

# **ОБРАЩЕНИЕ ПОЛНОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

**Обращение полного волнового поля: от верхней части разреза до глубинных горизонтов. История, современное состояние, перспективы развития**

Чеверда Владимир Альбертович ИНГГ СО РАН  
Гадыльшин Кирилл Геннадьевич ИНГГ СО РАН  
Твердохлебов Данила Николаевич ООО «РН-Эксплорейшн»

## Содержание

### **История развития методов обращения полного волнового поля**

Мотивация

Восстановление ВЧР методом обращения полного волнового поля (FWI) с использованием кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности

Восстановление глубинных целевых горизонтов и высокочастотный FWI

Основные направления развития

Выводы

# Немного истории

В своём настоящем виде метод полного обращения ведёт начало от работ французских математиков Albert Trantola и Guy Chavent 70х – 80х годов прошлого века. Упомяну лишь две из них:

A.Bamberger, G.Chavent, Ch.Hemon, P.Lailly. Inversion of normal incidence seismograms // Geophysics. – 1982. – v.47(5). – 757 – 842.

A.Tarantola Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation // Geophysics. – 1984. – v. 49(8). – 1140 – 1395.

Проблема, известная сейчас как “cycle skipping” была впервые описана в работе

Gauthier, O., J. Virieux, and A. Tarantola, 1986, Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: Numerical results: Geophysics, 51, 1387–1403

# Немного истории: “cycle skipping problem”

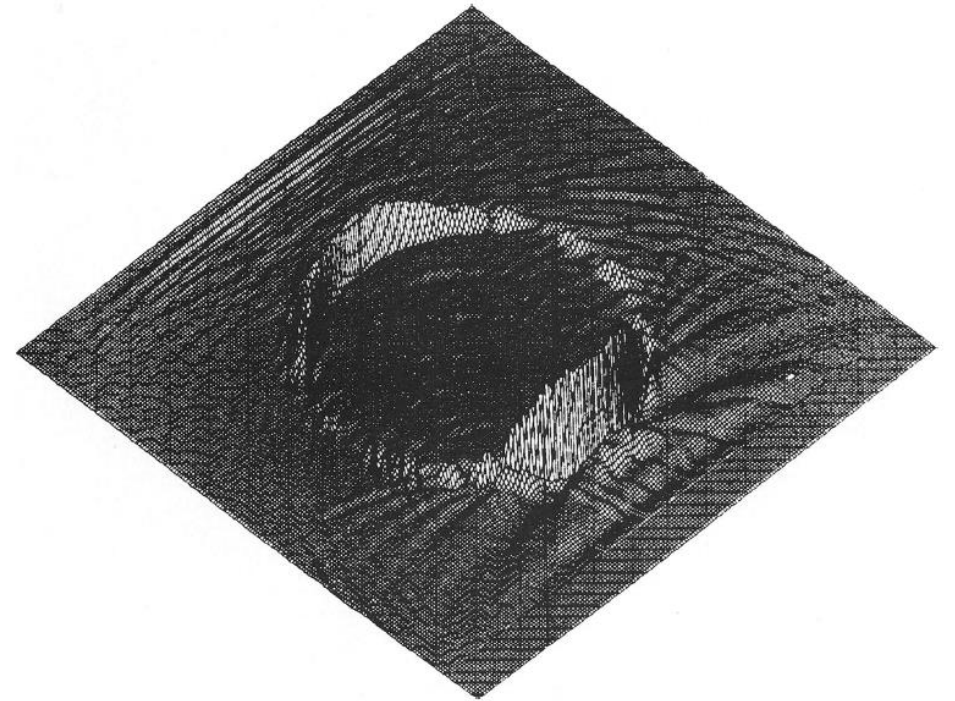
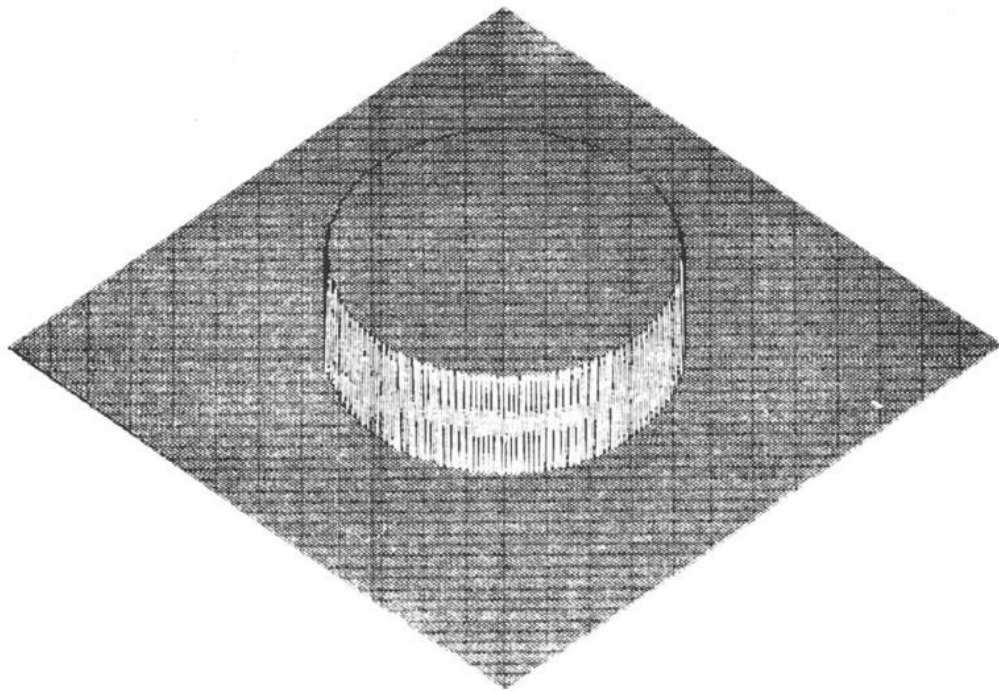


Рисунок из: Gauthier, Virieux and Tarantola; 1986

# Немного истории

Пути преодоления этой проблемы:

- Расширение диапазона временных частот в сторону низких частот;
- Увеличение выноса.
- Модификация целевого функционала: отдельное отыскание макроскоростной составляющей и отражателей (Гадыльшин и Чеверда, 2021)

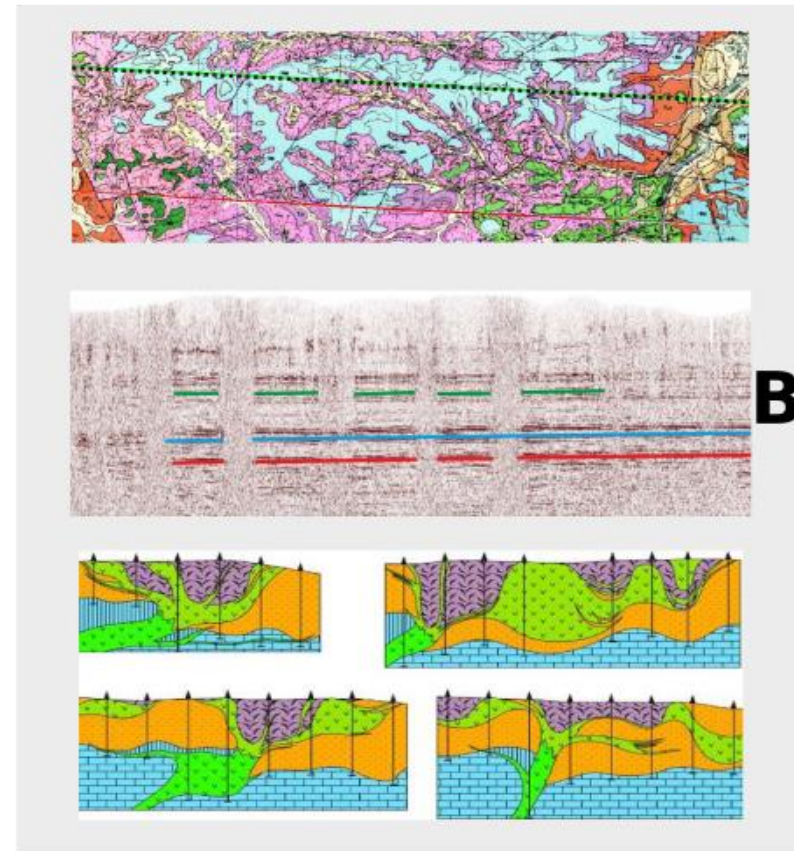
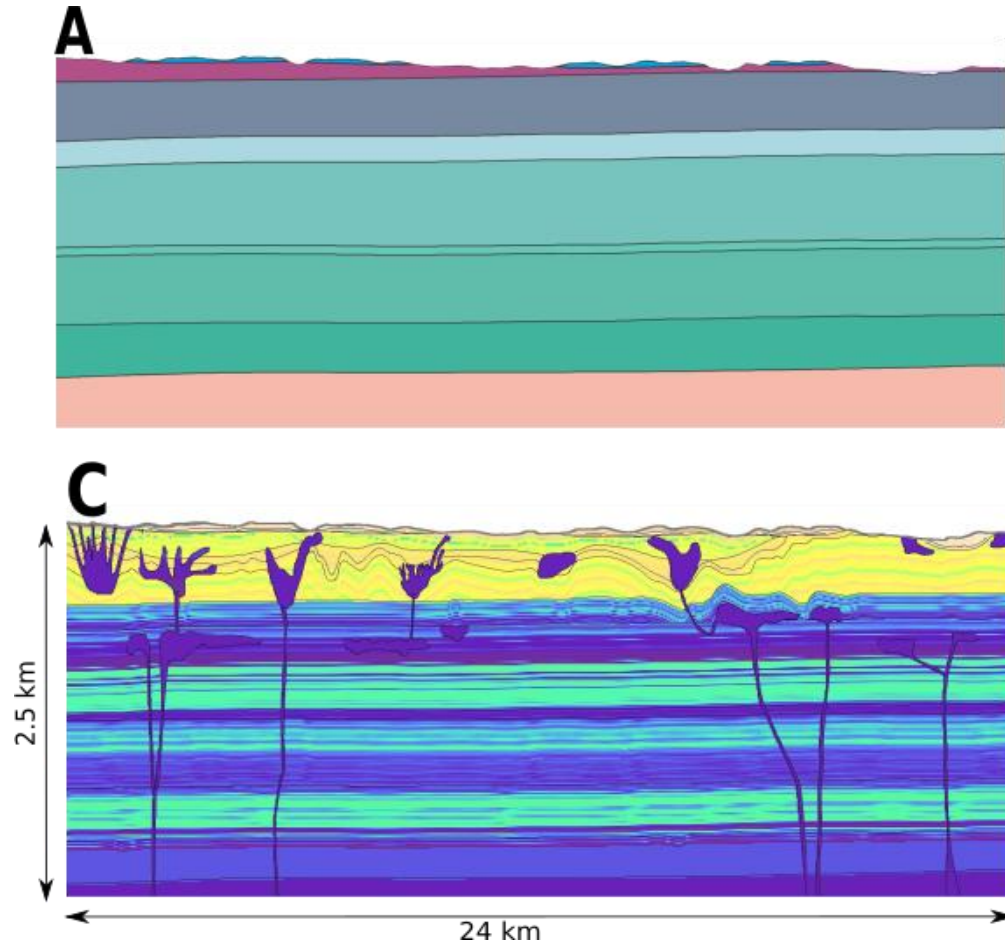
Это не единственная проблема, которая была преодолена, прежде чем метод обращения полного волнового поля начал применяться в промышленности.

Более детально современное состояние: Gang Yao, Di Wu and Shang-Xu Wang. A review on reflection-waveform inversion. *Petroleum Science* **volume 17**, pages 334–351 (2020)

# Содержание

- История развития методов обращения полного волнового поля
- **Мотивация**
- Восстановление ВЧР методом обращения полного волнового поля (FWI) с использованием кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности
- Восстановление глубинных целевых горизонтов и высокочастотный FWI
- Основные направления развития
- Выводы

# Мотивация: сложная ВЧР



## Содержание

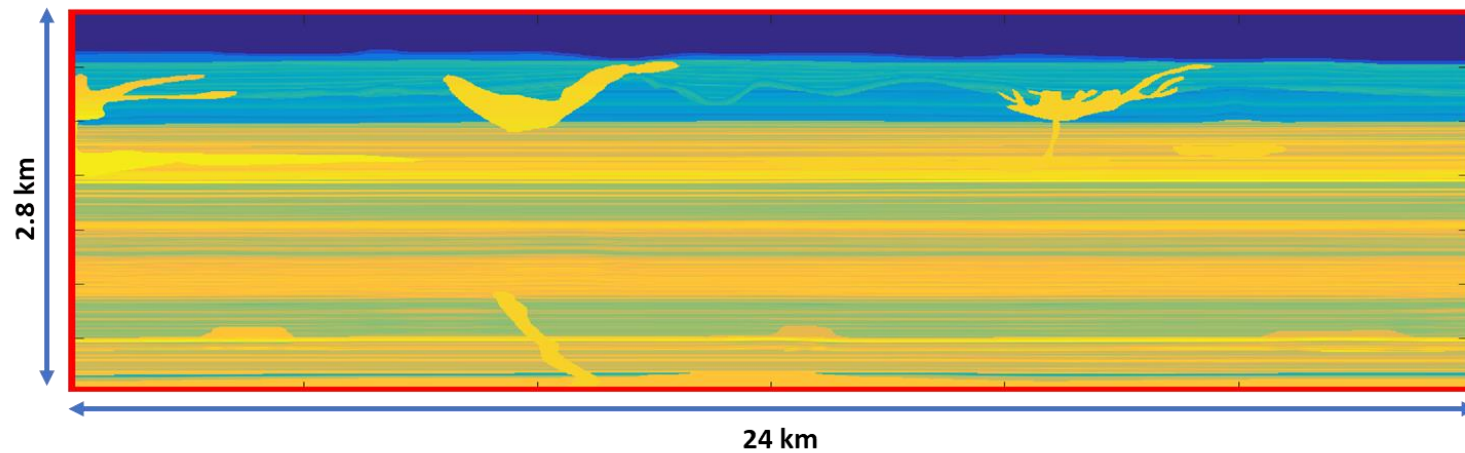
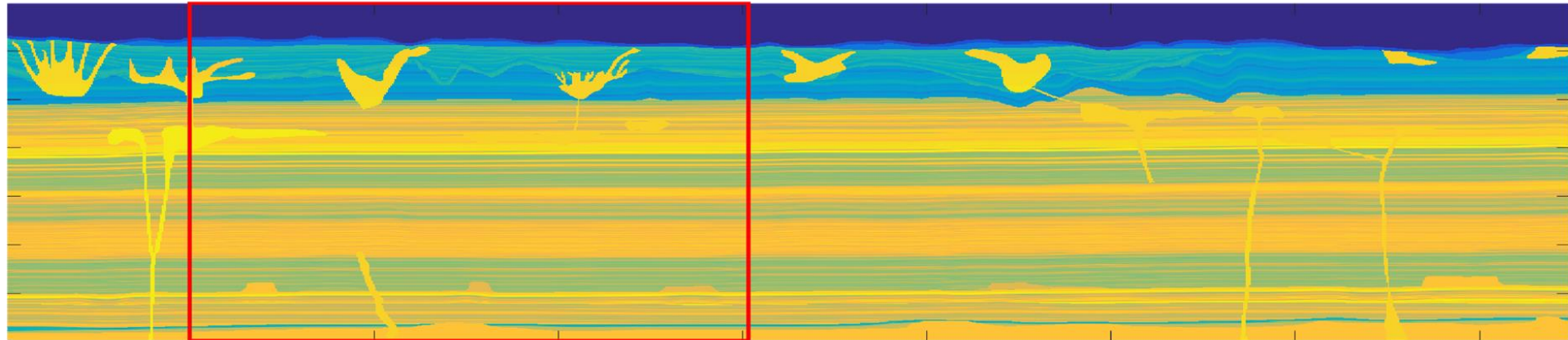
- История развития методов обращения полного волнового поля
- **Мотивация**
- Восстановление ВЧР методом обращения полного волнового поля (FWI) с использованием кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности
- Восстановление глубинных целевых горизонтов и высокочастотный FWI
- Основные направления развития
- Выводы



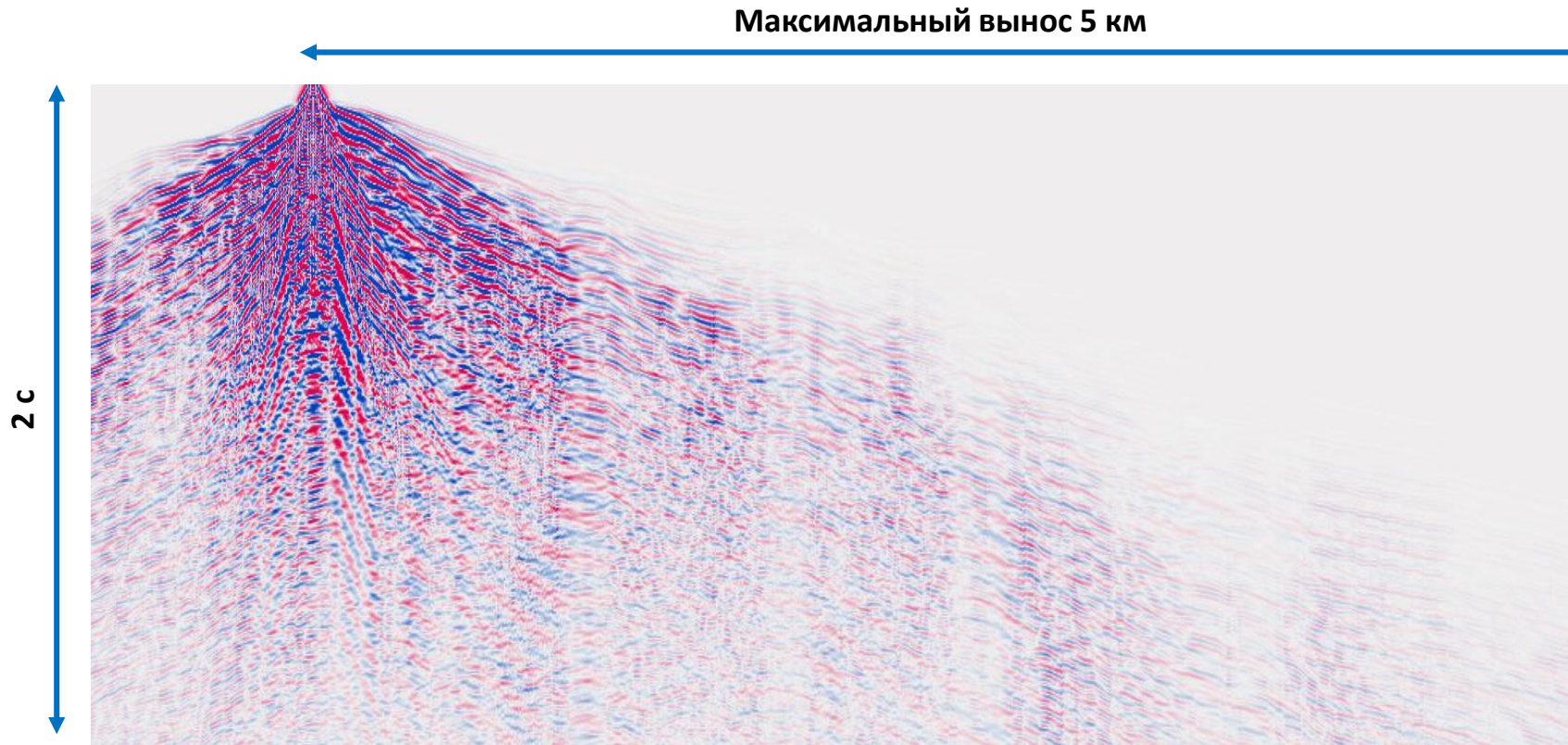
# Откуда взялась модель?

Район работ принадлежит к Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области (НГО) в составе Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (НГП) Сибирской платформы. Согласно административному делению, участок исследований находится на территории Катангского района Иркутской области, Ленского и Мирнинского района Республики Саха (Якутия) и является одним из ведущих районов в промышленном освоении Восточной Сибири. Исследуемая территория довольно хорошо освещена данными сейсморазведки. В пределах лицензионных участков отработаны более 13 тыс. пог. км. профилей 2D сейсморазведки. В настоящее время рассматриваемая территория Непско-Ботуобинской антиклизы интенсивно изучается трехмерными сейсморазведочными работами.

# Модель со сложной ВЧР и топографией



# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

## **FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

## **Частоты** для FWI:

Этап1: 3-10Гц

Этап 2: 3-10Гц без кратных

Этап 3: 8-20Гц без кратных

Этап 4: 15-30Гц без кратных

Этап 5: 20-40Гц без кратных

Этап 6: 35-70Гц без кратных

# Метод

**Fourier transform of time data  $\longrightarrow$  frequency data**

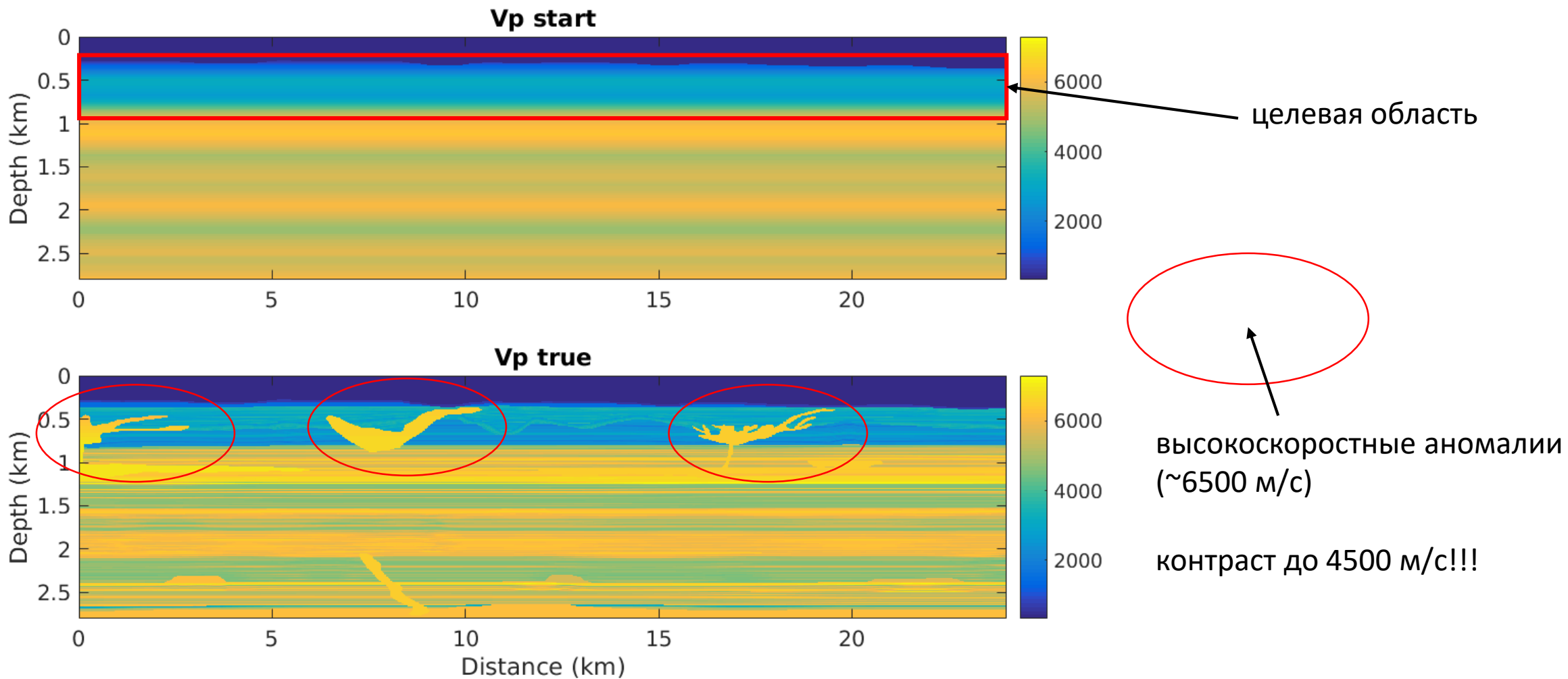
$$d_{calc}(x_r, x_s; t) \rightarrow \hat{d}_{calc}(x_r, x_s; \omega)$$

$$d_{obs}(x_r, x_s; t) \rightarrow \hat{d}_{obs}(x_r, x_s; \omega)$$

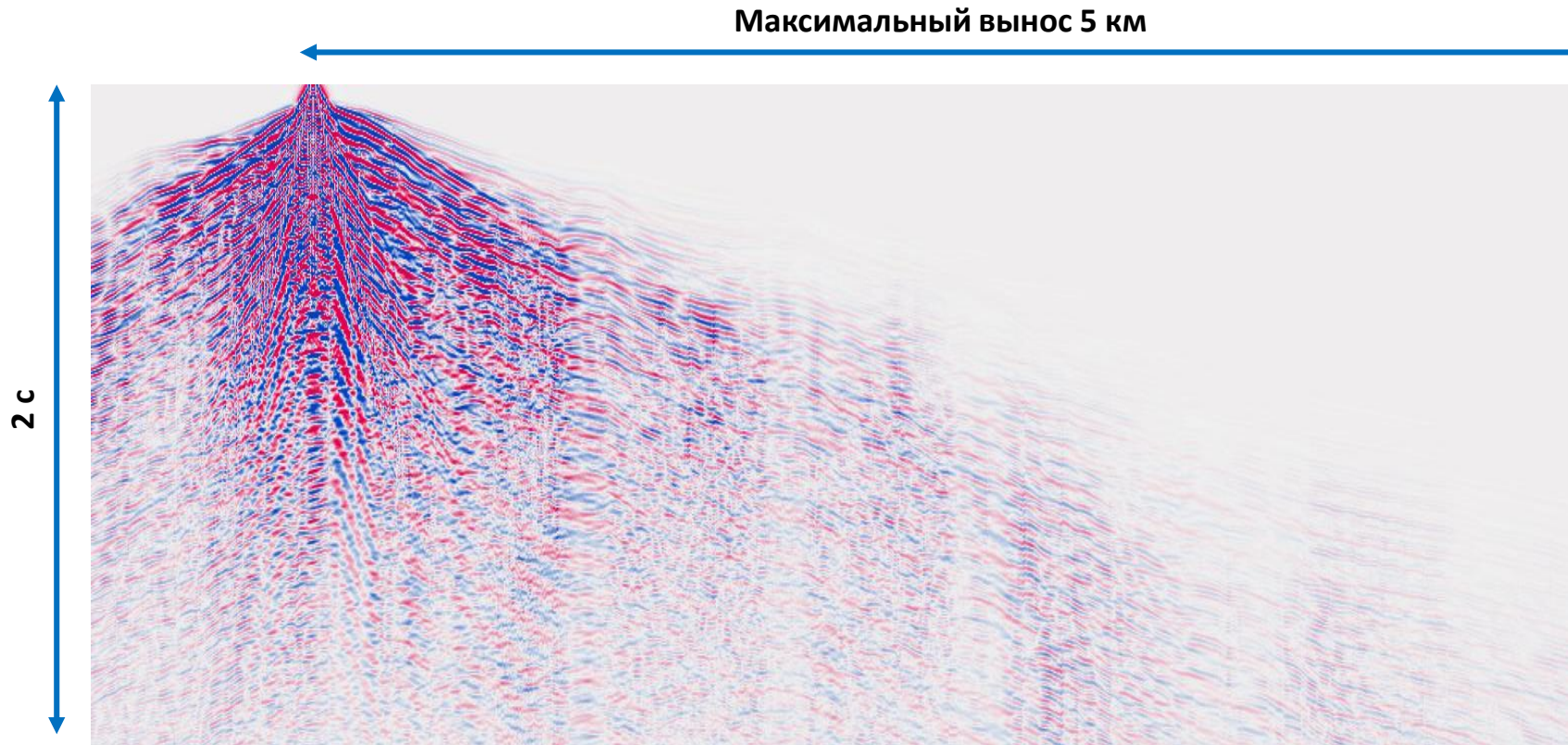
**L2 FWI misfit functional in frequency domain**

$$\frac{1}{2} \sum_s \sum_r \sum_\omega \|\hat{d}_{obs}(x_r, x_s; \omega) - \hat{d}_{calc}(x_r, x_s; \omega)\|_C^2$$

# Этап1: ВЧР реконструкция с использованием кратных волн



# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

**FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

**Частоты** для FWI:

**Этап1: 3-10Гц**

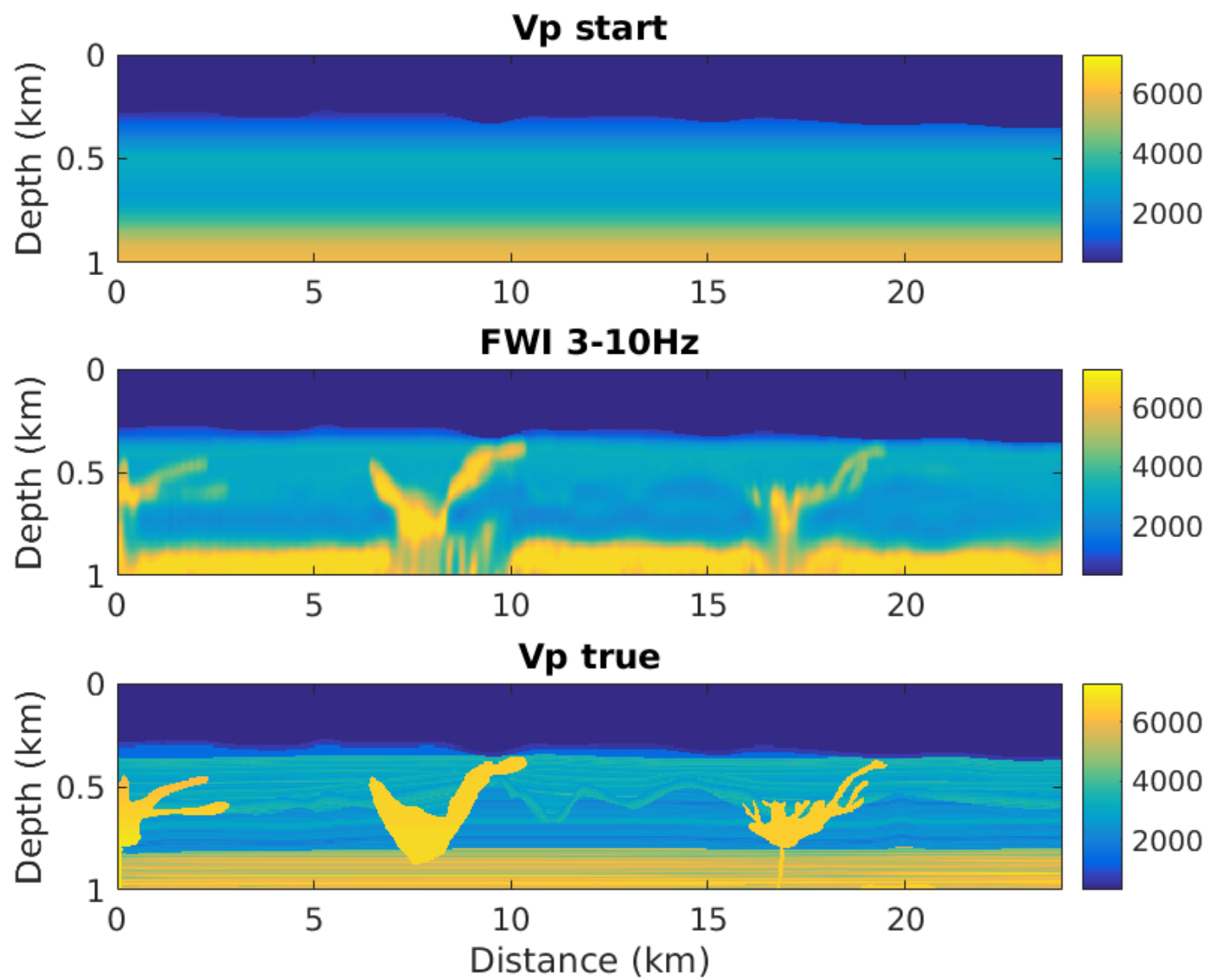
Этап 2: 3-10Гц без кратных

Этап 3: 8-20Гц без кратных

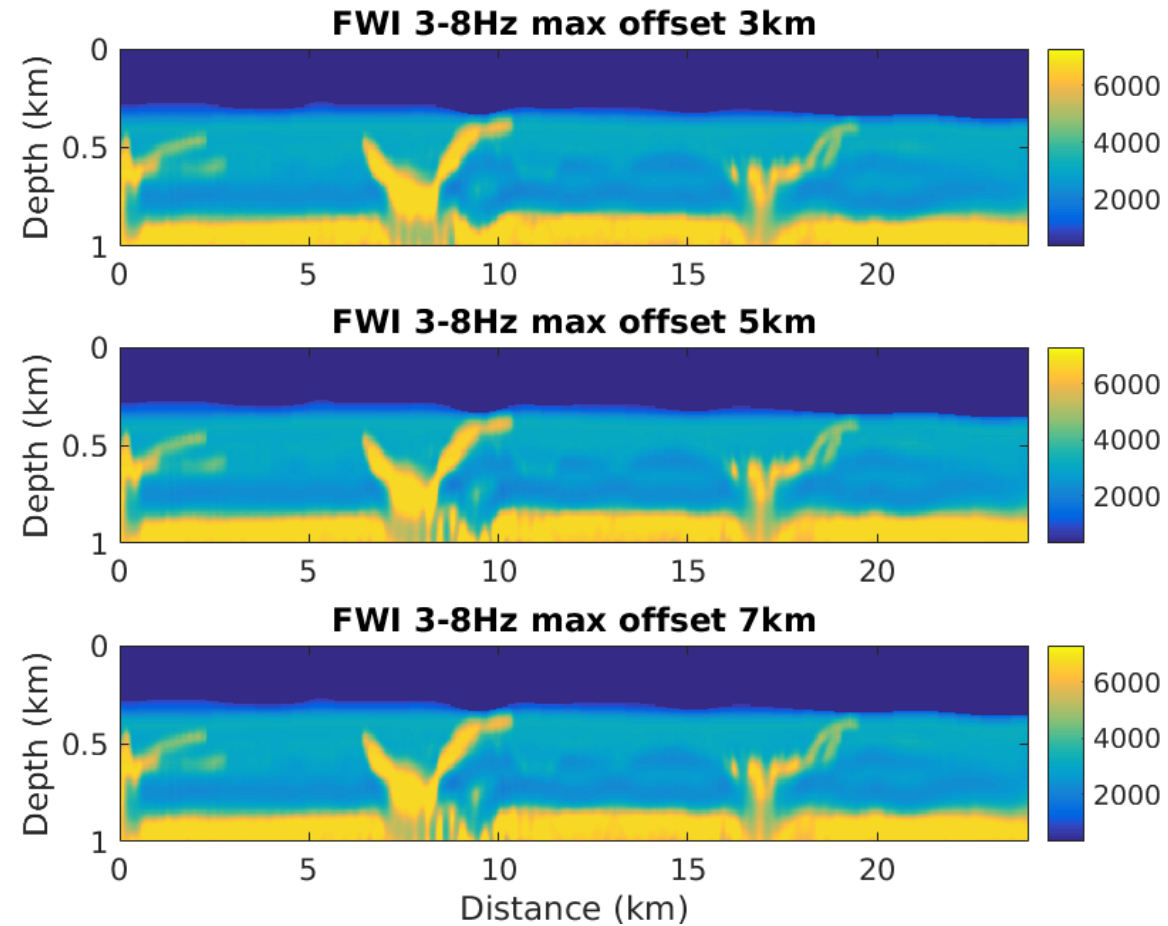
Этап 4: 15-30Гц без кратных

Этап 5: 20-40Гц без кратных

Этап 6: 35-70Гц без кратных

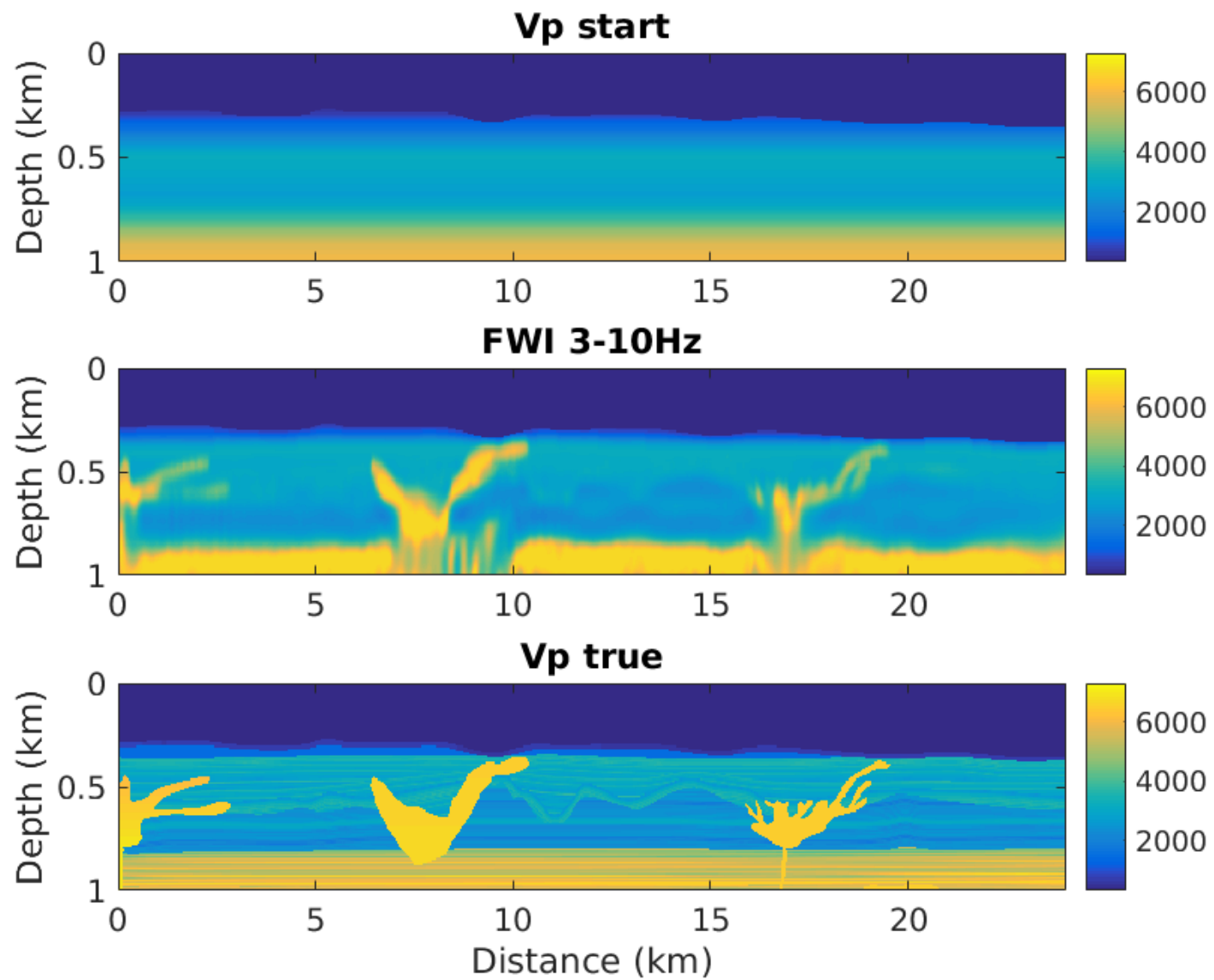


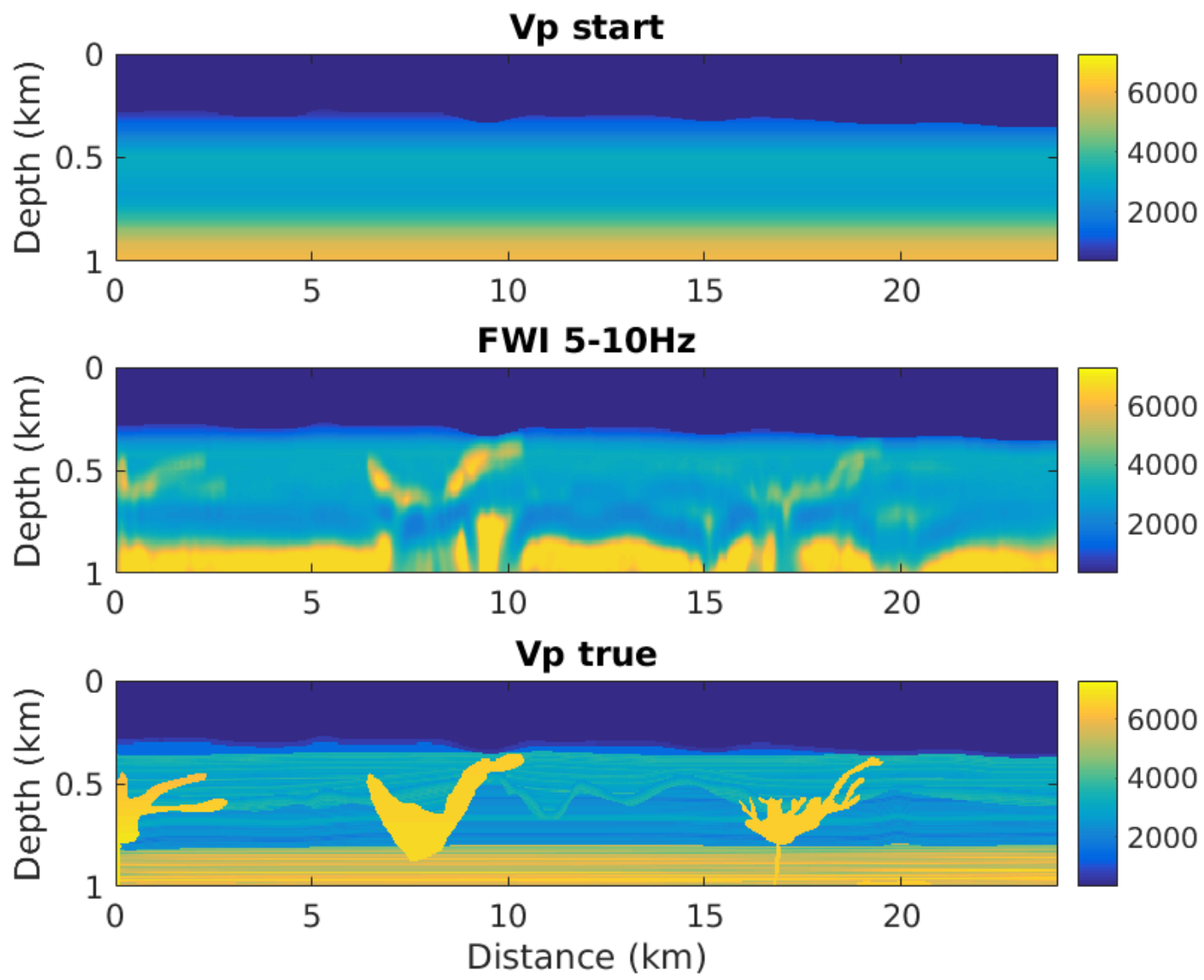
# Влияние максимального выноса на восстановление ВЧР

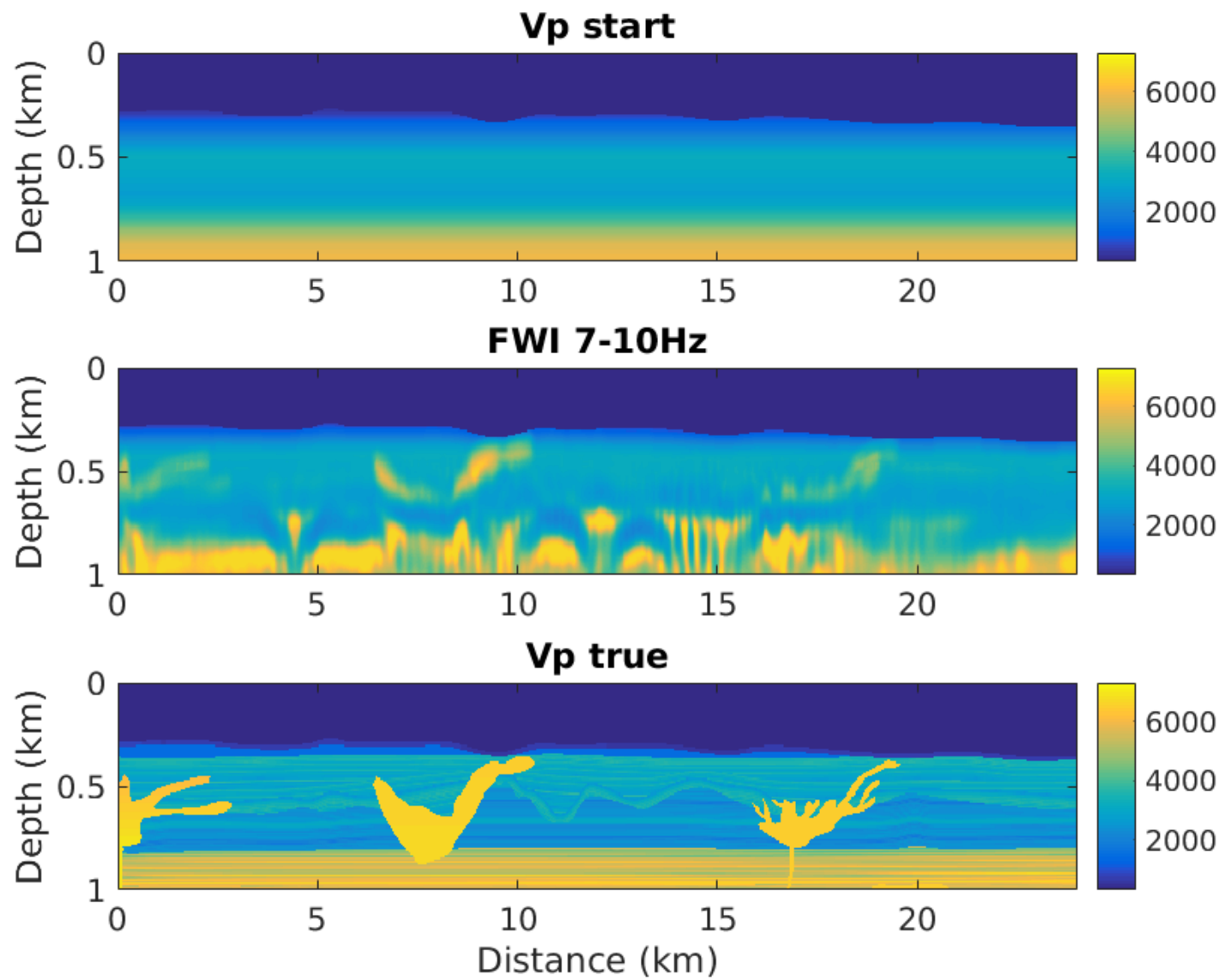


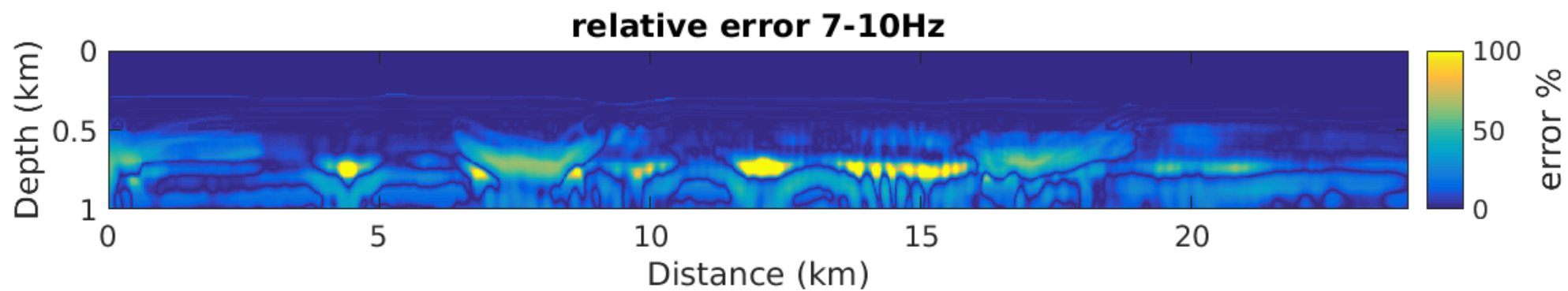
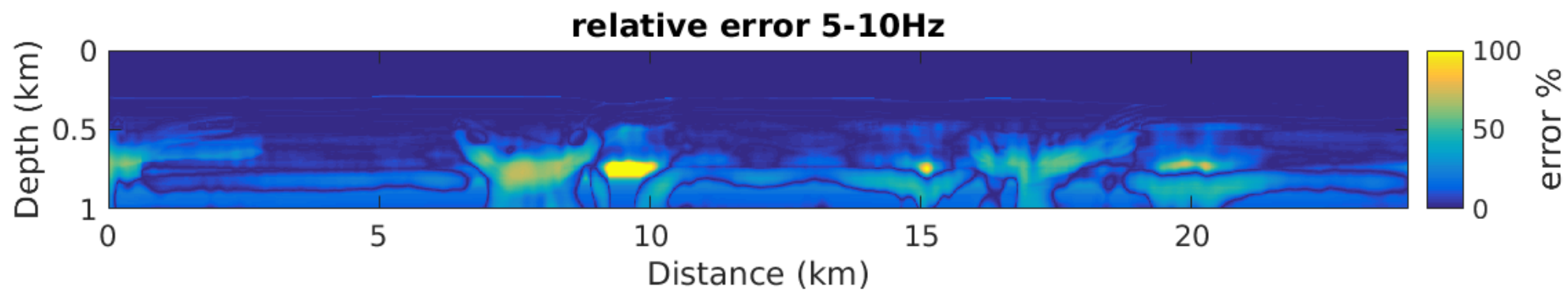
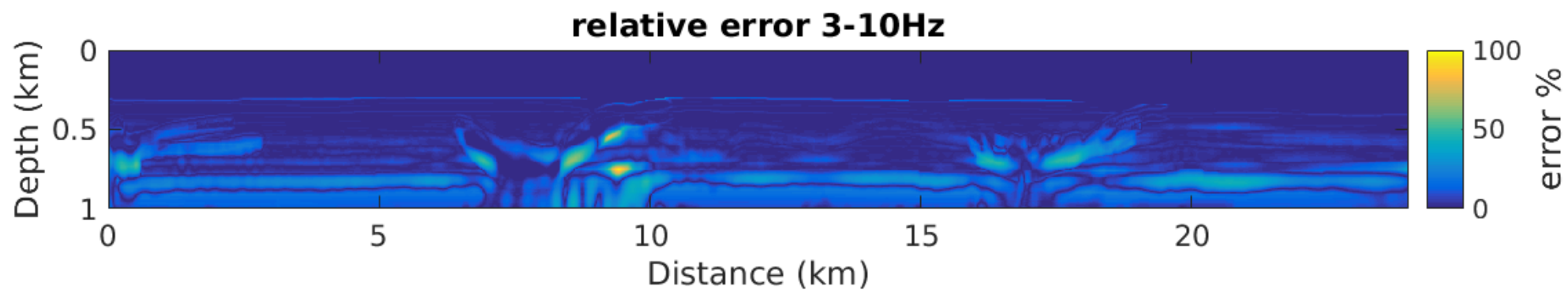


Как минимальная доступная  
временная частота в  
наблюденных данных влияет на  
результаты обращения?

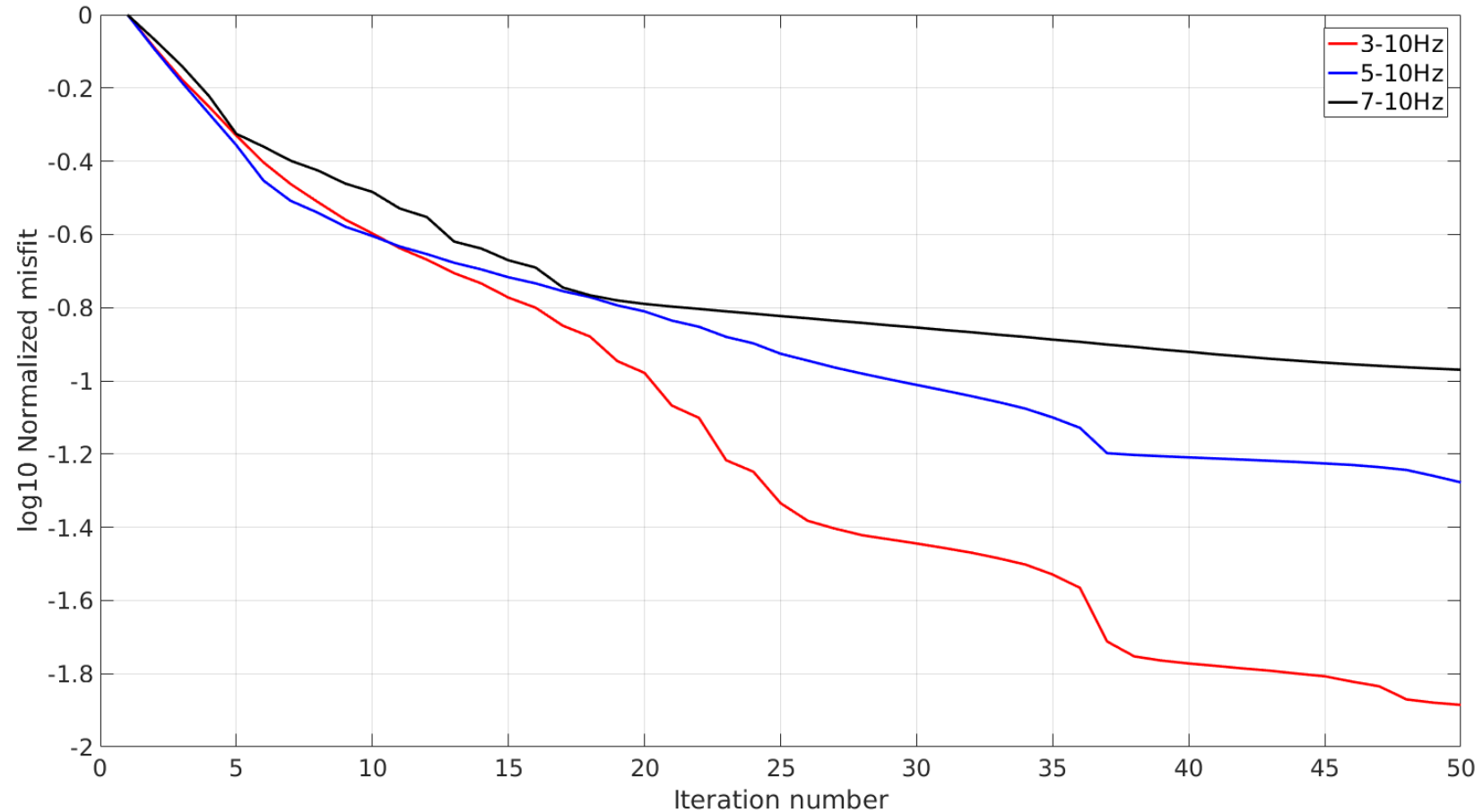






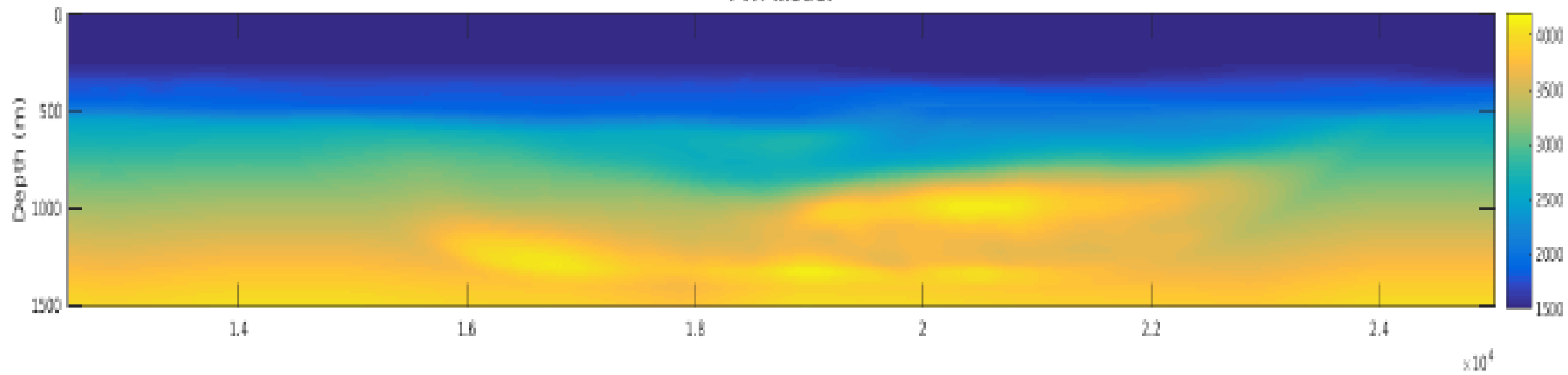


# Поведение целевого функционала FWI для различных сценариев

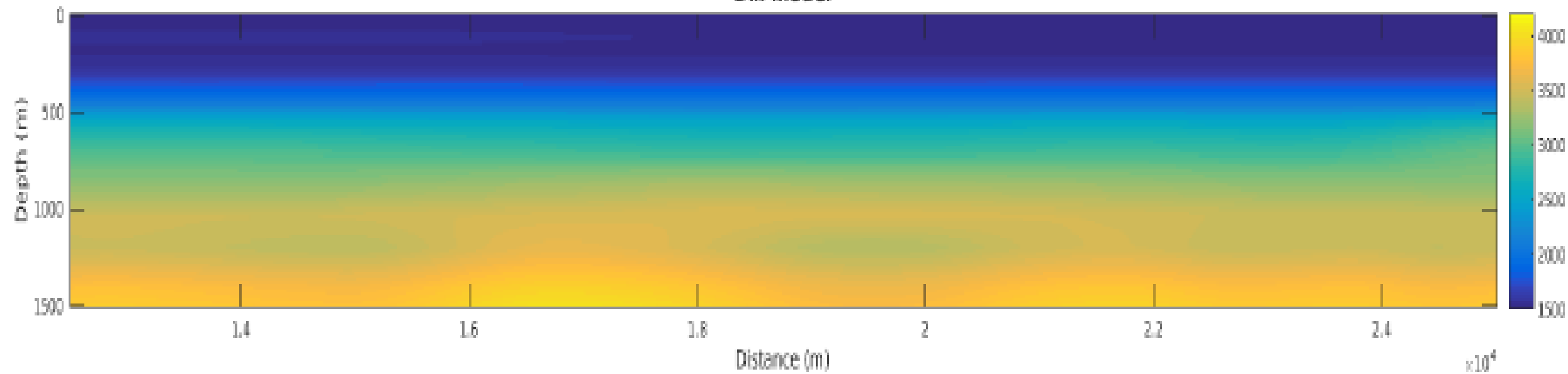


# Обработка данных морских наблюдений

**FWI model**

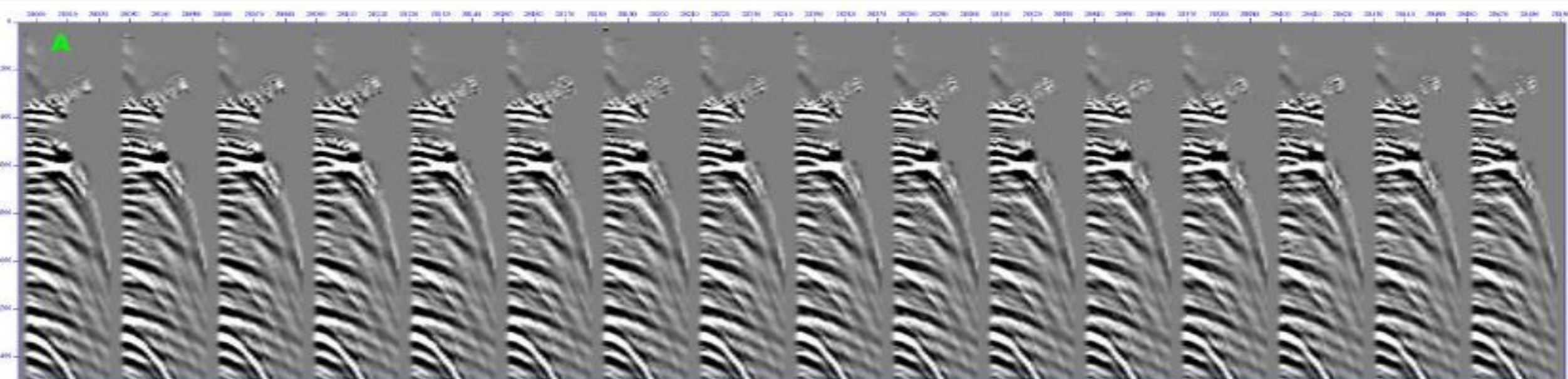


**Dix model**

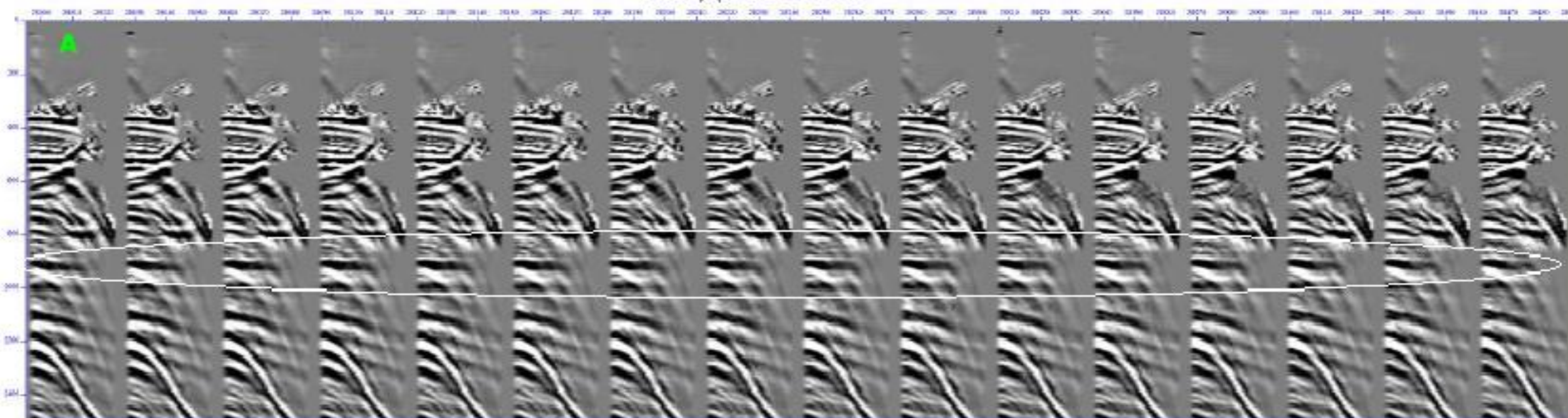




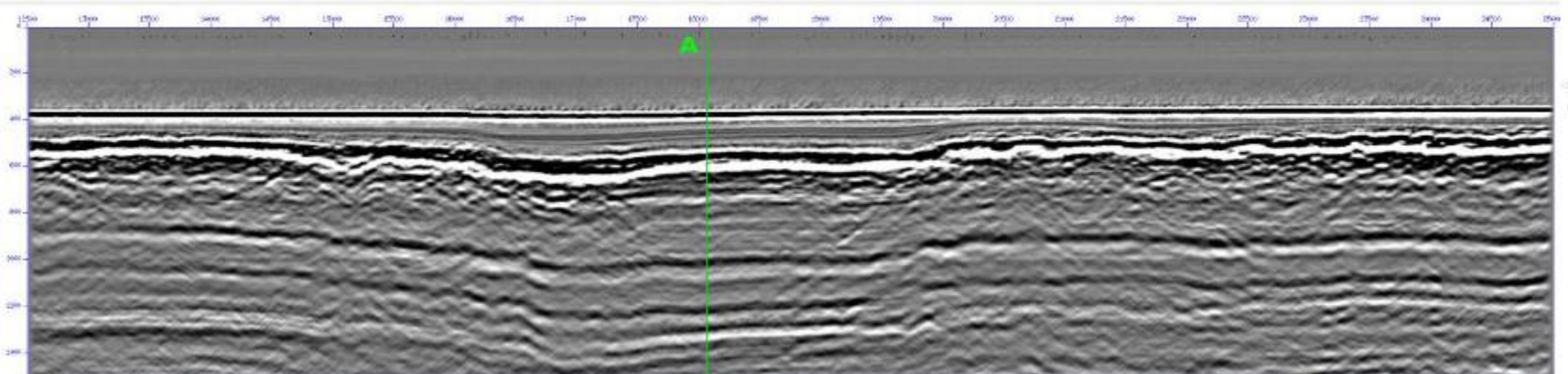
## Модель Дикса



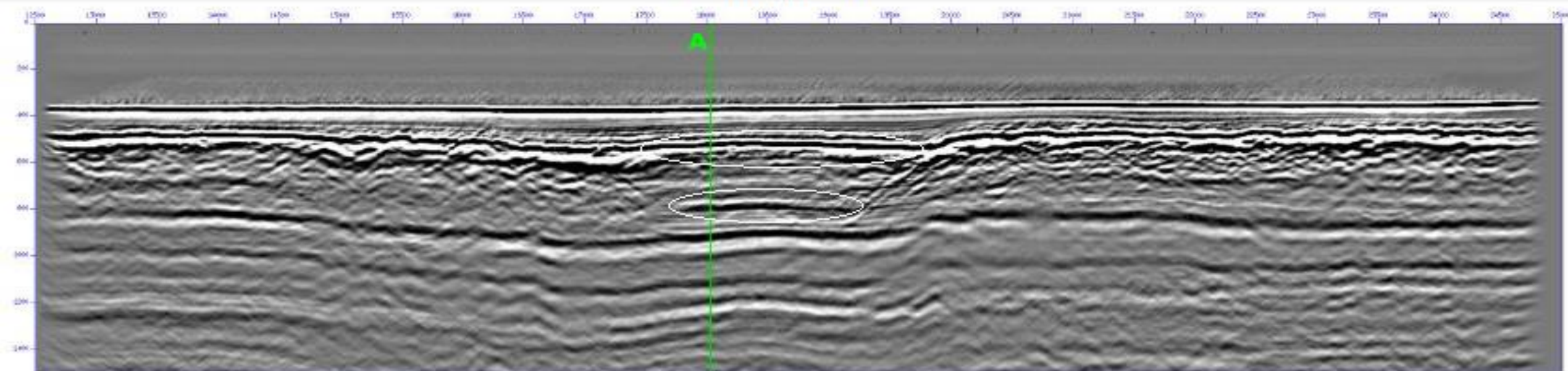
## Модель FWI



## Модель Дикса



## FWI модель



# Содержание

- История развития методов обращения полного волнового поля
- Мотивация
- Восстановление ВЧР методом обращения полного волнового поля (FWI) с использованием кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности
- Восстановление глубинных целевых горизонтов и высокочастотный FWI
- Основные направления развития
- Выводы

# Влияние кратных от свободной поверхности

В наших предыдущих работах была исследована роль кратных волн в выполнении FWI:

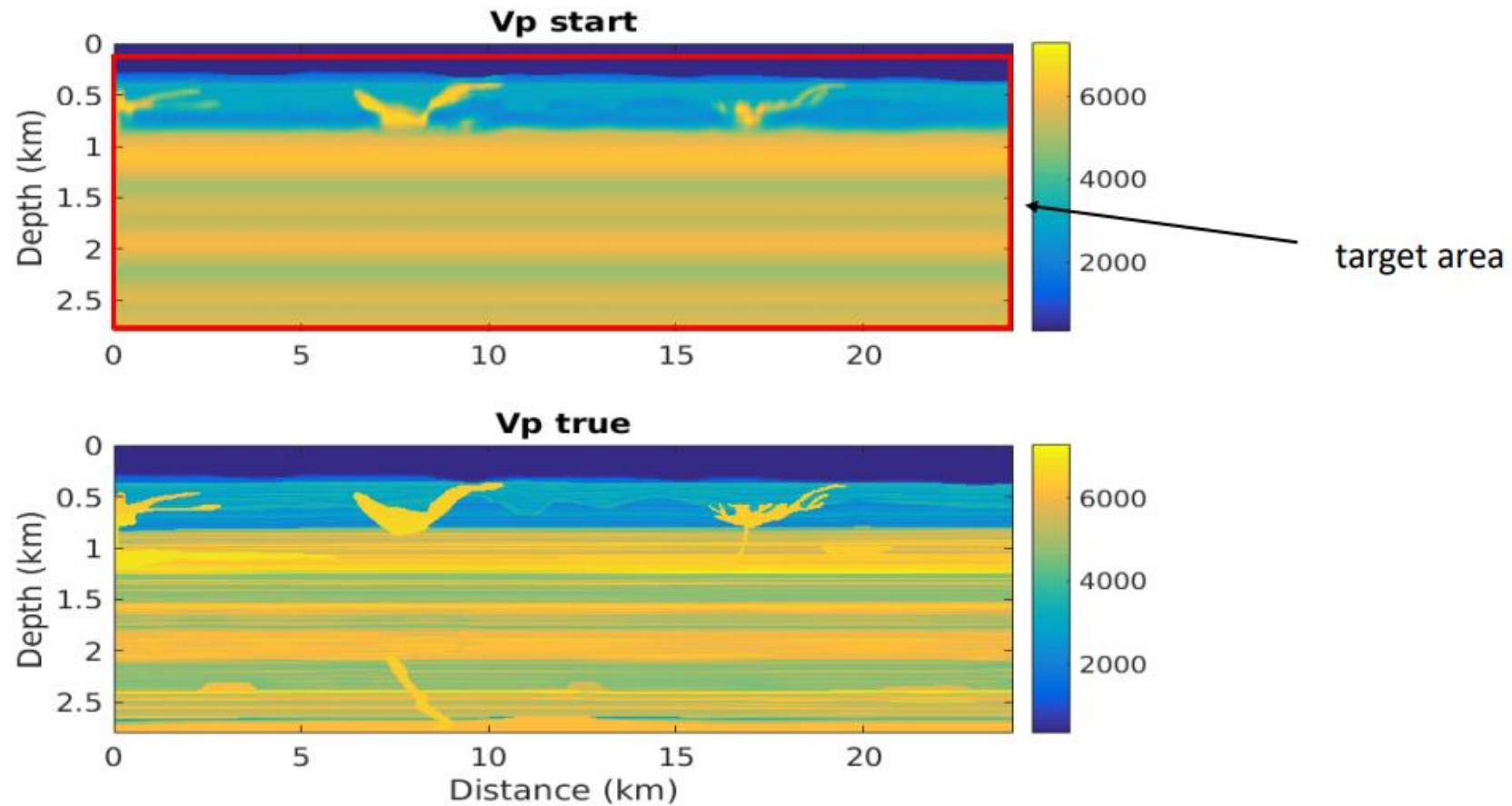
Вовлечение в обработку кратных волн ухудшает разрешающую способность, но заметно повышает устойчивость результата.

K. Gadylshin, A. Bakulin, M. Dmitriev, P. Golikov, D. Neklyudov, V. Tcheverda. Effect of free-surface related multiples on near surface velocity reconstruction with acoustic frequency domain FWI. 76th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2014: Experience the Energy - Incorporating SPE EUROPEC 2014, Amsterdam, Netherlands, 16-19 June 2014, 357-361 (2014).

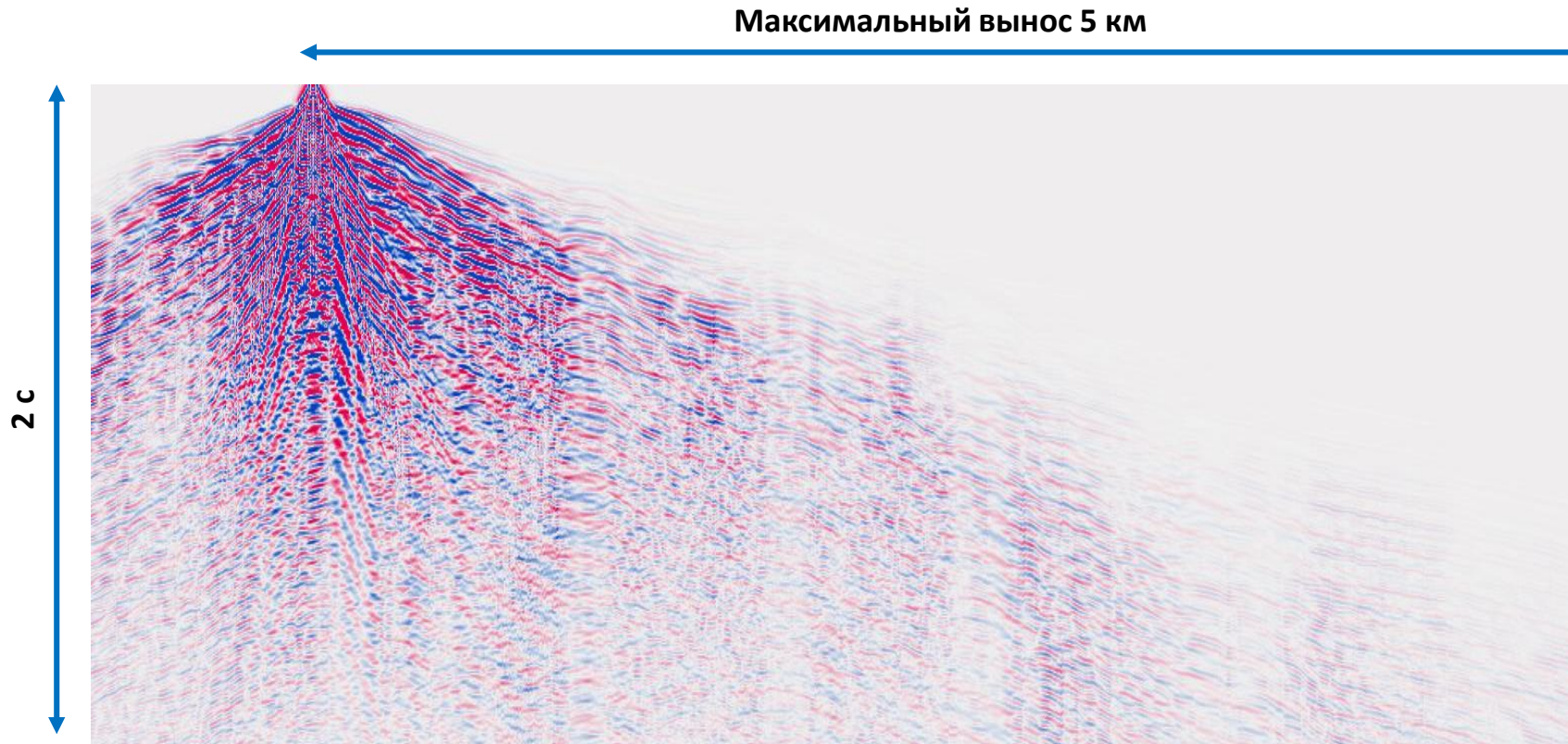
Поэтому обработка выполнялась в два этапа:

- Полного поля вместе с кратными (ВЧР, уже рассказано);
- Волнового поля после подавления кратных.

## Этап2: FWI без привлечения кратных волн от свободной поверхности



# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

## **FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

## **Частоты** для FWI:

Этап1: 3-10Гц

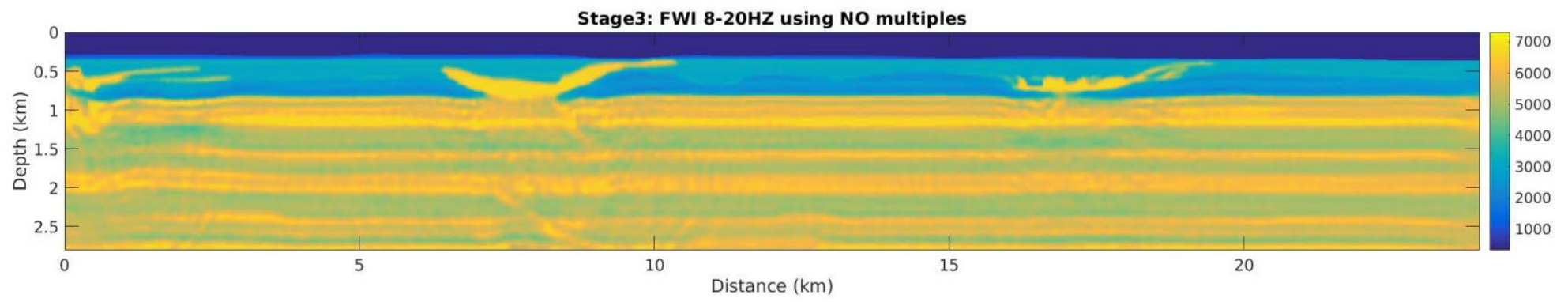
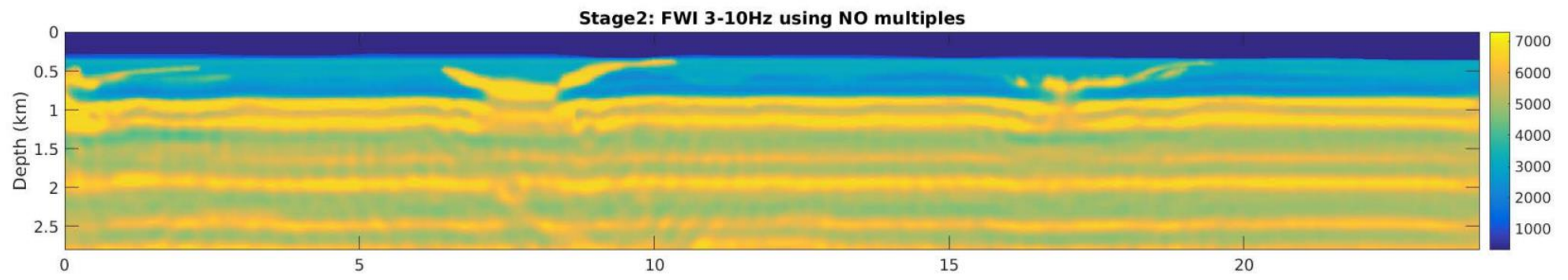
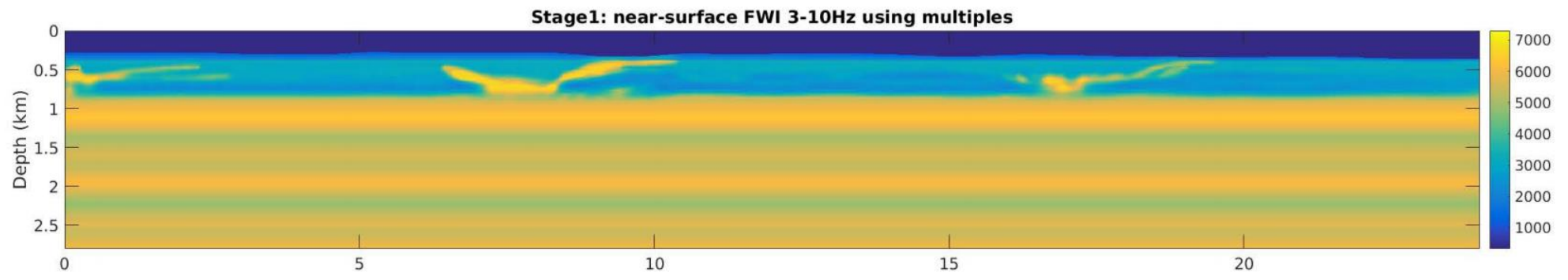
**Этап 2: 3-10Гц без кратных**

Этап 3: 8-20Гц без кратных

Этап 4: 15-30Гц без кратных

Этап 5: 20-40Гц без кратных

Этап 6: 35-70Гц без кратных



цы" перемещается...

дет перемещен в будущем обновлении...

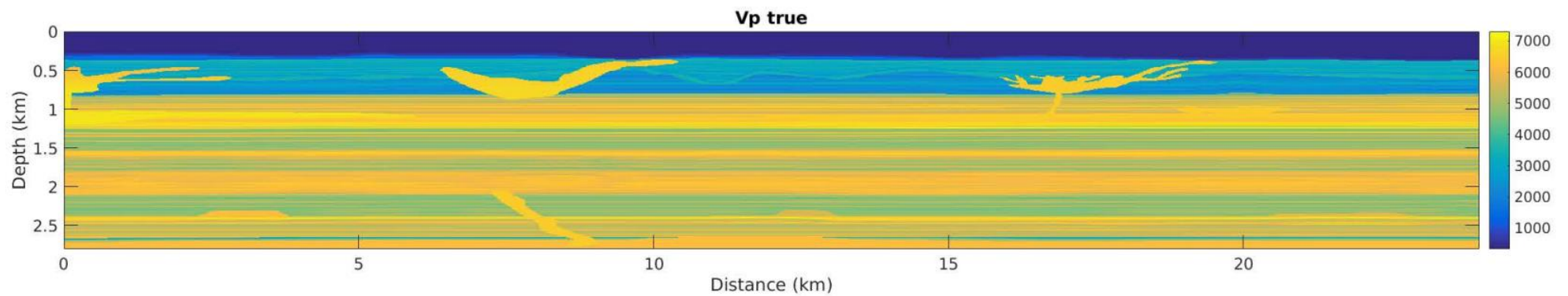
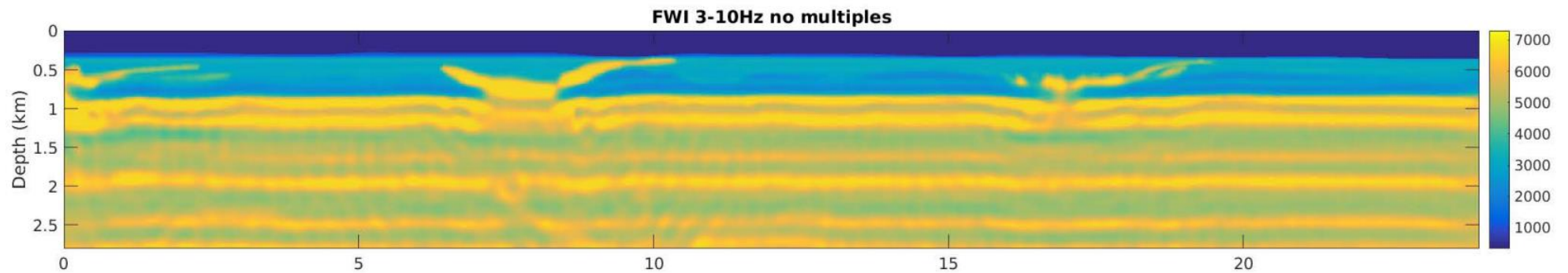
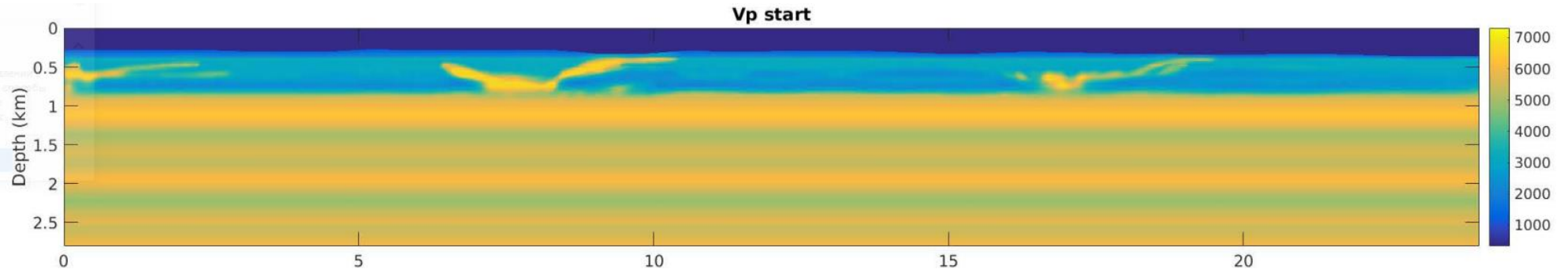
улучшенные функции и обилие со...

справки "Настройка на фронт мекс..."

использовать сочетание клавиш с...

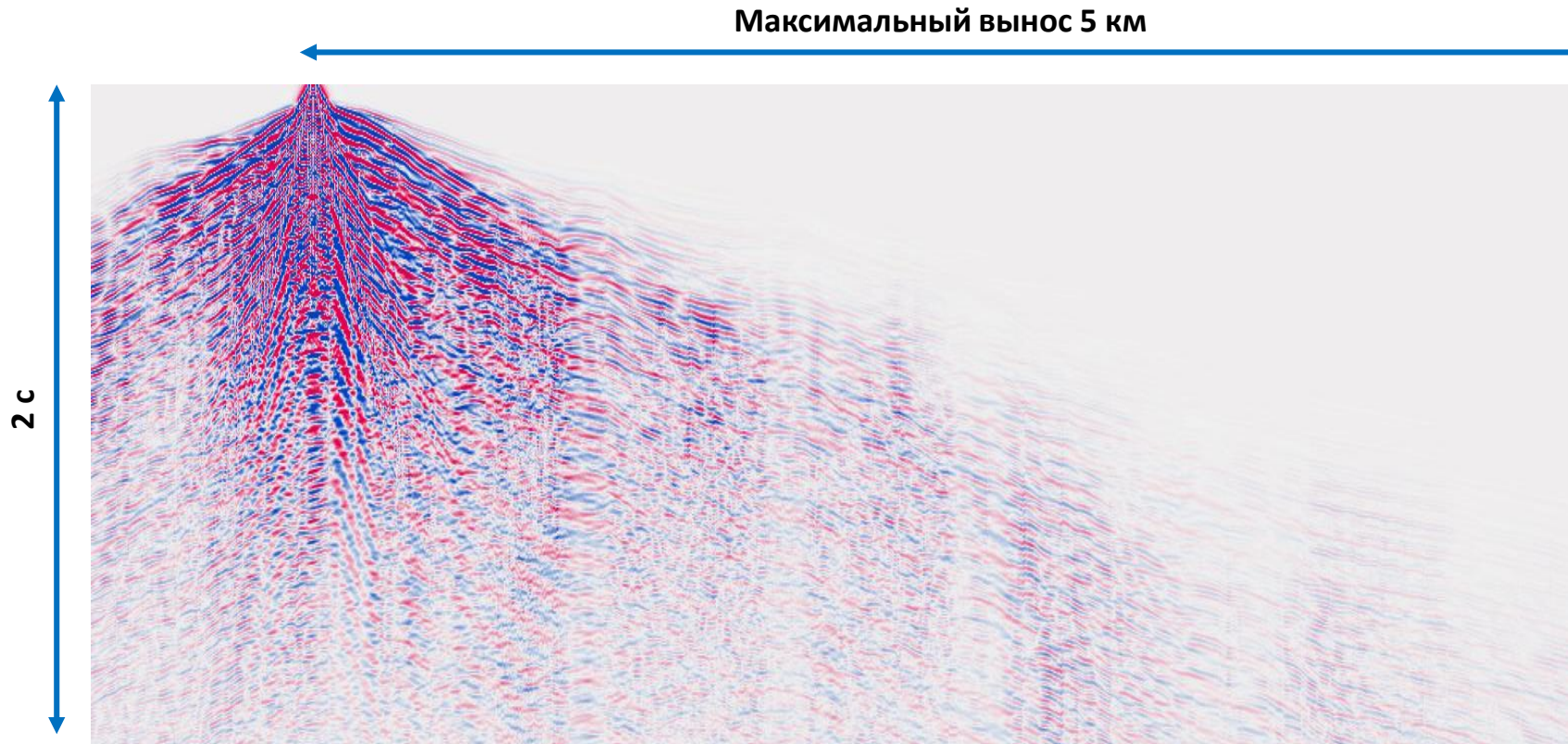
1 + Q.

Настройка на фронт мекс...





# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

## **FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

## **Частоты** для FWI:

Этап1: 3-10Гц

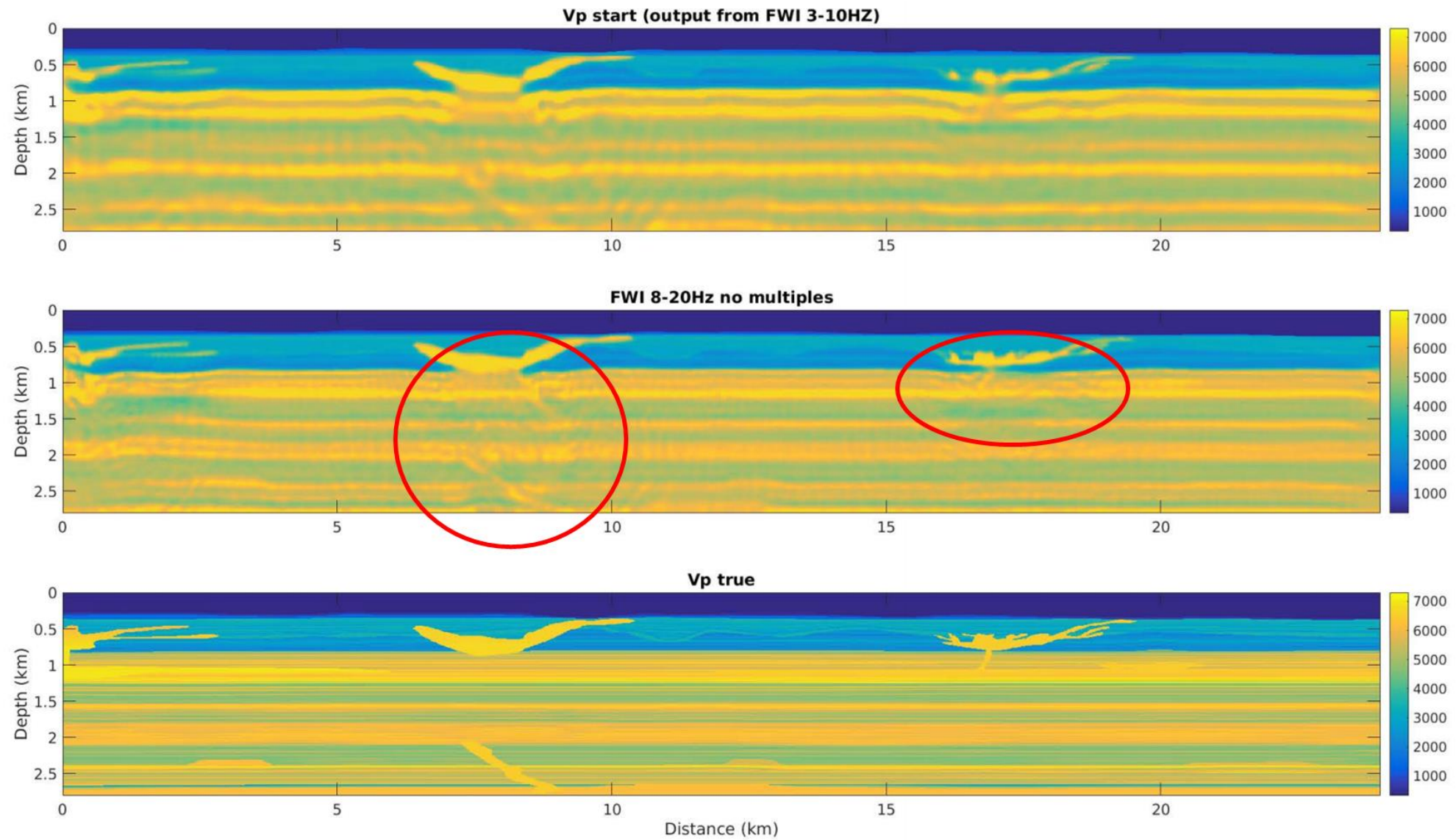
Этап 2: 3-10Гц без кратных

**Этап 3: 8-20Гц без кратных**

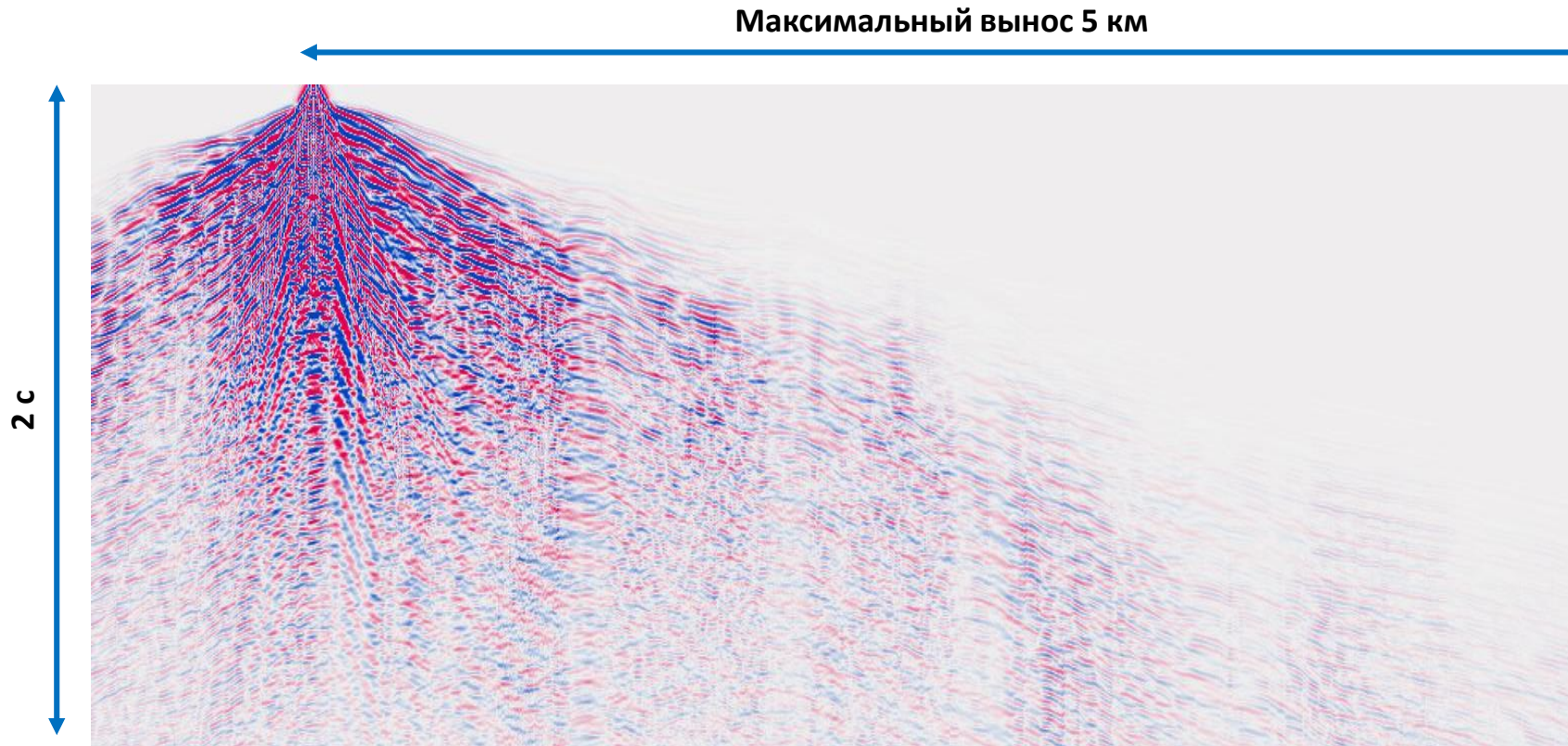
Этап 4: 15-30Гц без кратных

Этап 5: 20-40Гц без кратных

Этап 6: 35-70Гц без кратных



# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

## **FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

## **Частоты** для FWI:

Этап1: 3-10Гц

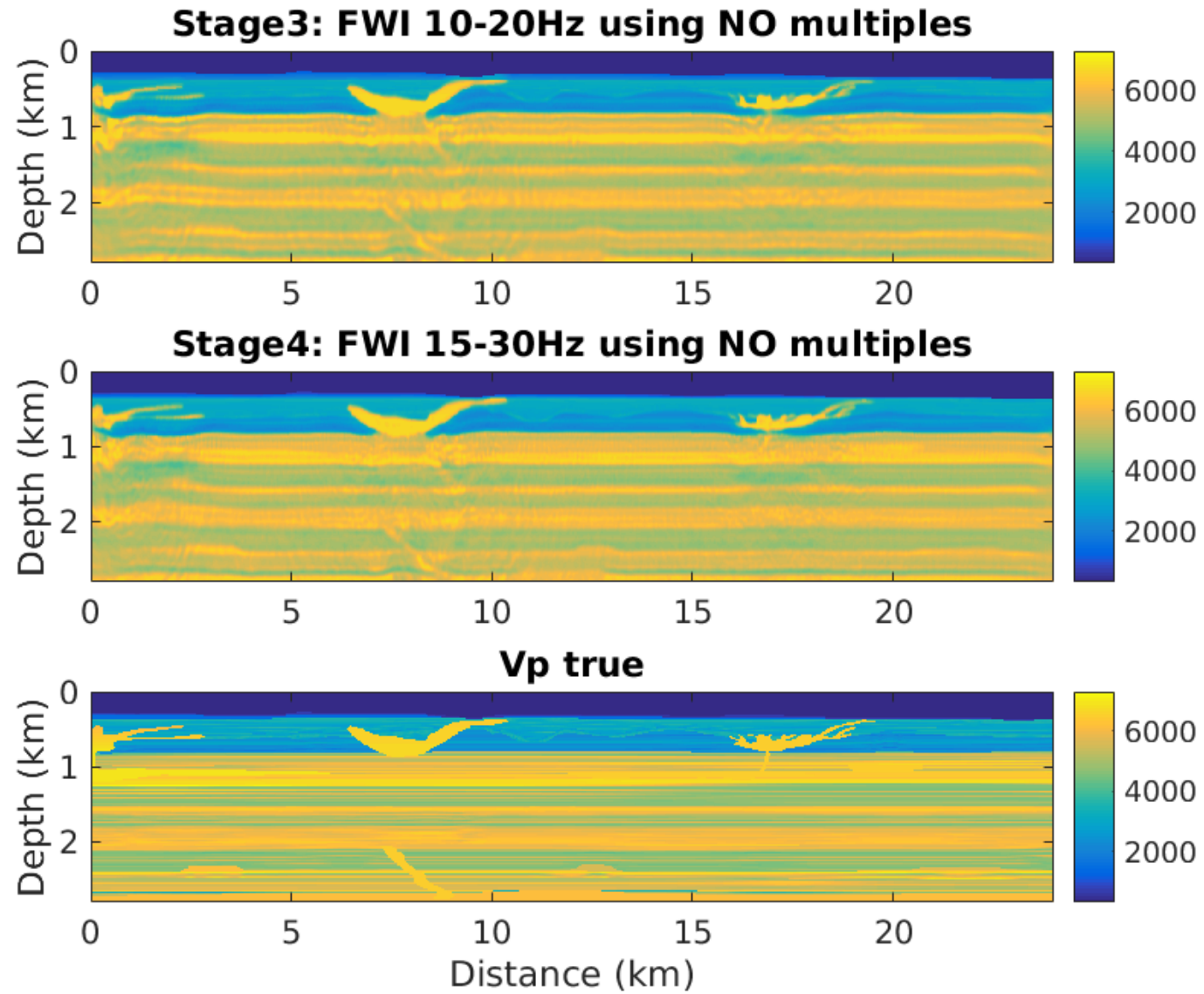
Этап 2: 3-10Гц без кратных

Этап 3: 8-20Гц без кратных

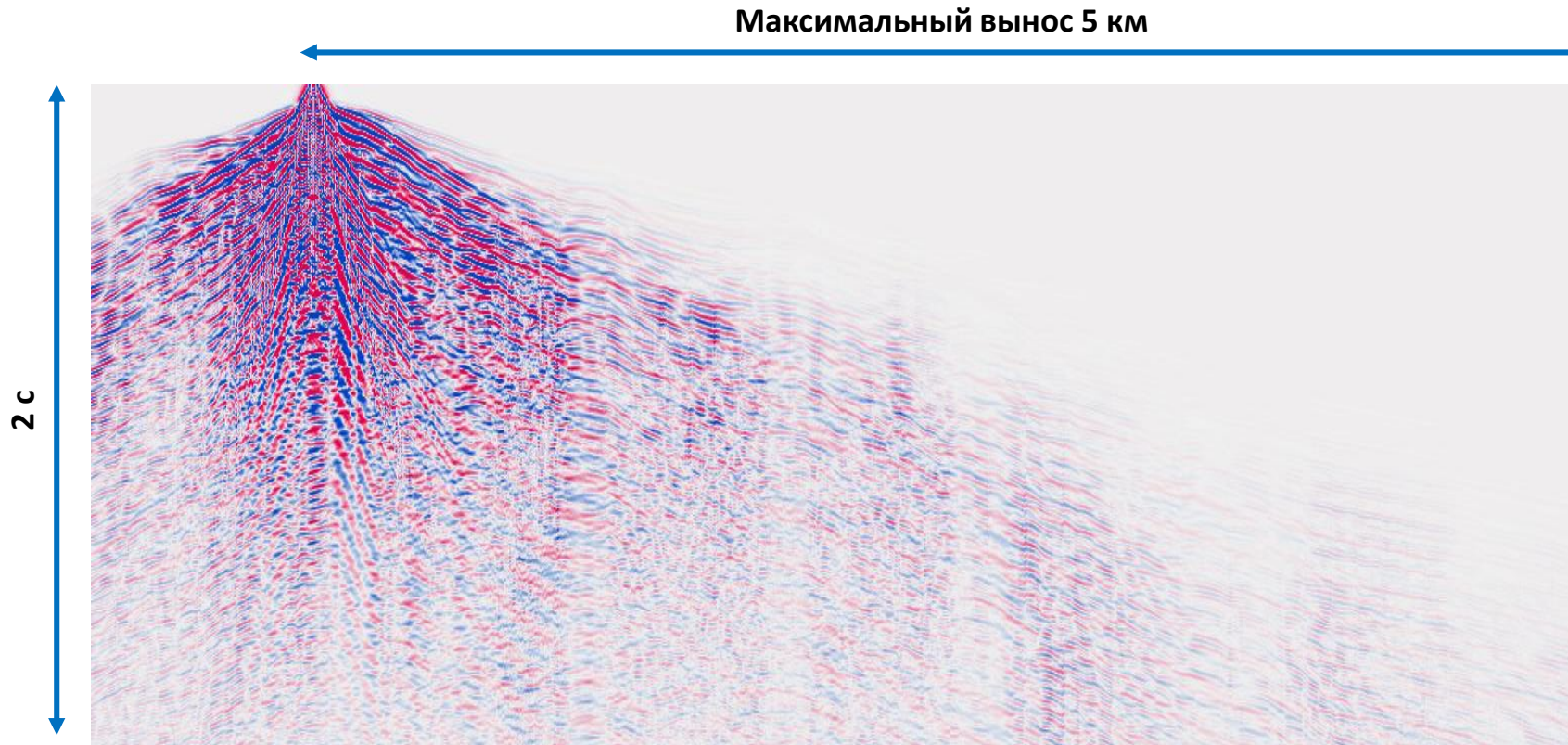
**Этап 4: 15-30Гц без кратных**

Этап 5: 20-40Гц без кратных

Этап 6: 35-70Гц без кратных



# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

## **FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

## **Частоты** для FWI:

Этап1: 3-10Гц

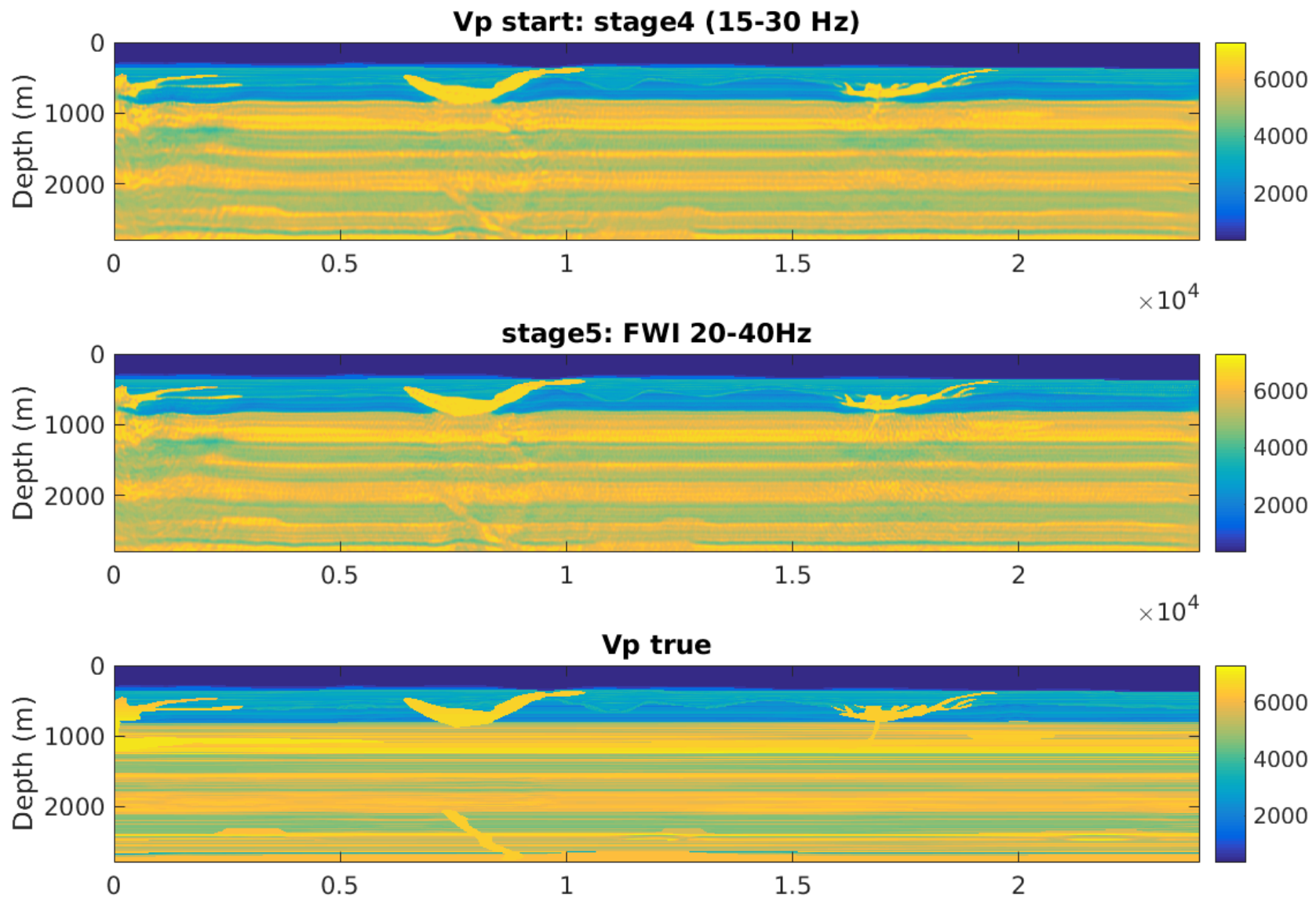
Этап 2: 3-10Гц без кратных

Этап 3: 8-20Гц без кратных

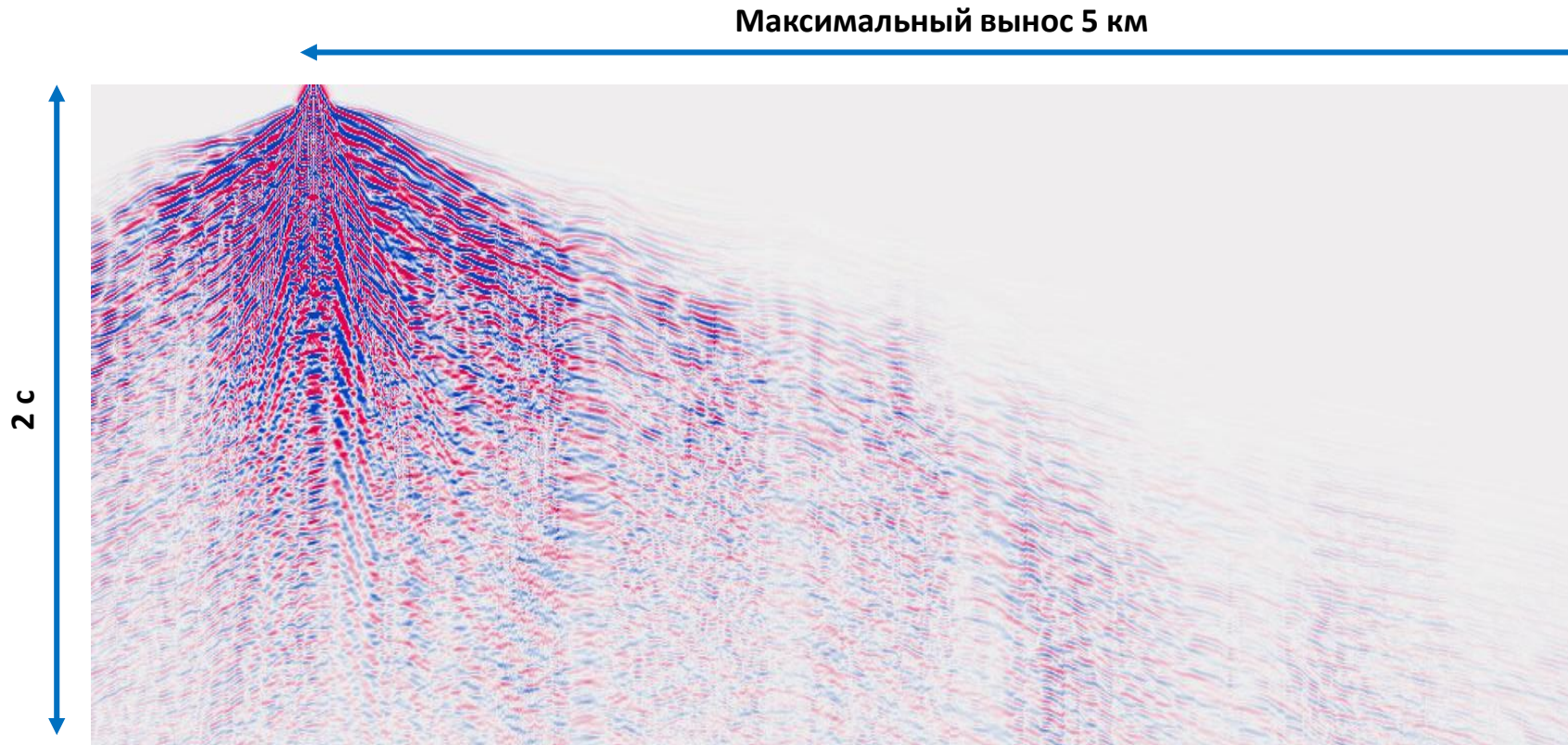
Этап 4: 15-30Гц без кратных

**Этап 5: 20-40Гц без кратных**

Этап 6: 35-70Гц без кратных



# Сейсмические данные и система наблюдения



Импульс зондирующего сигнала – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 30Гц

## **FWI** конфигурация:

240 источников  
с шагом 100м

шаг по приёмникам 25м  
выносы до 5000м

## **Частоты** для FWI:

Этап1: 3-10Гц

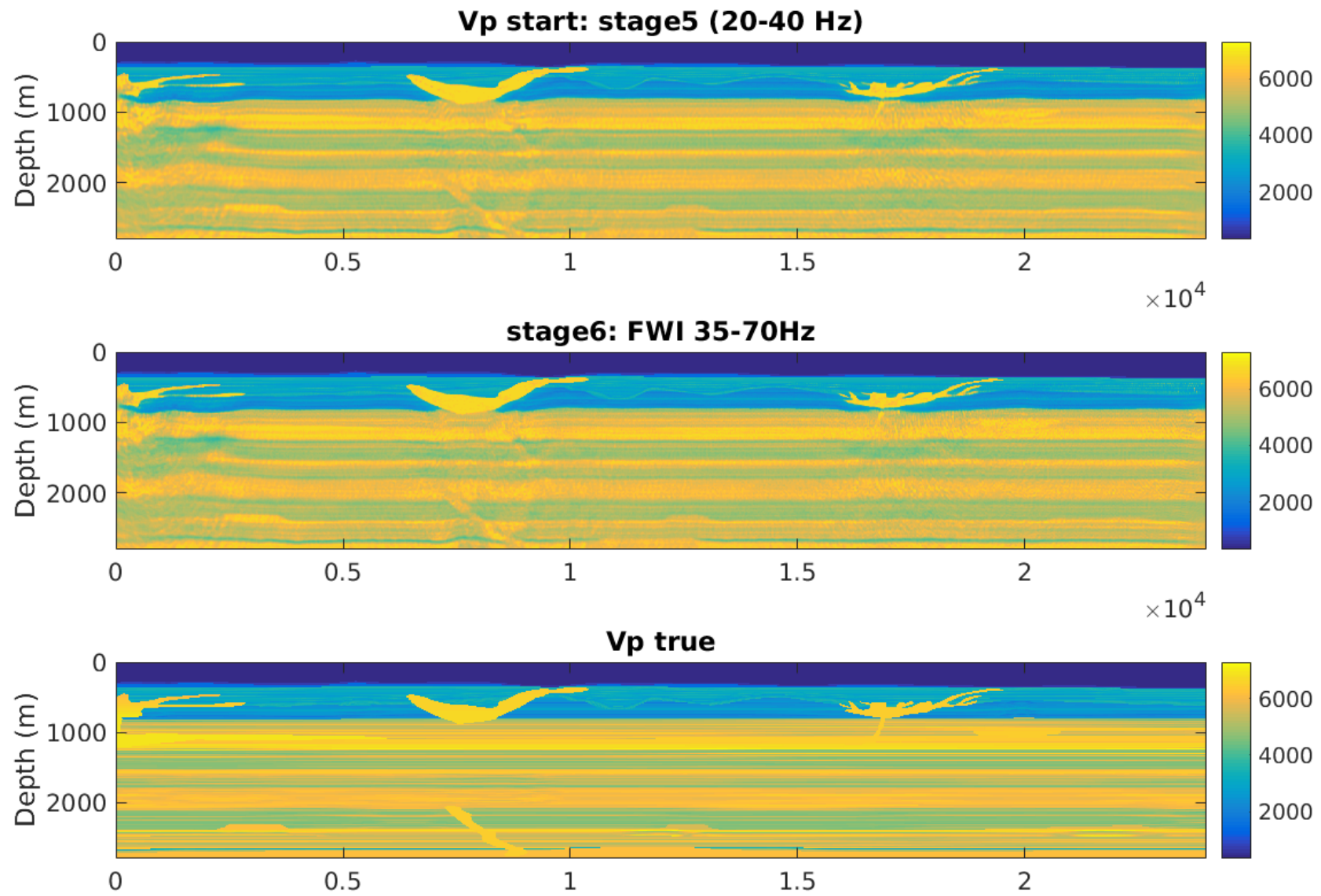
Этап 2: 3-10Гц без кратных

Этап 3: 8-20Гц без кратных

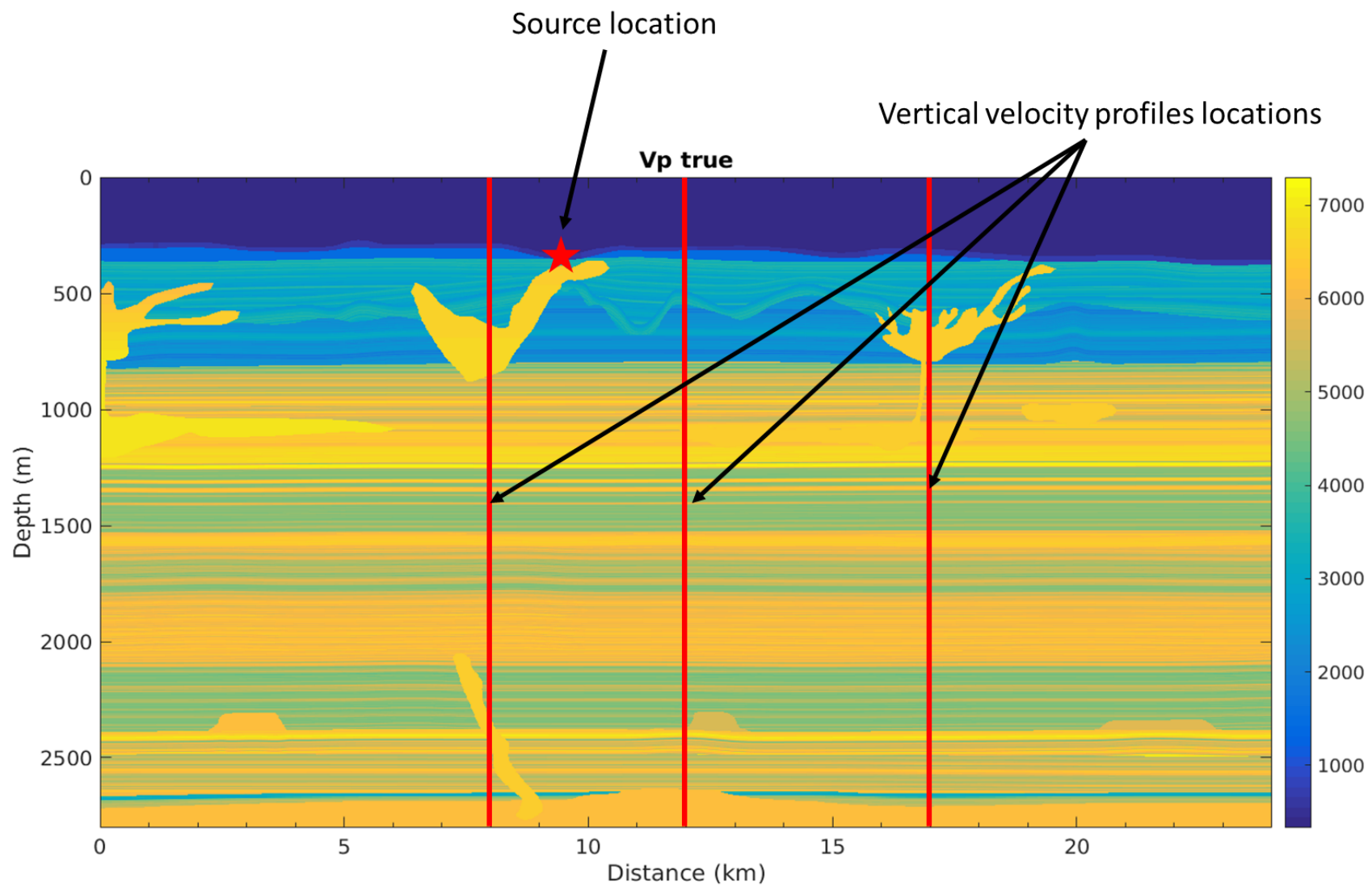
Этап 4: 15-30Гц без кратных

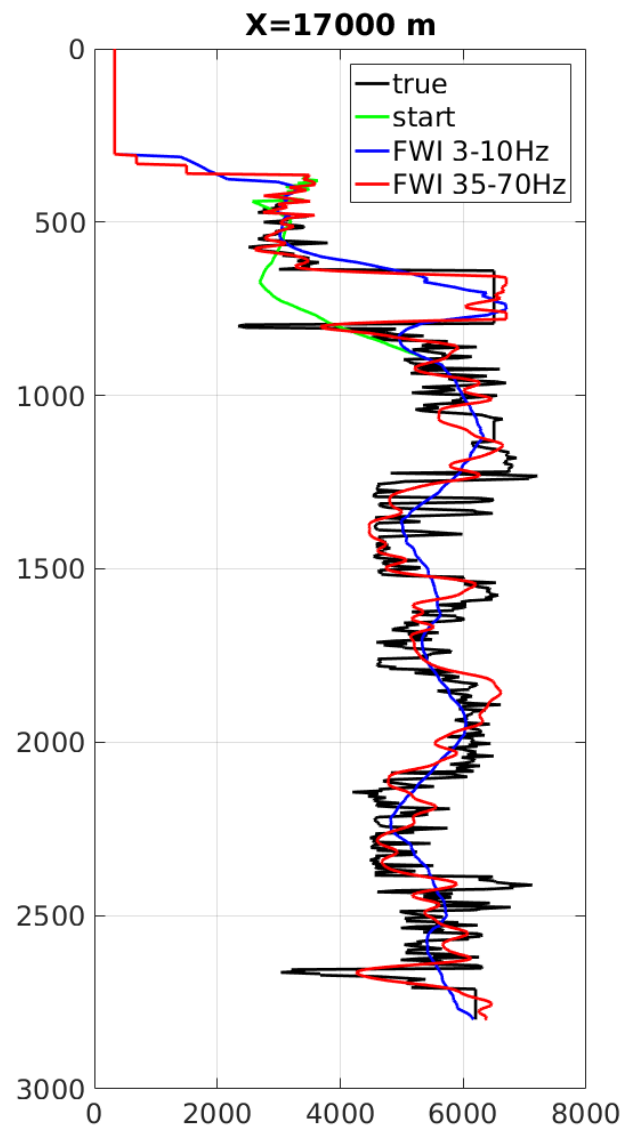
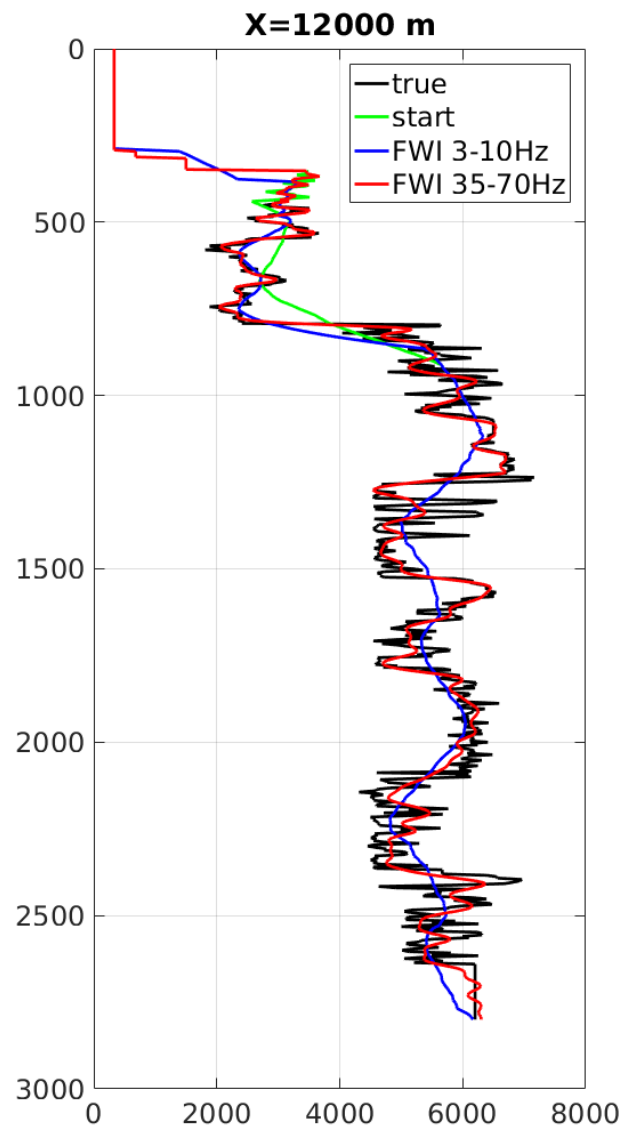
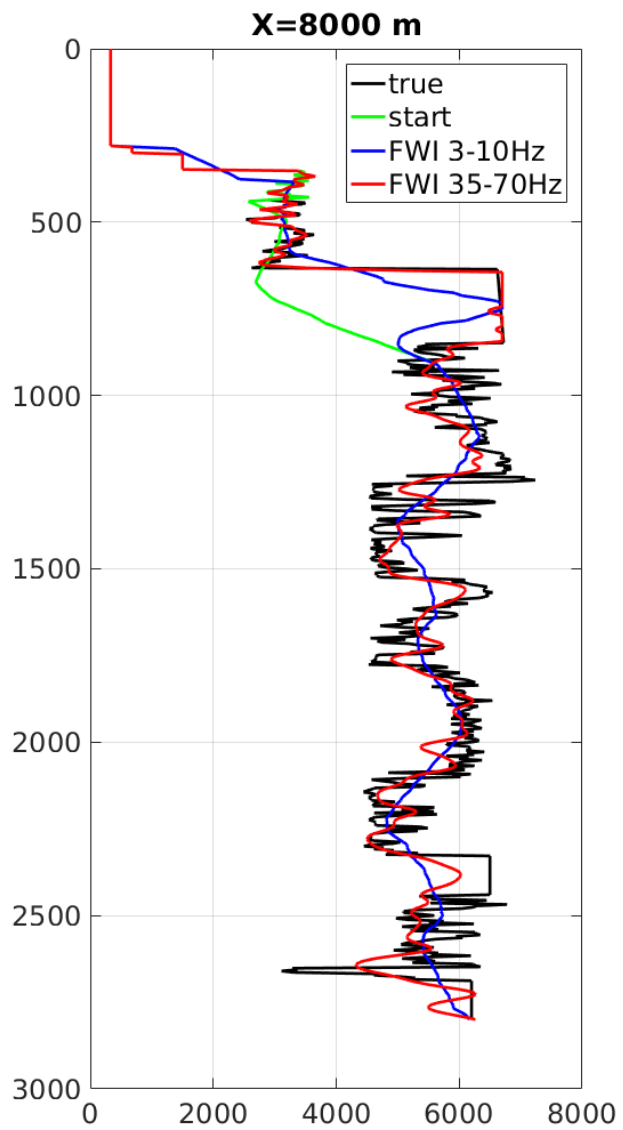
Этап 5: 20-40Гц без кратных

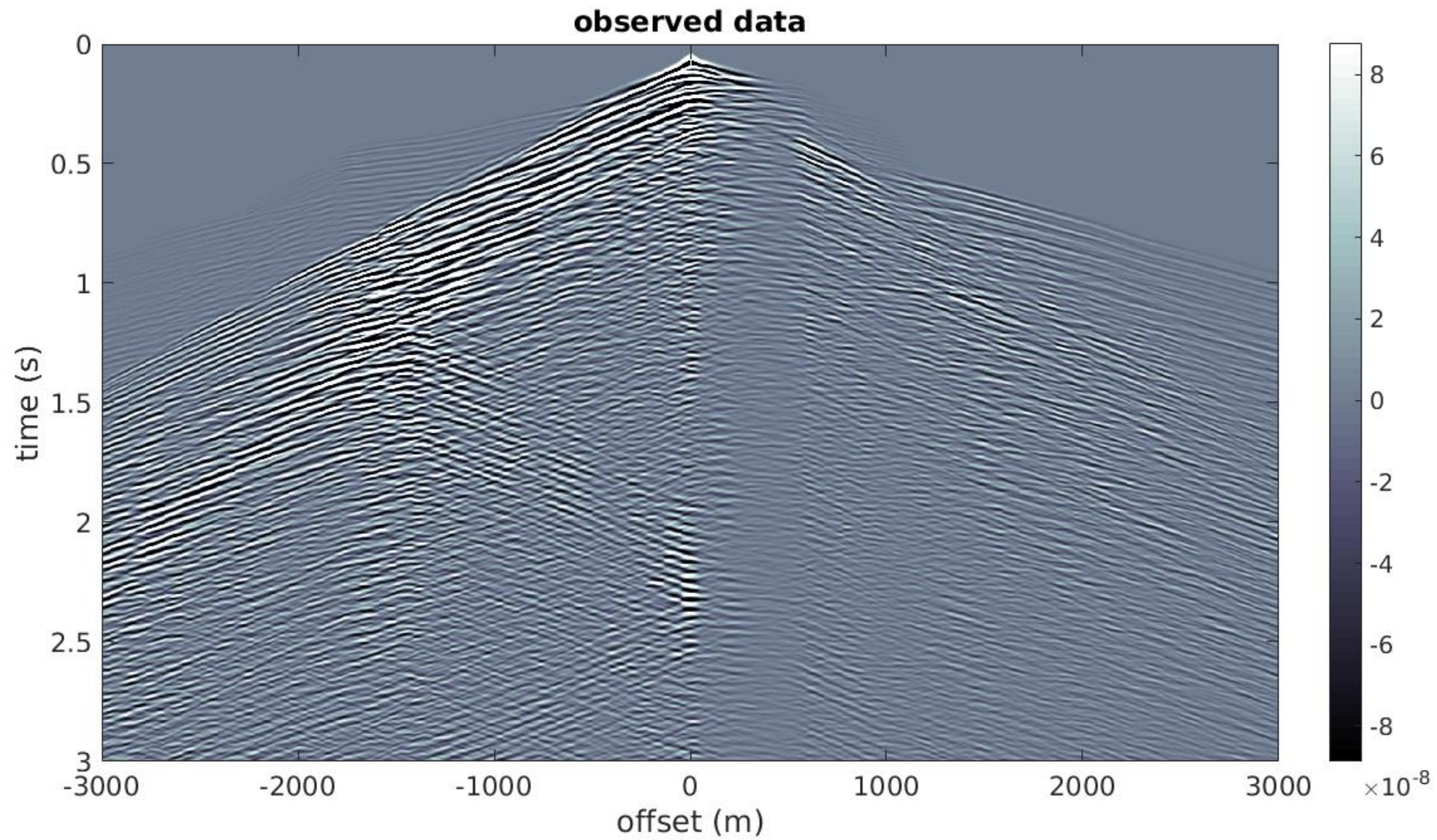
**Этап 6: 35-70Гц без кратных**

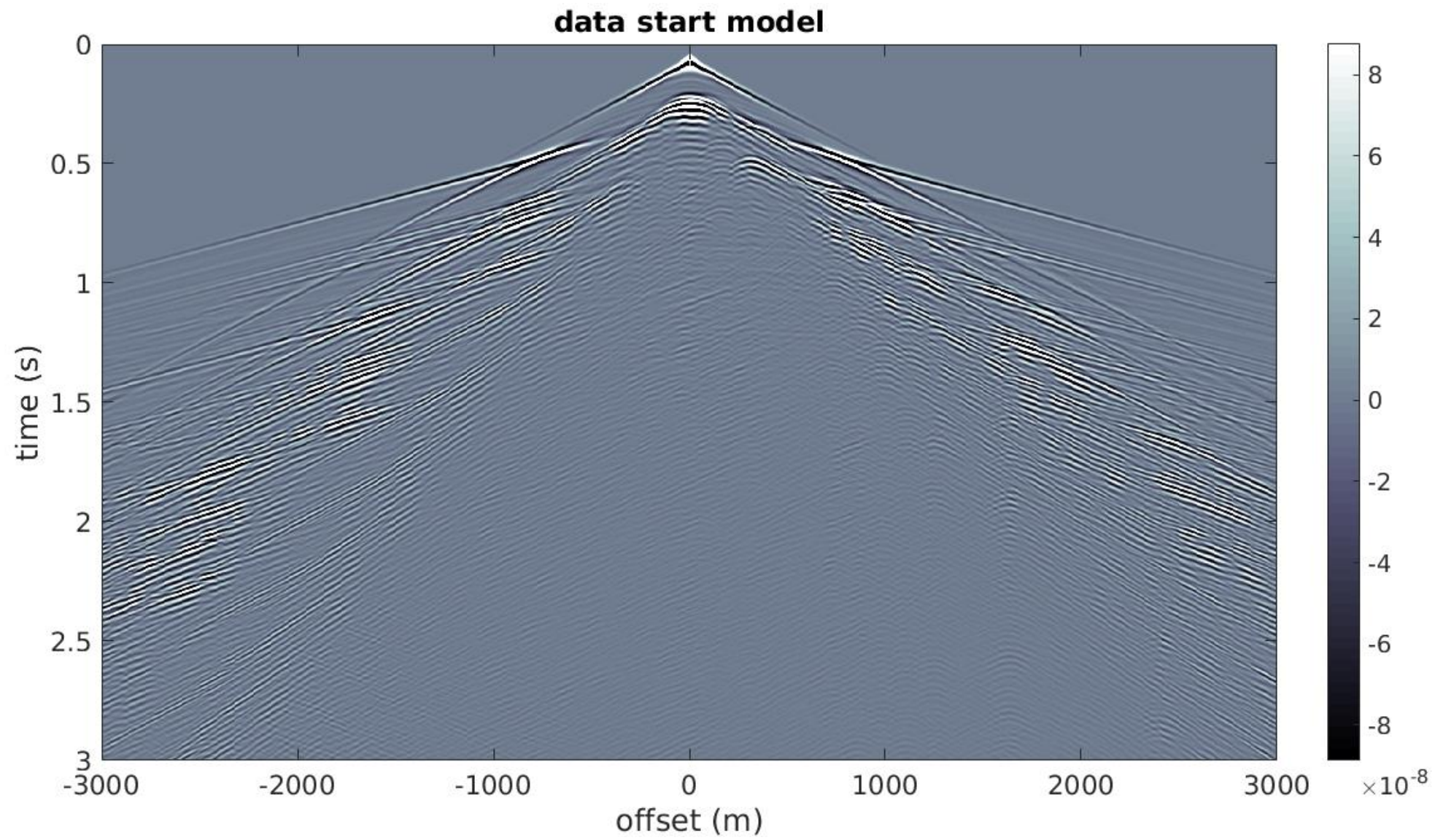


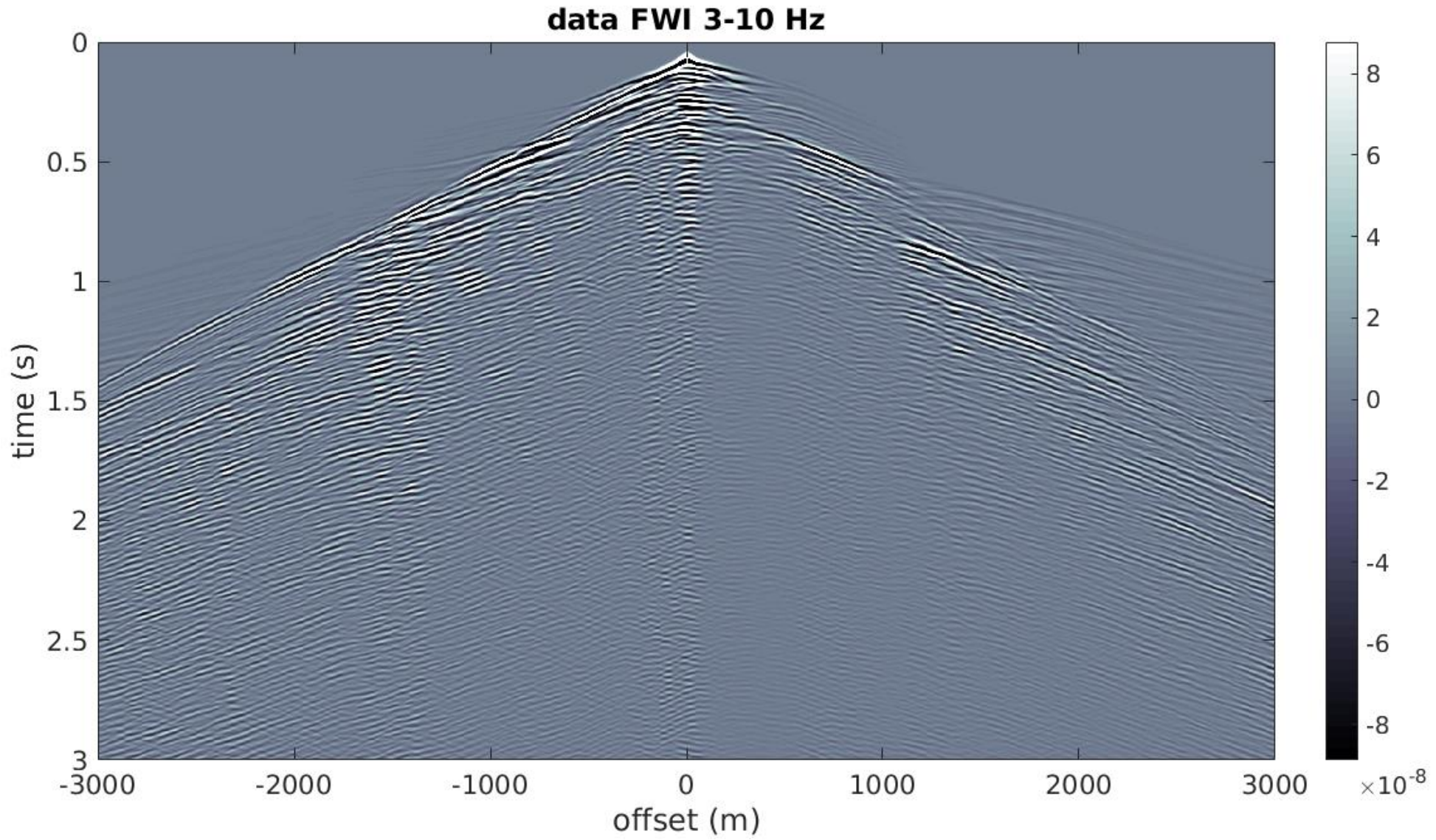


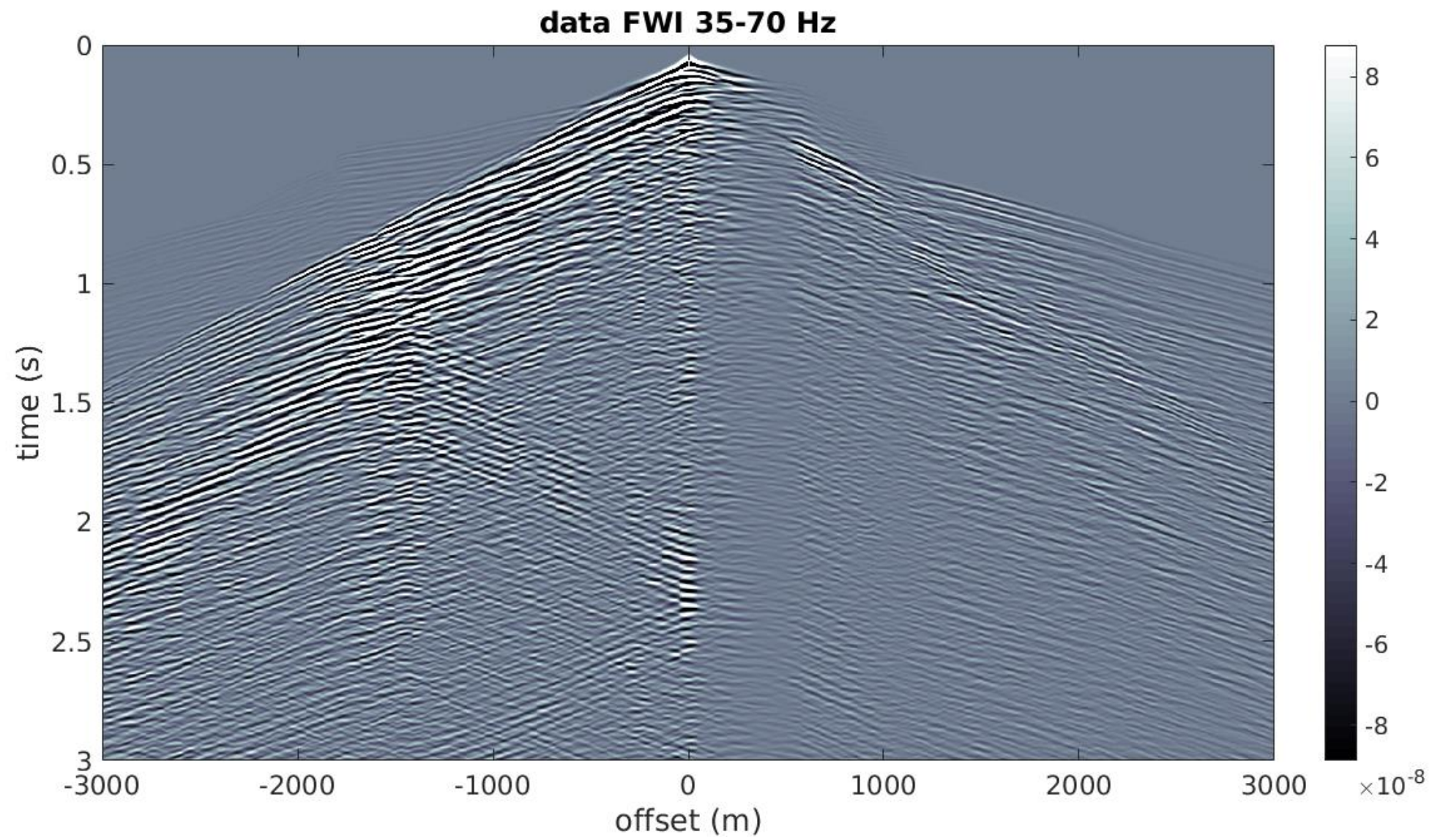


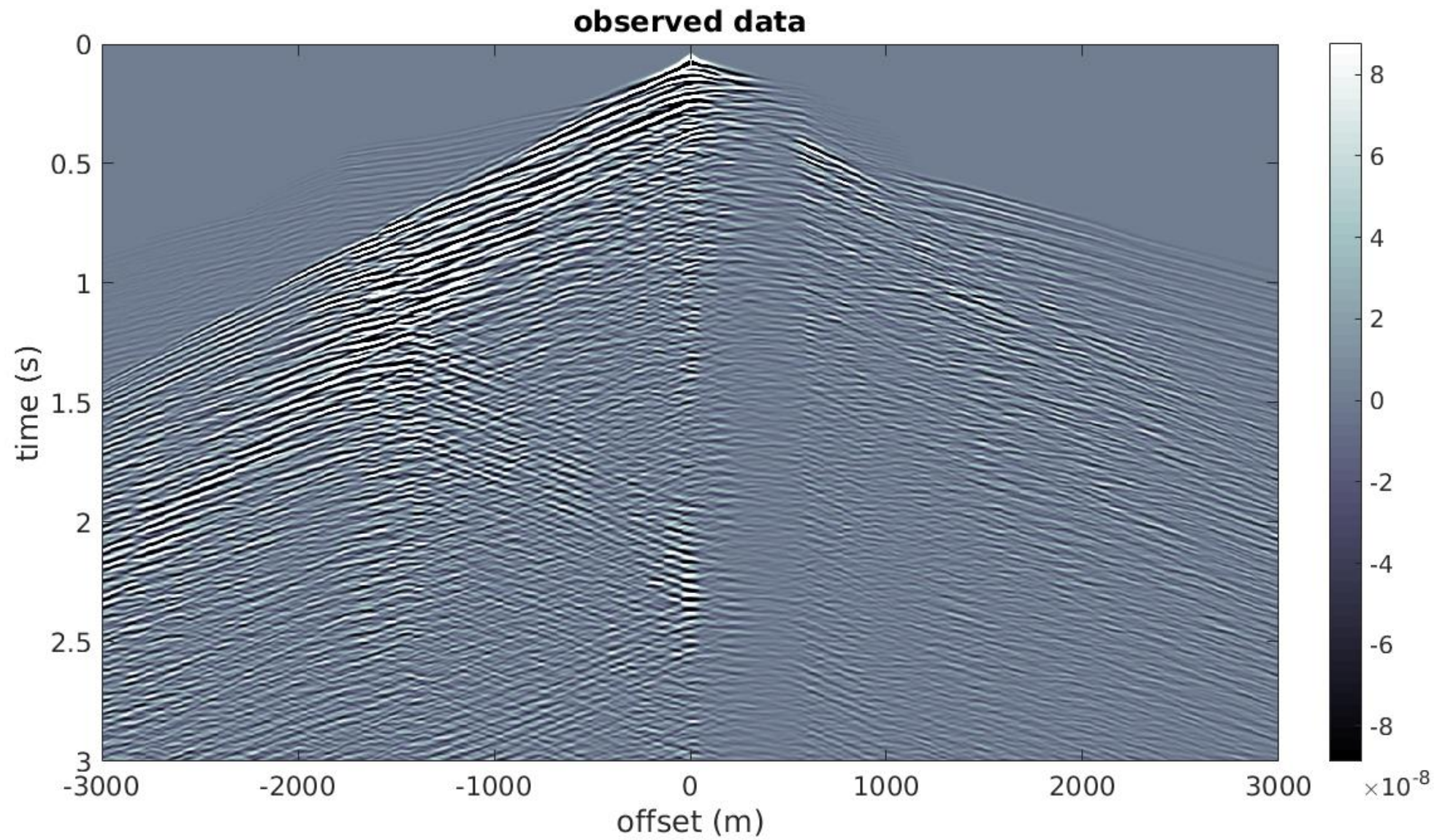


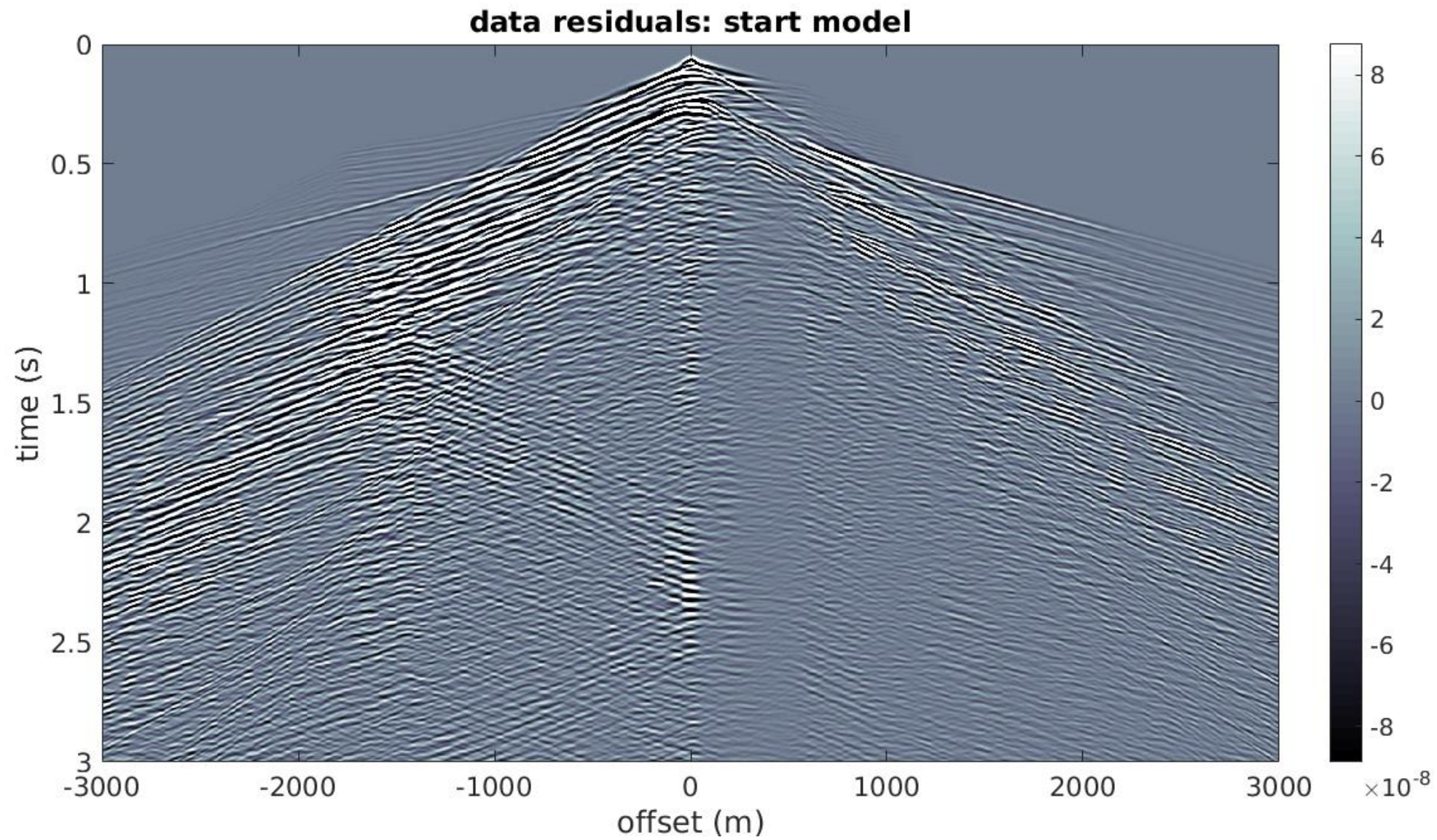




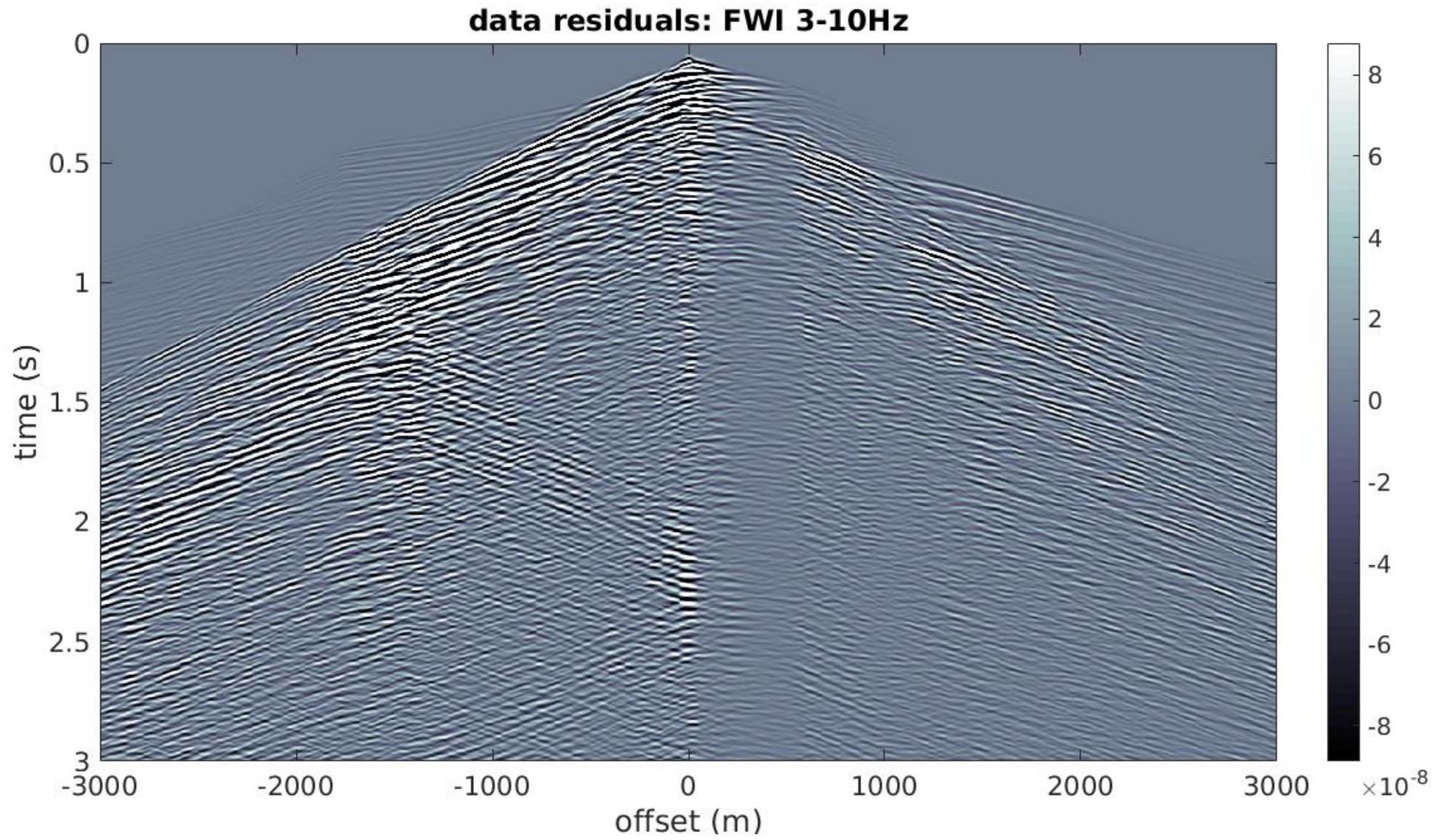


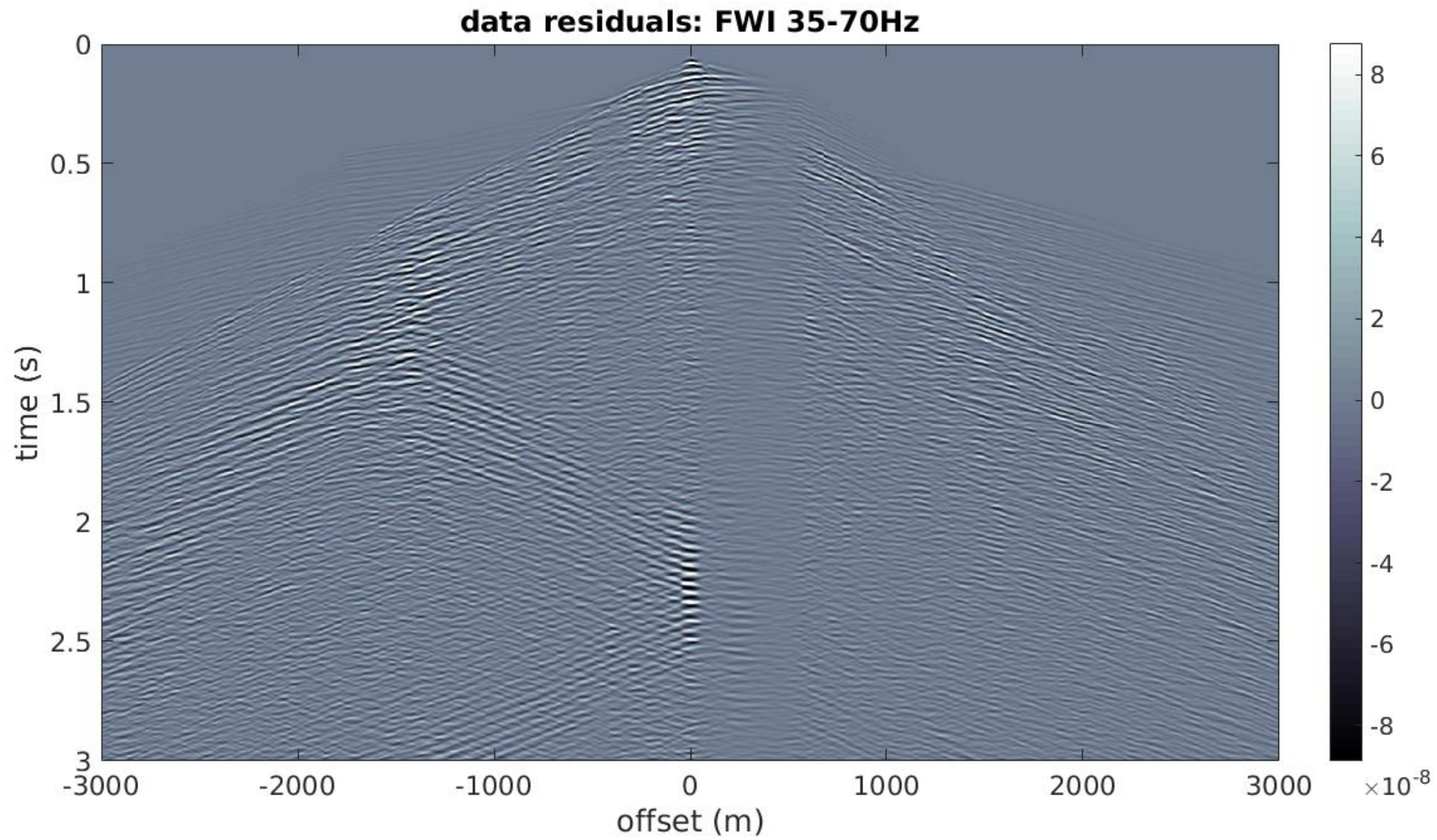












## Выводы

- Предложен подход к **восстановлению сложной ВЧР** с учётом топографии свободной поверхности с последующим уточнением **глубинных целевых горизонтов** на основе **FWI**
- Исследовано **влияние** максимального выноса и **минимальной** доступной временной **частоты** на результаты обращения ВЧР в присутствии высокоскоростных аномалий (**трапповых интрузий**)
- Результаты высокочастотного **FWI (вплоть до 70Гц)** демонстрируют **высокую разрешённость** восстановленной глубинной скоростной модели
- **Финальная FWI модель** объясняет бóльшую часть сейсмических **данных**, даже в областях «**экранированных**» высокоскоростными аномалиями

## Содержание

- История развития методов обращения полного волнового поля
- Мотивация
- Восстановление ВЧР методом обращения полного волнового поля (FWI) с использованием кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности
- Восстановление глубинных целевых горизонтов и высокочастотный FWI
- Основные направления развития
- Выводы

# Многопараметрические обратные задачи

В настоящее время общепризнанным является тот факт, что основным направлением развития методов обработки сейсмических данных на ближайшие десятилетия становится развитие многопараметрического обращения многокомпонентных полных волновых полей:

S.Operto et al., A guided tour of multiparameter full-waveform inversion with multicomponent data: From theory to practice, The Leading Edge, September 2013.

Наиболее общая постановка состоит в определении всех 21 параметра анизотропии, плотности и коэффициентов поглощения.

# Многопараметрические обратные задачи

Однако на сегодняшний день наибольшее распространение получило использование только двух параметров для описания волновых процессов в Земле – скорости продольных волн  $V_p$  и плотности  $\rho$ , либо их комбинаций, таких, как например, импеданс  $I_p$ .

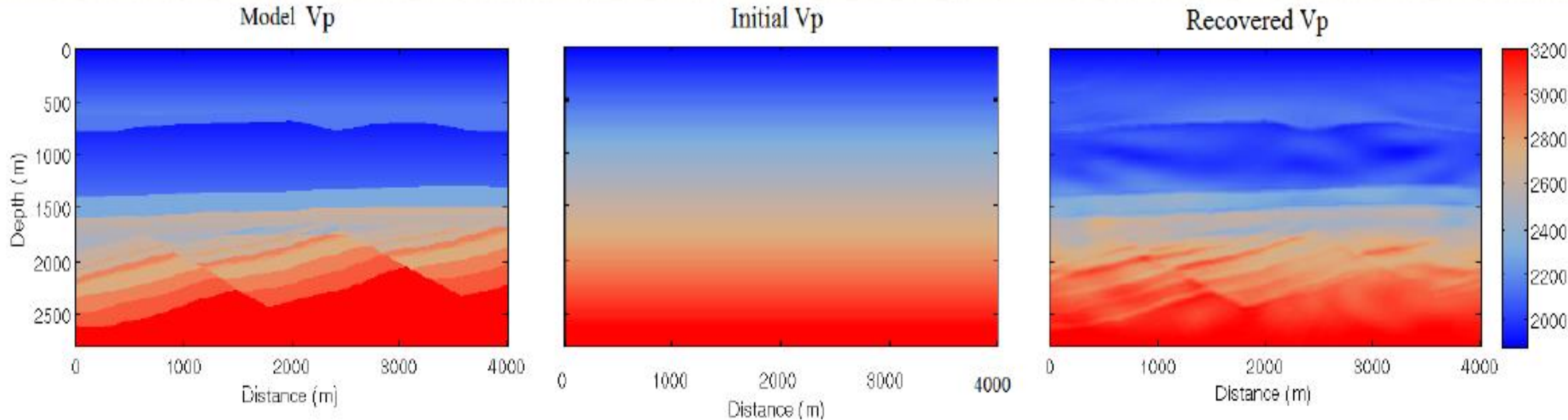
Отметим здесь, что при обращении полного волнового поля в верхней части разреза используются, как правило, закритические отражения и рефрагированные волны. Поэтому здесь вполне разумно не включать плотность в число искомых параметров.

Однако при рассмотрении отражений от глубинных слоёв плотность во многом определяет импеданс на границе слоёв и, следовательно, вносит существенный вклад в изменчивость амплитуд.

# Многопараметрические обратные задачи

Естественно, что для решения такой многопараметрической задачи необходимо вовлечение в обработку и продольных, и поперечных волн.

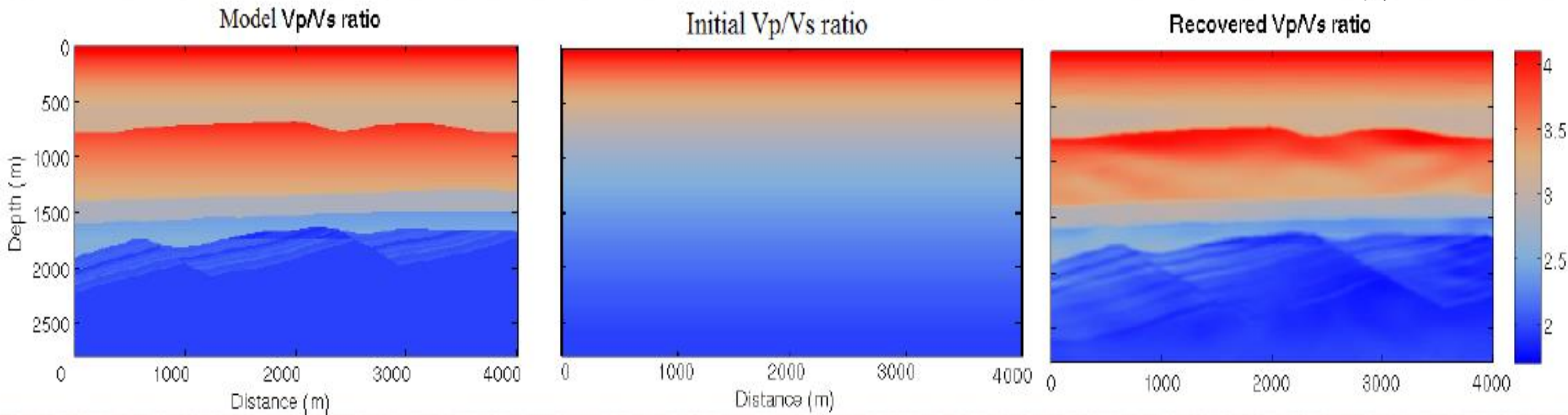
# Многопараметрические обратные задачи: Двумерная упругая модель Gullfaks



Восстановление скорости распространения продольных волн

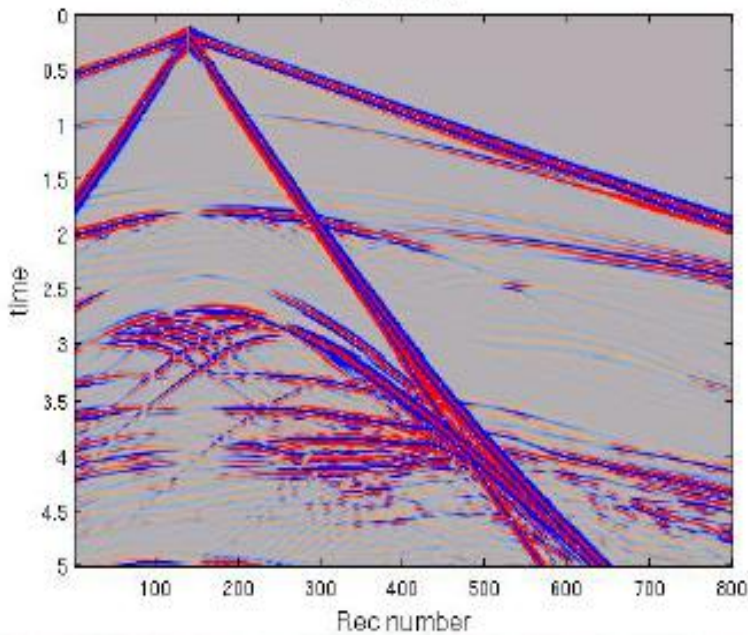


# Многопараметрические обратные задачи: Двумерная упругая модель Gullfaks

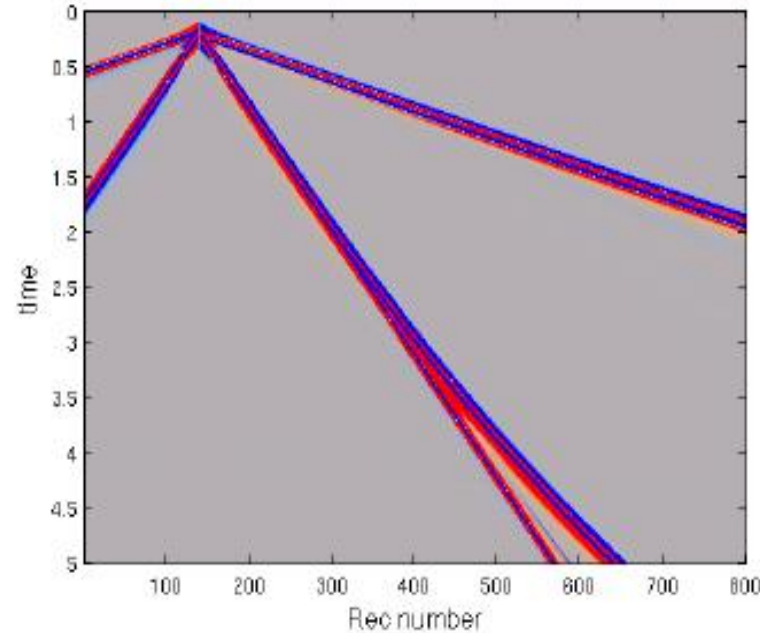


# Многопараметрические обратные задачи: Двумерная упругая модель Gullfaks

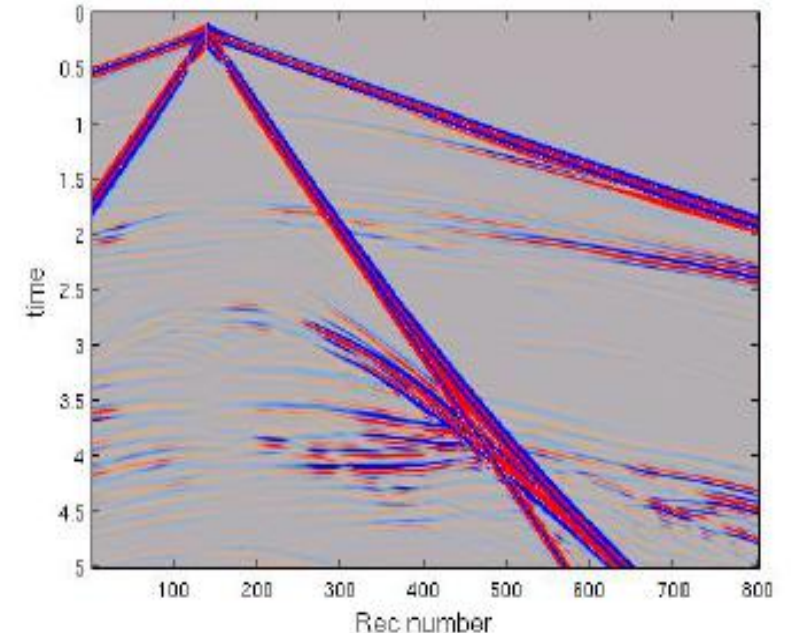
Ux true



Ux start

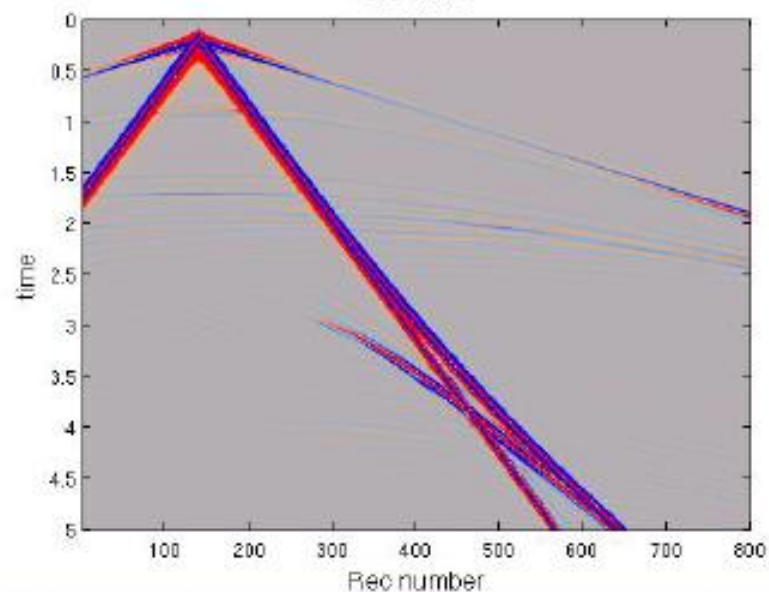


Ux recovered

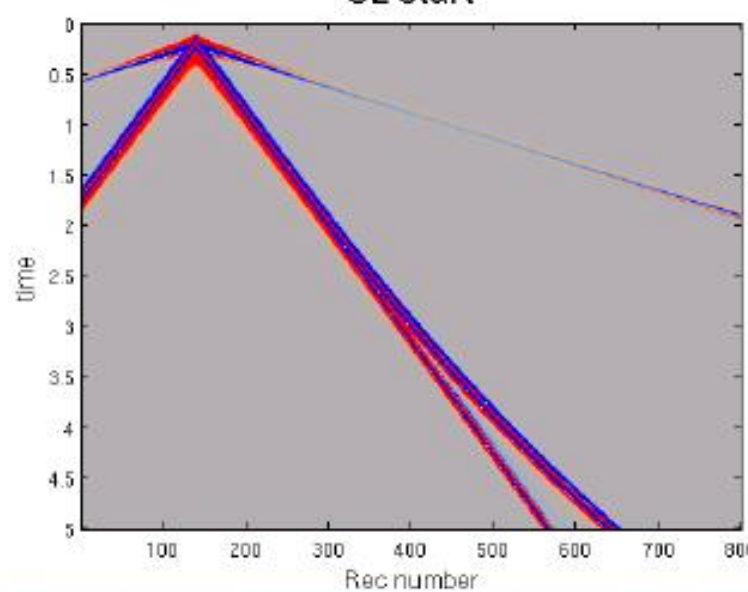


# Многопараметрические обратные задачи: Двумерная упругая модель Gullfaks

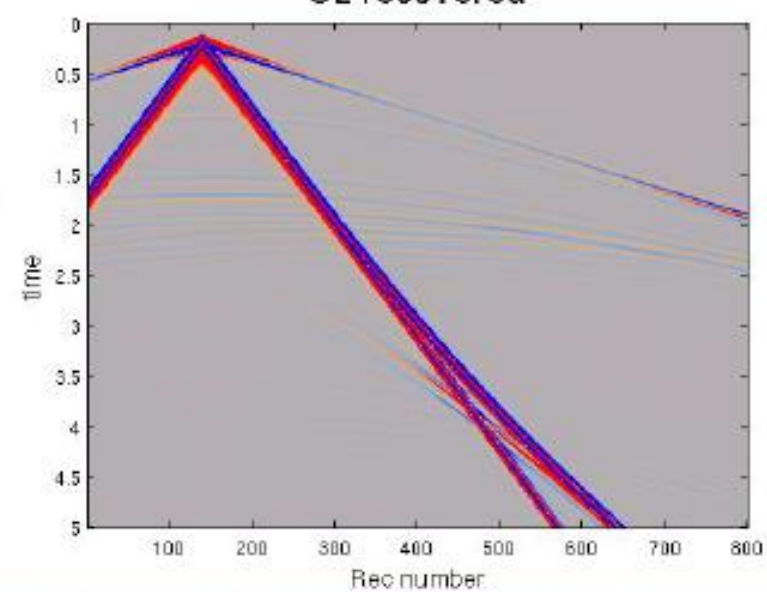
Uz true



Uz start



Uz recovered



# Многопараметрические обратные задачи: реконструкция поглощения среды

## Постановка задачи: математическая модель

Любой линейный процесс распространения волн описывается системой уравнений, состоящей из:

1. Уравнения равновесия (второй закон Ньютона),

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \operatorname{div} \sigma + \vec{f};$$

связывающего тензор напряжения и вектор скорости смещения.

2. Уравнения состояния (закон Гука)

$$\sigma = G \langle \varepsilon \rangle$$

связывающего тензоры деформаций и напряжений.

## Постановка задачи: математическая модель

Наличие поглощения в среде ведёт к закону Гука в виде интеграла свёртки:

$$\sigma_{ij}(x, t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(x, t - \tau) \frac{\partial \varepsilon_{kl}(x, \tau)}{\partial \tau} d\tau.$$

Однако такая форма ведёт к весьма громоздким интегро-дифференциальным уравнениям, очень тяжёлым для численной реализации. Поэтому путём некоторых преобразований такое соотношение сводят к гораздо более простой дифференциальной записи.

# Математическая формулировка для модели GSLS

Рассмотрим теперь волновой процесс, вызываемый в вязкоупругой среде в результате действия точечного источника типа центра расширения. Соответствующие уравнения в частотной области имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} & \omega^2 \rho u_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( ((\lambda + 2\mu)(1 + S^P \tau^P) \operatorname{div} \mathbf{u} - 2\mu(1 + S^S \tau^S) \frac{\partial u_z}{\partial z}) \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu(1 + S^S \tau^S) \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right) = F_1(\omega) \frac{\partial \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)}{\partial x} \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left( ((\lambda + 2\mu)(1 + S^P \tau^P) \operatorname{div} \mathbf{u} - 2\mu(1 + S^S \tau^S) \frac{\partial u_z}{\partial z}) \right) + \\ & \omega^2 \rho u_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu(1 + S^S \tau^S) \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right) = F_2(\omega) \frac{\partial \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)}{\partial z} \end{aligned}$$

# Математическая формулировка для модели GSLS

Пусть теперь в приёмниках  $(x_r, z_r)$  зарегистрировано волновое поле, созданное источниками типа центра расширения, расположенными в точках  $(x_s, z_s)$ . Эти данные мы будем рассматривать как действие некоторого нелинейного оператора на искомые параметры вязкоупругой среды: параметры Ламэ и времена релаксации продольных и поперечных волн:

$$\mathbf{u}(x_r, z_r; \omega) = B[\lambda, \mu, \tau^P, \tau^S]$$

Решение этого нелинейного уравнения и даст значения искомых параметров вязкоупругой среды.

На данном этапе мы ограничиваемся линеаризованной постановкой постановкой обратной задачи для заданной референтной модели среды.



# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS

В предположении о слабом отклонении изучаемой среды от некоторой референтной модели обратная задача сводится к следующей линеаризованной постановке, где в качестве референтной модели берётся идеально упругая среда:

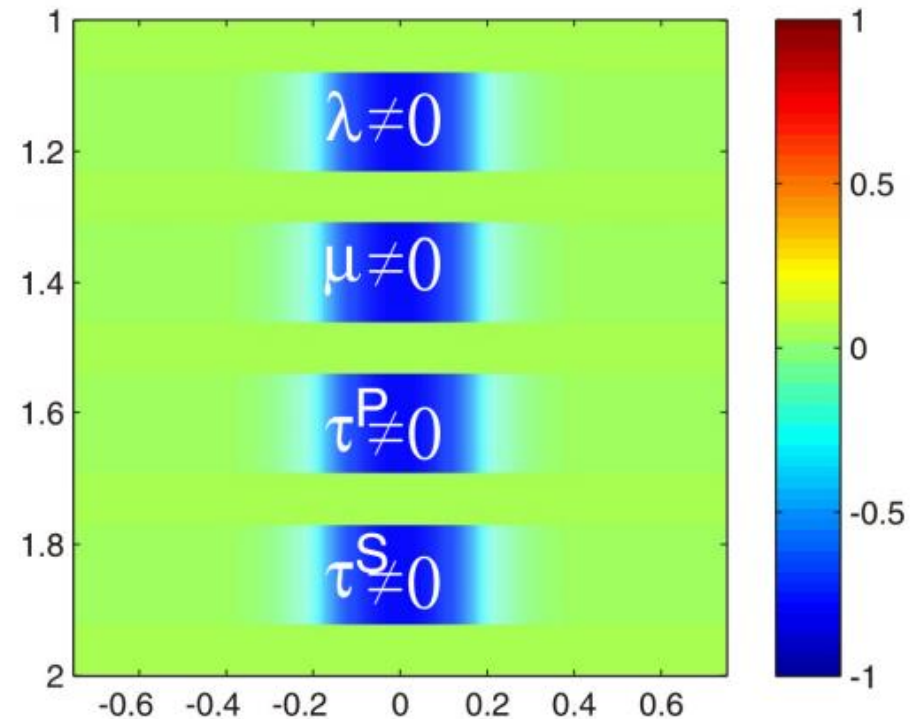
$$\mathbf{u}_0 + \delta \mathbf{u} = B[\lambda_0, \mu_0, 0, 0] + DB[\lambda_0, \mu_0, 0, 0] \begin{pmatrix} \delta \lambda \\ \delta \mu \\ \tau^P \\ \tau^S \end{pmatrix}$$

В предположении, что референтная среда известна, получаем следующее уравнение:

$$\delta \mathbf{u} = DB[\lambda_0, \mu_0, 0, 0] \begin{pmatrix} \delta \lambda \\ \delta \mu \\ \tau^P \\ \tau^S \end{pmatrix}$$

# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS: численные эксперименты

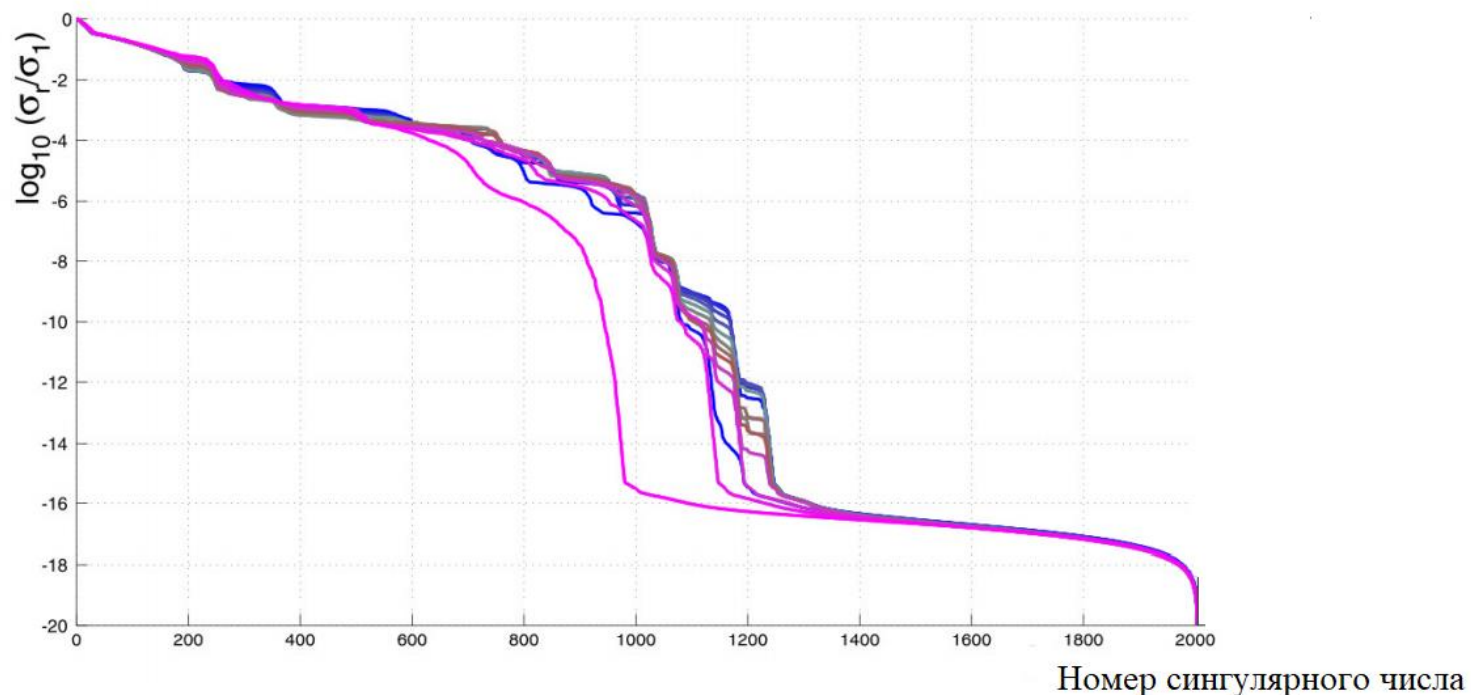
Для численных экспериментов мы выбрали целевую область в виде прямоугольника  $-700 \text{ m} \leq x \leq 700 \text{ m}$ ,  $1000 \text{ m} \leq z \leq 2000 \text{ m}$  и частотный диапазон от 20 Гц до 100 Гц. Вмещающая (референтная) среда взята однородной идеально упругой, в которую помещались локальные возмущения всех параметров, причём эти возмущения имеют не пересекающиеся носители.



$\delta\lambda$  in  $z \in [1080, 1230]m$ ,  $\delta\mu$  in  $z \in [1310, 1460]m$ ,  
 $\delta\tau^P$  in  $z \in [1540, 1690]m$ ,  $\delta\tau^S$  in  $z \in [1770, 1920]m$

# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS: численные эксперименты

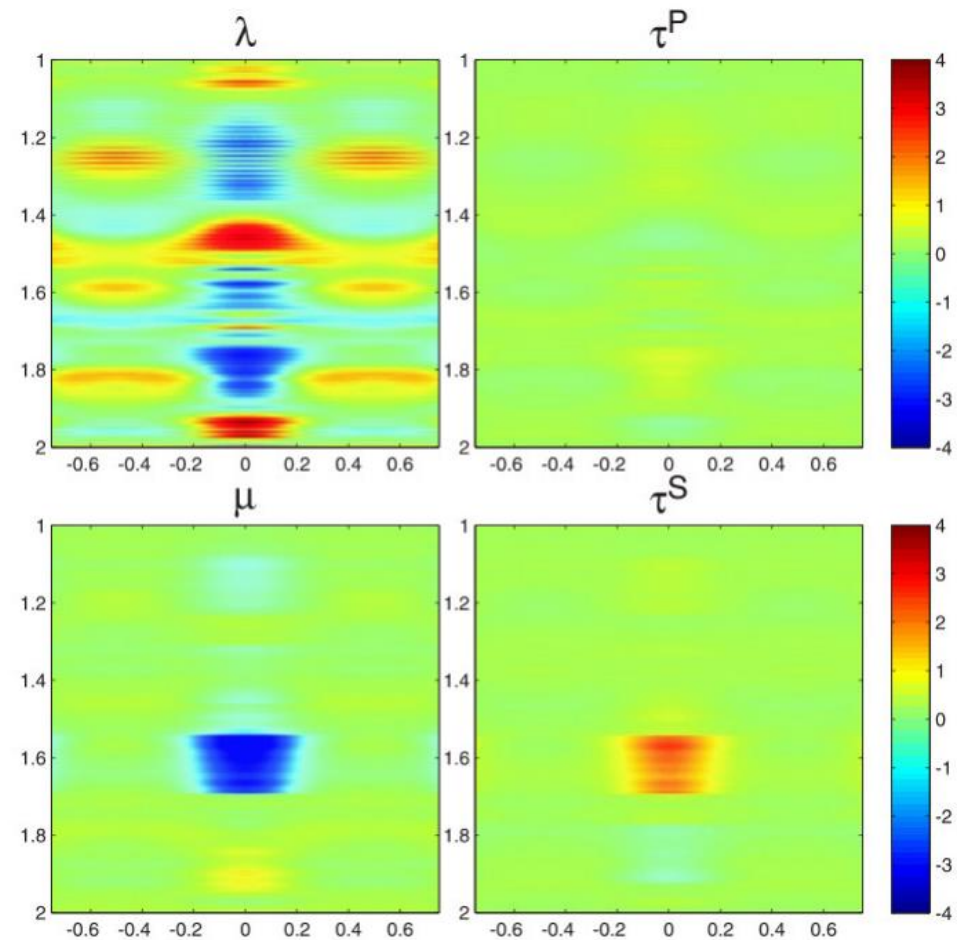
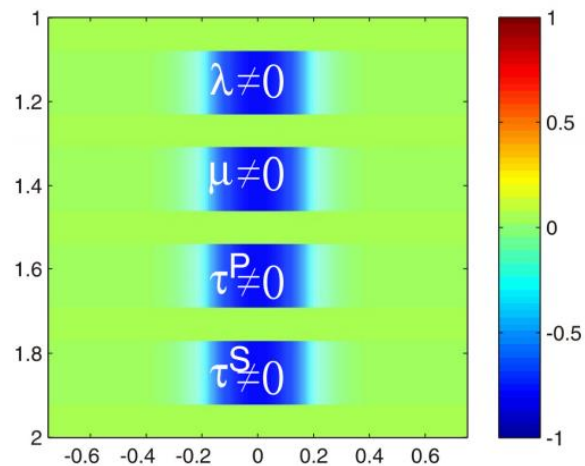
На первом шаге было выполнено вычисление матричного представления и для полученной матрицы рассчитано сингулярное разложение



# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS: численные эксперименты

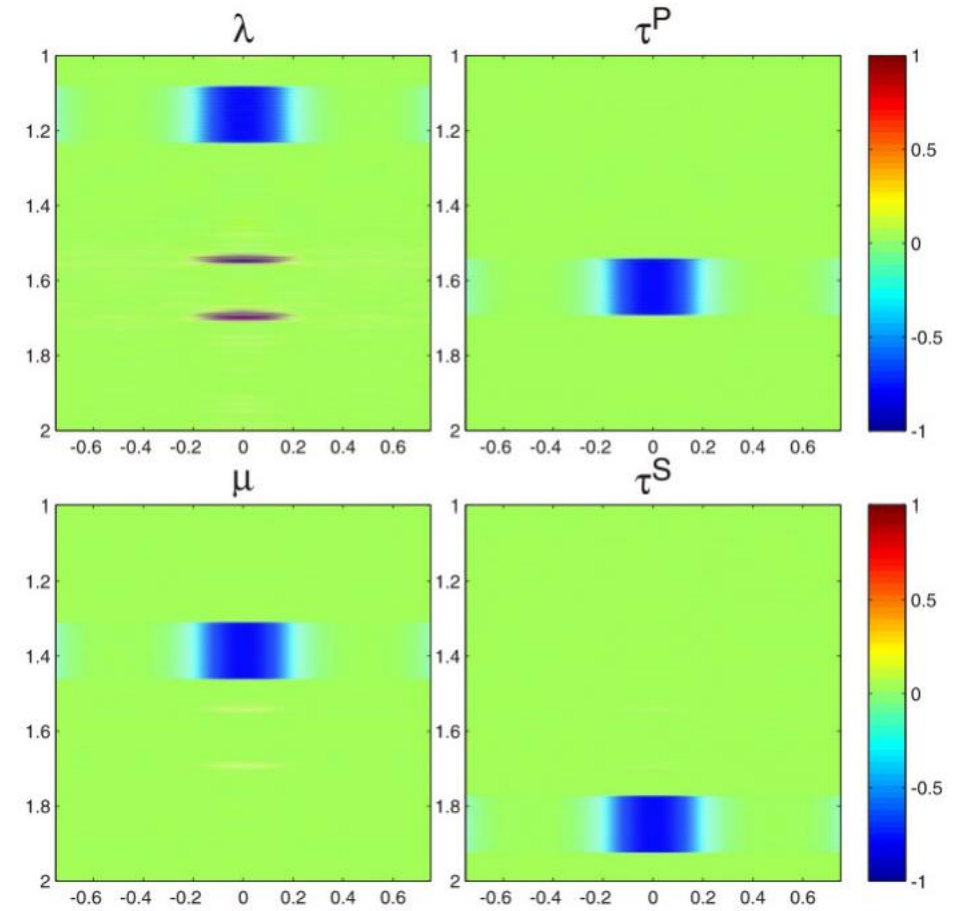
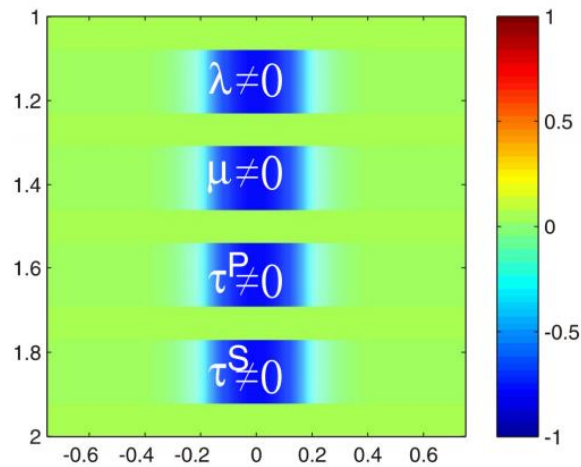
С использованием полученного сингулярного спектра мы построили серию решений обратной задачи путём усечения сингулярного разложения с постепенным возрастанием числа обусловленности.

# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS: численные эксперименты



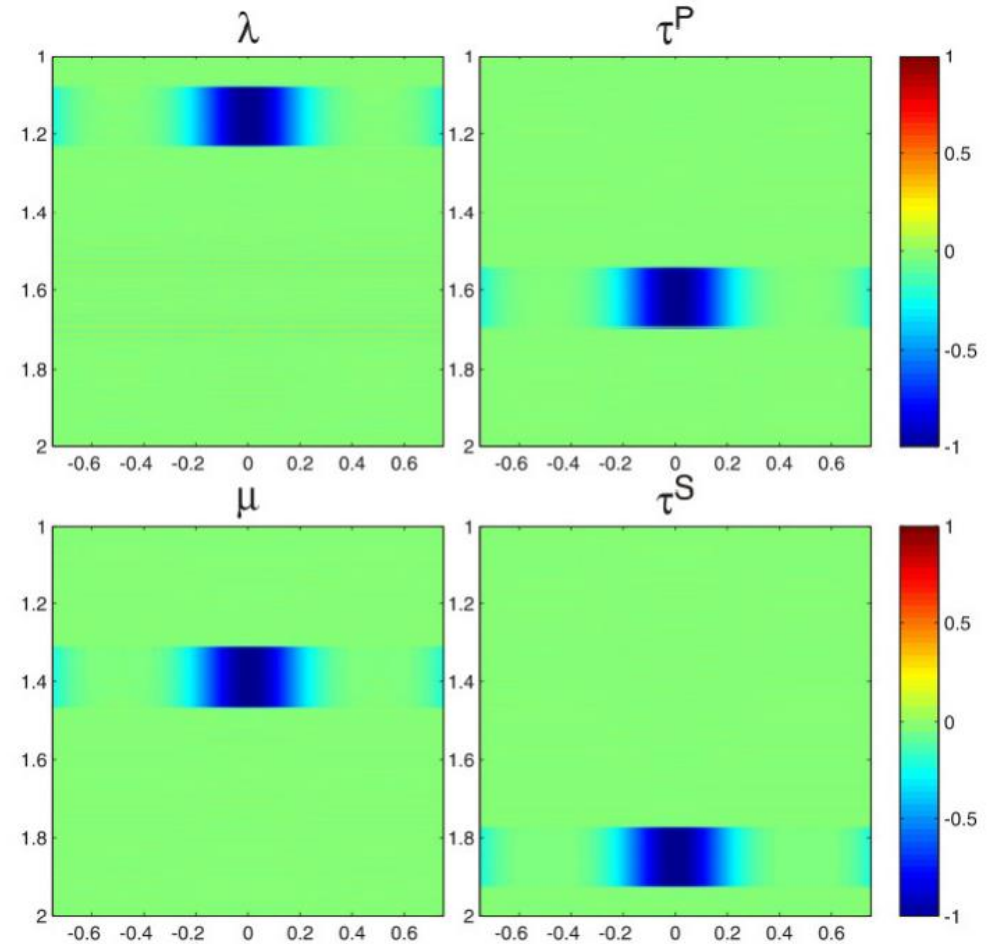
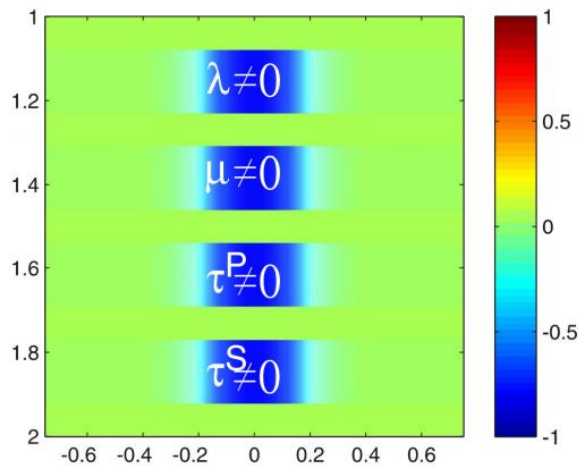
The truncated SVD-solution for condition number  $10^4$

# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS: численные эксперименты



The truncated SVD-solution for condition number  $10^8$

# Линеаризованная постановка обратной задачи для GSLS: численные эксперименты



The truncated SVD-solution for condition number  $10^{14}$

# Выводы

На основании представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Прямолинейное применение метода обращения полного волнового поля в вязкоупругой среде неизбежно ведёт к связанности искомым параметров.
2. Для обеспечения разделения их изменчивости целесообразно выполнить анализ сингулярного спектра соответствующего линейного оператора и оценить углы раствора подпространств, соответствующих добротности и упругим скоростям.
3. Опираясь на знание углов, оценку погрешности в данных и точности вычисления сингулярного разложения определить параметры усечения сингулярного разложения.



# Заключение

Переход к решению многопараметрических обратных задач становится всё более востребованным на практике.

Первоочередными целями этих исследований должно стать изучение взаимозависимости между различными параметрами и выбор оптимальной параметризации.

Спасибо за внимание!

*Вопросы? Комментарии?*