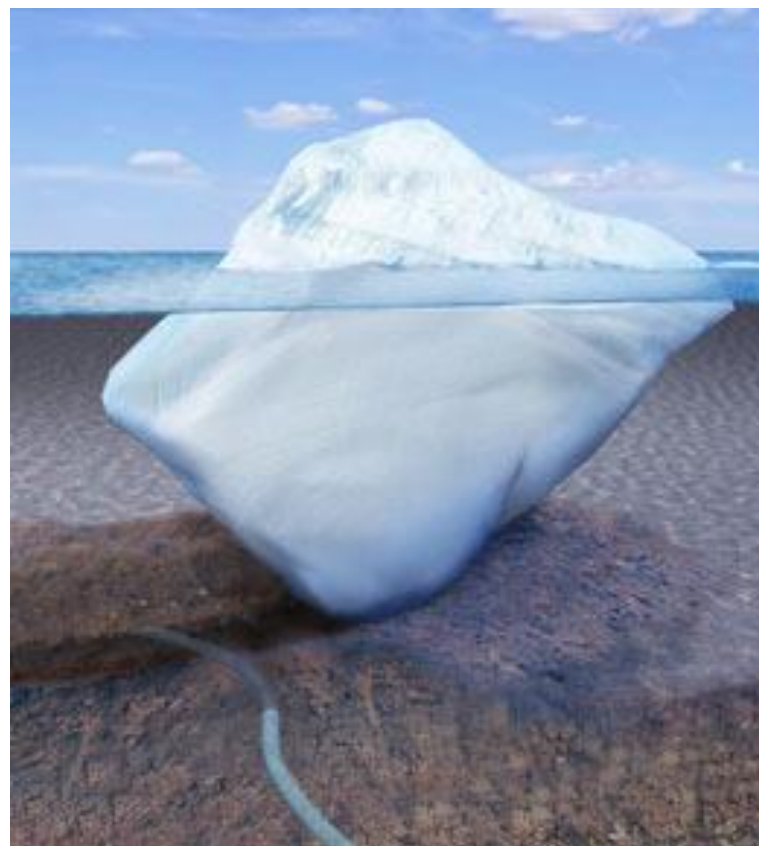


# Соударение киля тороса с морским дном или подводным трубопроводом. Постановка задачи.

- АВ - Граница тороса с воздухом. Условие свободной границы.
- ВС, AD - Контактная граница тороса с водой.  
Условие свободного скольжения.
- CD - Контактная граница тороса и морского грунта.  
Условие динамического трения, или полного слипания, или свободного скольжения.
- EF - Контактная граница подводного трубопровода и морского грунта.  
Условие полного слипания.
- GH - Граничное условие на внутренней границе подводного трубопровода.
- DI, CJ - Контактная граница морского грунта с водой.  
Условие свободного скольжения.
- IKLJ - Рассчитываемая граница морского грунта.  
Неотражающее граничное условие.
- AM, BN - Граница воды с воздухом. Условие свободной границы.
- IM, JN - Рассчитываемая граница воды.  
Неотражающее граничное условие.

# Воздействие килей торосов на дно и подводные трубопроводы

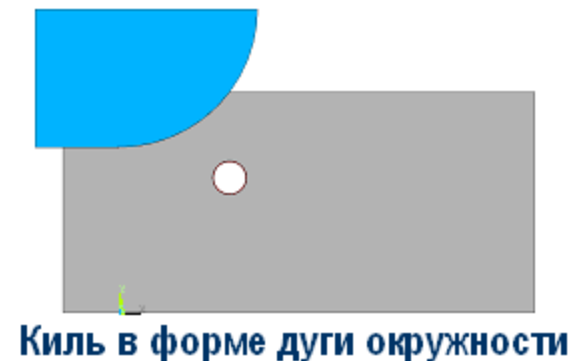
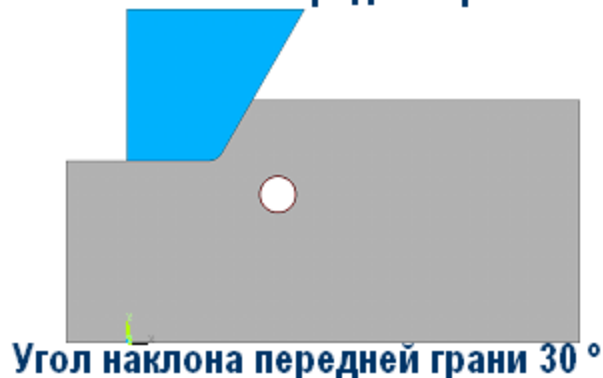
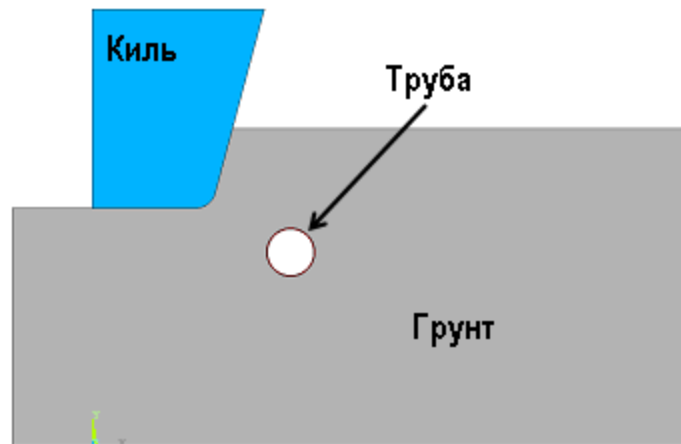
*М.А. Наумов, Д.А. Онищенко, Презентация  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»*



# 2-D модель воздействия кия тороса на заглубленный трубопровод (схема)

М.А. Наумов, Д.А. Онищенко,

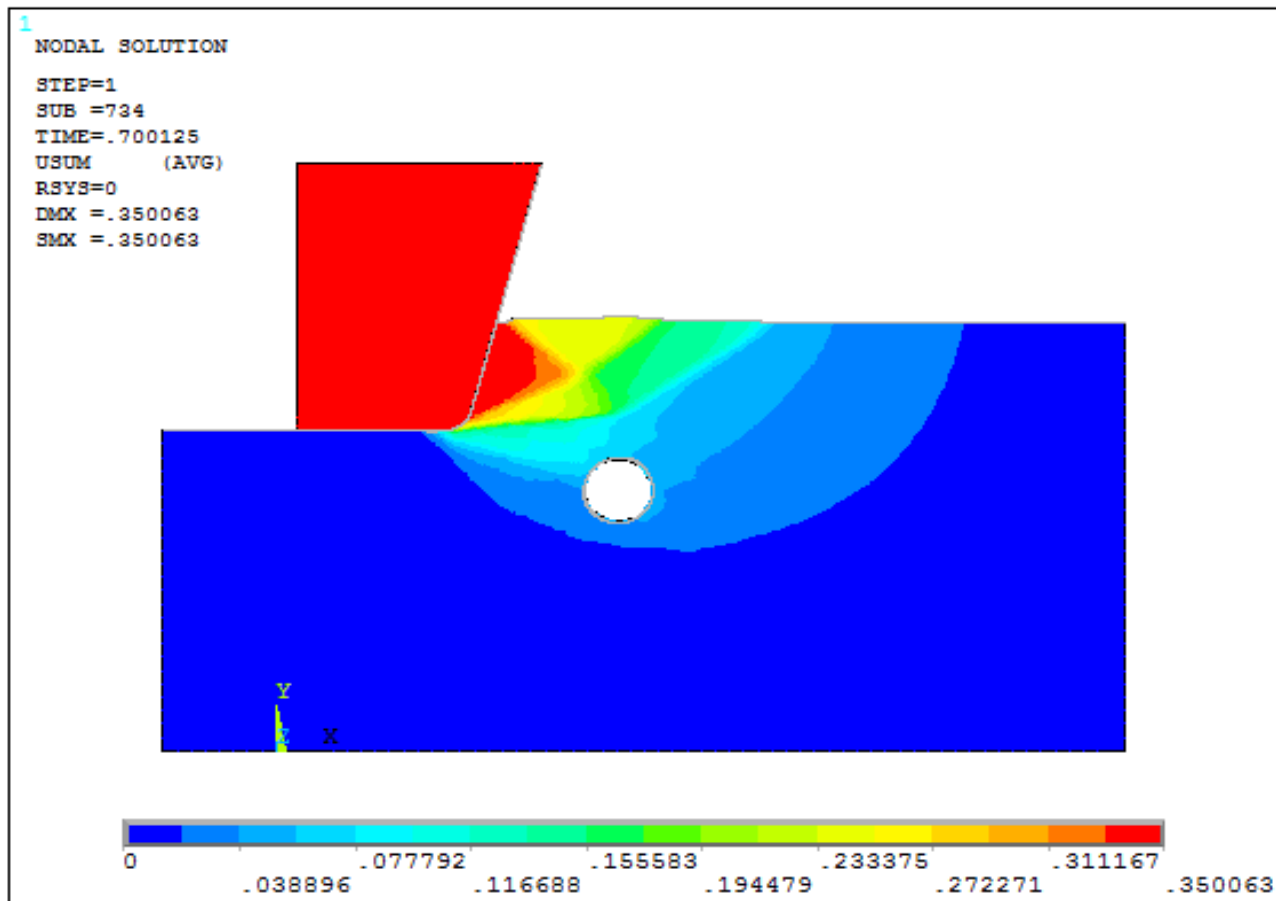
Презентация ООО «Газпром ВНИИГАЗ»




# 2-D модель воздействия килля тороса на заглубленный трубопровод

М.А. Наумов, Д.А. Онищенко,

Презентация ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



Распределение модуля смещения, м



**Задача 5.  
Воздействие  
штормовых волн  
на береговую зону  
Арктических морей**





# Воздействие штормовых волн на береговую зону Арктических морей. План работ. 1/2.

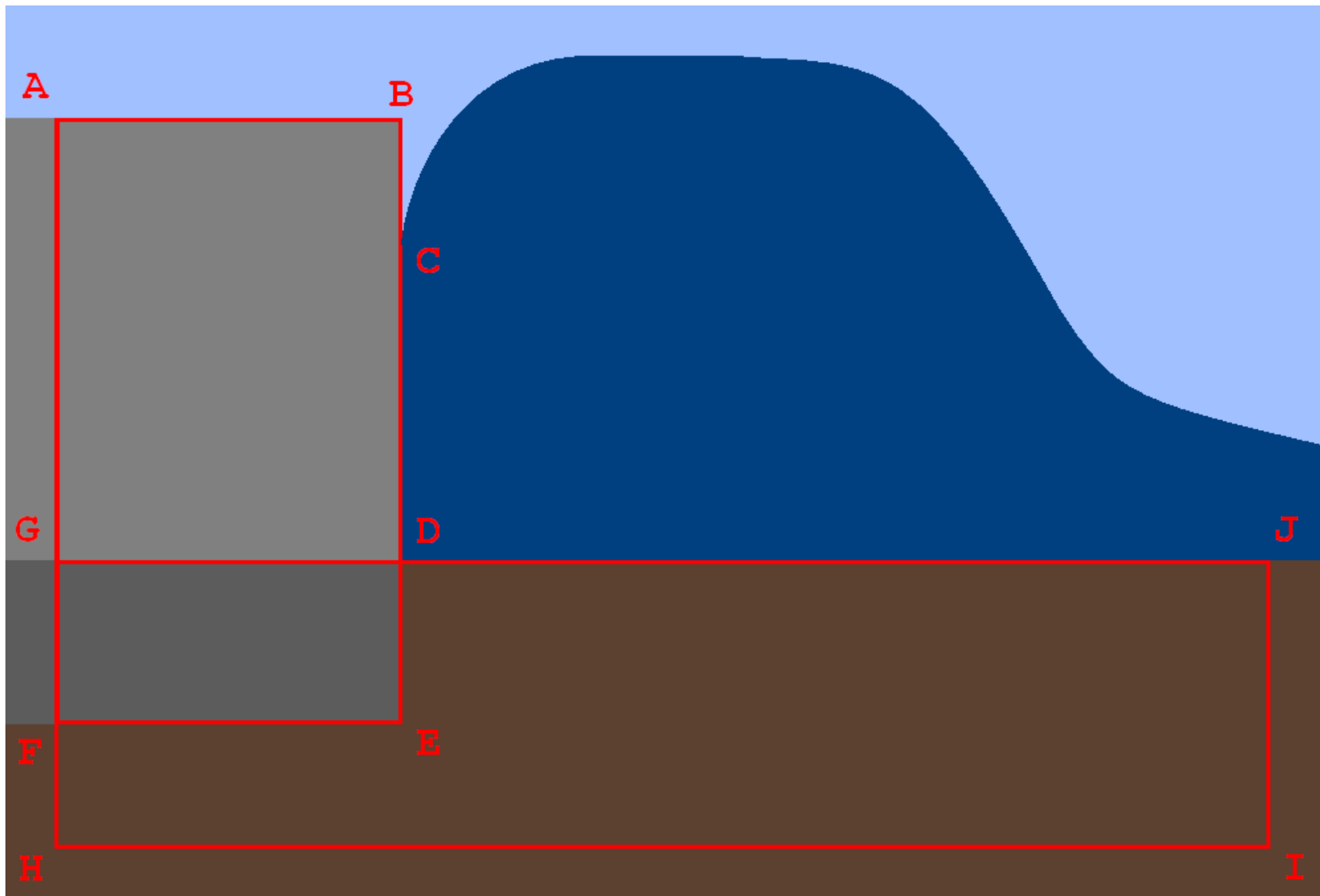
- Формулировка входных данных для расчета волнения в береговой зоне (**UNIS, МГУ**):
  1. Данные измерения волн и течений на полигоне в береговой зоне Шпицбергена
  2. Данные измерения волн и течение на полигоне в береговой зоне Печерского моря
  3. Батиметрические данные
  4. Данные о составе донных грунтов

# Воздействие штормовых волн на береговую зону Арктических морей.

## План работ. 2/2.

- Формулировка входных данных для расчета разрушения берега при штормах (**UNIS, МГУ, NTNU**):
  1. Состав береговых грунтов
  2. Температура берегового грунта
  3. Поровое давление воды в береговом грунте
  4. Эволюция формы берегового откоса
- Расчет распространения и разрушения волн в мелководных прибрежных районах (**ВНИИГАЗ, NTNU**).
- Расчет влияние полей давлений и течений, создаваемых волнами, на разрушение берегов (**МФТИ**).
- Расчет разгона льдин волнами в мелководных зонах (**UNIS, NTNU**).
- Расчет разрушения берега при ударах льдин, разгоняемых волнами на мелководье (ледовый шторм) (**МФТИ**).

# Воздействие штормовых волн на береговую зону Арктических морей. Постановка задачи.

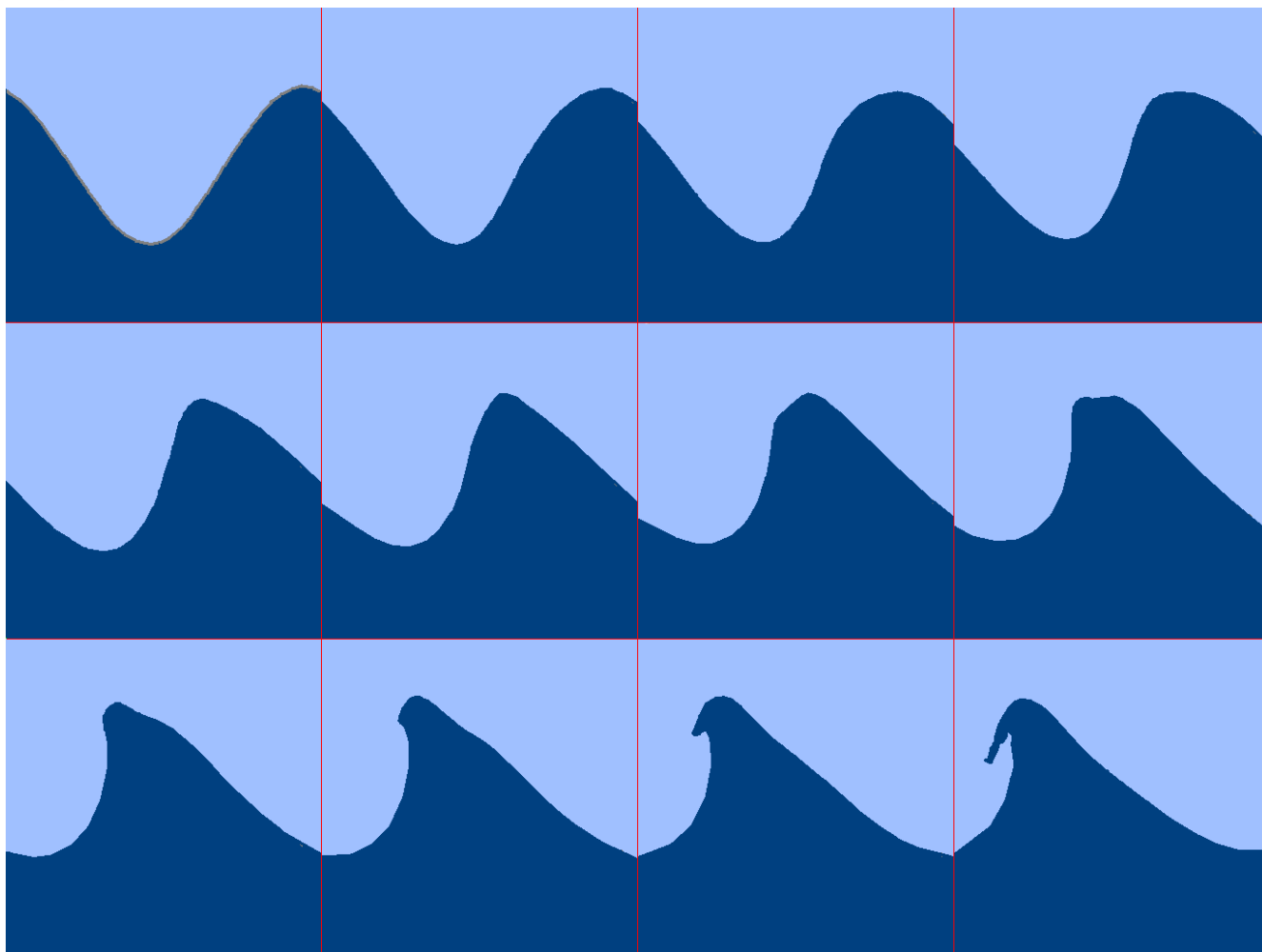



# Воздействие штормовых волн на береговую зону Арктических морей. Постановка задачи.

- ABC - Граница наземного сооружения с воздухом. Условие свободной границы.
- CD - Условие на границе наземного сооружения, описывающее контакт со штормовой волной.
- DG - Контактная граница наземного сооружения и фундамента наземного сооружения. Условие полного слипания.
- AG - Рассчитываемая граница наземного сооружения. Неотражающее граничное условие.
- DEF - Контактная граница фундамента наземного сооружения и грунта. Условие полного слипания.
- FG - Рассчитываемая граница фундамента наземного сооружения. Неотражающее граничное условие.
- DJ - Условие на границе грунта, описывающее контакт со штормовой волной.
- FHJ - Рассчитываемая граница грунта. Неотражающее граничное условие.

# Эволюция формы морской волны, набегающей на берег.

*Л.А.Иншакова (Харина)* Комплекс программ "Океан" моделирования  
динамики гравитационных волн





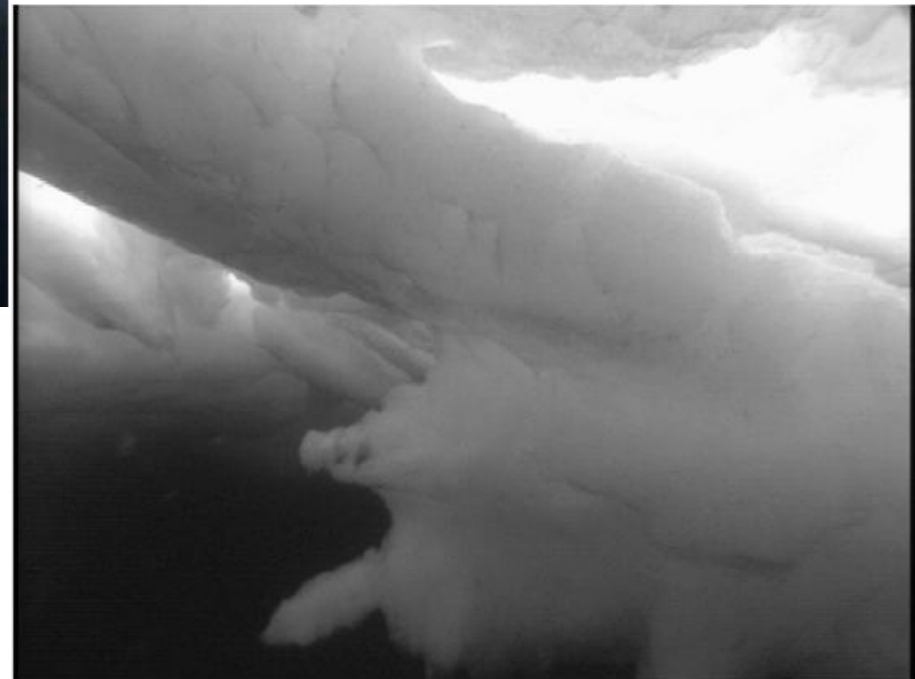
# Численное моделирование торосов





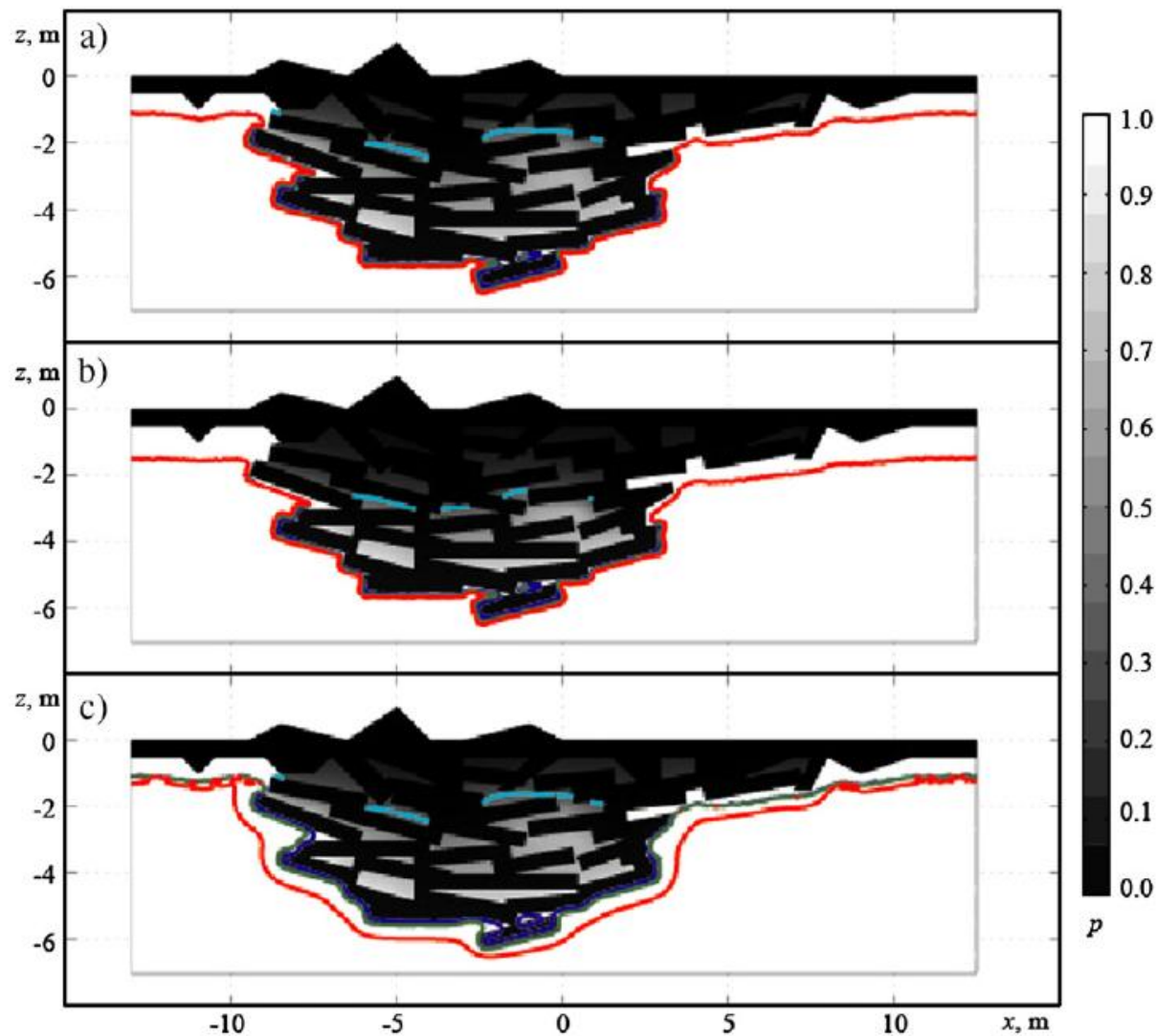
# Фотографии торосов

*A. Marchenko* Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges  
// Cold regions. Science and Technology, V. 52, N. 3, 2008.



# Строение торосов

A. Marchenko Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges  
// Cold regions. Science and Technology, V. 52, N. 3, 2008.



# Численное моделирование торосов.

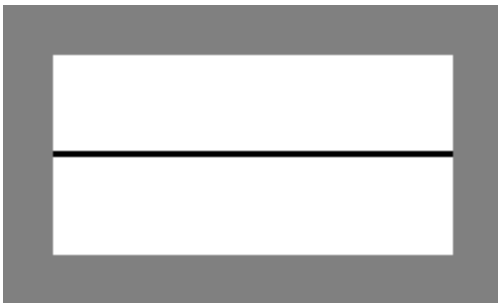
## Обозначения.



- Граница с воздухом.  
Условие свободной границы.

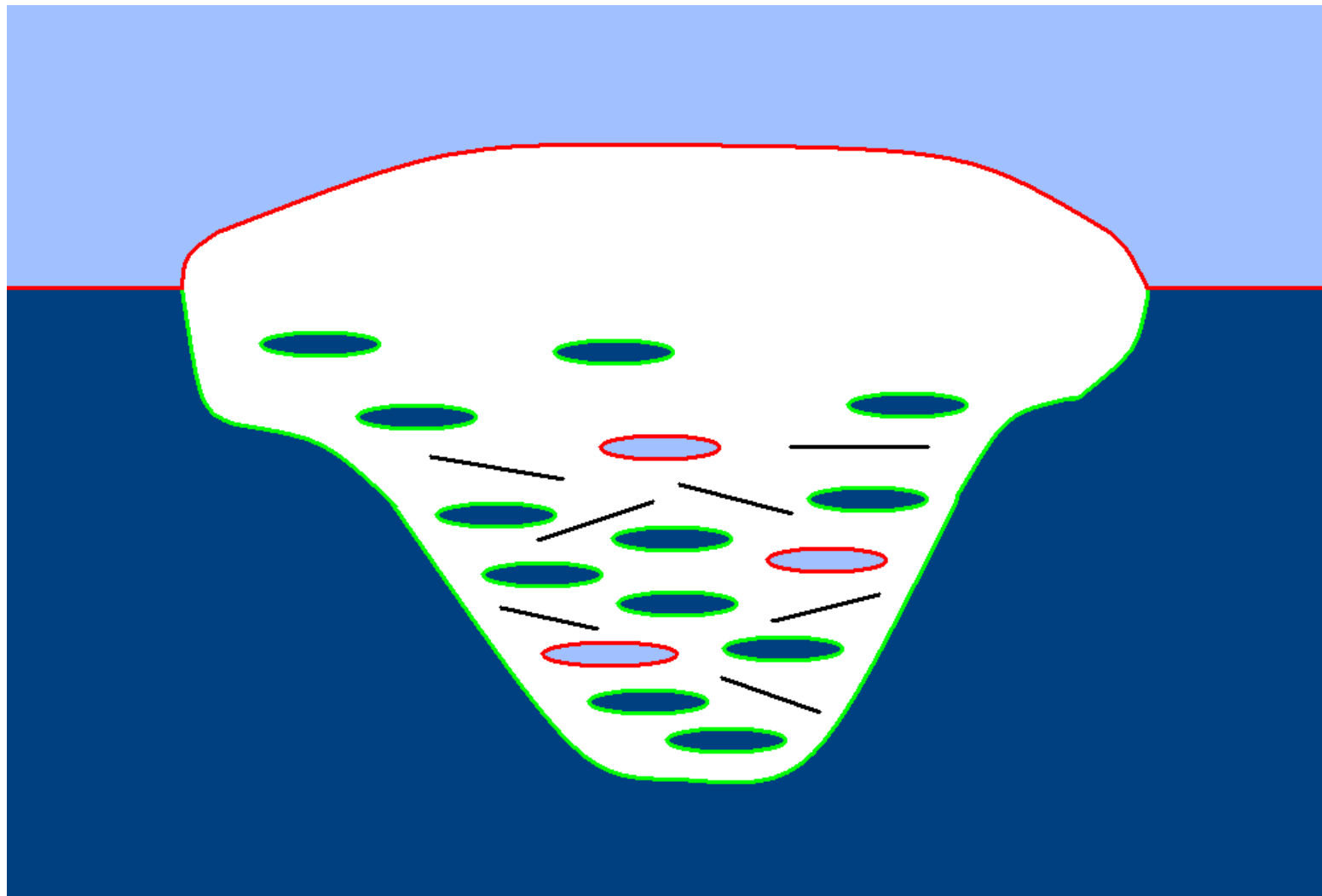


- Контактная граница с водой.  
Условие свободного скольжения.

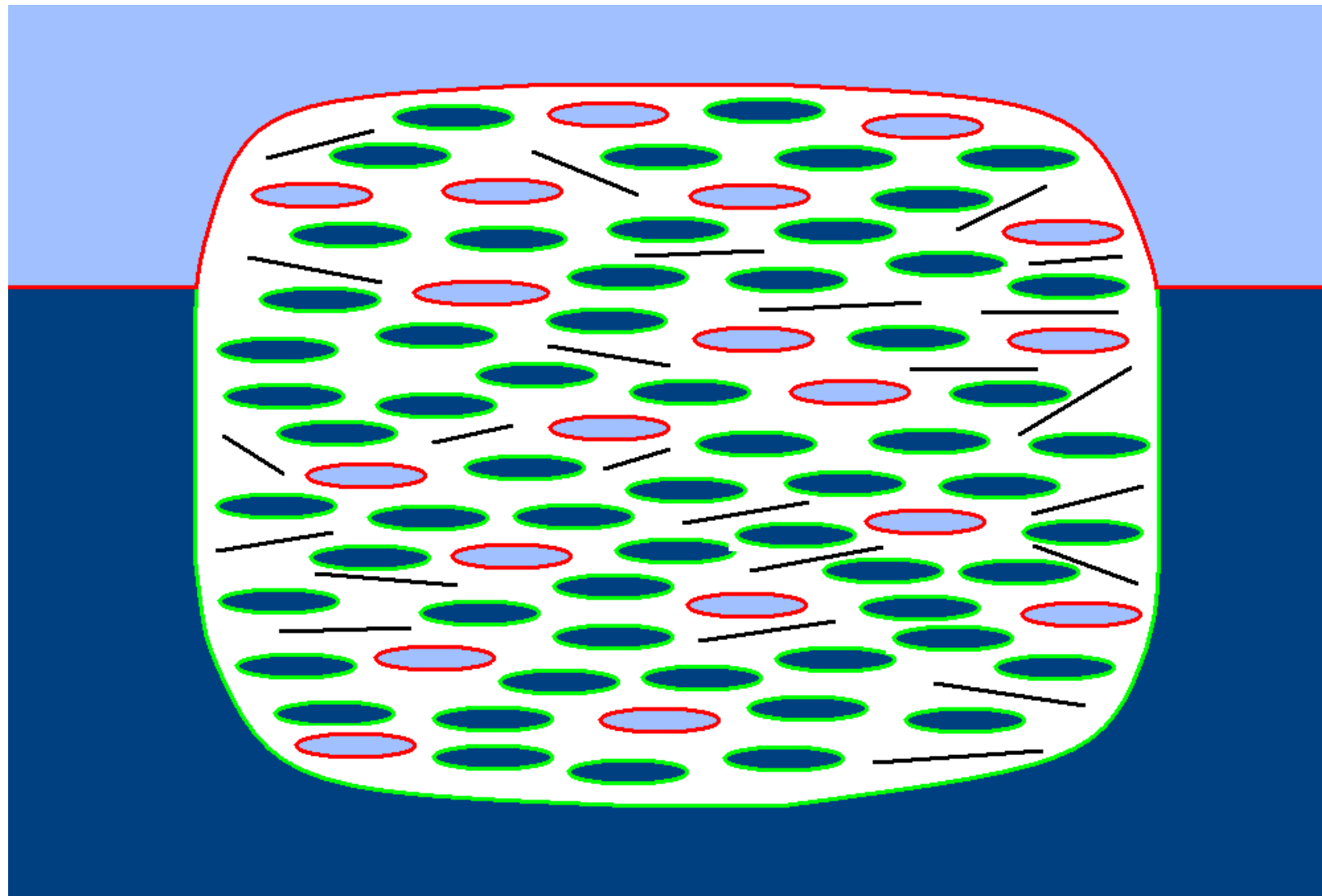


- Контактная граница между льдом и льдом.  
Условие динамического трения,  
или полного сцепления,  
или свободного скольжения.

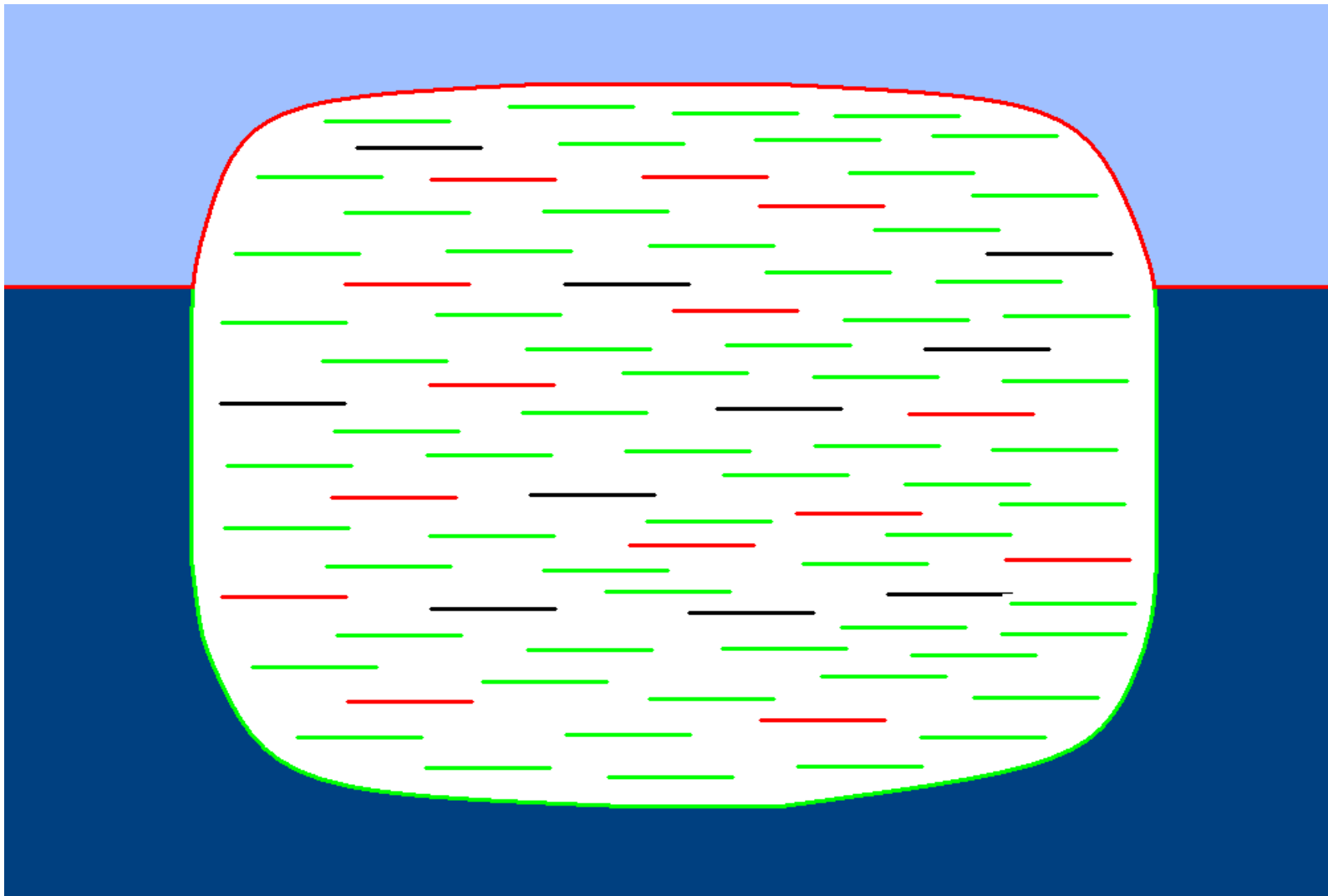
Ледяное тело заданной формы с заданным распределением водонасыщенных и газонасыщенных полостей и трещин




# Кластер водонасыщенных и газонасыщенных полостей и трещин



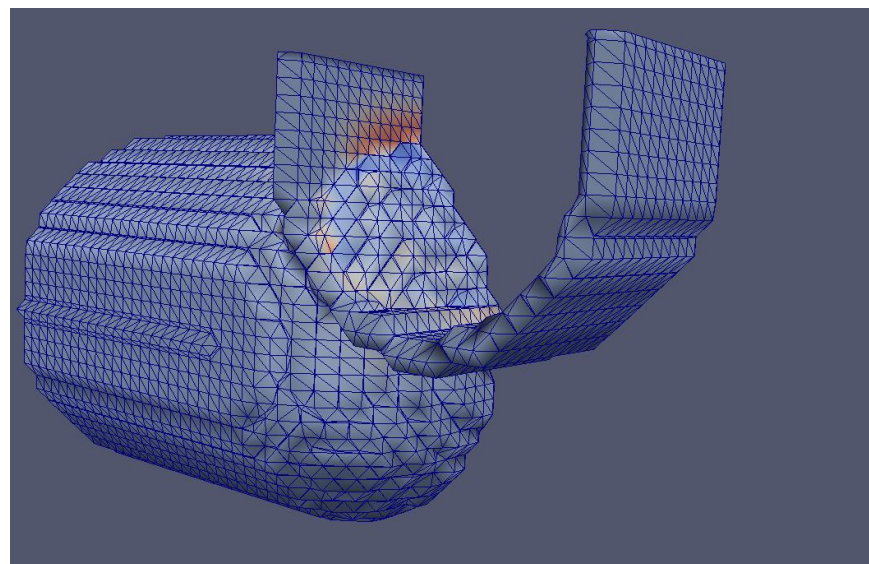
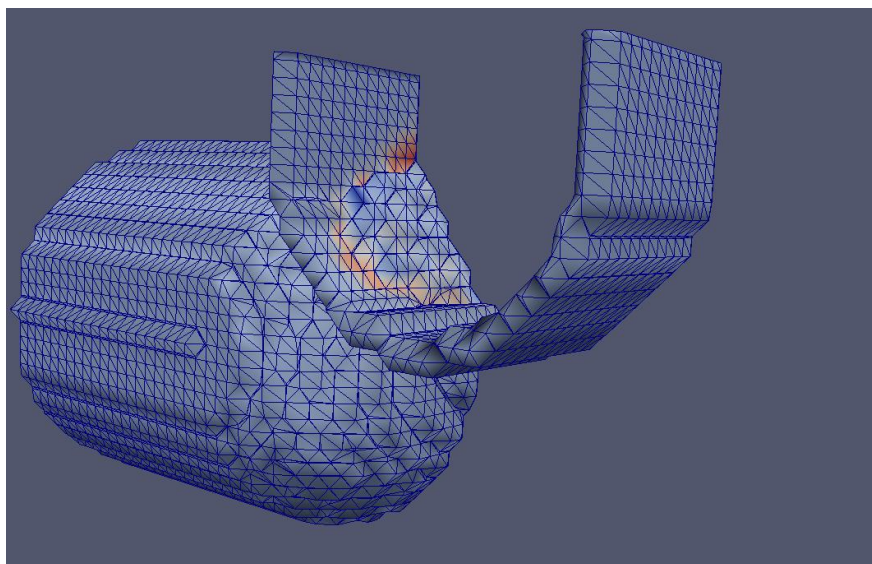
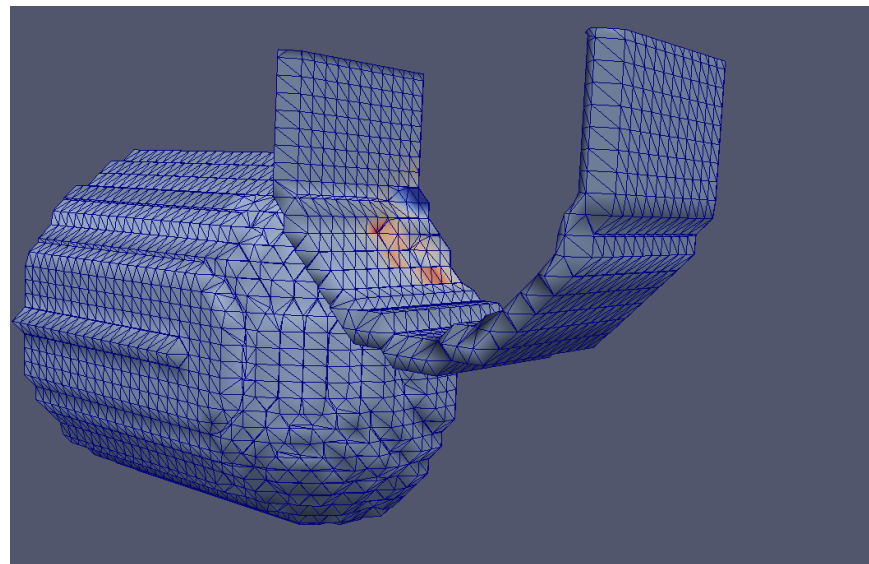
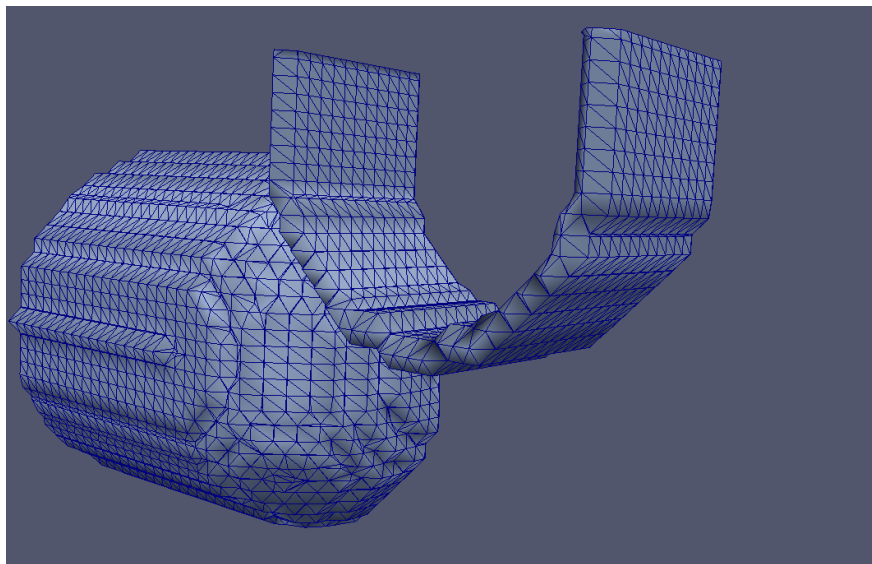
# Кластер водонасыщенных и газонасыщенных трещин





# Столкновение ледокола с торосом

# Столкновение ледокола с торосом

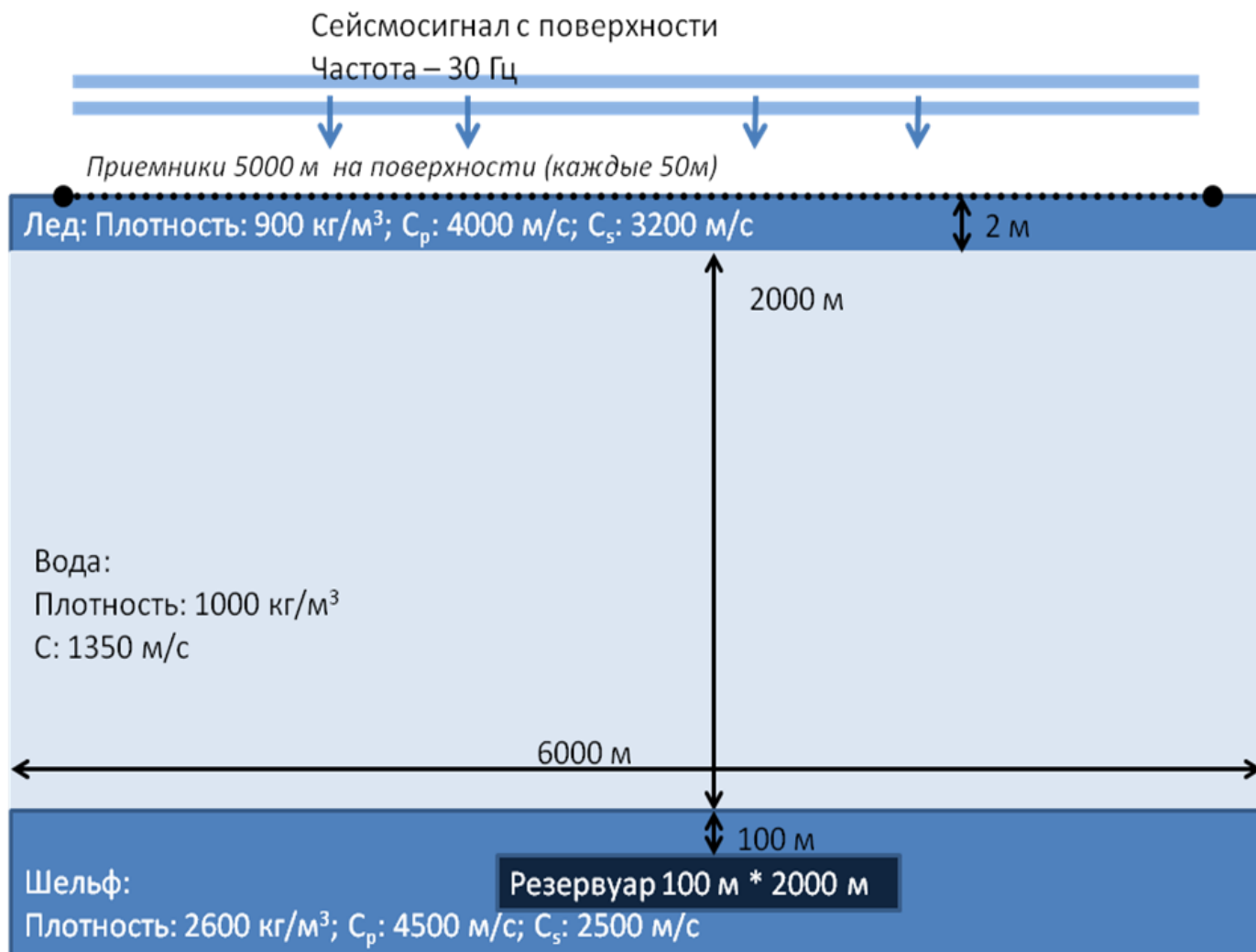






# Сейсморазведка арктического шлейфа

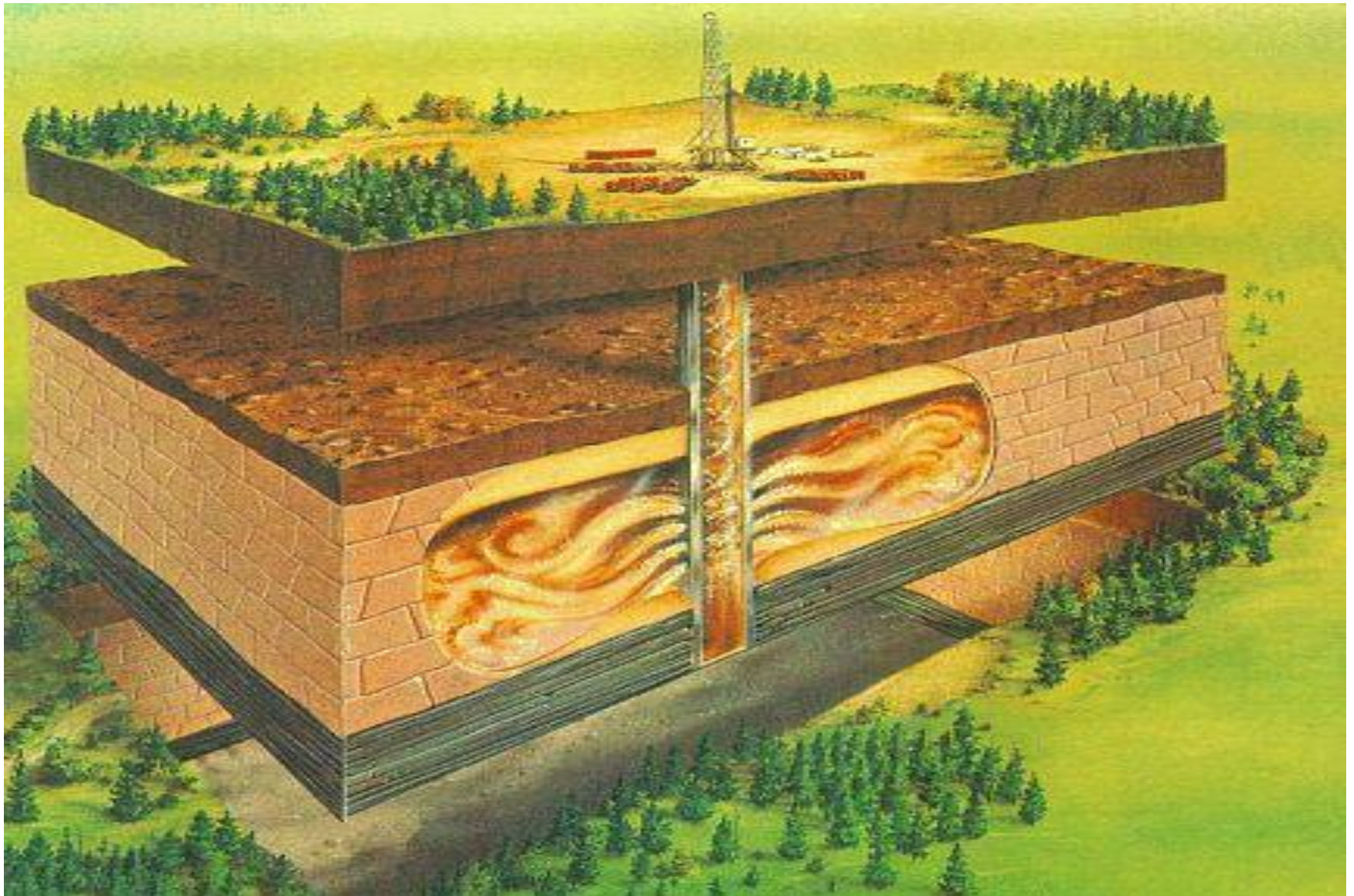
# Численное моделирование в задачах сейсморазведки арктического шлейфа



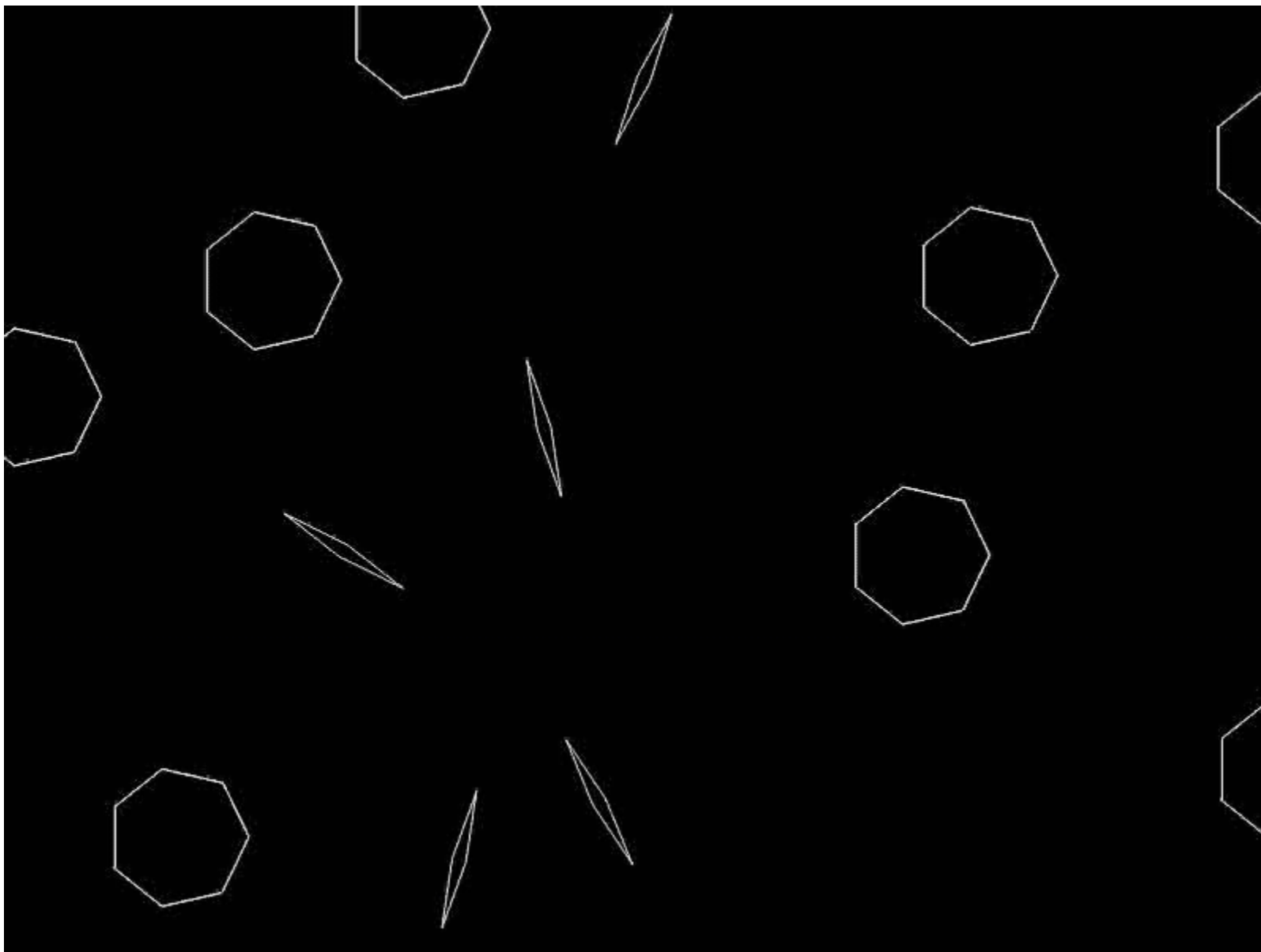


# **Численное моделирование в геологии**

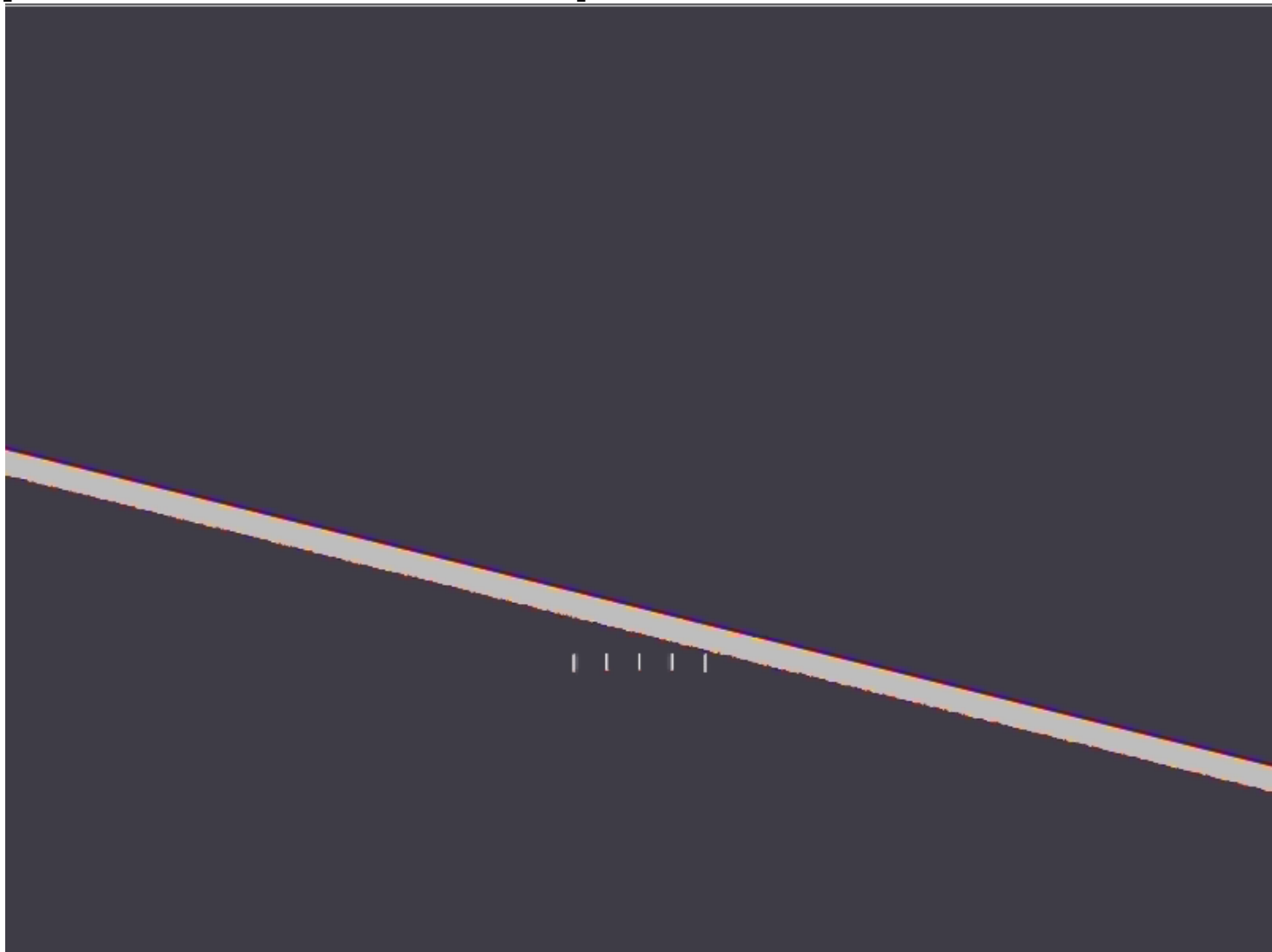
# Численное моделирование в геологии



# Трещины и пустоты



# Коридор водонасыщенных вертикальных трещин





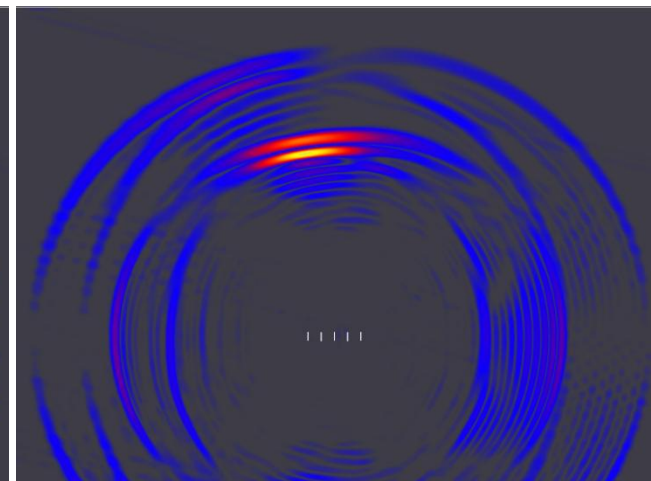
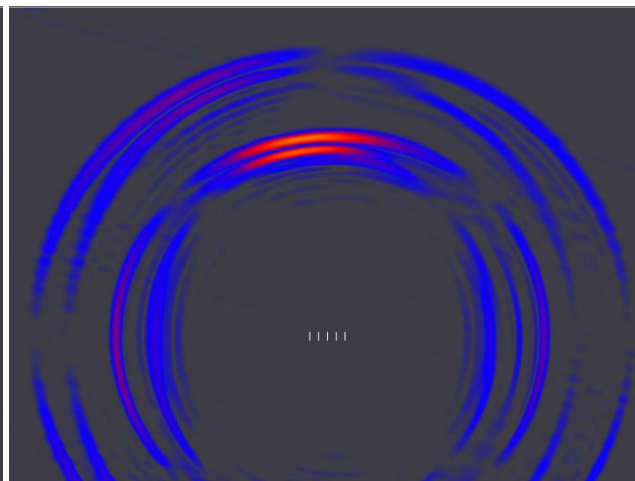
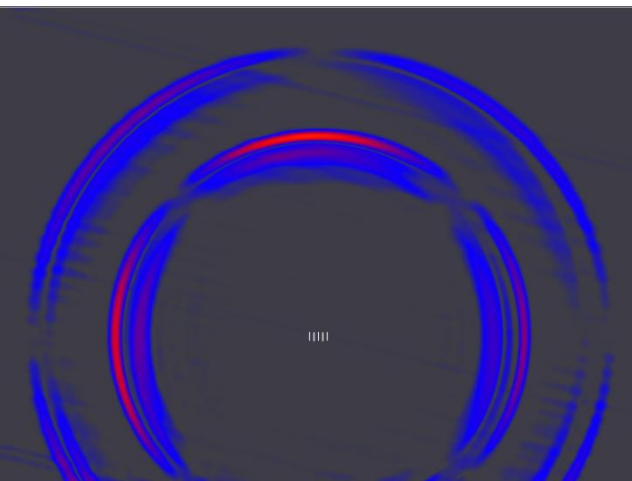
# Коридор водонасыщенных вертикальных трещин

расстояние между трещинами / длина трещин

0,5

1,0

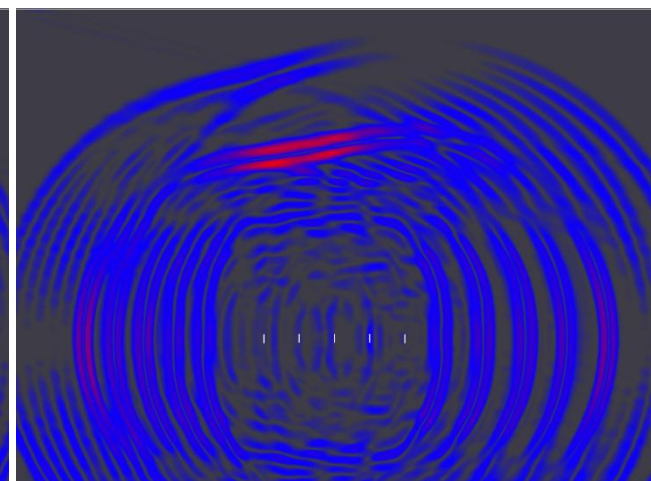
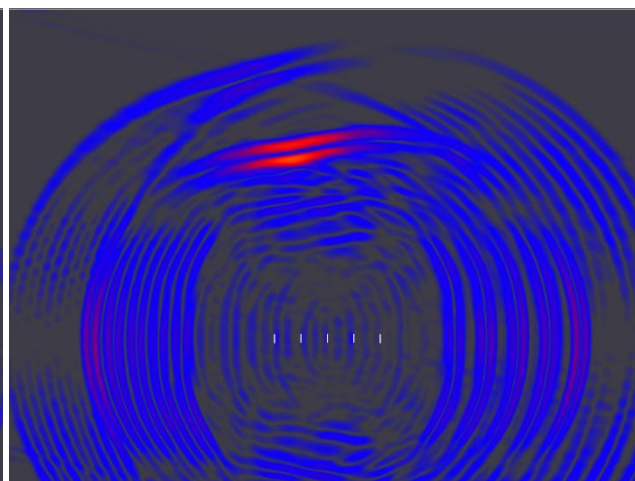
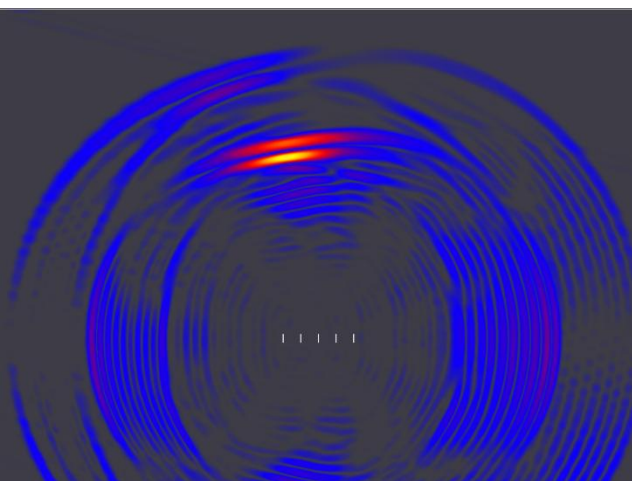
1,5



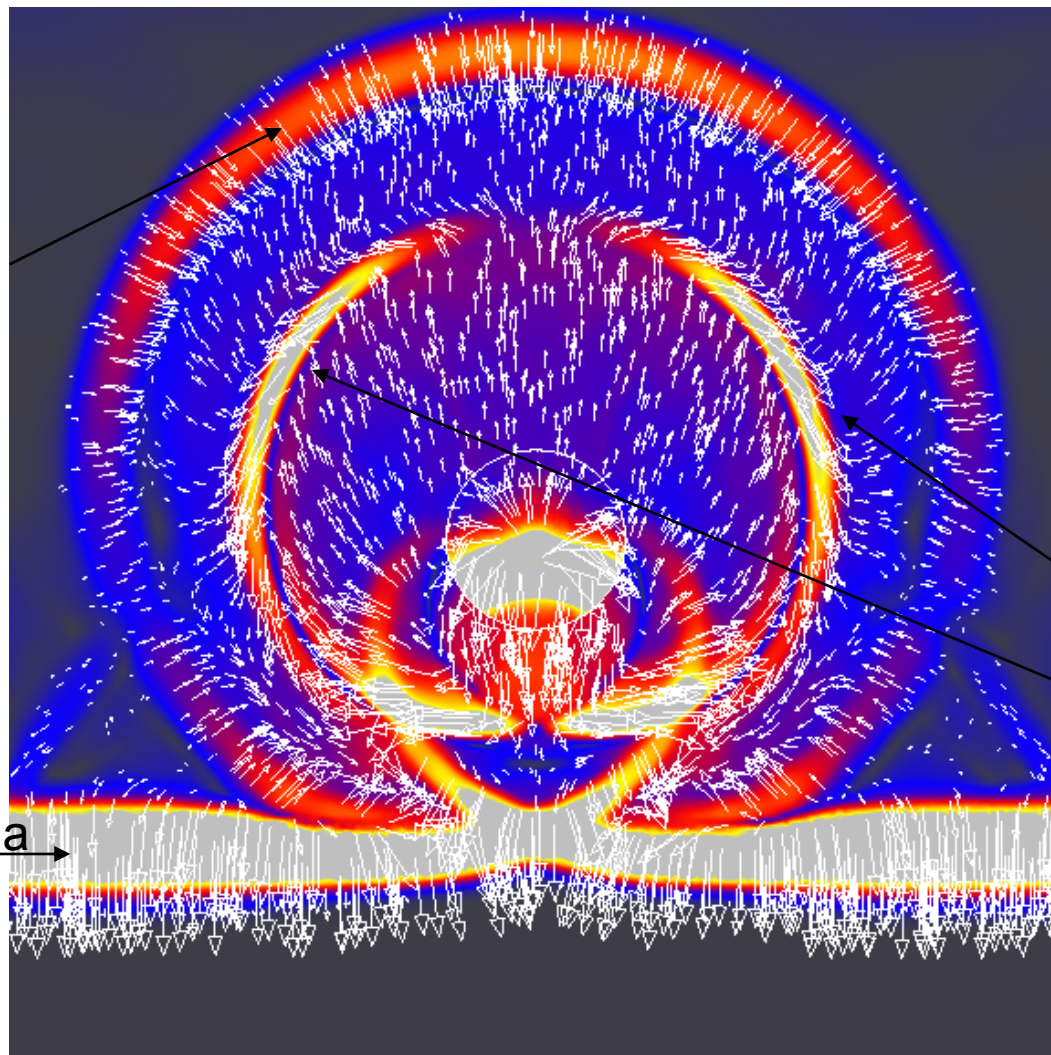
2,0

3,0

4,0



# Простая водонасыщенная полость



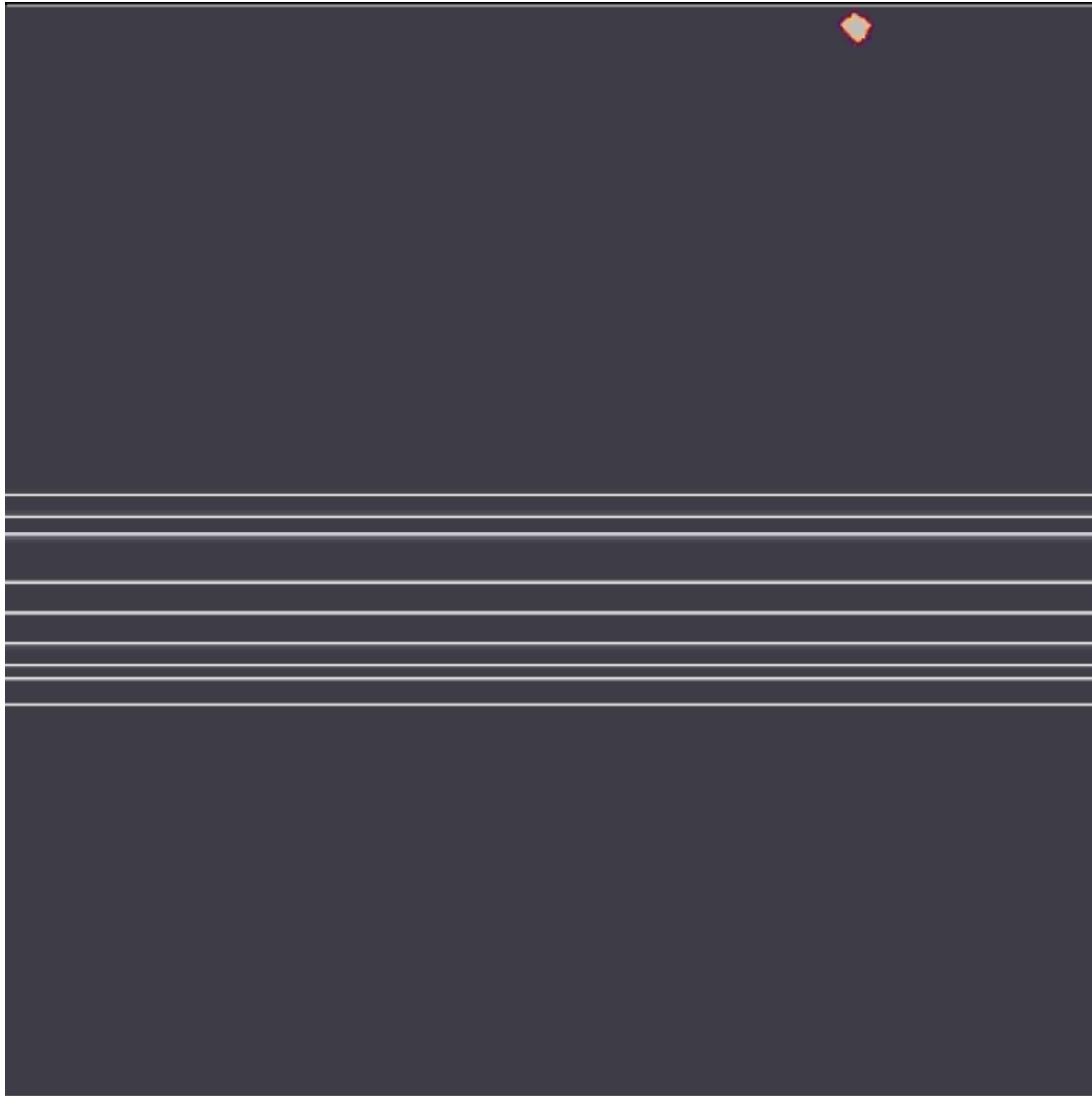
Отраженная  
продольная  
волна


Прошедшая волна

Отраженная  
волна



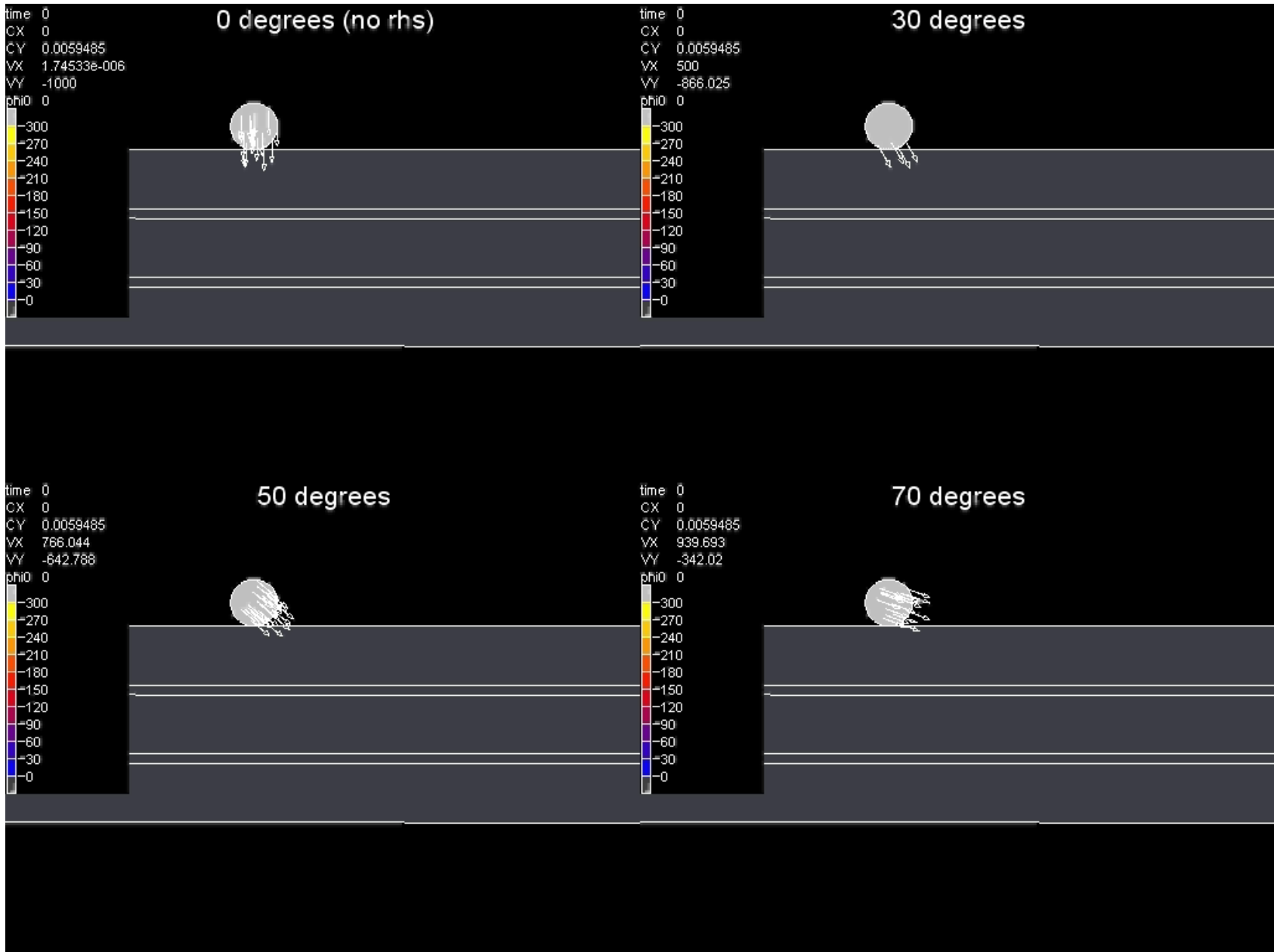
# Многослойная геологическая среда



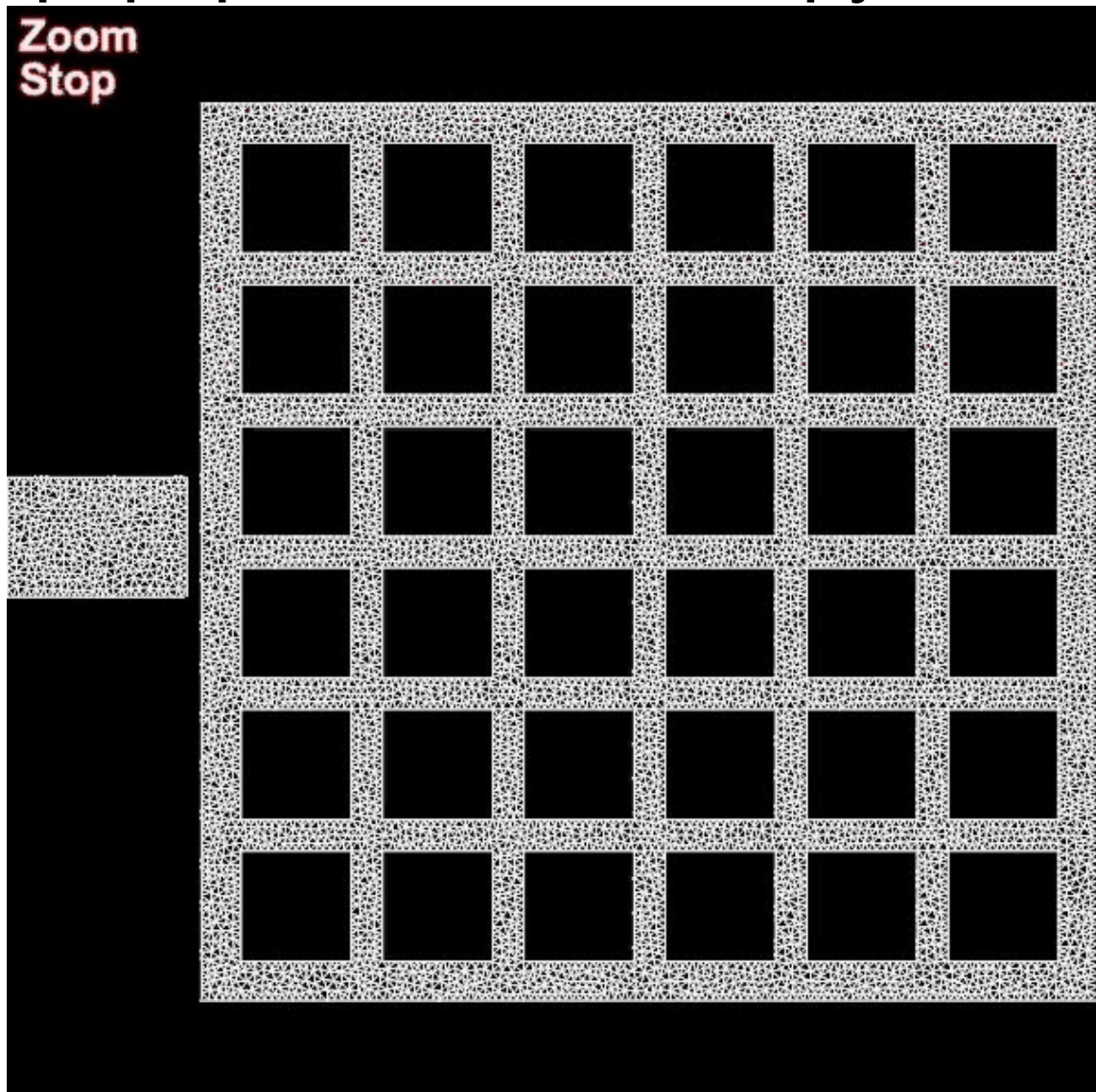


# **Численное моделирование задач о соударении**

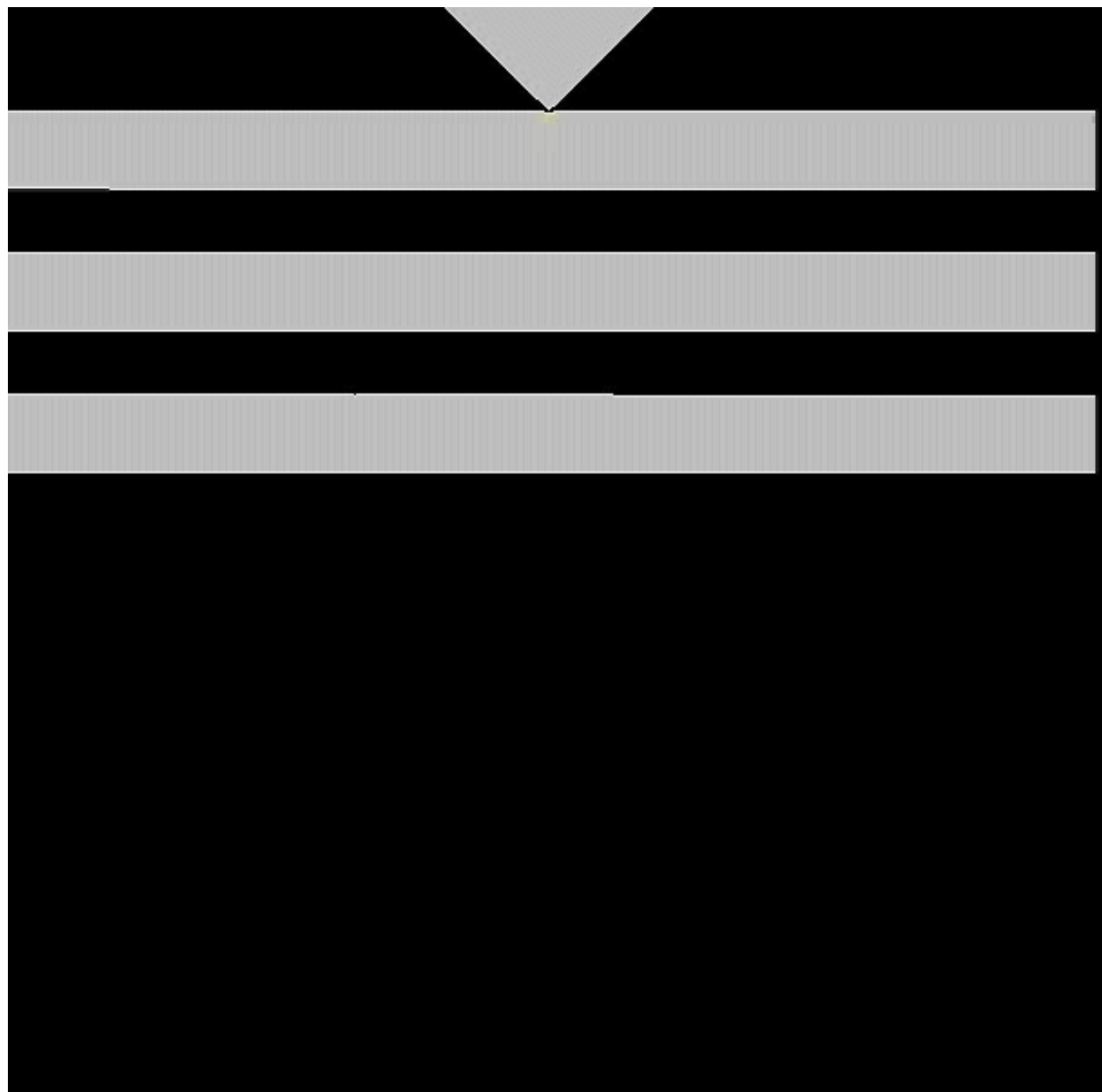
# Задача о соударении с многослойной преградой



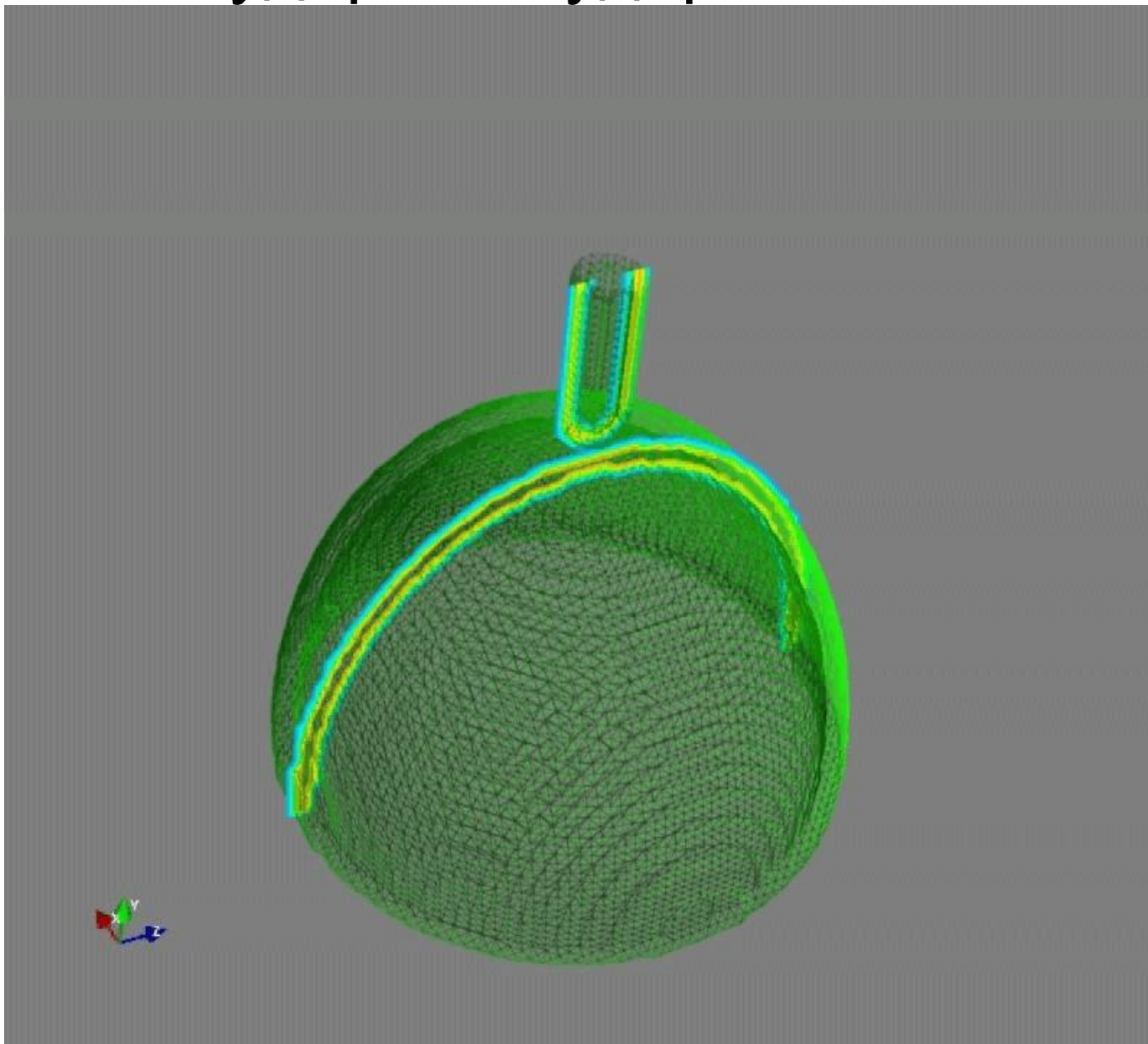
# Задача о соударении с перфорированной конструкцией



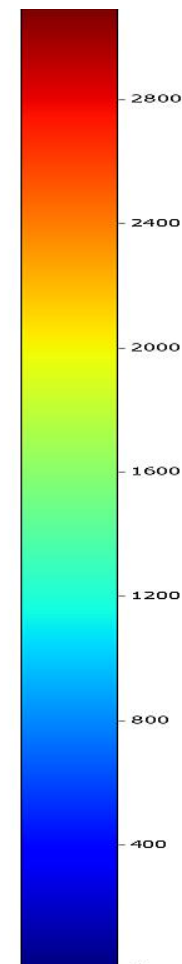
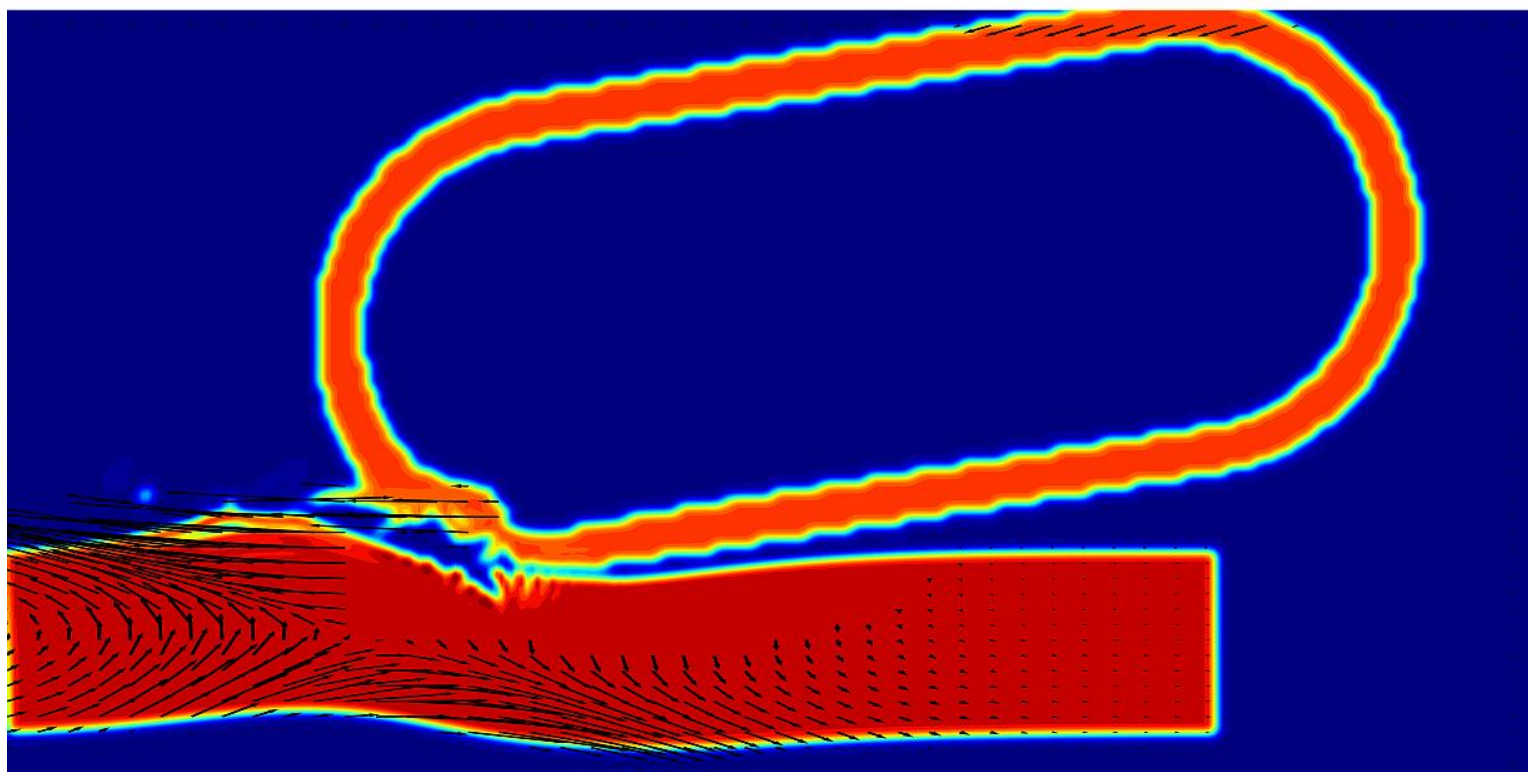
# Пробивание ударником трехслойной преграды



# Задача о соударении ударника с оболочкой



# Задача о наклонном соударении оболочки с поверхностью





# Сеточно- характеристический метод



# Система уравнений математической модели сплошной линейно-упругой среды

$$\rho \partial_t \vec{v} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma})^T$$

$$\partial_t \boldsymbol{\sigma} = \lambda (\nabla \cdot \vec{v}) \mathbf{I} + \mu \left( \nabla \otimes \vec{v} + (\nabla \otimes \vec{v})^T \right)$$

$\rho$  ■ плотность материала,

$\vec{v}$  ■ скорость,

$\boldsymbol{\sigma}$  ■ симметричный тензор напряжений Коши,

$\lambda, \mu$  ■ параметры Ляме, определяющие  
свойства упругого материала.

■ гиперболическая. Собственные значения:

$$c_i \in \left\{ \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, -\sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, -\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, -\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, 0, 0, 0 \right\}$$

# Расчет точек внутри области интегрирования

- Приводим систему уравнений к следующему виду:

$$\partial_t \bar{q} + \mathbf{A}_1 \partial_{\xi_1} \bar{q} + \mathbf{A}_2 \partial_{\xi_2} \bar{q} + \mathbf{A}_3 \partial_{\xi_3} \bar{q} = 0$$

- где за  $\bar{q}$  обозначен следующий вектор:

$$\bar{q} \in \{v_1, v_2, v_3, t_{11}, t_{22}, t_{33}, t_{23}, t_{13}, t_{12}\}^T$$

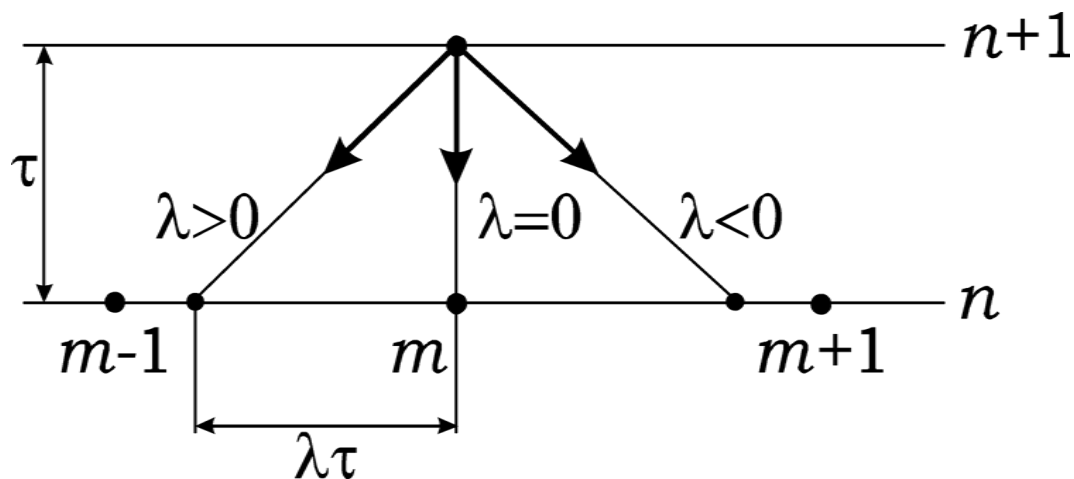
- Для каждой из трех систем вида

$$\partial_t \bar{q} + \mathbf{A}_1 \partial_{\xi_1} \bar{q} = 0$$

- справедливо следующее точное выражение:

$$\bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \sum_{i=1}^I \mathbf{X}_i \bar{q}(\xi_1 - c_i \tau, \xi_2, \xi_3, t)$$

# Сеточно-характеристический метод



# Расчет точек на границах области интегрирования

- Граничное условие в матричном виде:

$$\mathbf{D}\bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \bar{d}$$

- Для данного граничного условия справедливо следующее точное выражение:

$$\bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \mathbf{F}(\mathbf{D}, \bar{d})\bar{q}^{\text{in}}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) + \mathbf{\Phi}(\mathbf{D}, \bar{d})\bar{d}$$

- Где за  $\bar{q}^{\text{in}}$  обозначен следующий вектор:

$$\bar{q}^{\text{in}}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \sum_{c_i \geq 0} \mathbf{X}_i \bar{q}(\xi_1 - c_i \tau, \xi_2, \xi_3, t)$$


# Виды граничных и контактных условий

## Виды граничных условий

- Заданной внешней силы,
- Заданной скорости границы
- Смешанные граничные условия,
- Неотражающие граничные условия.

## Виды контактных условий

- Контактное условие полного сцепления вычисляется с помощью корректора заданной скорости границы.
  - Контактное условие свободного скольжения вычисляется с помощью корректора смешанных граничных условий.
- Контактное условие с динамическим трением



**Спасибо  
за внимание!**