

Моделирование волновых процессов в условиях Арктического шельфа

Стогний Полина Владимировна
273 группа
Кафедра информатики МФТИ
Науч. Руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Хохлов Н.И.

Цели работы:

- Обзор численных методов для решения систем гиперболических уравнений
- Обзор геологических сред в условиях Арктического шельфа и разработка на основе них геологических моделей
- Проведение расчетов и исследование откликов от нефтегазового слоя в различных моделях
- Исследование методов высокого порядка точности

Численные методы

- Метод Годунова
- Сеточно-характеристические методы
- TVD-схемы
- ENO-схемы (2-й/3-й порядок точности)
- Метод Галеркина
- Компактные/бикомпактные схемы (высокий порядок точности)
- ADER-схемы

Методы в расчетах

- Использованные схемы: TVD-схемы и схемы Русанова (лучше всего приближают модель к реальным условиям)
- Расчеты производились на программном комплексе, который был разработан на кафедре информатики и вычислительной математики МФТИ

Модели сред

- Анизотропная модель среды (макроскопические свойства различны в различных направлениях)
- Изотропная модель среды (свойства не зависят от направления распространения волны)
- Акустическая модель среды (жидкость, газ)

Определяющие системы уравнений

- Линейно-упругая среда:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \sigma = (\nabla \sigma)^T$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma = \lambda (\nabla \vec{v}) I + \mu (\nabla \times \vec{v} + (\nabla \times \vec{v})^T)$$

p – давление

- Акустическая среда:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \vec{v} = -\nabla p$$

\vec{v} – скорость

σ – тензор напряжений

$$\frac{\partial}{\partial t} p = -c^2 \rho (\nabla \vec{v})$$

ρ – плотность

c – скорость звука

Модели для рассмотрения:

Общая модель: вода (50-70 м, шельф) + грунт (600-1000 м)

Также, могут присутствовать:

- нефтегазовый слой (на глубине 500-700 м под землей)
- торосы (большие нагромождения льда)
- айсберги (до 30 м в высоту)
- ледовый покров (сплошной слой льда)
- ледяное поле (большое кол-во айсбергов)

2D постановки задач

- Модели с торосами



- Модели с ледовым покровом и ледяным полем



Общие параметры расчетов

- Шаг по пространству: 1 м
- Шаг по времени: 10^{-4} с
- Кол-во шагов по времени: 15 000
- Область интегрирования: 2000 м x 1200 м
- По бокам и внизу расчетной области-неотражающие граничные условия, сверху — свободная граница

Модели с торосами

Вода-Торос-Земля



Вода-Нефтегазовый слой- Земля



Вода-Торос-Нефтегазовый
слой-Земля

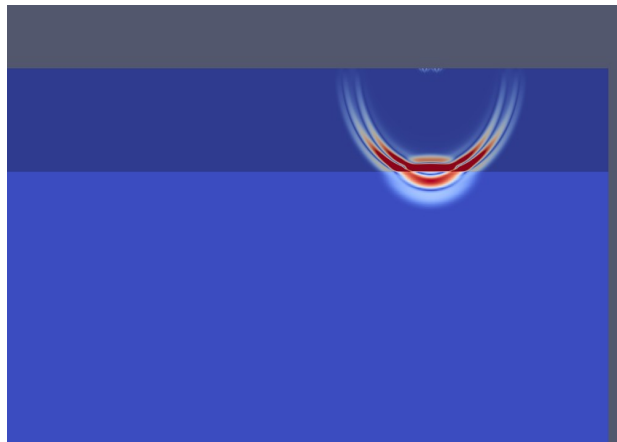


Вода-Торос-
Земля



Time-170

Вода-Нефтегазовый
слой-Земля

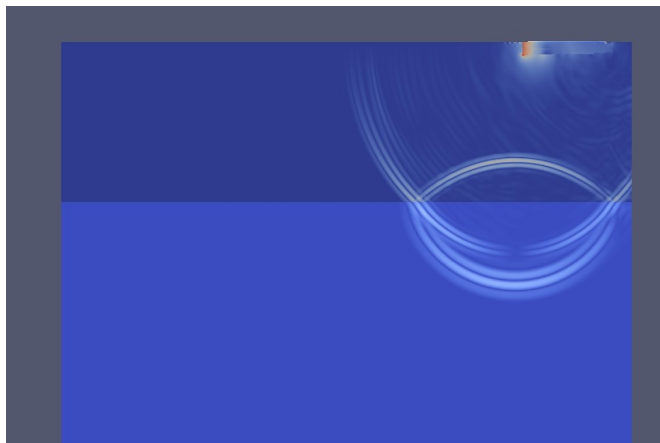


Time-80

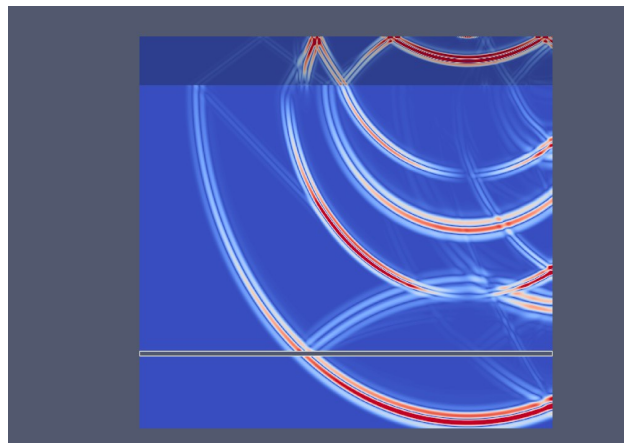
Вода-Торос-
Нефтегазовый
слой-Земля



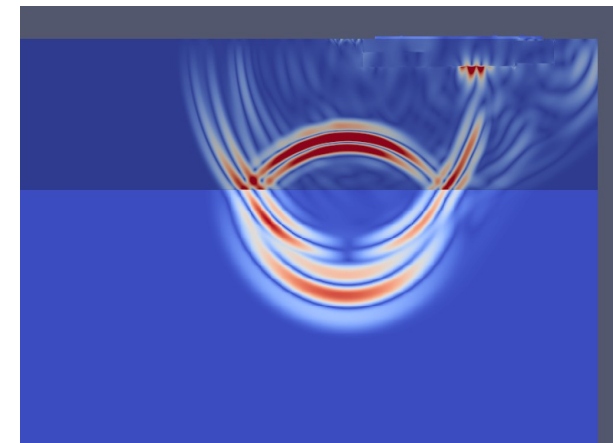
Time-40



Time-220



Time-310



Time-100

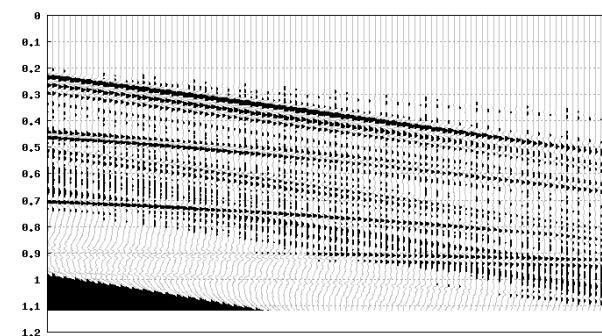
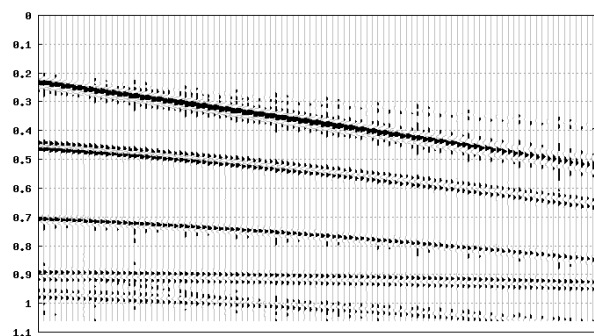
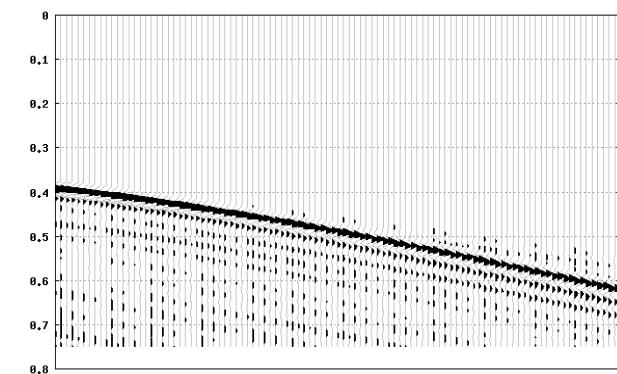
Сравнение сейсмограмм

Вода-Торос-Земля

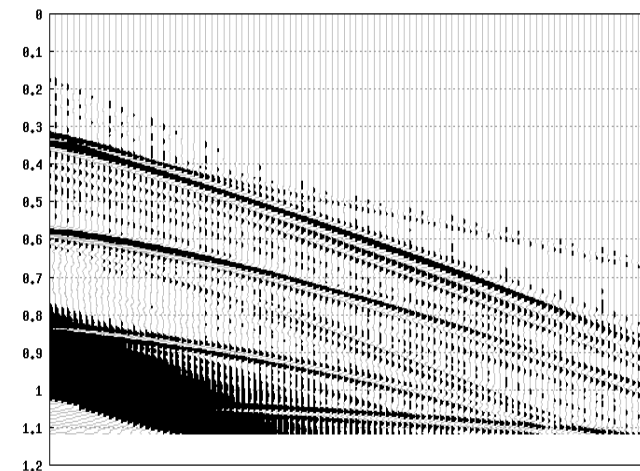
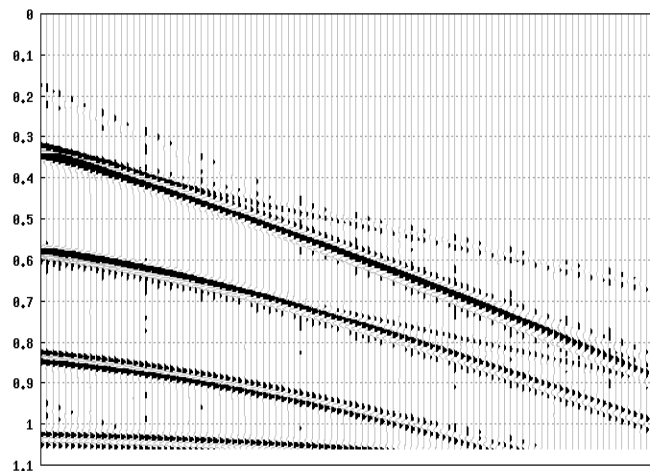
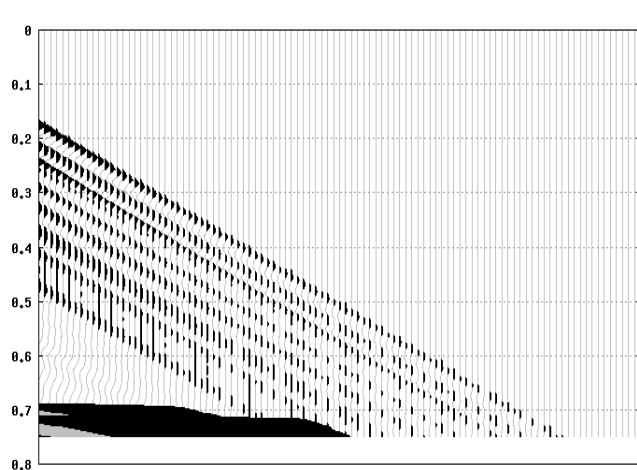
Вода-Нефтегазовый слой-Земля

Вода-Торос-Нефтегазовый слой-Земля

Приемники на дне

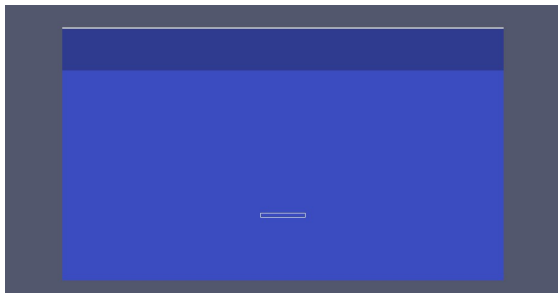


Приемники на поверхности воды

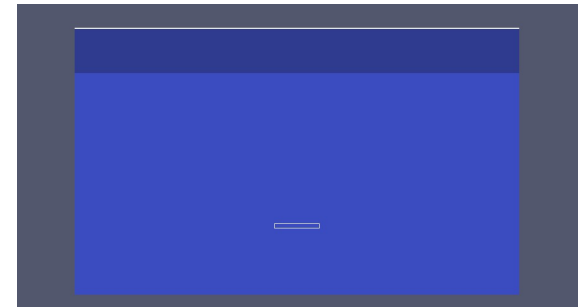


Модели с ледовым покровом и ледяным полем

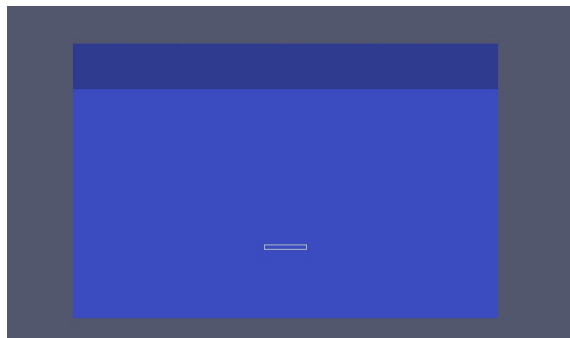
Лед-Вода-Нефтегазовый слой-
Земля (источник на поверхности
льда)



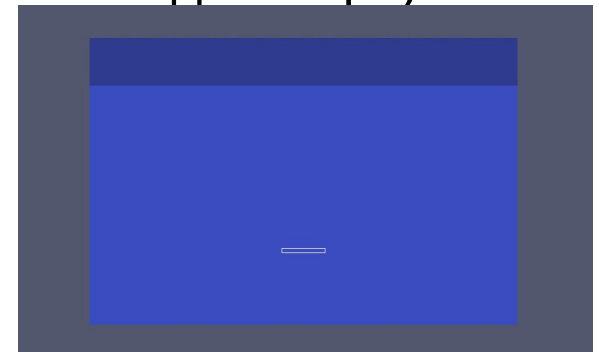
Лед-Вода-Нефтегазовый
слой-Земля(источник на дне
моря)



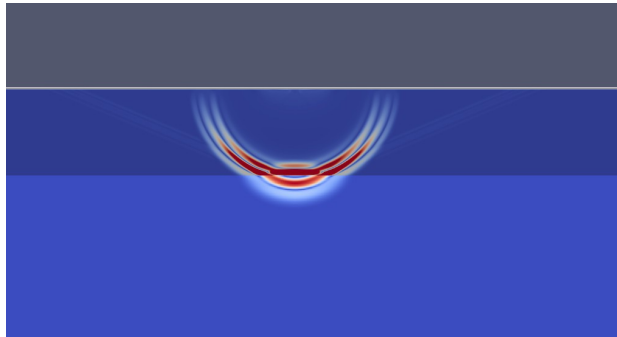
“Ледяное поле”-Вода-
Нефтегазовый слой-Земля
(источник на поверхности
льда)



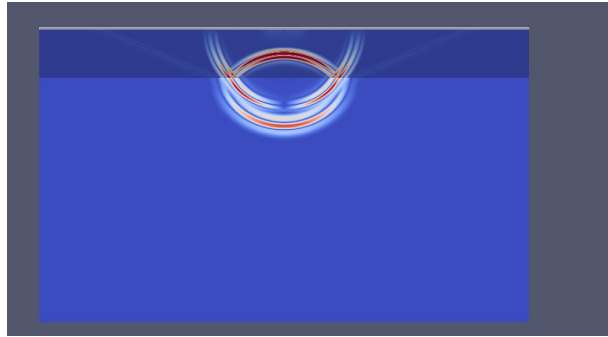
“Ледяное поле”-Вода-
Нефтегазовый слой-Земля
(источник на дне моря)



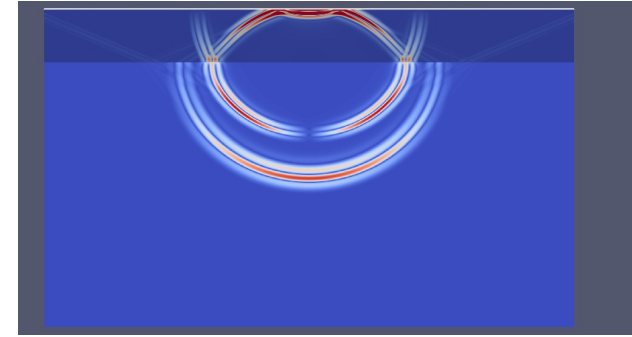
Лед-Вода-Нефтегазовый слой- Земля (источник на поверхности льда)



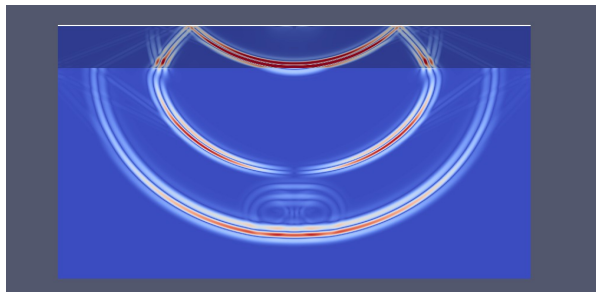
Time-80



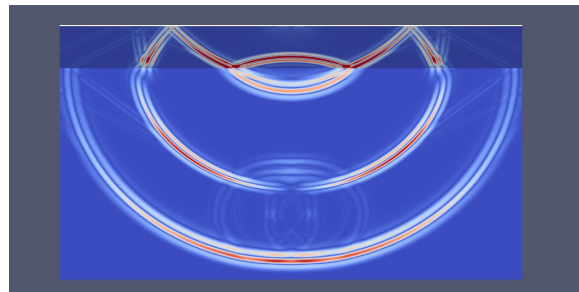
Time-110



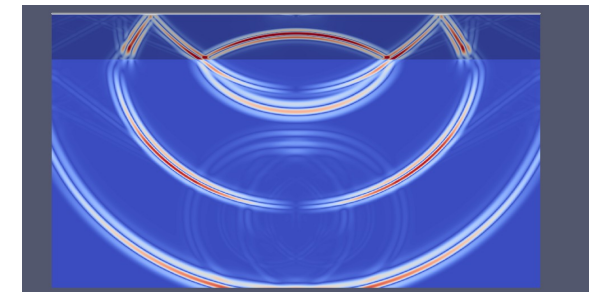
Time-150



Time-210



Time-230

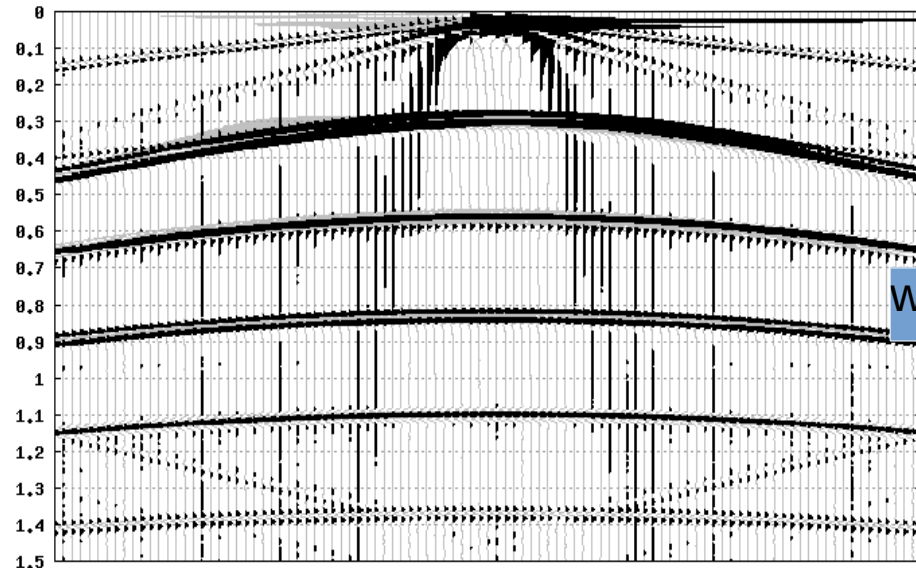
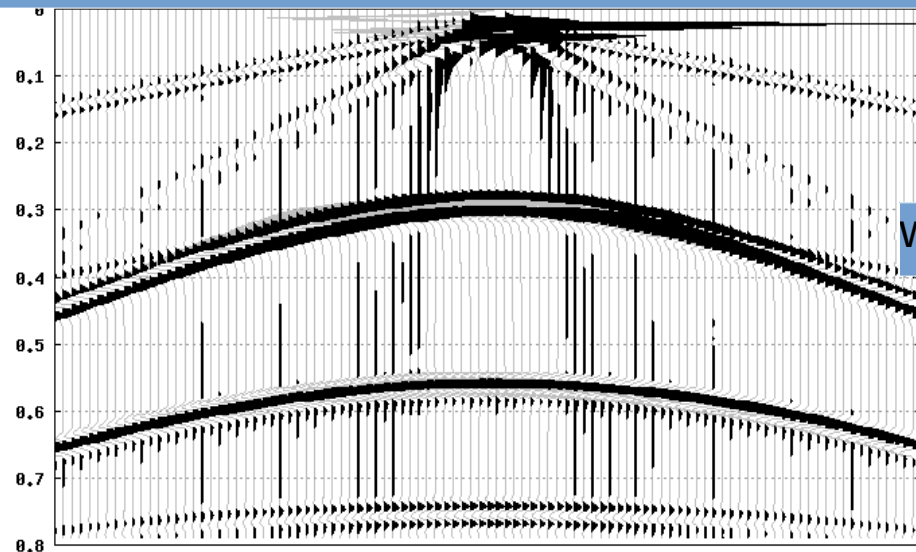


Time-250

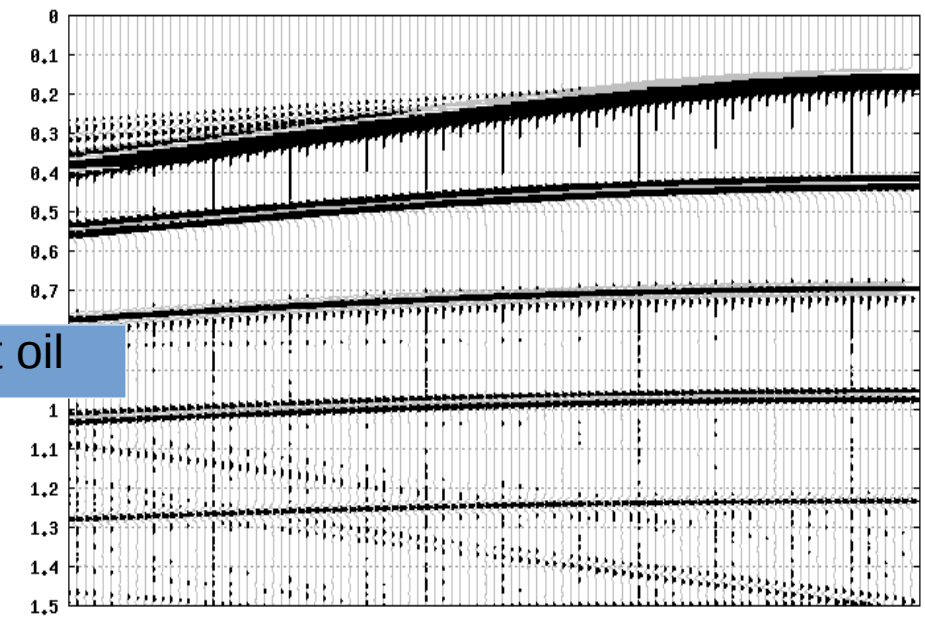
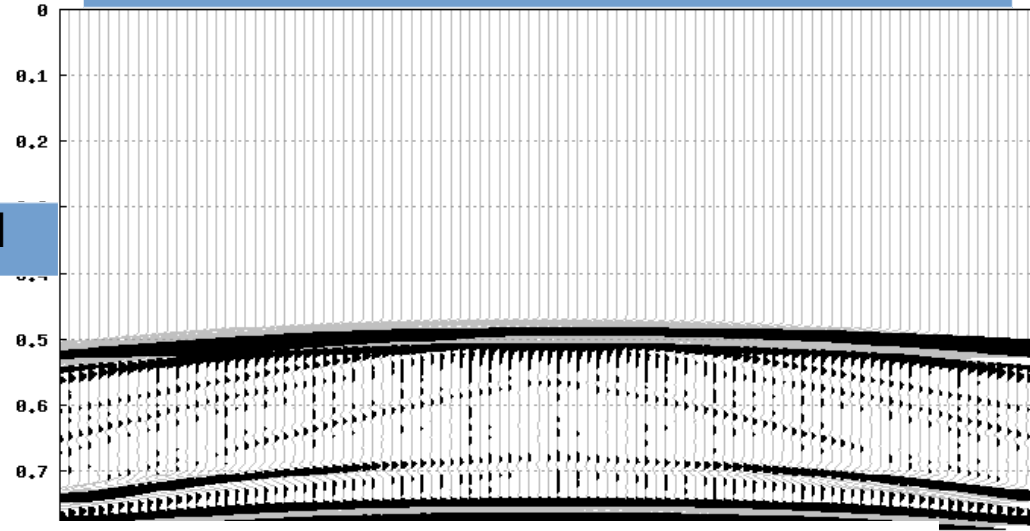
Отражение от нефтегазового слоя

Сейсмограммы: Лед-Вода-Нефтегазовый слой-Земля (источник на поверхности льда)

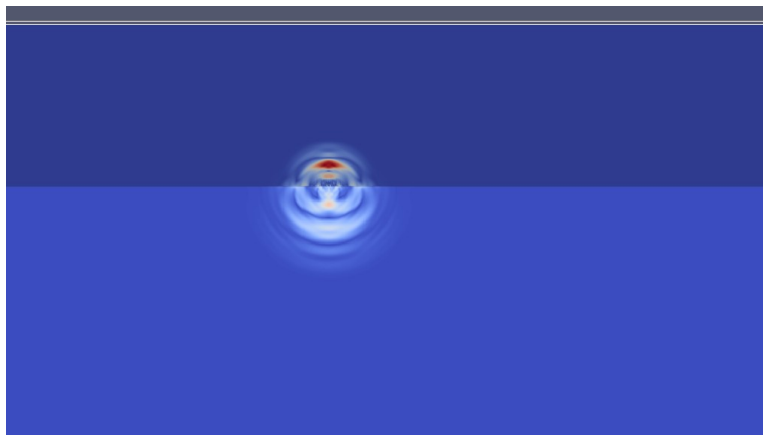
Приемники на поверхности



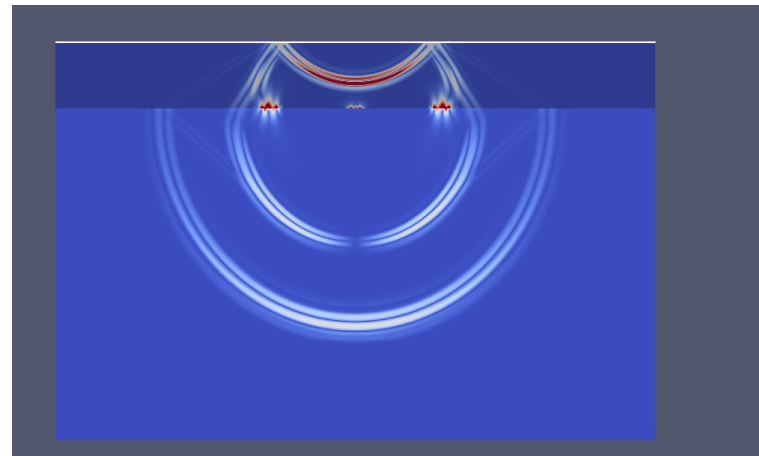
Приемники на дне



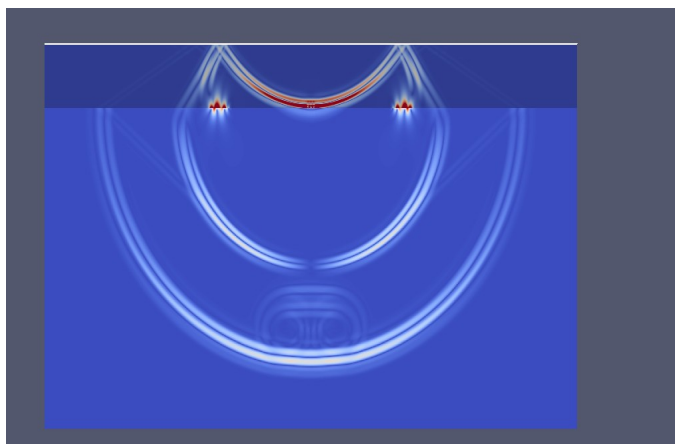
Лед-Вода-Нефтегазовый слой-Земля (источник на дне моря)



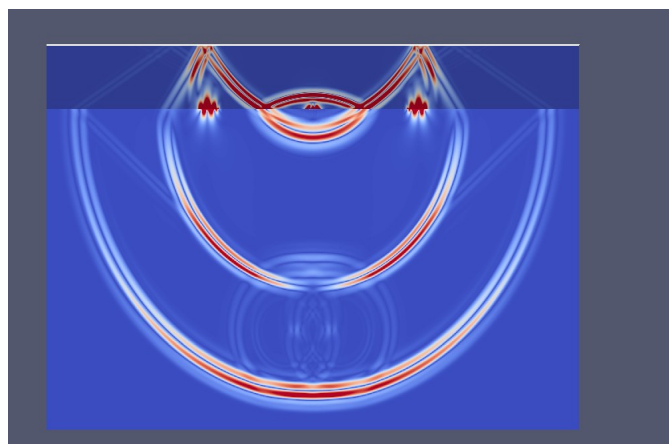
Time-20



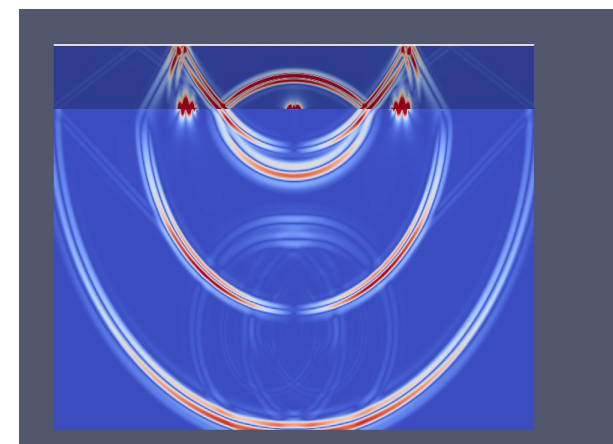
Time-120



Time-143



Time-160

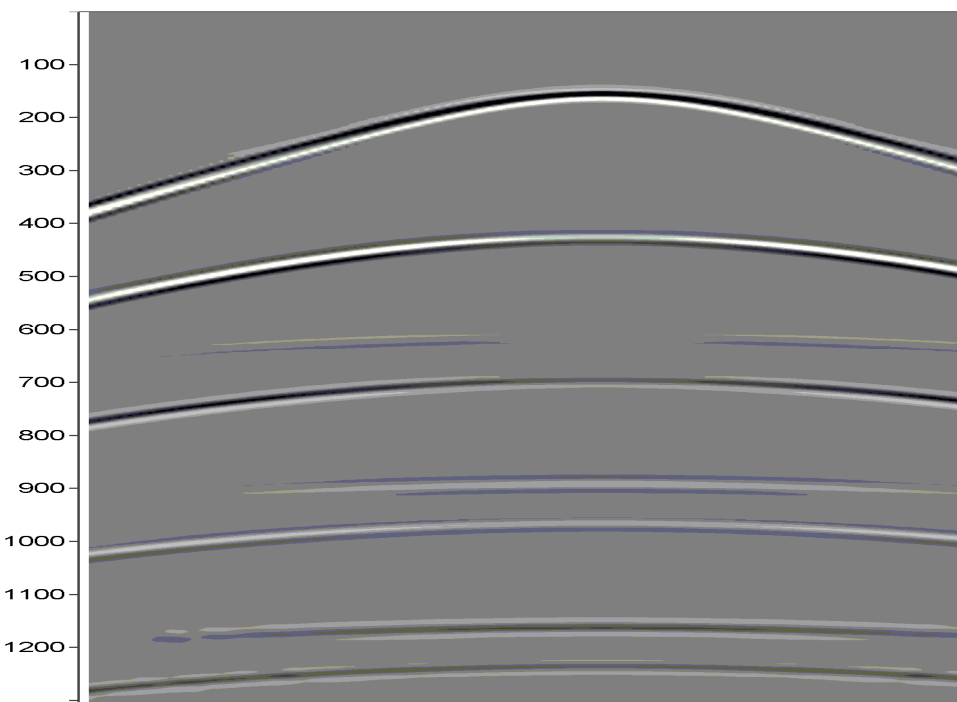


Time-180

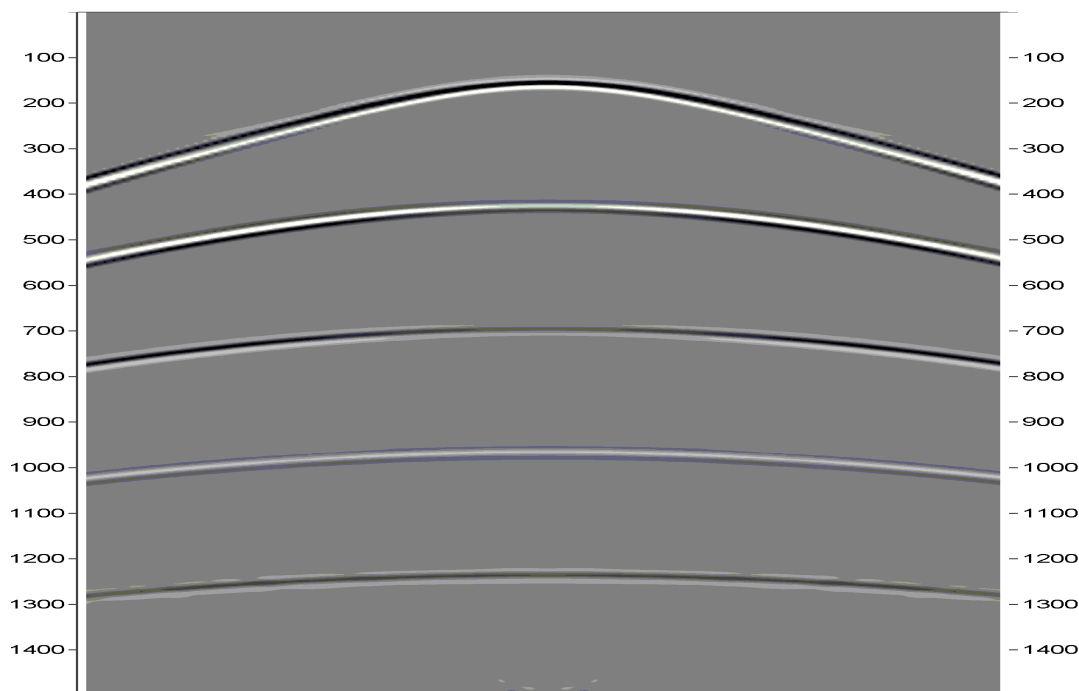
Отражение от нефтегазового слоя

Сейсмограммы: Лед-Вода-Нефтегазовый слой-Земля (источник на дне моря)

Приемники на поверхности

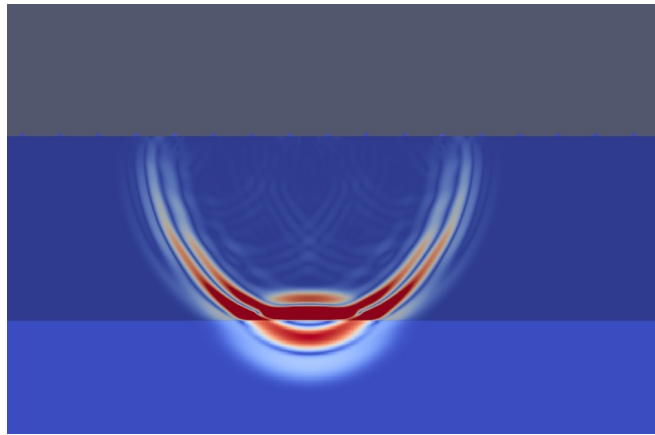


with oil

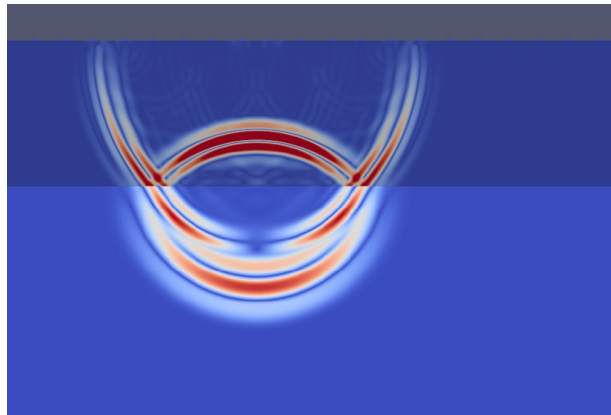


Without oil

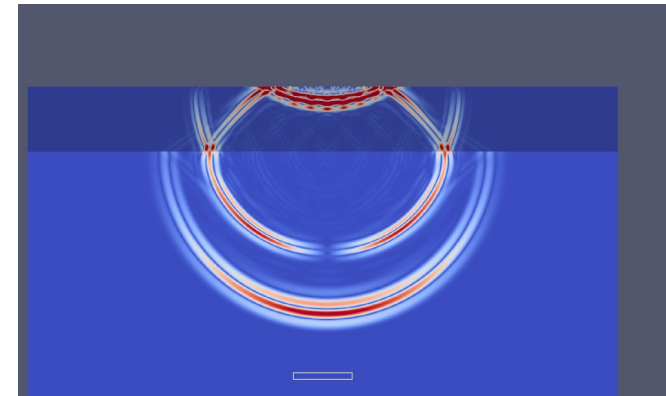
“Ледяное поле”-Вода- Нефтегазовый слой-Земля (источник на поверхности льда)



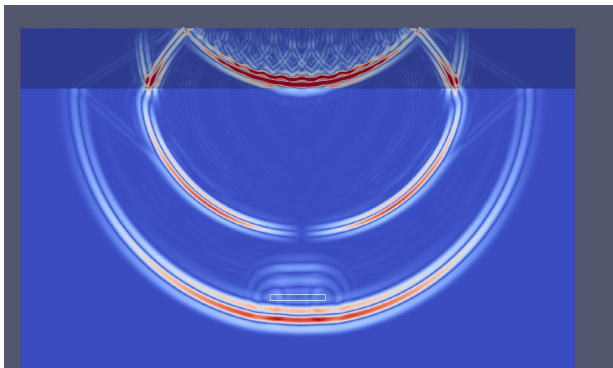
Time-80



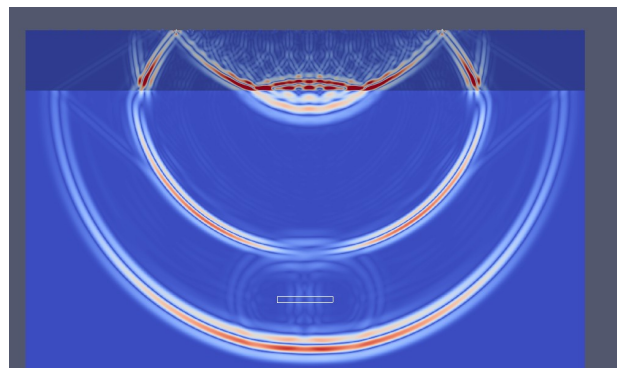
Time-100



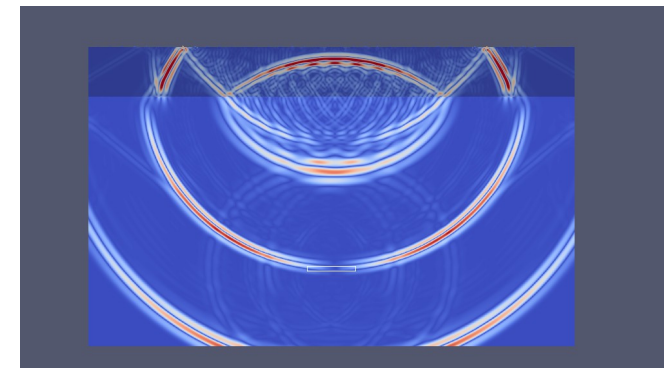
Time-160



Time-205



Time-220

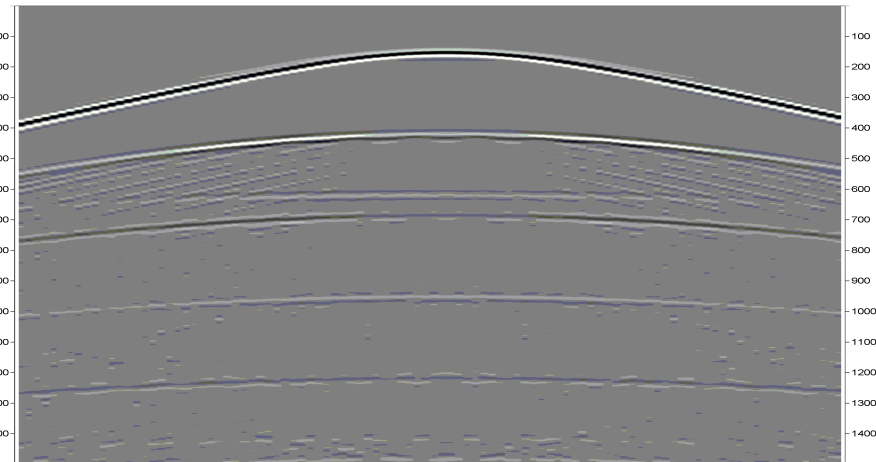


Time-260

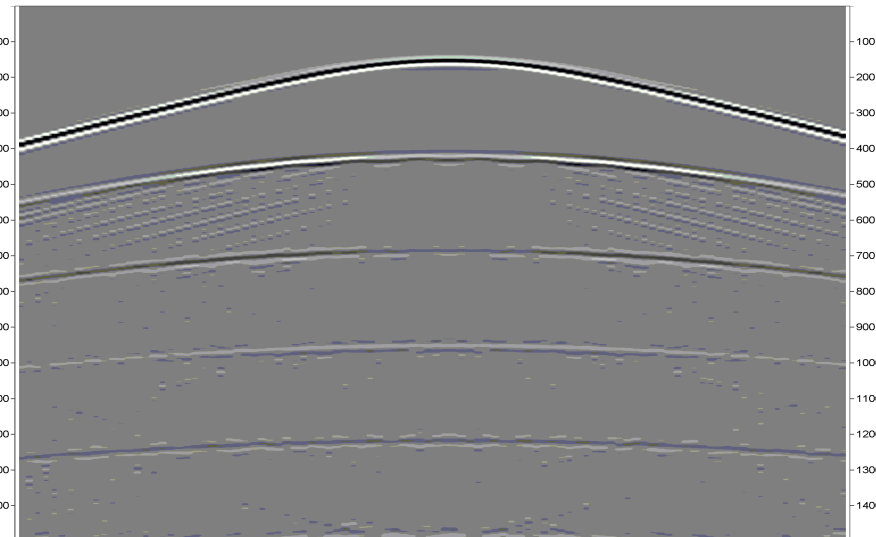
Отражение от нефтегазового слоя

Сейсмограммы: “Ледяное поле”- Вода-Нефтегазовый слой-Земля (источник на поверхности льда)

Приемники на дне

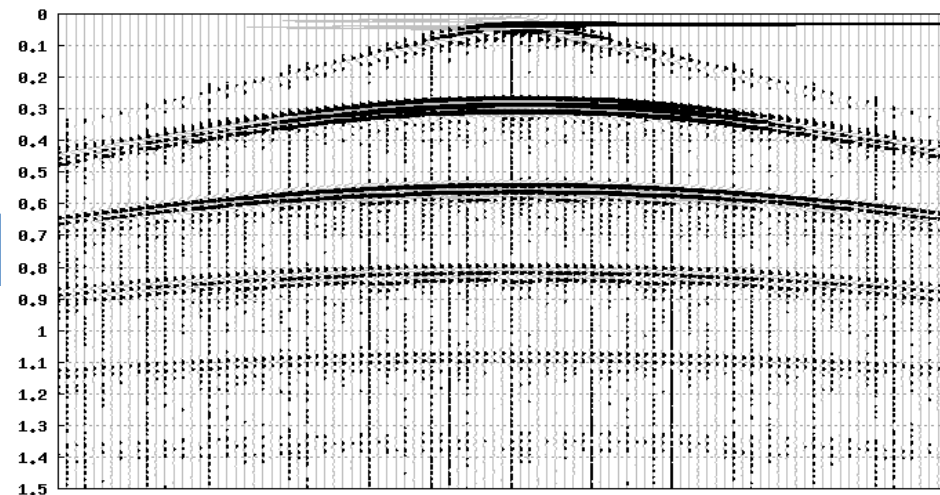
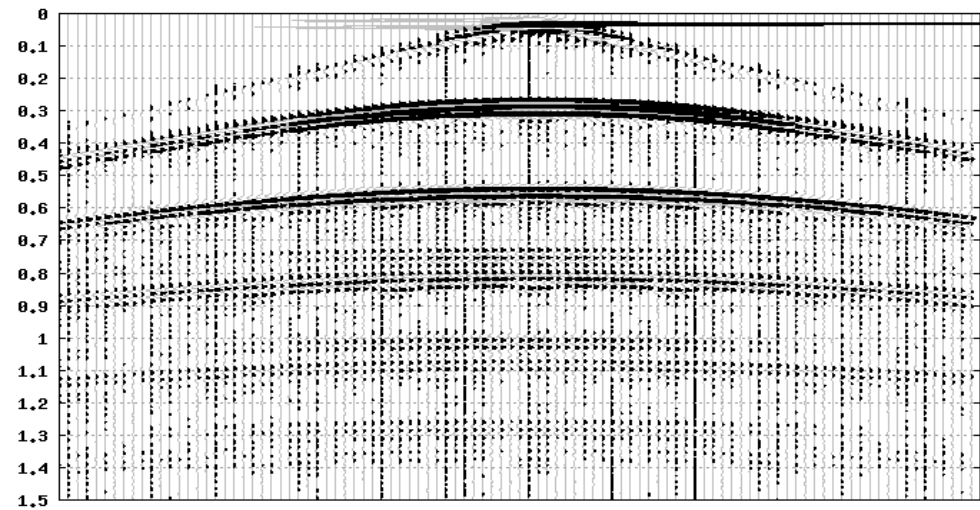


With oil

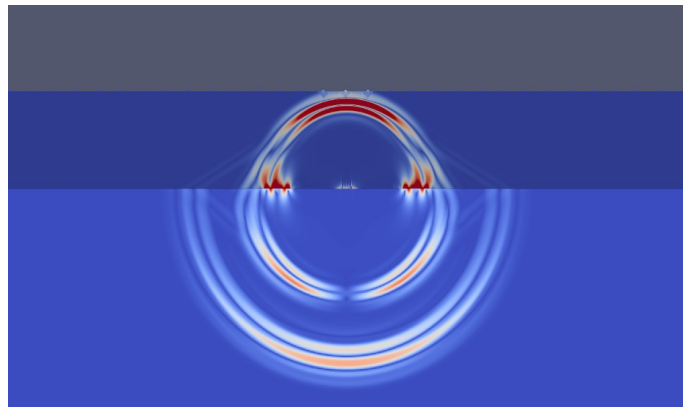


Without oil

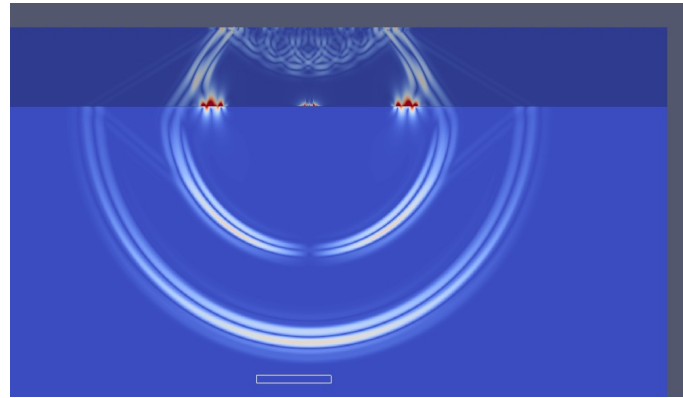
Приемники на поверхности



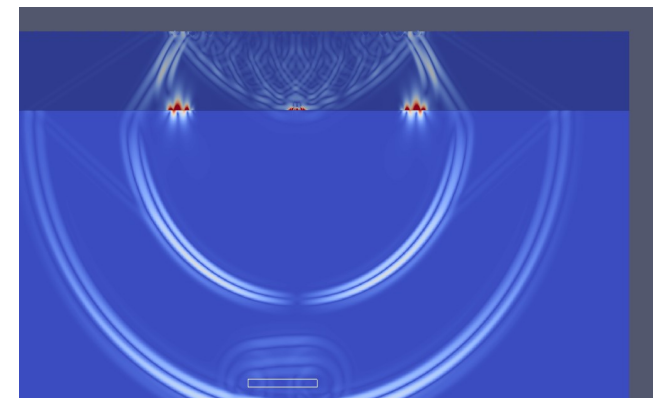
“Ледяное поле”-Вода- Нефтегазовый слой-Земля (источник на дне моря)



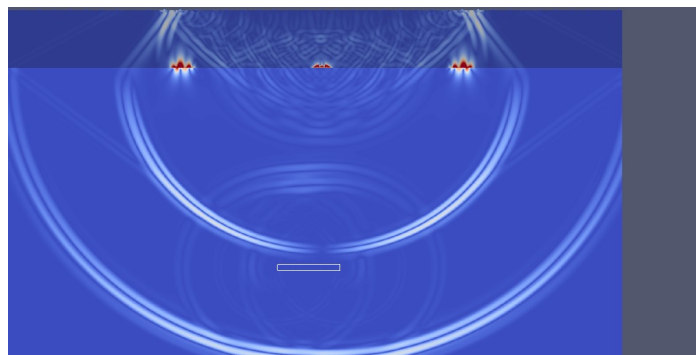
Time-70



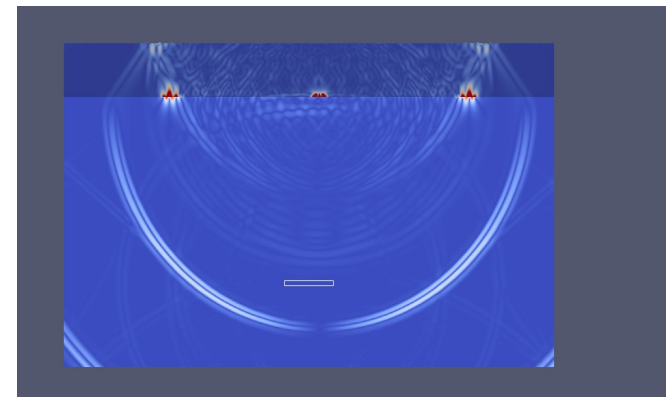
Time-110



Time-140



Time-180

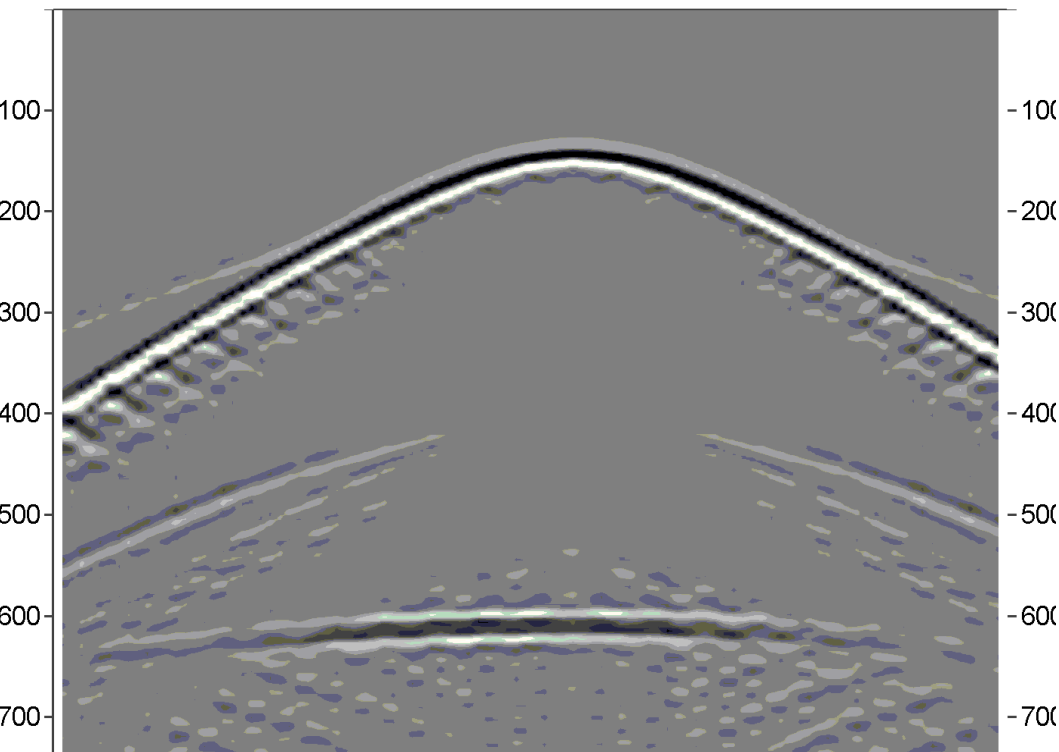


Time-240

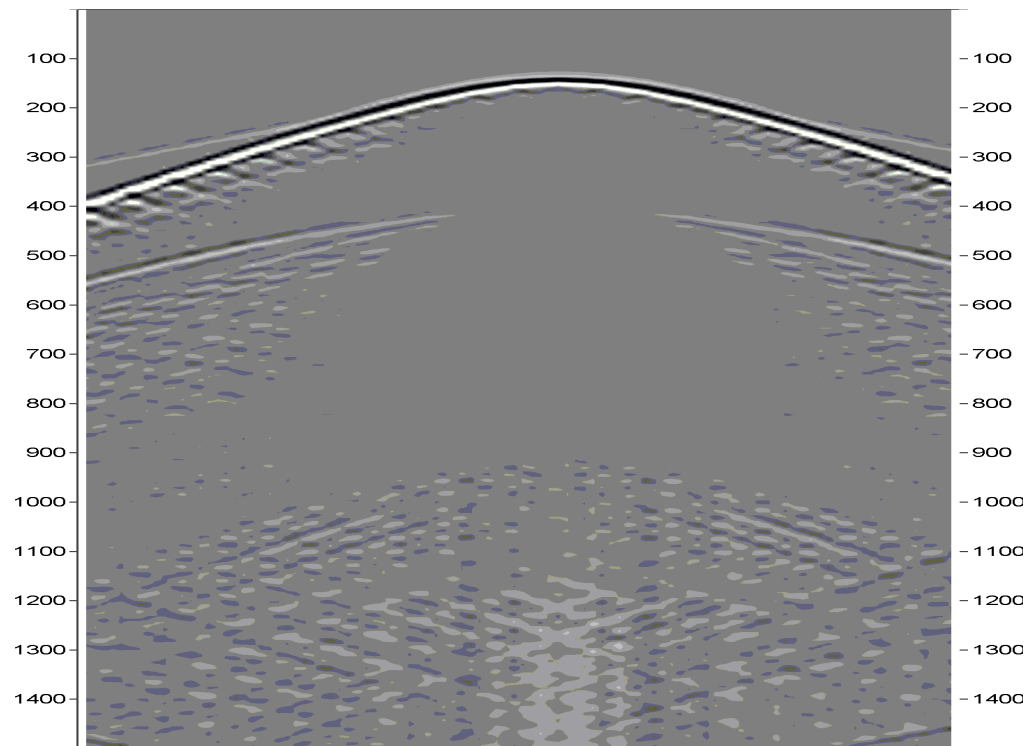
Отражение от нефтегазового слоя

Сейсмограммы: “Ледяное поле”- Вода-Нефтегазовый слой-Земля (источник на дне моря)

Приемники на поверхности



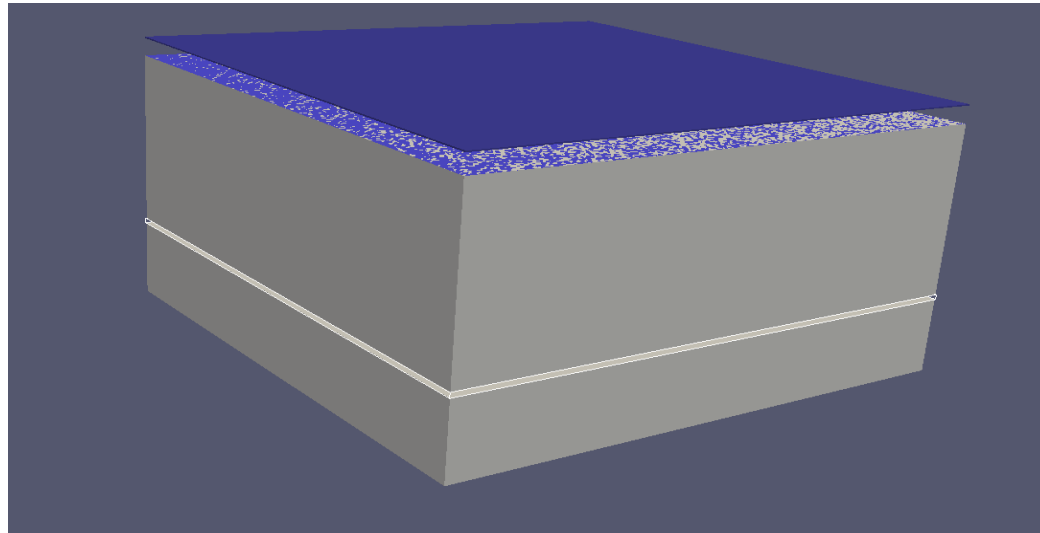
With oil



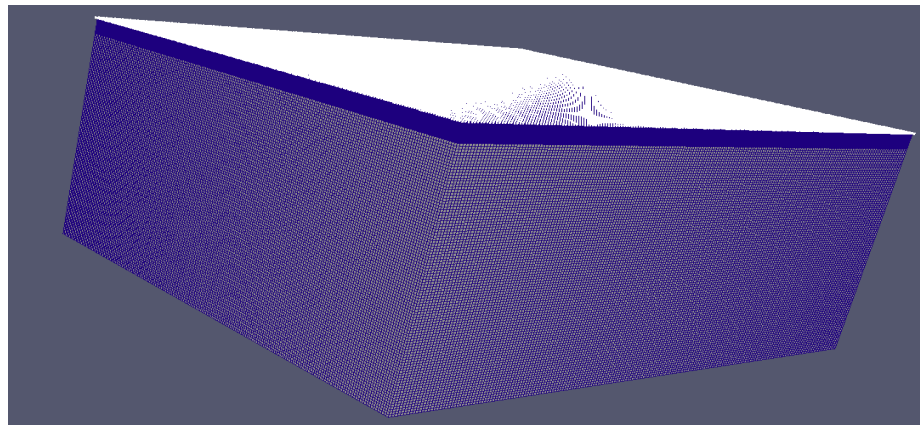
without oil

3D постановки задач

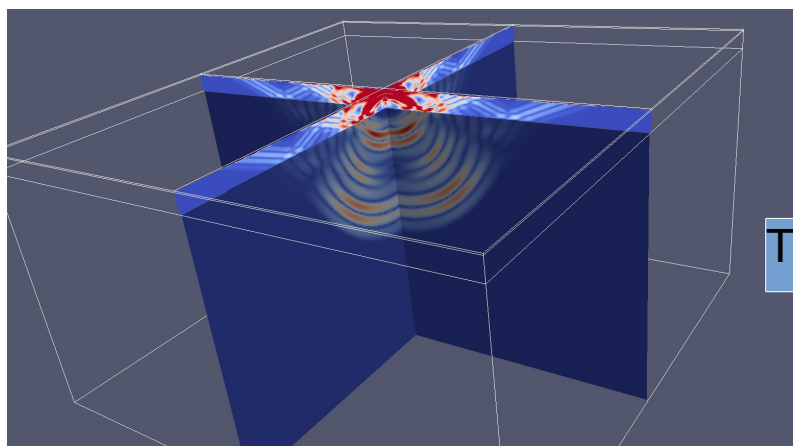
Модель с ледовым покровом и нефтегазовым слоем



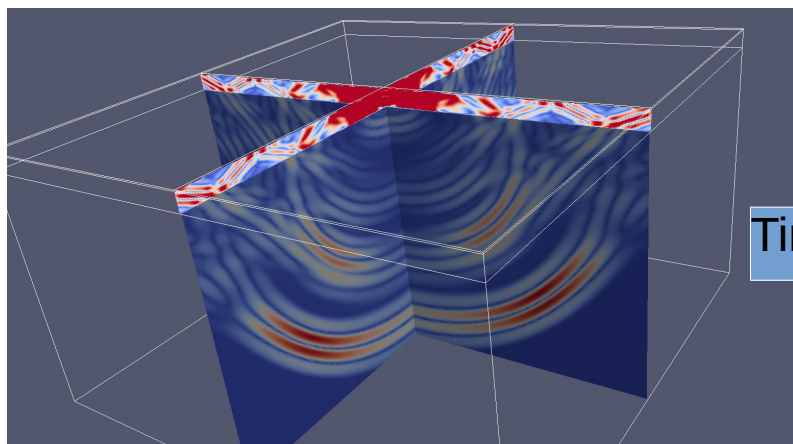
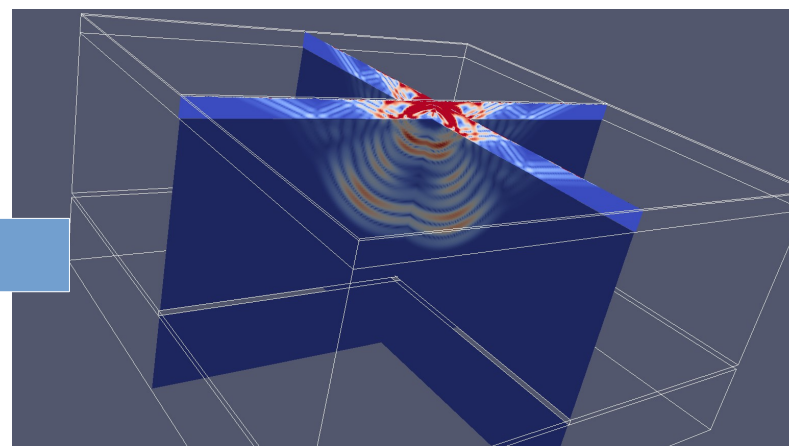
Модель с ледовым покровом без нефтегазового слоя



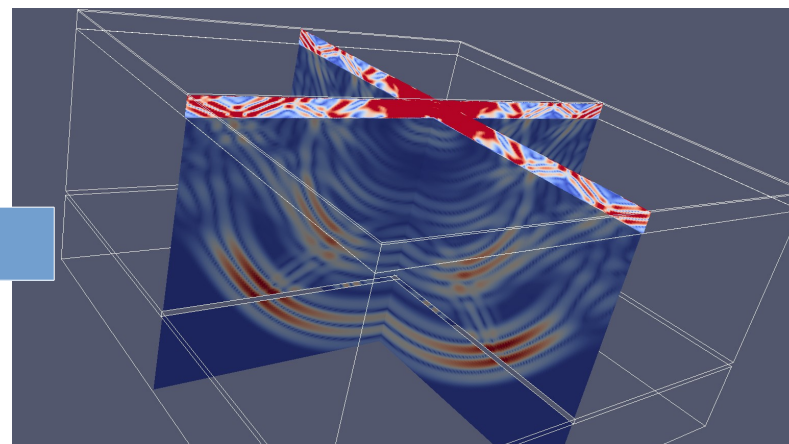
Волновые картины



Time-200



Time-370



Без нефтегазового слоя

с нефтегазовым слоем

Пример расчета с применением схемы высокого порядка точности

Отклик от одиночного импульса Рикера в
многокомпонентной среде

Постоянный шаг по времени $\Delta \tau = 10^{-7} \text{ с}$

500 шагов по пространству

$4 * 10^7$ шагов по времени (0,4 сек.)

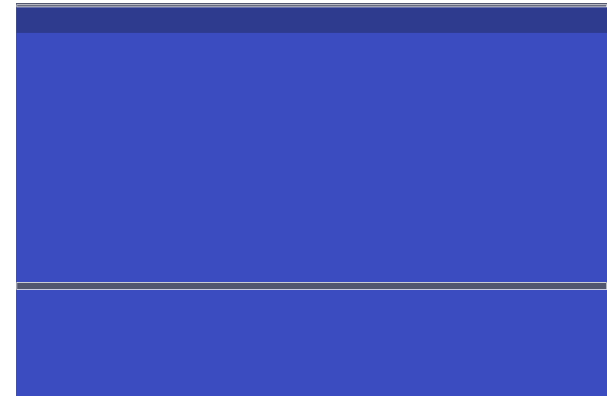
Для численного решения:

центрально-разностная схема 2-го порядка точности по
времени

$$v_t = \frac{v_{j+1} - v_j}{\tau}$$

аппроксимация 4-го порядка точности 2-й производной по
пространству

$$v_{xx} = \frac{-5}{2h^2} v_i + \frac{4}{3h^2} (v_{i+1} + v_{i-1}) - \frac{1}{12h^2} (v_{i+2} + v_{i-2})$$



Результаты:

- Проведен обзор численных методов для решения волнового уравнения
- Разработаны модели геологических сред и на их основе было произведено моделирование и анализ сейсмических откликов в морях при наличии/отсутствии различных ледовых образований и нефтегазового включения
- Построены соответствующие сейсмограммы откликов от нефтегазового слоя и сделаны выводы о наилучшей постановке источника импульса и датчиков в реальных условиях
- Начато исследование схем высокого порядка точности

Публикации, конференции:

- Журнал "Труды МФТИ" том7 №4 (28) (2015)-Петров Д.И., Стогний П.В., Хохлов Н.И.- "Численное моделирование влияния ледовых образований на сейсмические отклики сеточно-характеристическим методом"
<https://mipt.ru/upload/medialibrary/6fa/38-48.pdf>
- 58 научная конференция МФТИ:
«Влияние ледовых образований на сейсмические отклики»,
авторы: П.В. Стогний, Д.И. Петров, Н.И. Хохлов, И.Б. Петров
http://conf58.mipt.ru/static/reports_pdf/29.pdf
- GERMAN-RUSSIAN CONFERENCE «Supercomputing in scientific and industrial problems»:
«Computer modeling of influence of ice structures on seismic replies in the arctic»,
Авторы: D.Petrov, N.Khokhlov, I.Petrov, P.Stognii

Дальнейшее направление работы в рамках магистратуры:

- Сделать расчеты моделей, полученных в 2D, в 3D
- Продолжить анализ схем высокого порядка точности

Спасибо за внимание!