

ПО «Альтаир-М» – открытый продукт: Разработка и внедрение стороннего модуля SWI, его функциональные возможности

Яблоков Александр Викторович,
к.ф.-м.н., с.н.с. НГУ / ИНГГ СО РАН

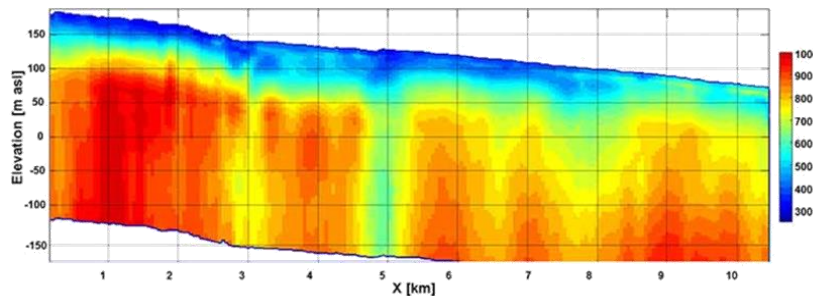
г. Тюмень, 2025 г.

Что такое SWI?

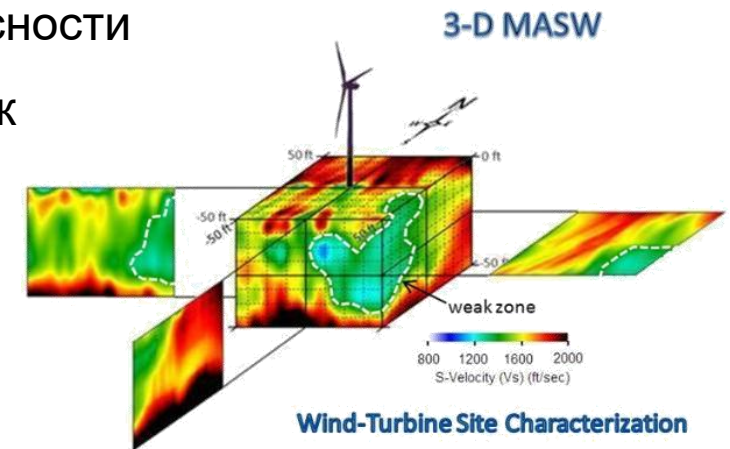


SWI – модификация методов поверхностных волн (**MASW**, **SASW**, **CSW**), которые решают задачи малоглубинной сейсморазведки:

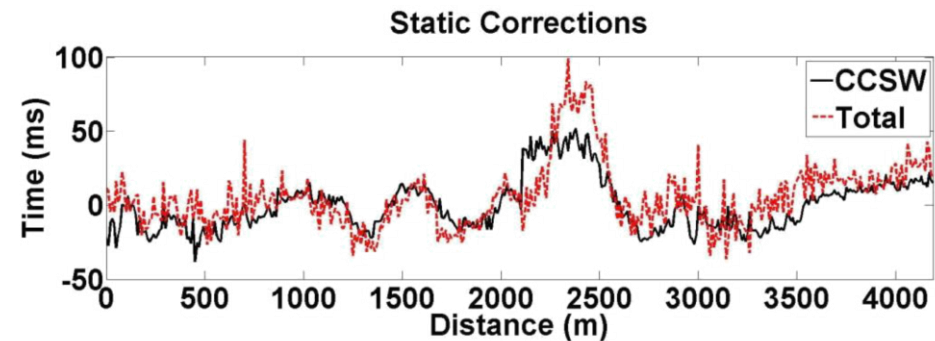
- ✓ Построение скоростной модели ВЧР
- ✓ Картирование распространения ММП
- ✓ Районирование сейсмической опасности
- ✓ Определение статических поправок



[SWAMI, www.slb.com]

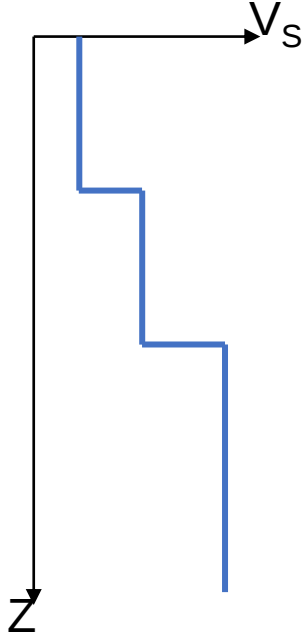
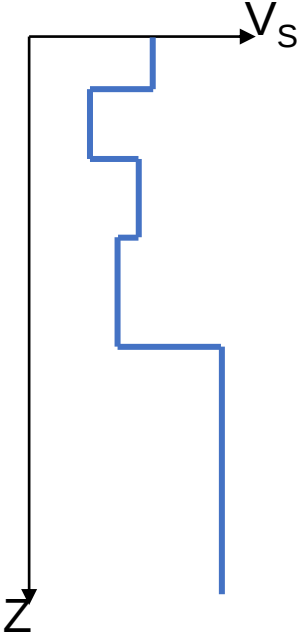
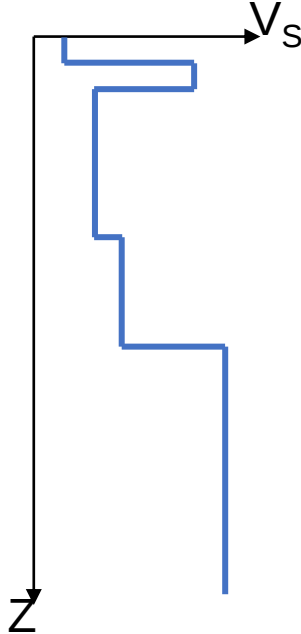
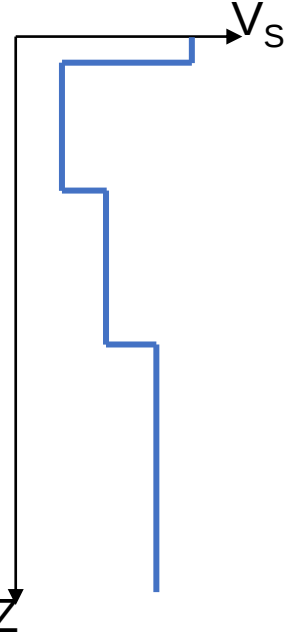


[MASW, www.masw.com]



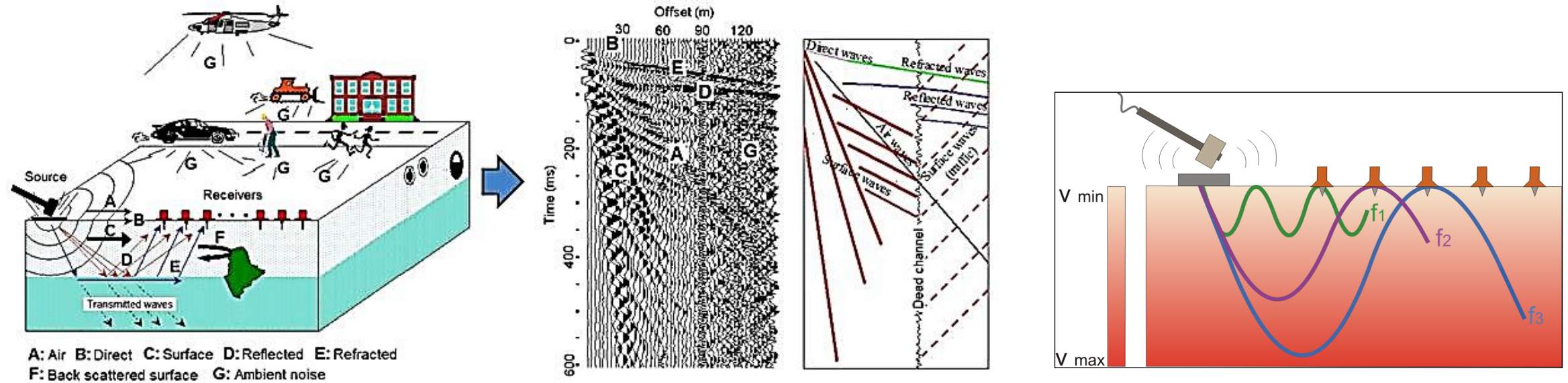
[R. Askari, 2012]

Почему SWI?

Тип разреза	Нормальный	Частично инверсные		Инверсный
				
Методы	✓ МПВ MASW -	МПВ (малозэффективно или невозможно) ✓ MASW MOB (SH)		- ✓ MASW MOB (SH)

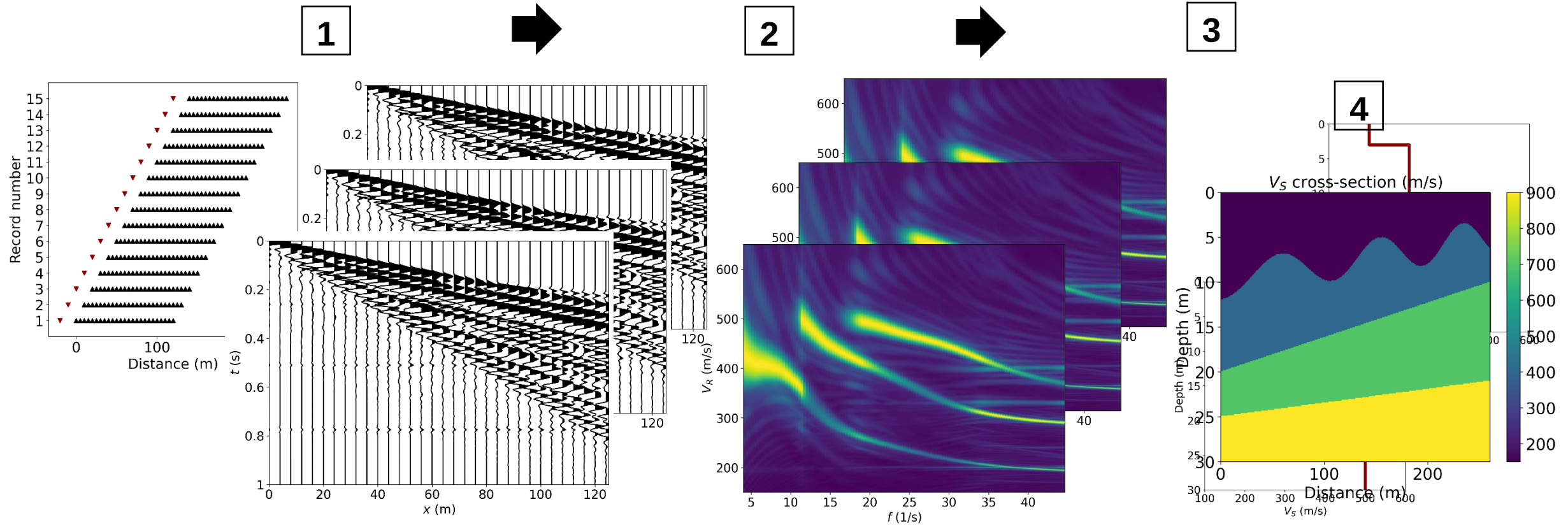
- ✓ Метод SWI (MASW) подходит для всех типов разрезв.
- ✓ Для повышения точности результатов инверсии следует использовать комплекс методов.

Особенности распространения поверхностных волн



- ☐ Высокое соотношение S / N
- ☐ Низкие частоты и малые скорости
- ☐ Различные частотные компоненты распространяются с различной скоростью (**дисперсия**)
- ☐ Высокие частоты характеризуют приповерхностную часть, низкие частоты несут информацию о более глубоких слоях
- ☐ Быстро затухают с глубиной: Релея $\sim (1-1.5)\lambda$; Лява $\sim 2\lambda$

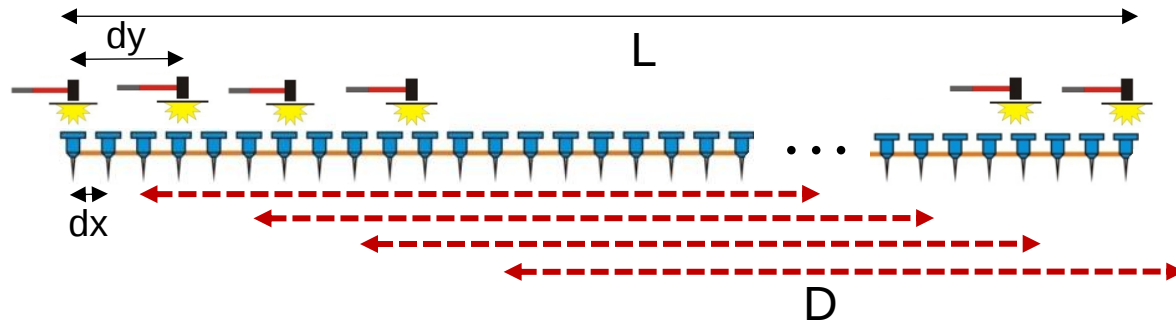
Этапы метода (модуля) SWI



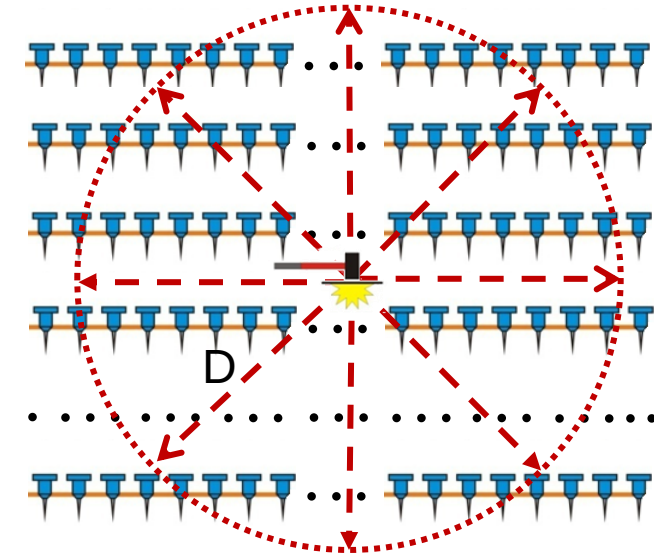
- 1. Препроцессинг:** сведение данных к фланговой расстановке
- 2. Спектральный анализ:** преобразование данных в спектральную область и извлечение кривой зависимости фазовой скорости от частоты (дисперсионная кривая)
- 3. Инверсия:** обращение дисперсионной кривой и определение 1D скоростной модели S-волны
- 4. Постпроцессинг:** интерполяция и сглаживание скоростных моделей, построение 2D и 3D модели

Этап 1 – Препроцессинг. Методика «профилирования»

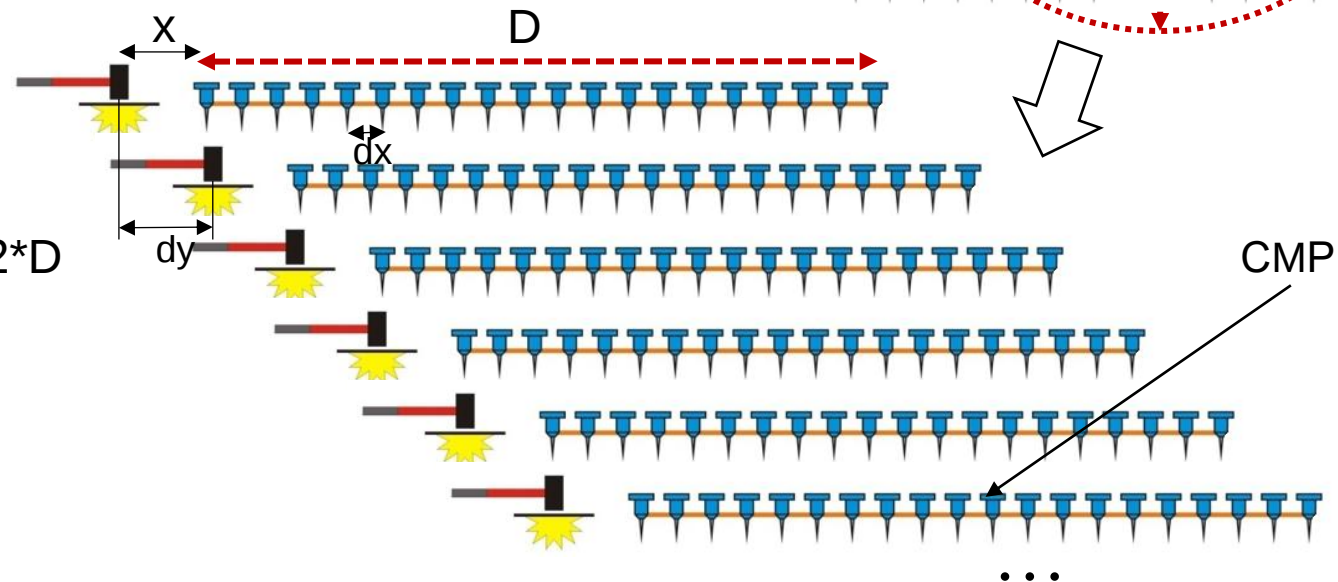
В случае 2D системы наблюдения



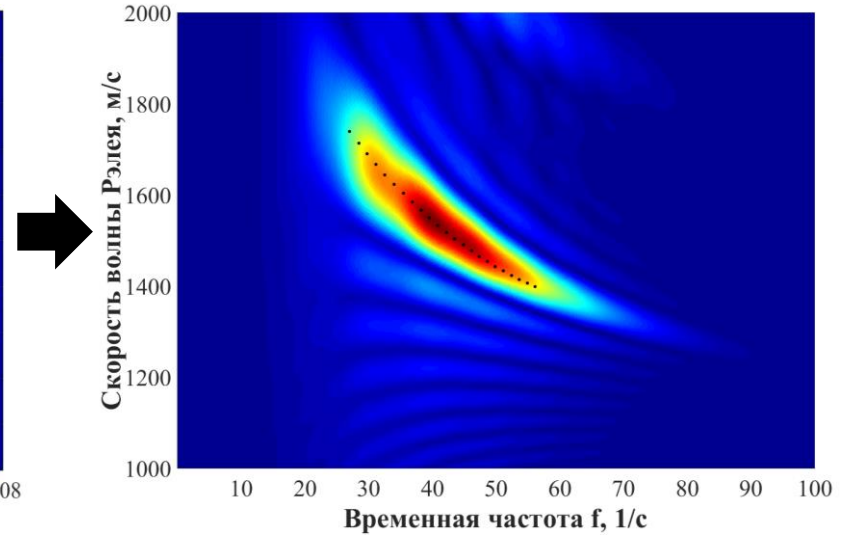
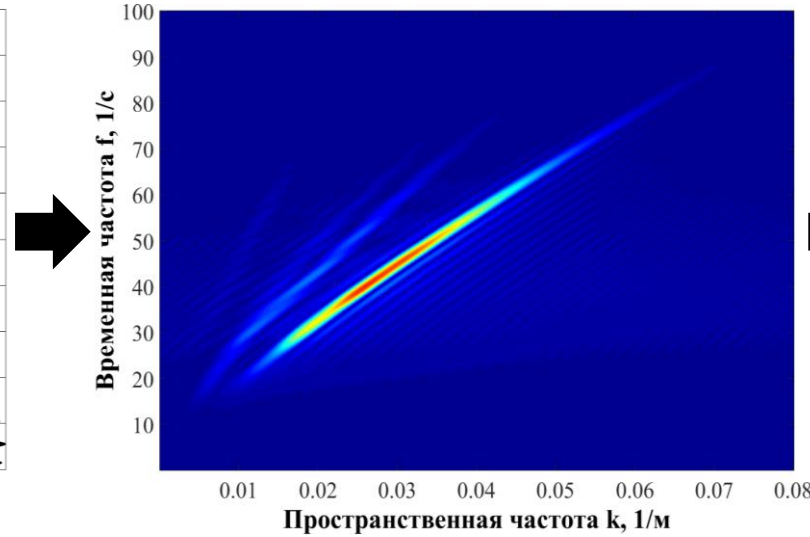
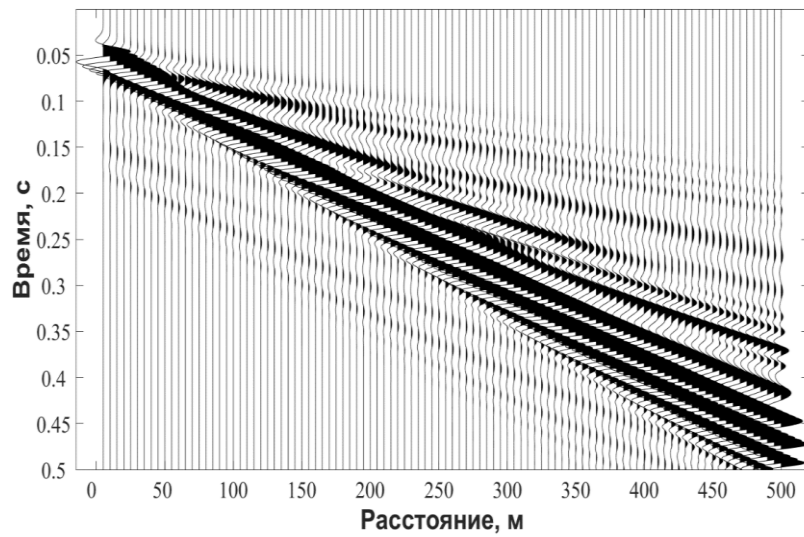
В случае 3D системы наблюдения



- ❑ База наблюдения (D):
желаемая глубина $\sim D/2$
- ❑ Мин. вынос ПВ-ПП (X) $\sim 0.2 \cdot D$
- ❑ Шаг ПВ – минимально
возможный
- ❑ CMP – среднее по
координатам приемников



Этап 2 – Спектральный анализ. Метод FKT



Базовый метод – 2D
Фурье-преобразование
(FK-transform)

$$D(k, f) = \iint d(x, t) \exp(-i2\pi ft) \exp(i2\pi kx) dt dx,$$

Перераспределение
амплитуд из F-K в V-f

$$V = f/k$$

Методы спектрального анализа:

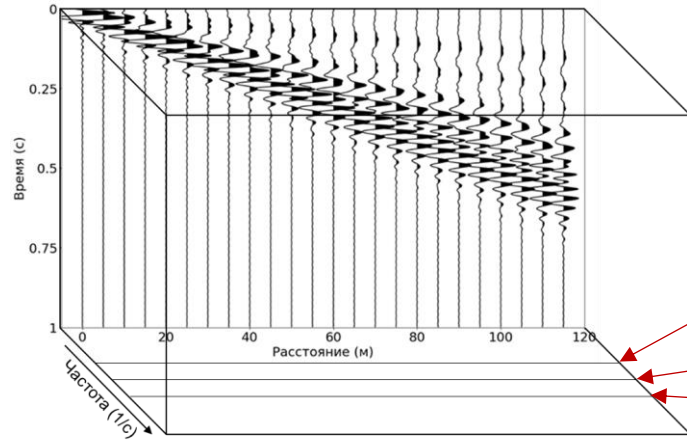
- f - k преобразование [Gabriels et al., 1987]
- τ - p преобразование [McMechan and Yedlin, 1981]
- алгоритм фазового сдвига [Park et al., 1999]

- ✓ Недостаточная фильтрация случайных и регулярных помех
- ✓ Ложные максимумы энергии на амплитудных спектрах
- ✓ Спектральное размывание при уменьшении базы наблюдения
- ✓ Требуется ручное пикирование опытными специалистами

Этап 2 – Спектральный анализ. Метод SFK

1

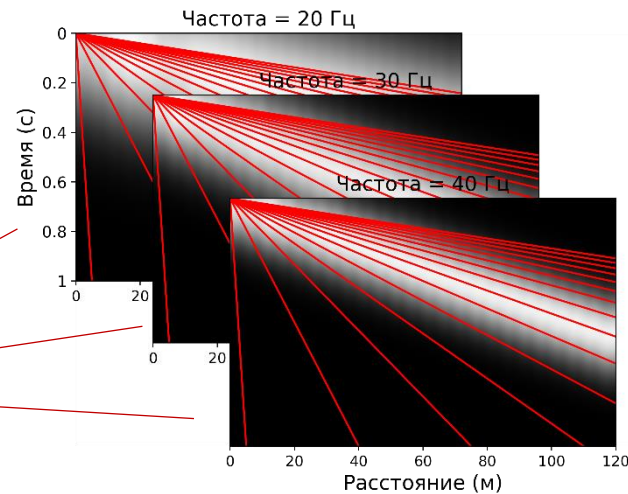
$$\hat{g}(x, t, f) = ST[g(x, t)](\tau, f, x)$$



Трансформация данных в пространство f - t - x применением S-преобразования

2

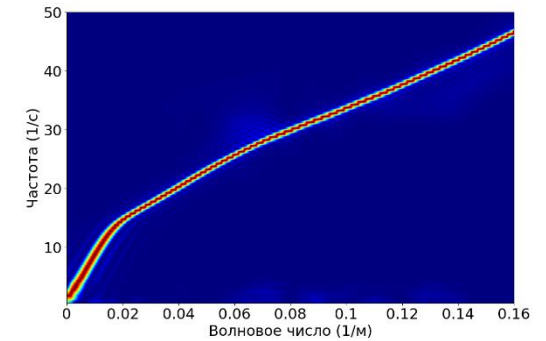
$$\Omega(u, f, k) = |FT[\hat{g}(x, x/u, f)](x)|$$



Перебор возможных наклонов и поиск суммарного максимума вдоль наклона на каждой частоте.
Расчет 1D-Фурье вдоль x

3

$$P(f, k) = \max_u \Omega(u, f, k)$$



Построение помехоустойчивого FK-изображения, пересчет в V-f. Автоматическое извлечение дисперсионной кривой по максимумам энергии вдоль волновых чисел

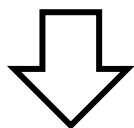
Для повышения устойчивости и выделения фундаментальной кривой при ее извлечении задаются **пределы диапазонов**, а также используется кластеризация спектральных амплитуд методом **HDBSCAN**.

Основные входные параметры: f_{min} , f_{max} , V_{min} , V_{max} , ширина окна Гаусса, диапазоны пикирования и метод пикирования

[Serdyukov A.S., **Yablokov A.V.**, Duchkov A.A., Azarov A.A., Baranov V.D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Т. 84. – № 1. – С. A19-A24.]

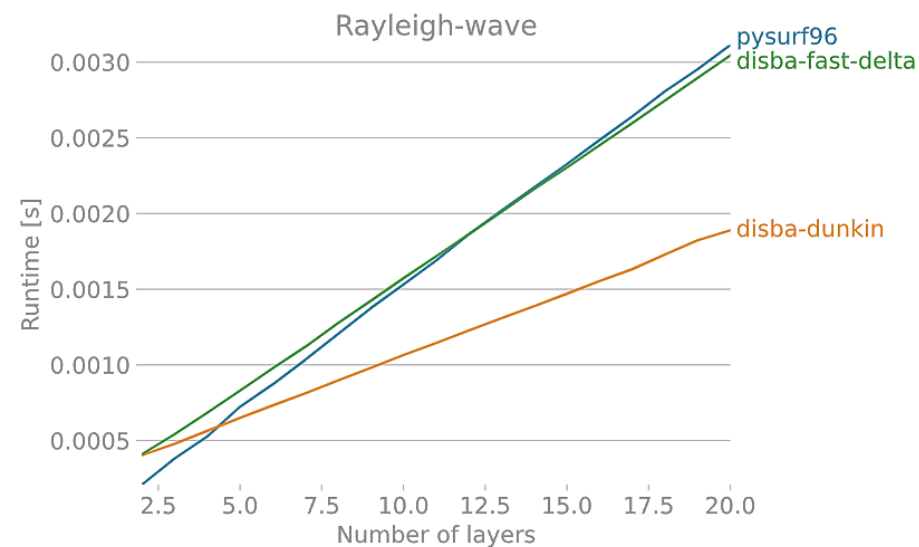
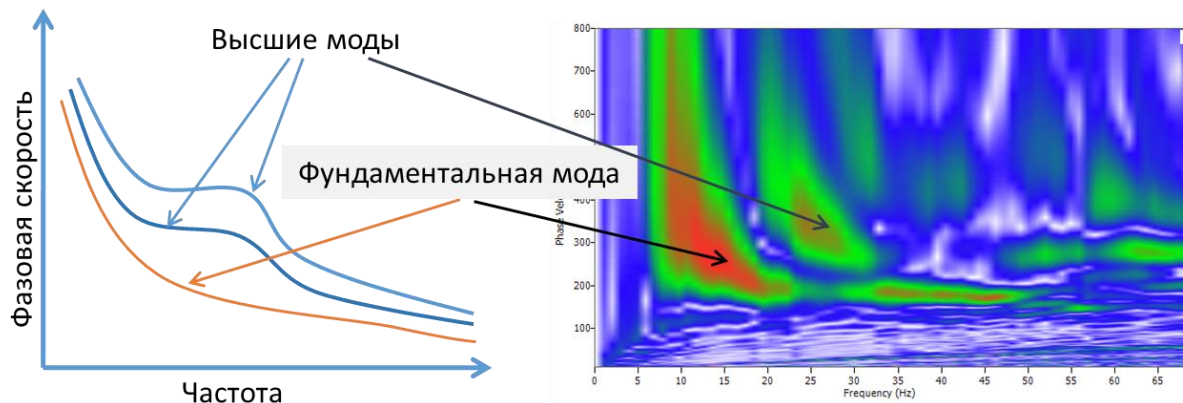
Расчет дисперсионных кривых (прямая задача)

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} - (\lambda + 2\mu) \text{grad} \text{div} \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} = f(t) \delta(x_s)$$



$$F_R = [f, C_R, V_s, V_p, \rho, h] = 0 \quad (F_L = [f, C_L, V_s, \rho, h] = 0)$$

- ❑ **Дисперсионная кривая** рассчитывается в ходе решения задачи на собственные значения вектора движения-напряжения в рамках упругой, 1D-модели среды.
- ❑ Для фиксированной частоты существует некоторое множество решений – **моды** дисперсионной кривой.
- ❑ Задача решается методом **Dunkin's matrix** [Cercato, 2007], превосходящим по скорости остальные известные подходы: fast delta matrix [Buchen, 1996], метод Томсона – Хаскелла [Thomson, 1950; Haskell, 1953].



Этап 3 – Инверсия (обратная задача)

Обратная задача состоит в подборе скоростной модели (m), для которой расчетная кривая будет близка к наблюдаемой:

$$MAE(V_R^{\text{извлеченная}} - V_R^{\text{расчетная}}(m)) \rightarrow \min$$

Традиционно задача решается двумя подходами:

- Локальная оптимизация (алгоритм **Оккама** и др.) [Xia et al., 1999; Lai, 2005]



- ✓ Решение – гладкие модели (большое число слоев, только Vs)
- ✓ Необходима хорошая начальная модель
- ✓ Вычислительно простые
- ✓ Низкая точность определения глубины границ слоёв

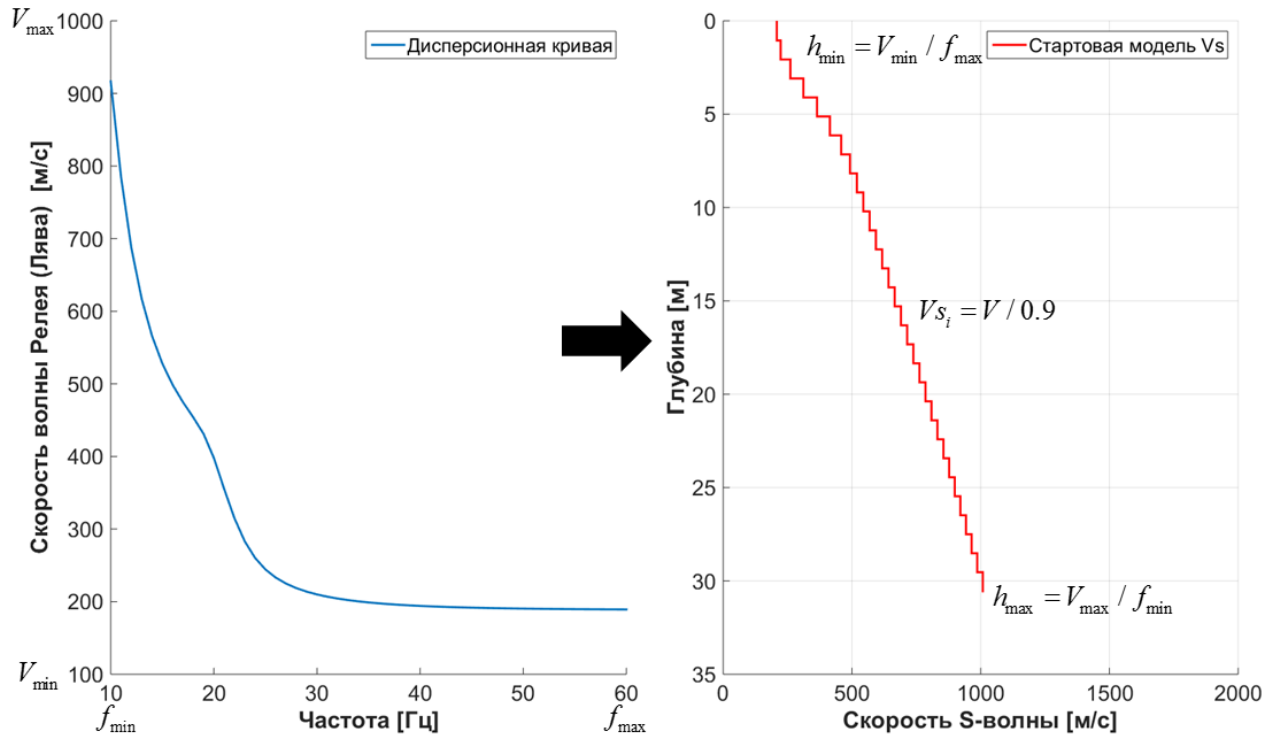
- Глобальная оптимизация (алгоритмы **SSA**, **GWO** и др.) [Song et al., 2015; Cox and Teague, 2016]



- ✓ Решение – слоистые модели (Vs и мощность слоев)
- ✓ Необходимо определять диапазоны поиска параметров
- ✓ Вычислительно сложные
- ✓ Больше настраиваемых параметров

Этап 3 – Инверсия локальной оптимизацией (Оккама)

Построение начальной модели



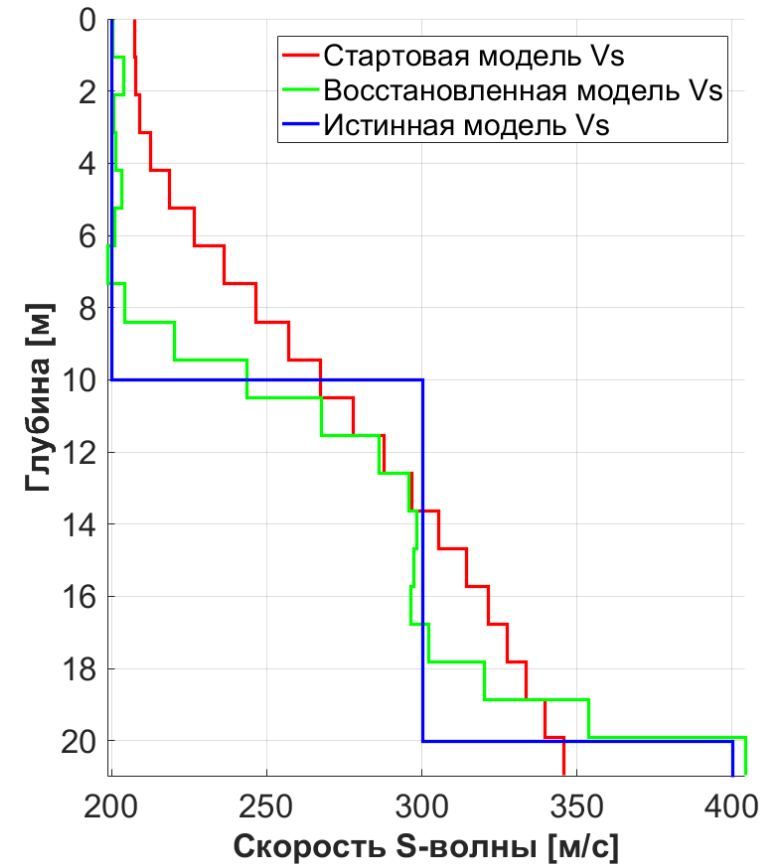
Обратная задача линейризуется на каждой итерации, где ищется добавка к скоростной модели

$$dV_s = \left\{ \mu(\partial^T \partial) + \left[(J_s)_{V_{S_0}} \right]^T \left[(J_s)_{V_{S_0}} \right] \right\}^{-1} \left[(J_s)_{V_{S_0}} \right]^T \left[V_{R(L)}^{\text{набл}} - V_{R(L)}^{\text{расч}}(V_{S_0}) \right],$$

$$V_s = V_{S_0} + dV_s$$

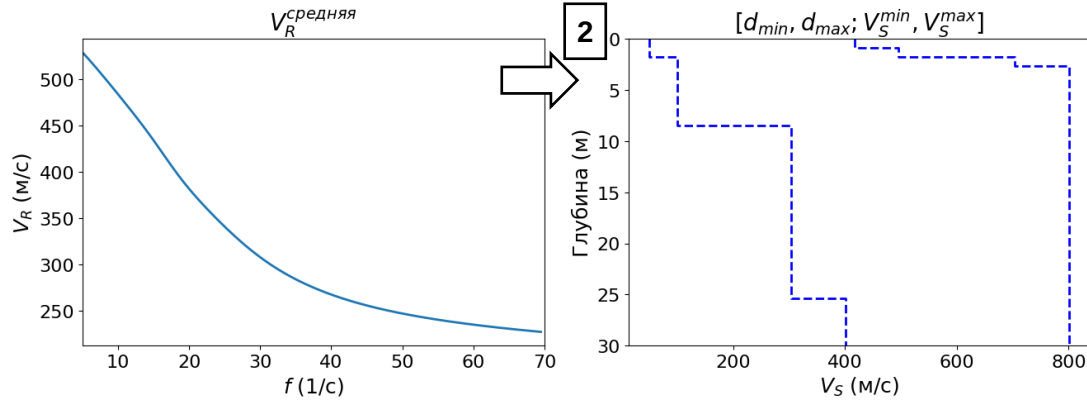
Основные входные параметры:

число итераций, число слоев



Этап 3 – Инверсия глобальной оптимизацией (SSA и GWO)

Оценка диапазонов поиска параметров



d_{min} и d_{max} [Cox, Teague, 2016]:

$$d_{min}^i \approx \begin{cases} \lambda_{min}/3 & \text{при } i=1 \\ d_{max}^{i-1} & \text{при } i>1 \end{cases}$$

$$d_{max}^i \approx \begin{cases} \lambda_{min} & \text{при } i=1 \\ d_{min}^i + \Xi \cdot \lambda_{min} & \text{при } i=2 \\ d_{min}^i + \Xi \cdot (d_{max}^{i-1} - d_{min}^{i-1}) & \text{при } i>2 \end{cases}$$

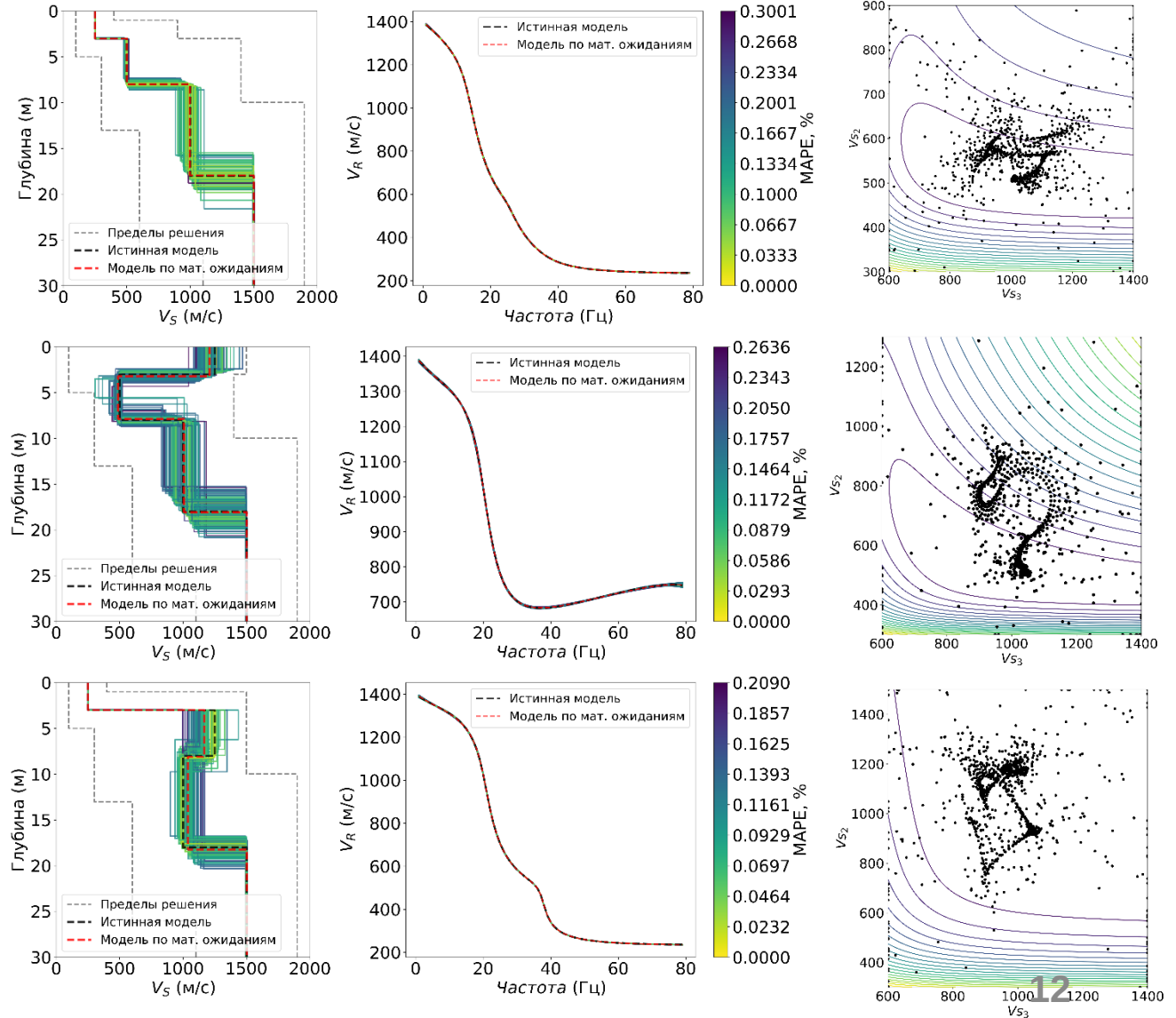
V_S^{min} и V_S^{max} :

$V_R(\lambda) \rightarrow V_S(d)$, при $d \approx \lambda/2$, $V_S \approx 1.16V_R$

$$V_S^{i,min,max} = V_S(d_{mean}^i) -/+0,5V_S(d_{mean}^i)$$

Основные входные параметры:

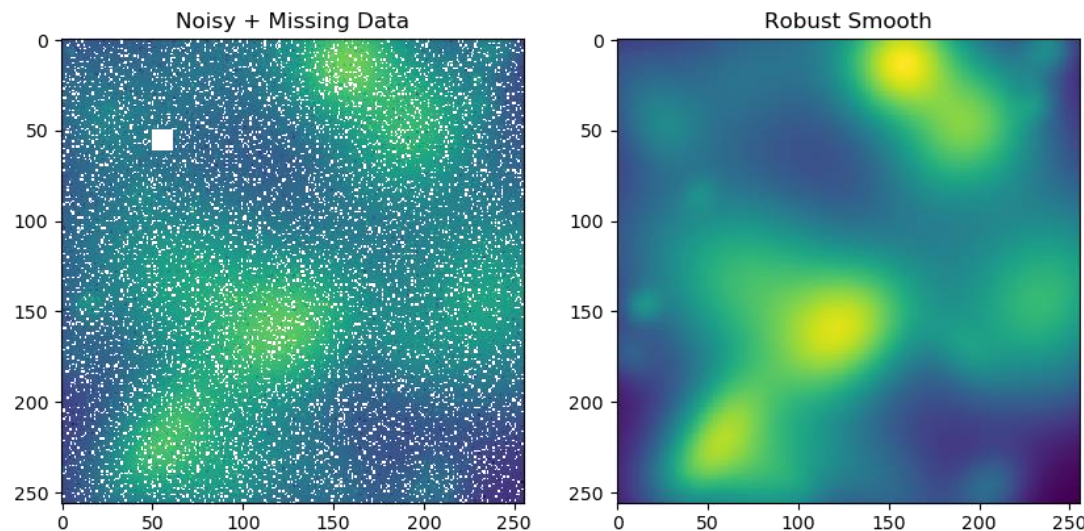
число итераций, коэффициент слоистости



Этап 4 – Постпроцессинг

1. Линейная интерполяция моделей на заданный шаг.
2. Сглаживание 2D-моделей алгоритмом с фильтрацией выбросов и восстановления пропусков

Основные входные параметры: dx , dy , dz , фактор сглаживания, флаг на обработку выбросов



Алгоритм сглаживания основан на пенализированном МНК и дискретном косинусном преобразовании.

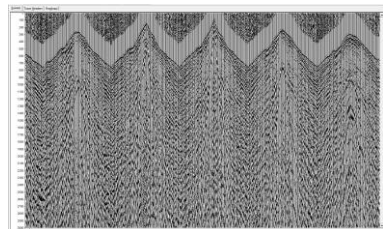
[Garcia, 2010 - Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values]

Входные параметры по этапам модуля

Входные данные модуля	Преппроцессинг	Спектральный анализ	Инверсия	Постпроцессинг
Сейсмотрассы, FFID, SourceX, SourceY, GroupX, GroupY	ffid_start: 1 ffid_stop: 5 ffid_increment: 1 path4ffid_file: \ffid.txt data_dir: \data_3d type_data: 3d offset_min: 0 offset_max: 600 qc_preprocessing: True both_flank: True sort_3d_order: csp num_sectors: 10 bin_size_x: 100 bin_size_y: 100	spectral_method: sfk fmin: 1 fmax: 10 vmin: 1 vmax: 1500 extract_dc_method: dbscan path4dc_limits: \dc_lim.csv qc_spectral: True desired_nt: 500 desired_nx: 500 smooth_data: True width: 0.5	inversion_method: occam niter: 50 wavetype: rayleigh veltype: phase vp_model: vp lock_vp: False path4vp_model: \vp.sgy qc_inversion: True model_ranges: path4vs_limits: \vs_lim.csv xi: 2.2 get_num_layers: every nlay: 20	max_depth: 200 d_x: 500 d_y: 500 d_z: 5 smooth_factor: 150 interp_dim: 1d vmin_in_model: 200 vmax_in_model: 1400 num_xslices_3d: 3 num_yslices_3d: 3 error_trh: 20

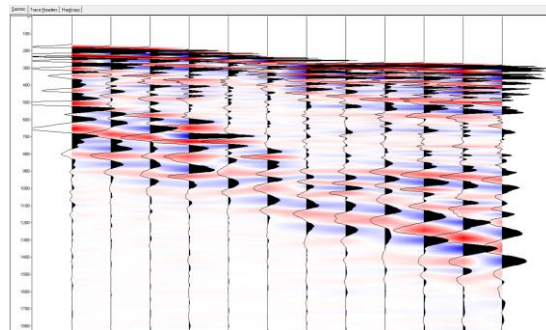
QC по этапам модуля

Входные данные модуля



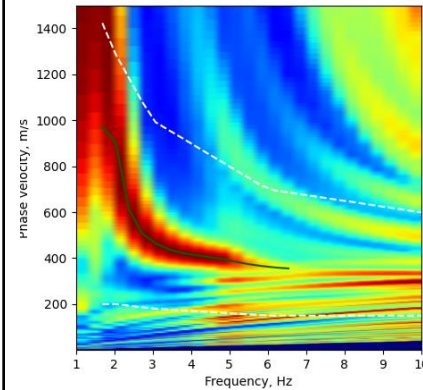
Time (seconds)	Trace	Amplitude	Frequency	Phase	Velocity	Depth	Location
0.0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.2	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.3	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.6	1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.7	1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
0.8	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
1.0	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Препроцессинг

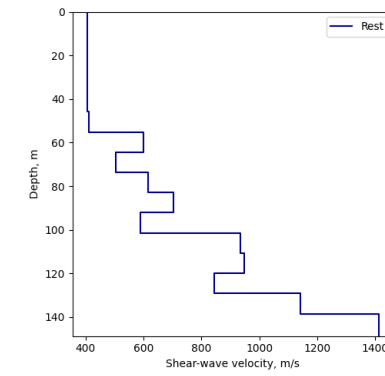
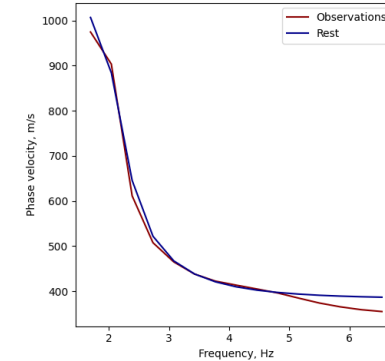


Time (seconds)	Trace	Amplitude	Frequency	Phase	Velocity	Depth	Location
0.0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.2	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.3	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
0.4	1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.6	1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.7	1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
0.8	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
1.0	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

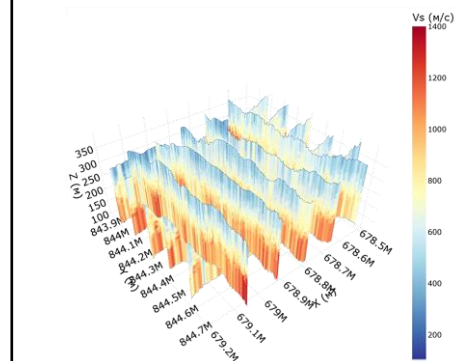
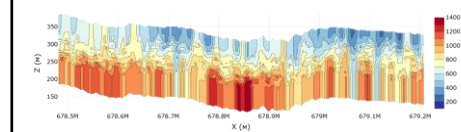
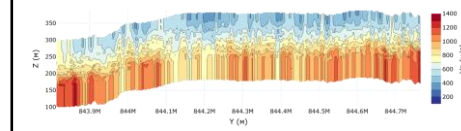
Спектральный анализ



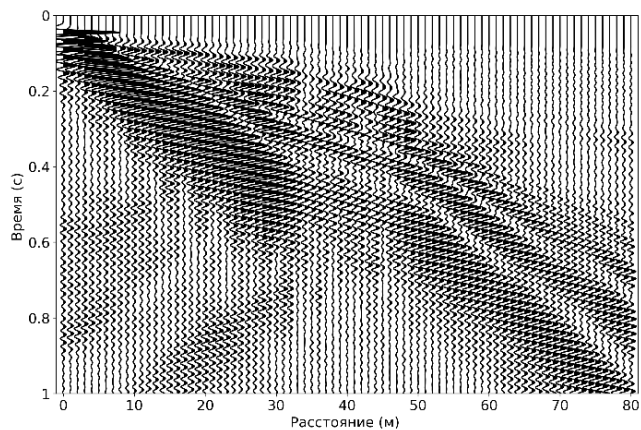
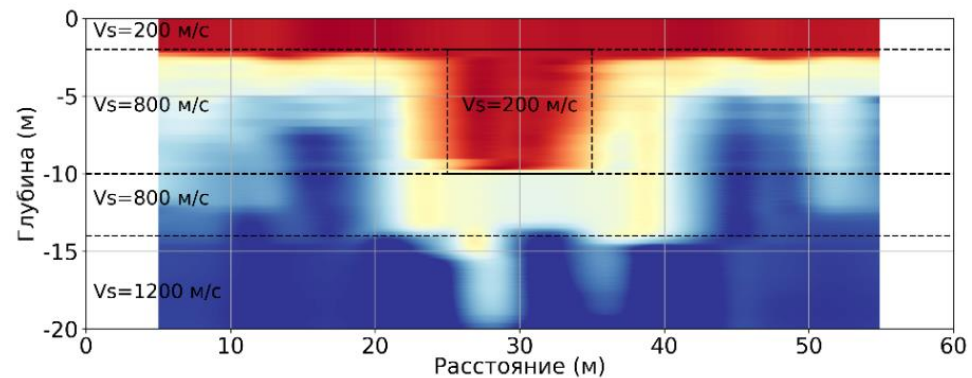
Инверсия



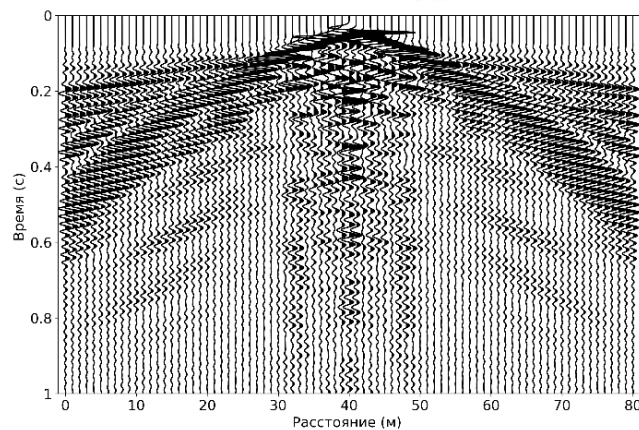
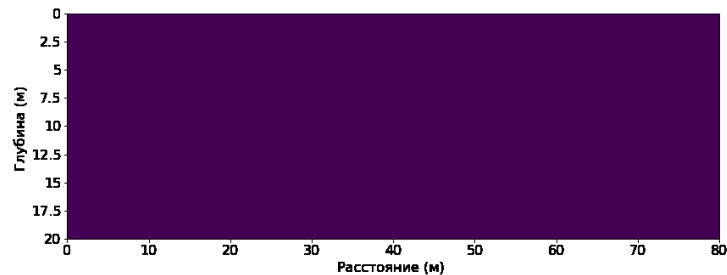
Постпроцессинг



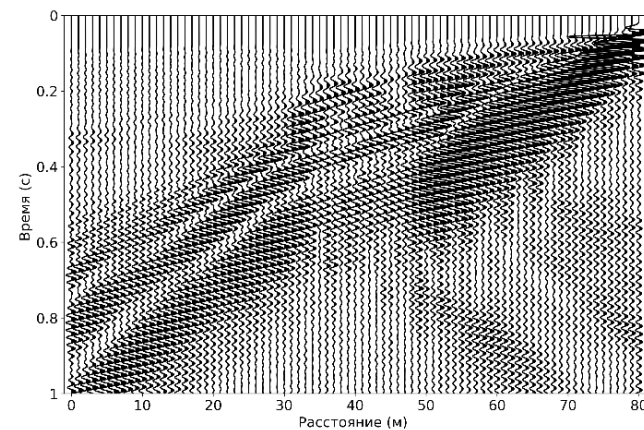
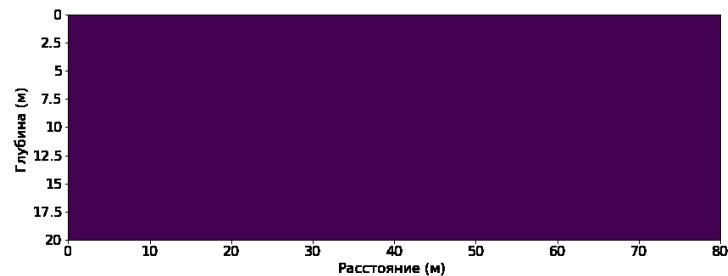
Тестирование на синтетических данных



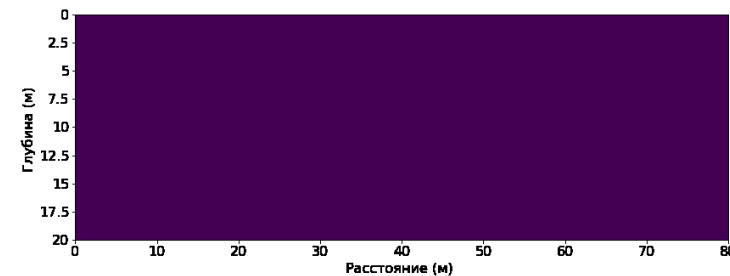
Вертикальная компонента смещения ($t=0.0$ с)



Вертикальная компонента смещения ($t=0.0$ с)

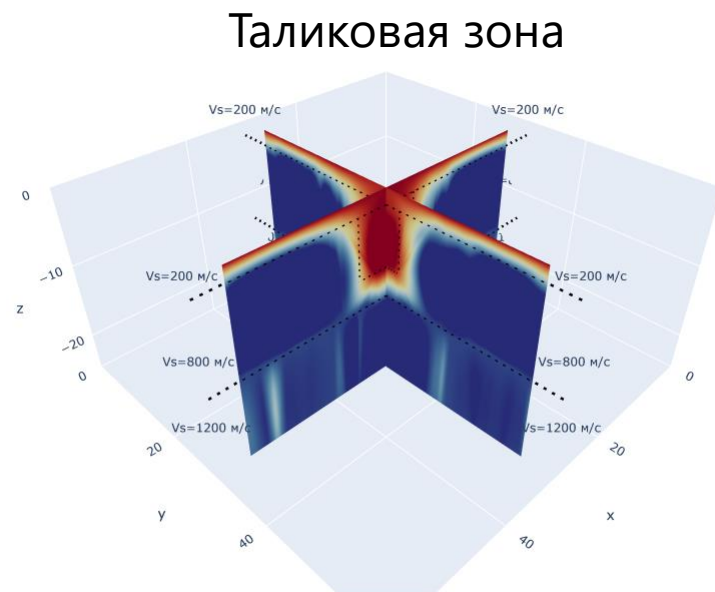


Вертикальная компонента смещения ($t=0.0$ с)

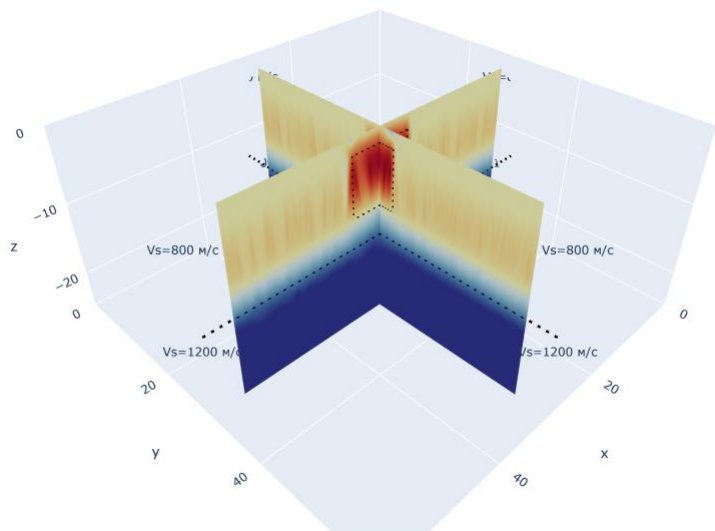


Тестирование на синтетических данных

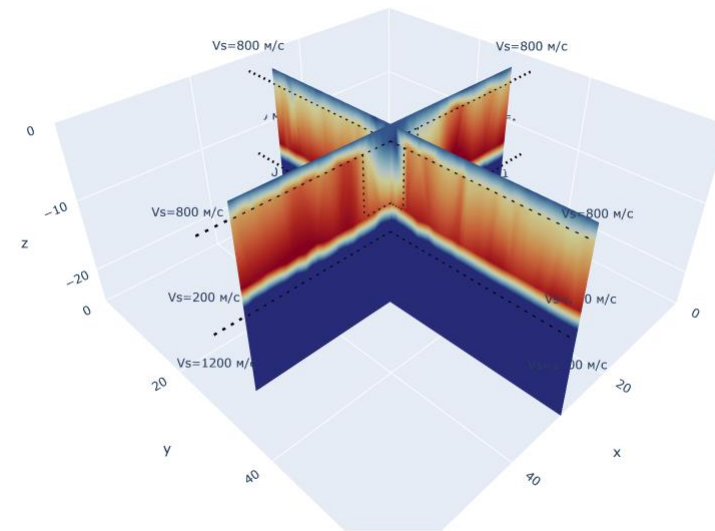
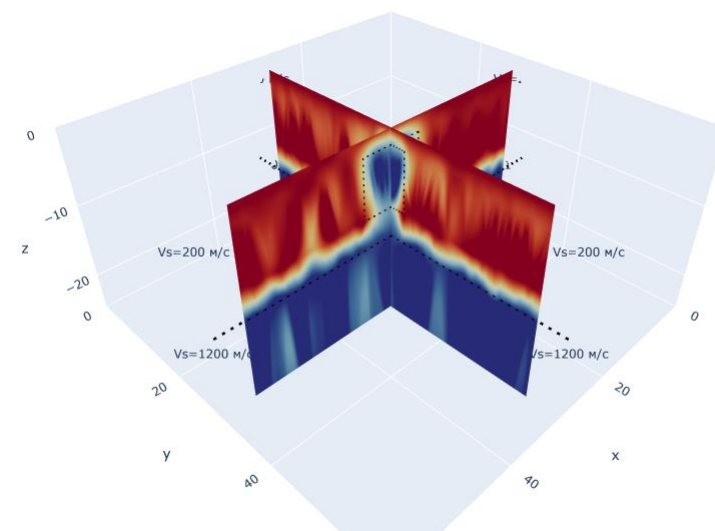
Нормальный разрез



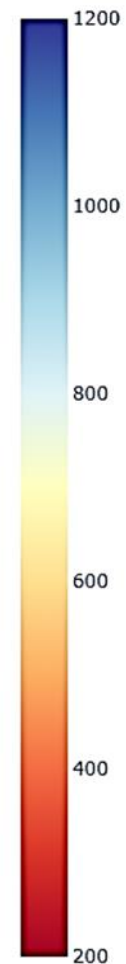
Инверсный разрез



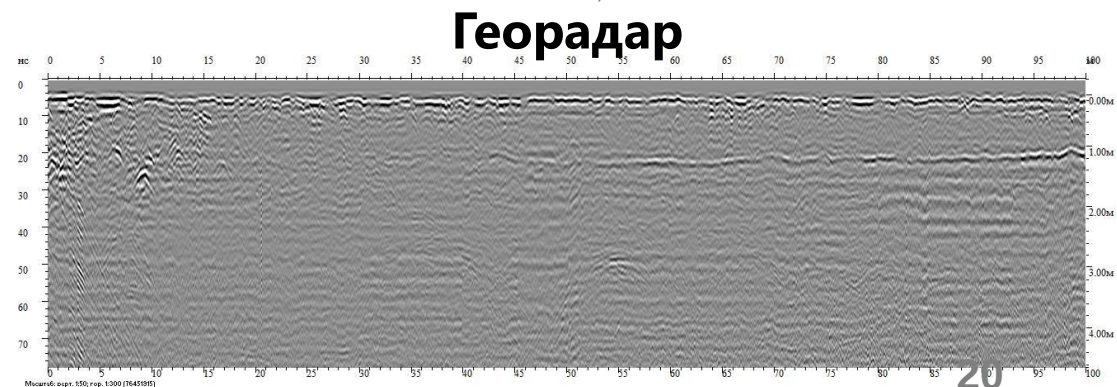
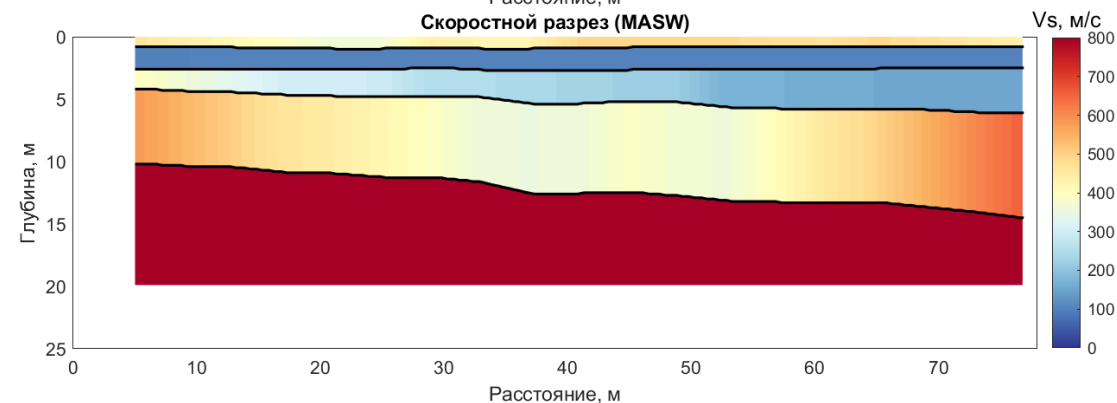
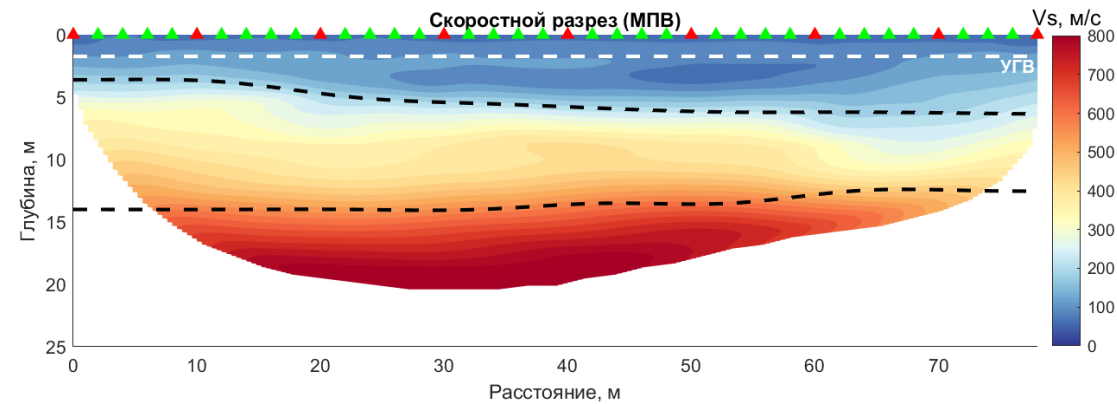
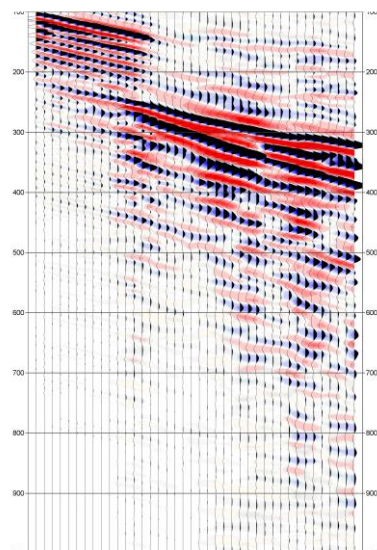
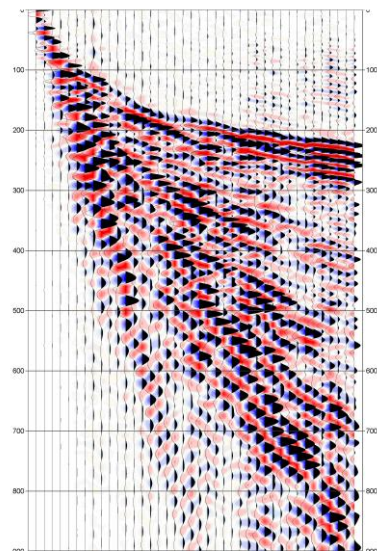
Искусственная мерзлота



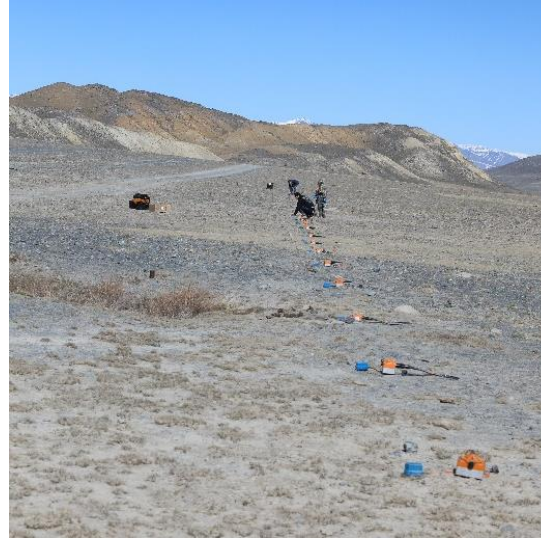
V_s , м/с



Апробация на реальных данных. Малоглубинная сейсморазведка. НСО



Апробация на реальных данных. Малоглубинная сейсморазведка. Алтай

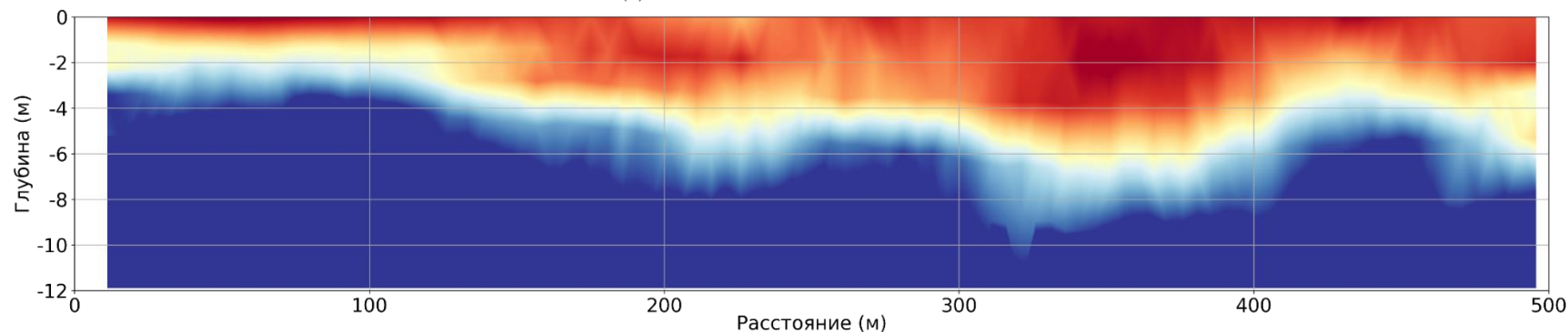
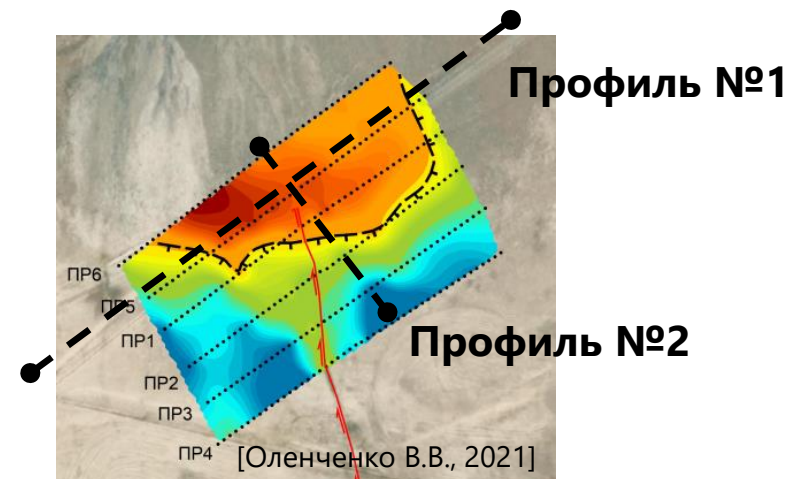
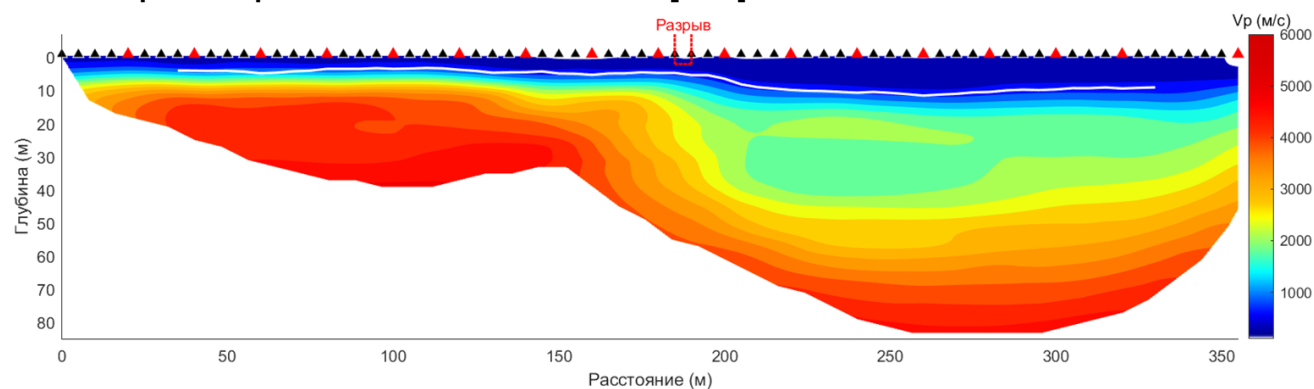


LandStreamer

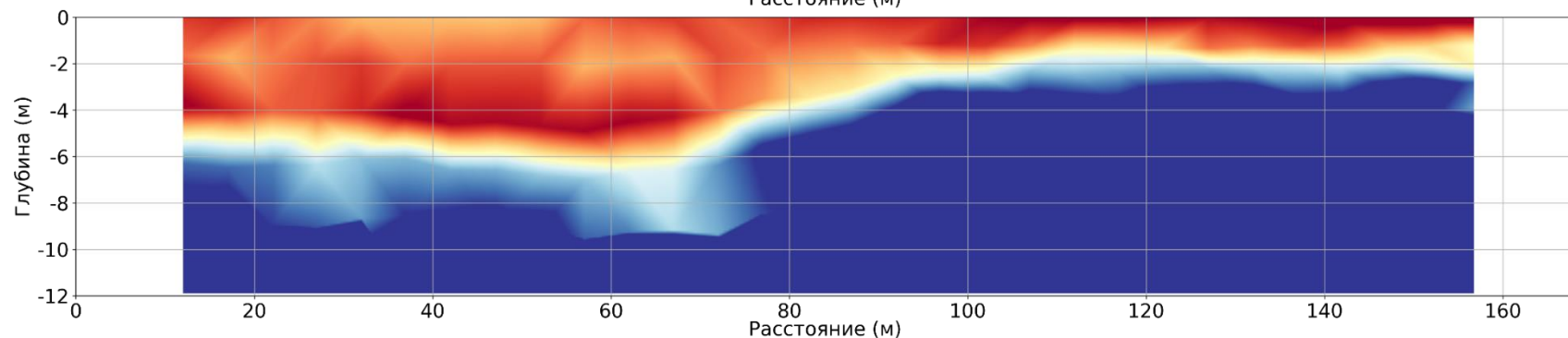


Апробация на реальных данных. Малоглубинная сейсморазведка. Алтай

Разрез V_p по сейсмотомографии

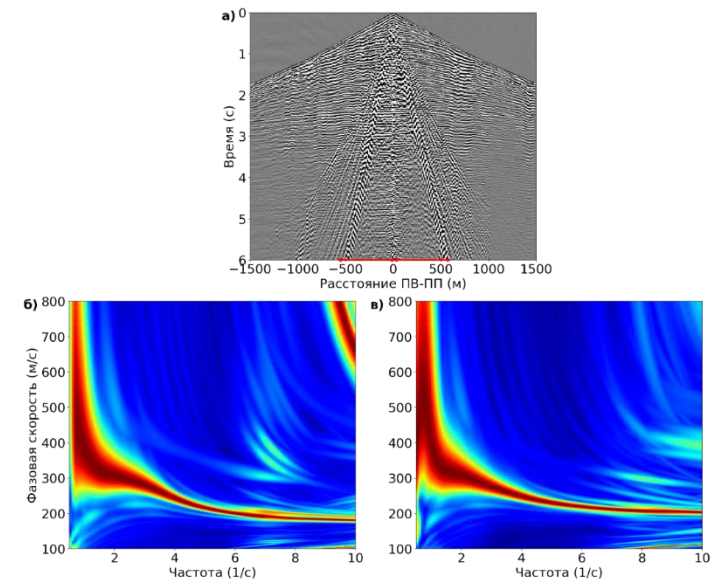
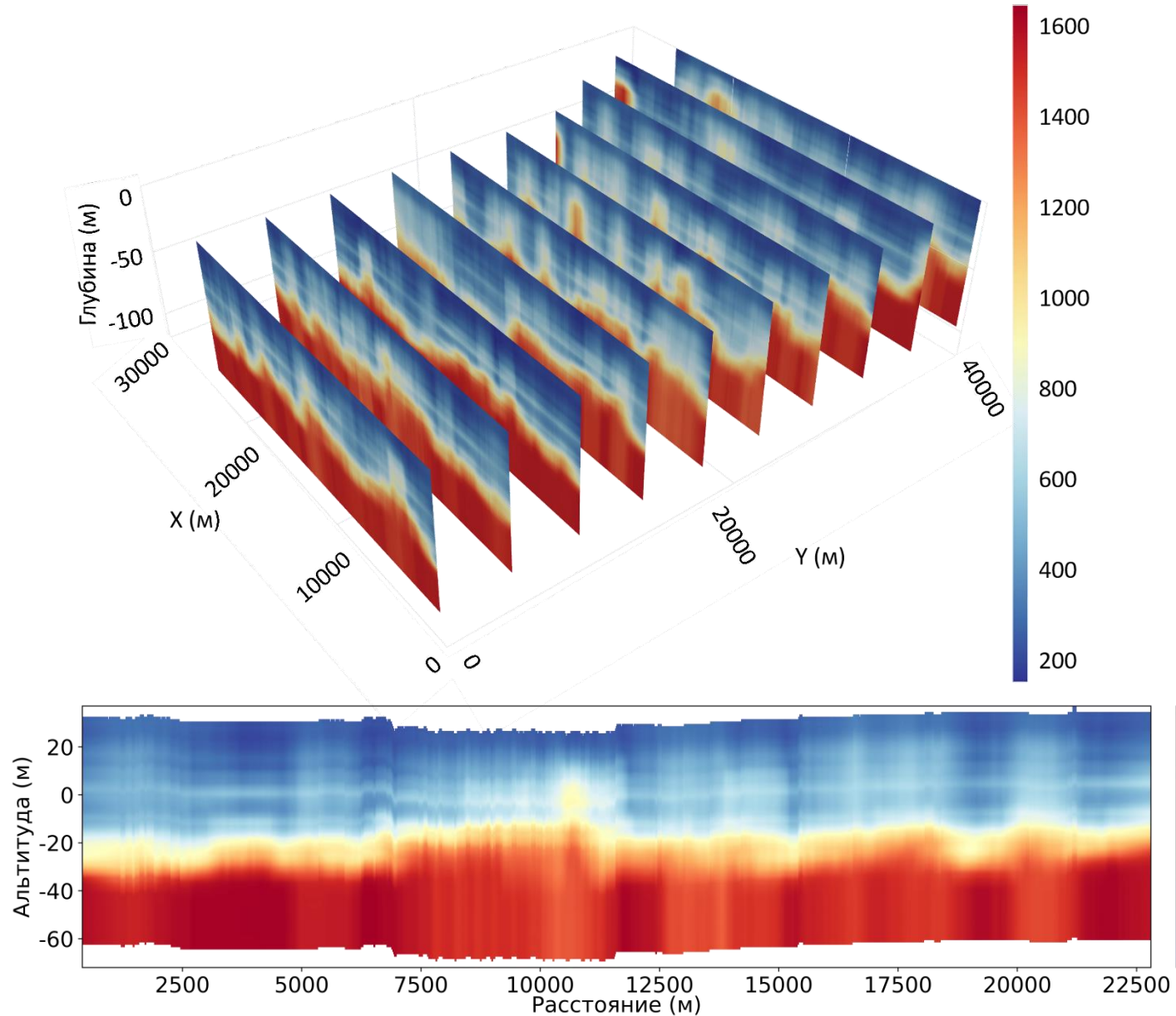


Результат MASW
(профиль №1)

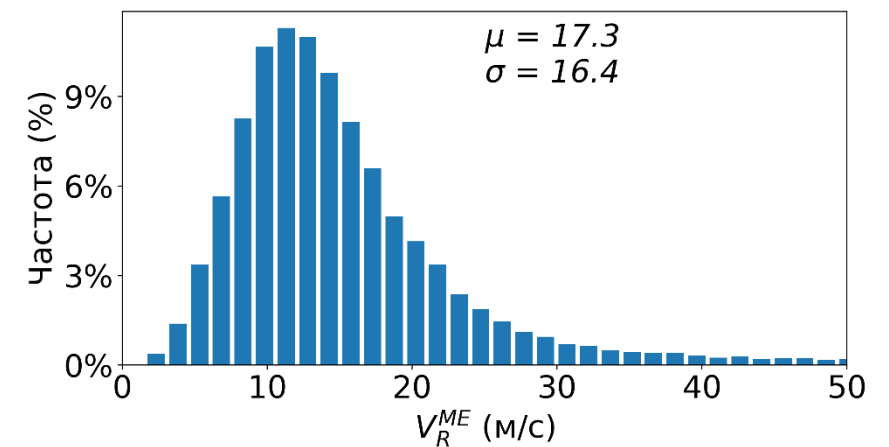


Результат MASW
(профиль №2)

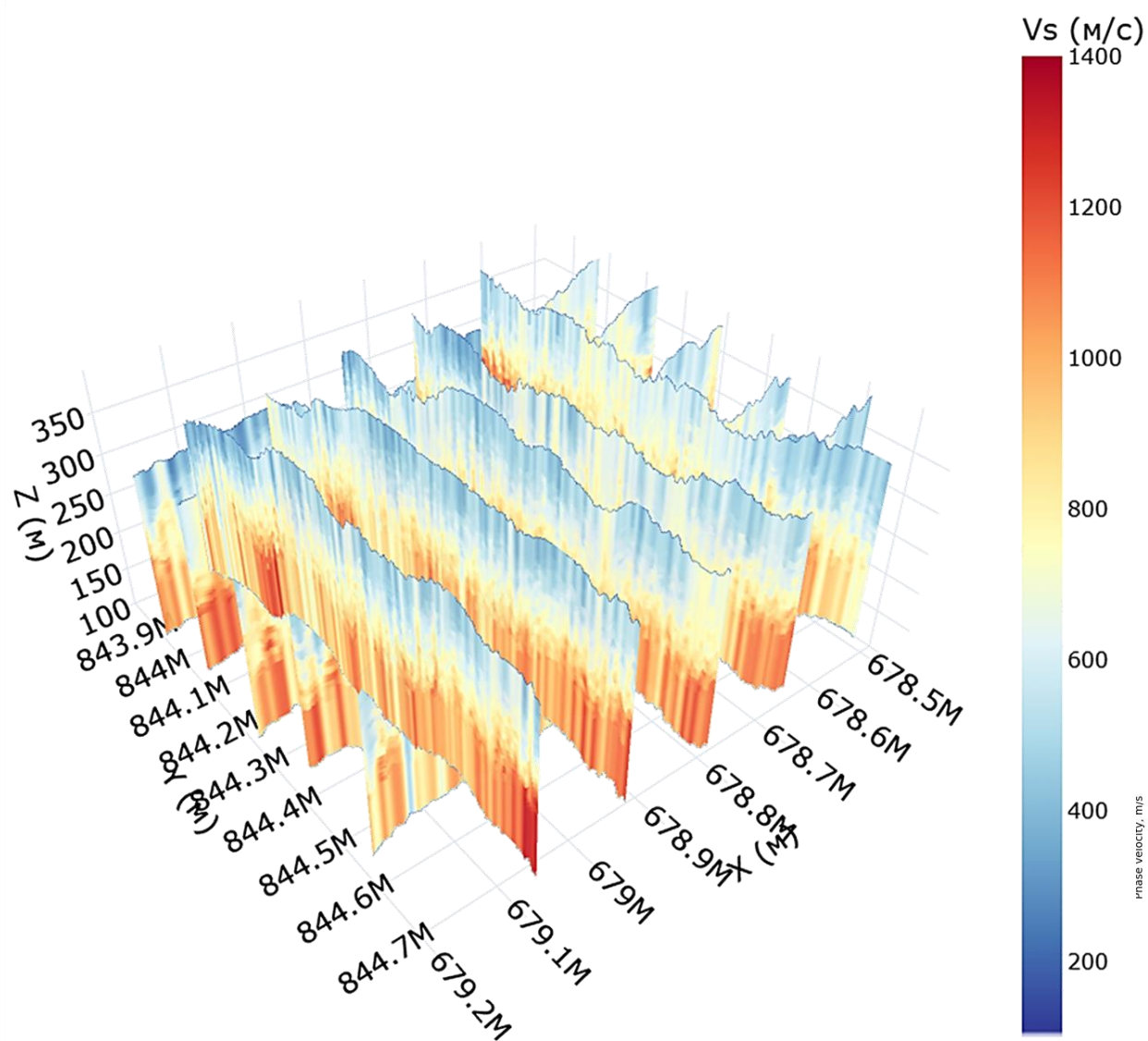
Апробация на реальных данных. Западная Сибирь. 2D



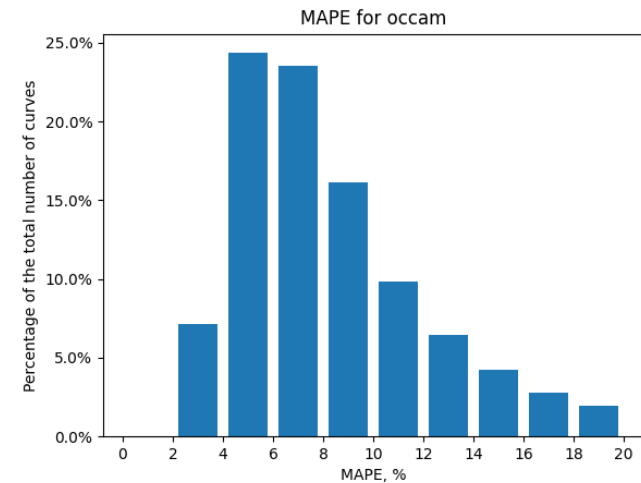
Максимальная абсолютная невязка между
дисперсионными кривыми



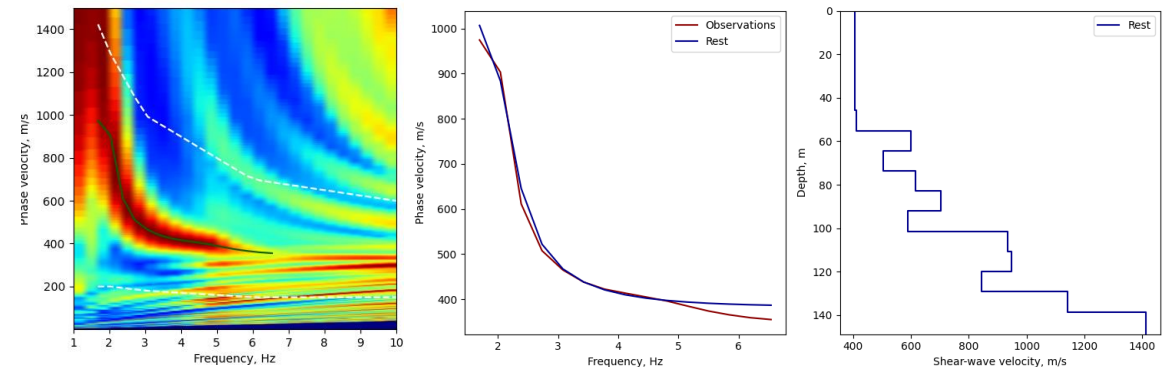
Апробация на реальных данных. Пакистан. 3D



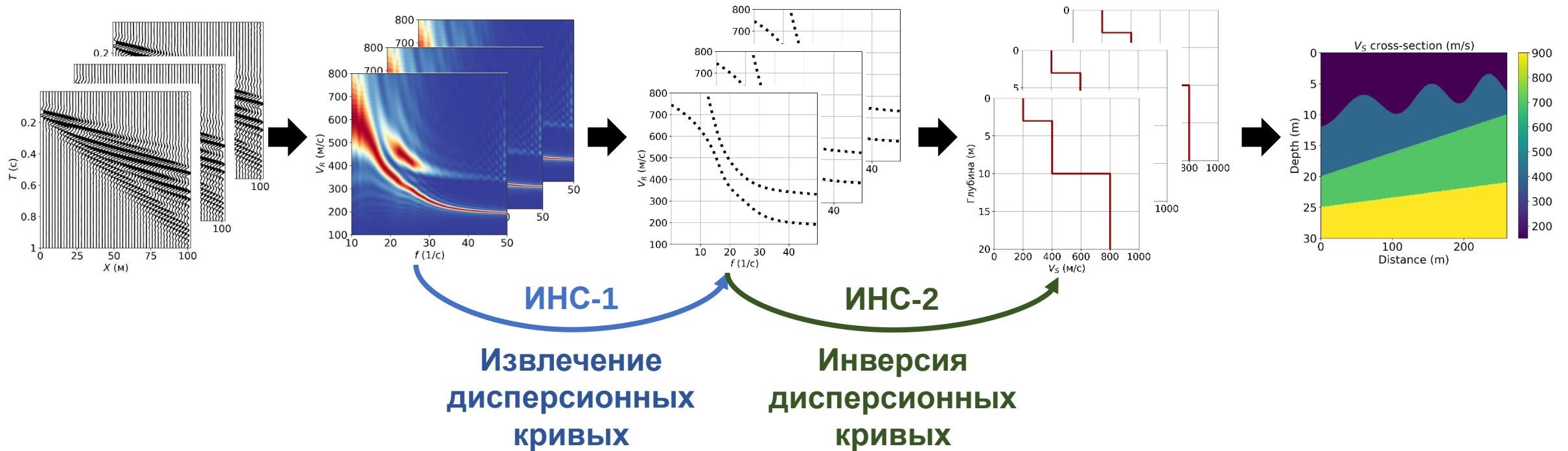
Средняя абсолютная невязка между дисперсионными кривыми



Для всей площади всего извлечено **45 516** дисперсионных кривых фазовых скоростей

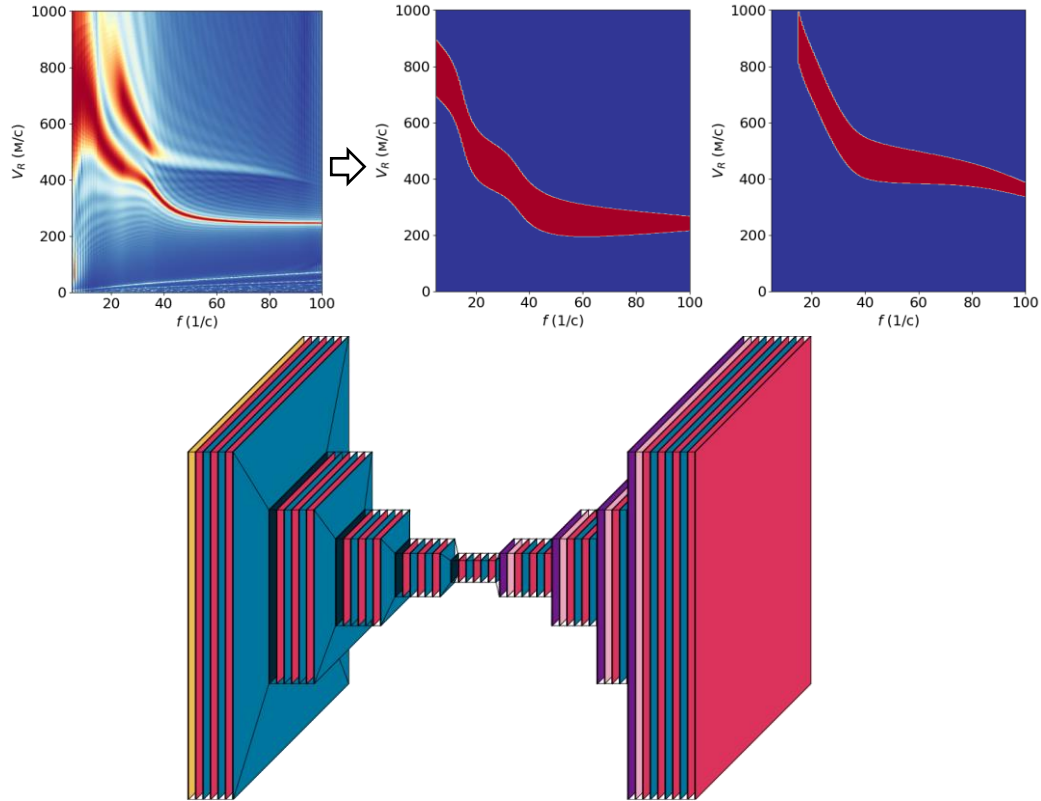


Ближайшее будущее модуля SWI



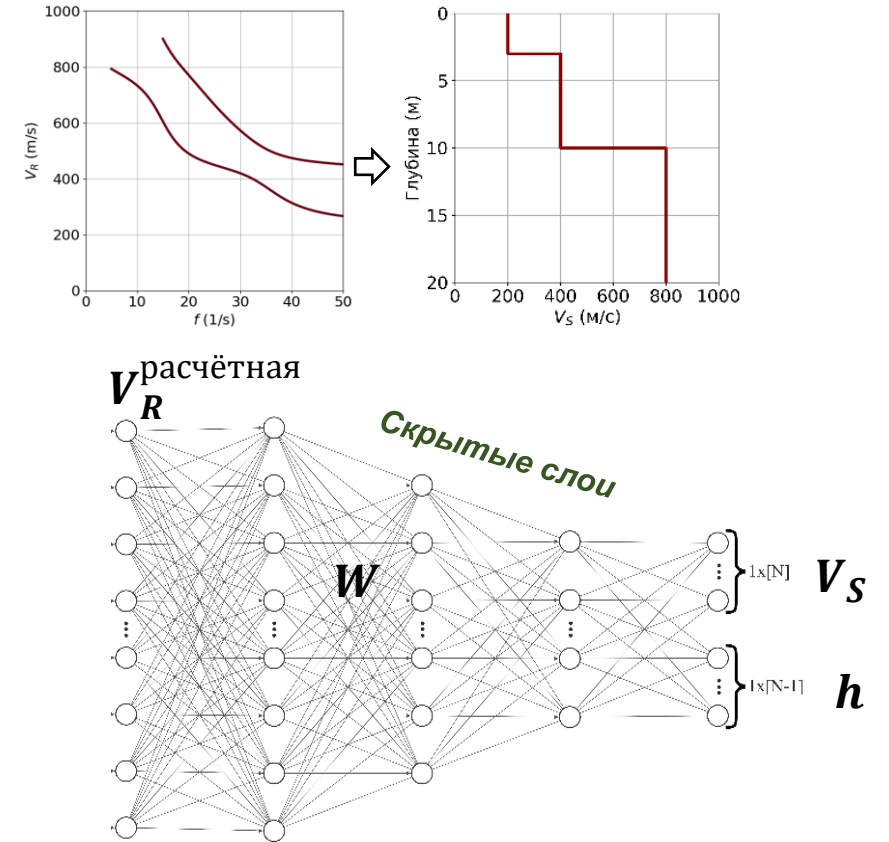
1. Препроцессинг
2. Трансформация сейсмограмм в дисперсионные изображения
3. Извлечение дисперсионных кривых с помощью нейронной сети типа автоэнкодер
4. Инверсия дисперсионных кривых с помощью полносвязанной нейронной сети
5. Постпроцессинг

ИНС-1 – АЕ



Камашев А. М., Дучков А. А. Применение машинного обучения для адаптивного вычитания кратных отраженных волн // Геофизические технологии – 2023.

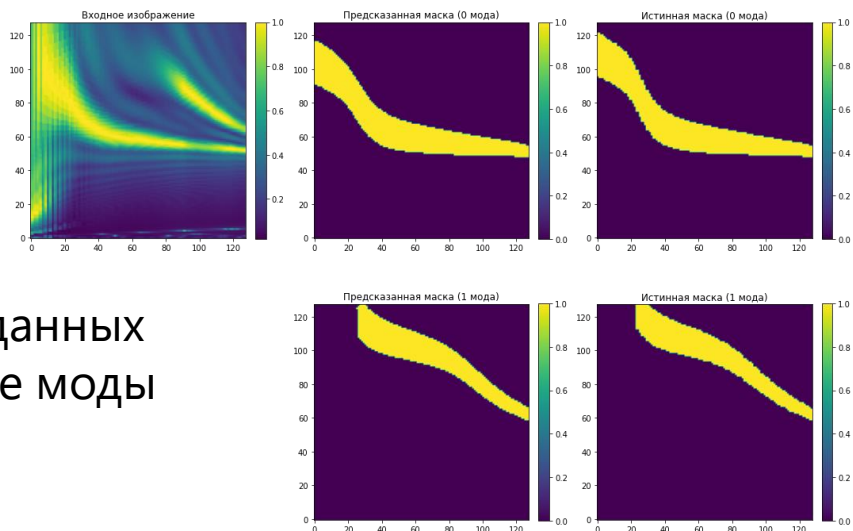
ИНС-2 – FC-ANN



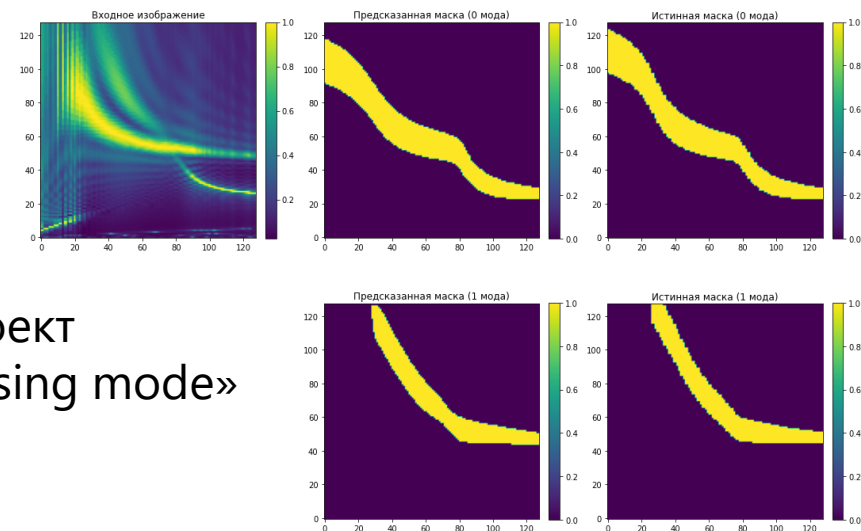
Yablokov A.V. et al.,
An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // Geophysical Prospecting – 2021.

Верификация ИНС-1 – АЕ на синтетических данных

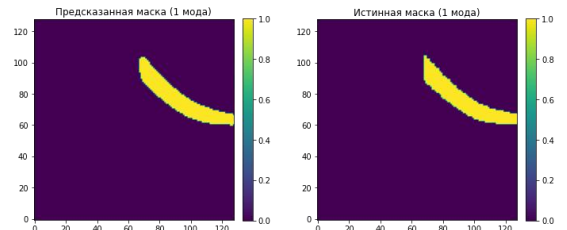
В данных
обе моды



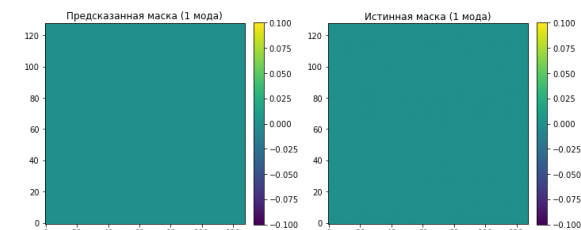
Эффект
«kissing mode»



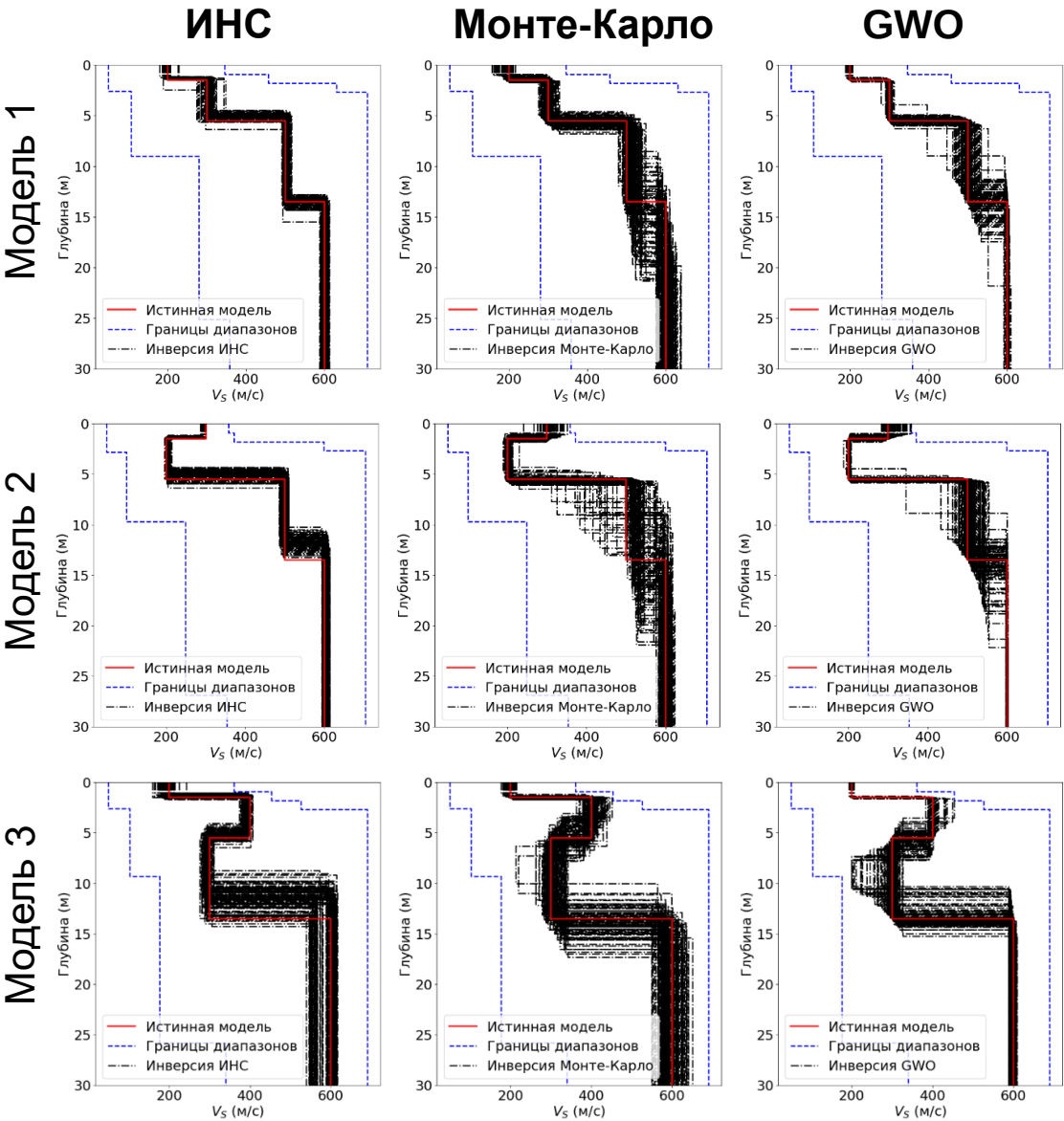
В данных
только
первая мода



В данных
только
нулевая мода



Верификация ИНС-2 – FC-ANN



- ❑ С использованием ИНС повышается устойчивость решения обратной задачи.
- ❑ С использованием ИНС время вычисления растёт незначительно при увеличении числа дисперсионных кривых.

Количество кривых	ИНС	Монте-Карло	GWO
1	< 1	< 1	~ 30
100	< 1	~ 5	~ 3 000
50 000	< 1	~ 160	~ 1 500 000
1 000 000	~ 10	~ 3 100	~ 30 000 000

Время решения обратной задачи (в секундах).

Заключение

❑ Функциональные возможности модуля **SWI**:

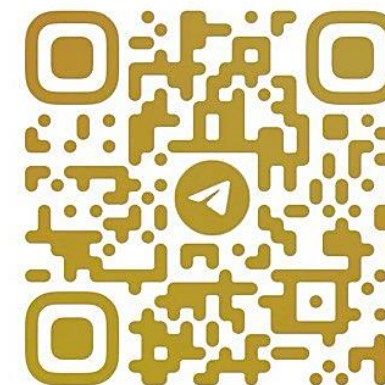
- ✓ Предобработка данных 2D и 3D
- ✓ Выполнение спектрального анализа (алгоритмы **FKT**, **SFK**)
- ✓ Автоматическое извлечение дисперсионных кривых (алгоритмы **max**, **hdbscan**)
- ✓ Построение начального приближения, определение диапазонов поиска и инверсия извлеченных дисперсионных кривых (алгоритмы **Оккама**, **SSA** и **GWO**)
- ✓ Устойчивое сглаживание с обработкой выбросов и пропусков

❑ Разработанный модуль SWI протестирован, верифицирован и апробирован на реальных данных

❑ Развитие модуля SWI сфокусировано в повышении точности и скорости работы на основных этапах с помощью искусственных нейронных сетей

Спасибо за внимание!

Яблоков
Александр Викторович
к.ф.-м.н., с.н.с. НГУ / ИНГГ СО РАН
yablokovav@ipgg.sbras.ru

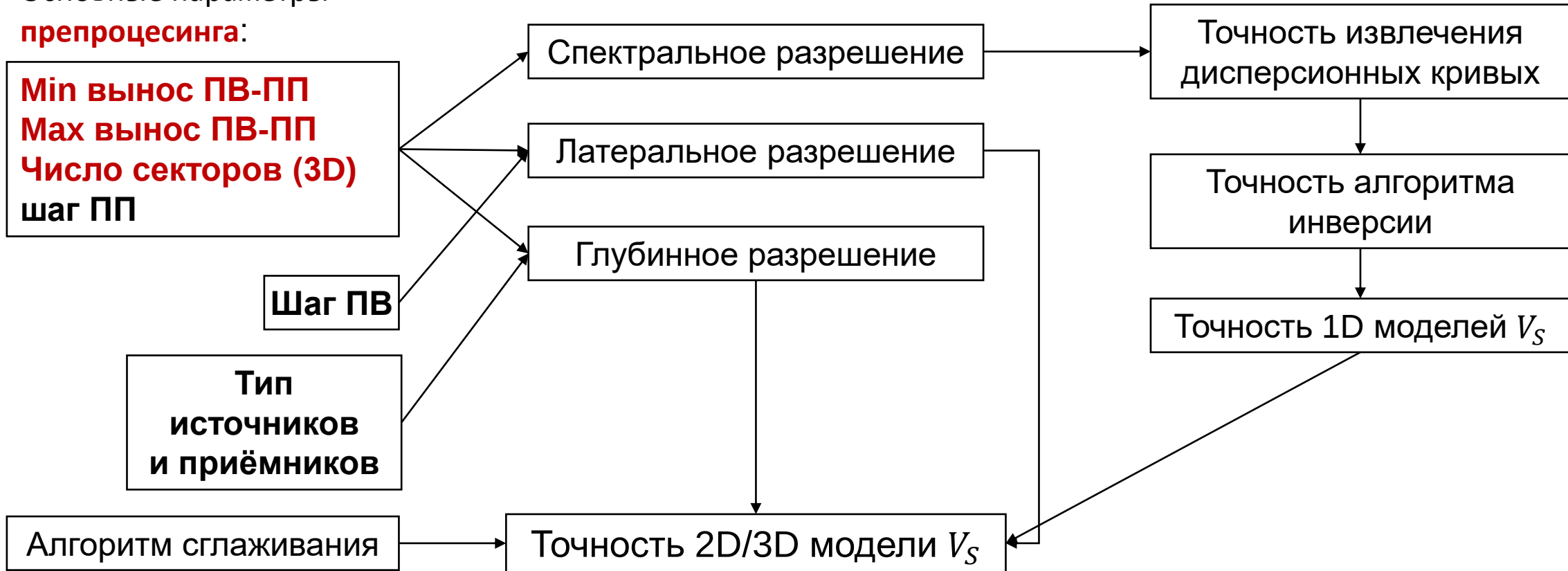


@YABLOKOVAV

Этап 1 – Препроцессинг. Влияние параметров препроцессинга на результат

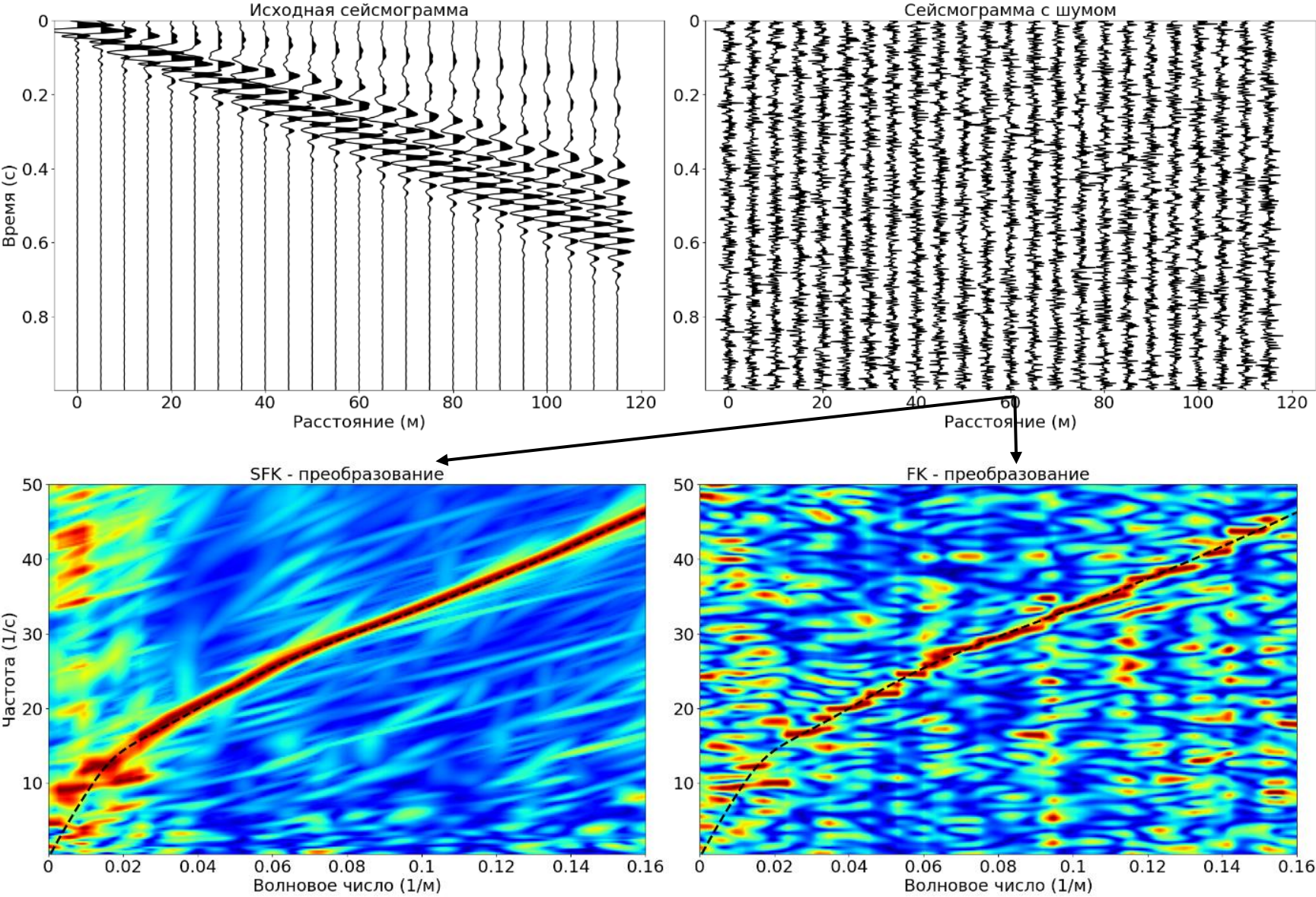
Основные параметры

препроцесинга:



[Рекомендации по выбору параметров системы наблюдений для MASW можно найти здесь: masw.com, («LLC Park Seismic»)]

Этап 2 – Спектральный анализ. Сопоставление SFK и FKT

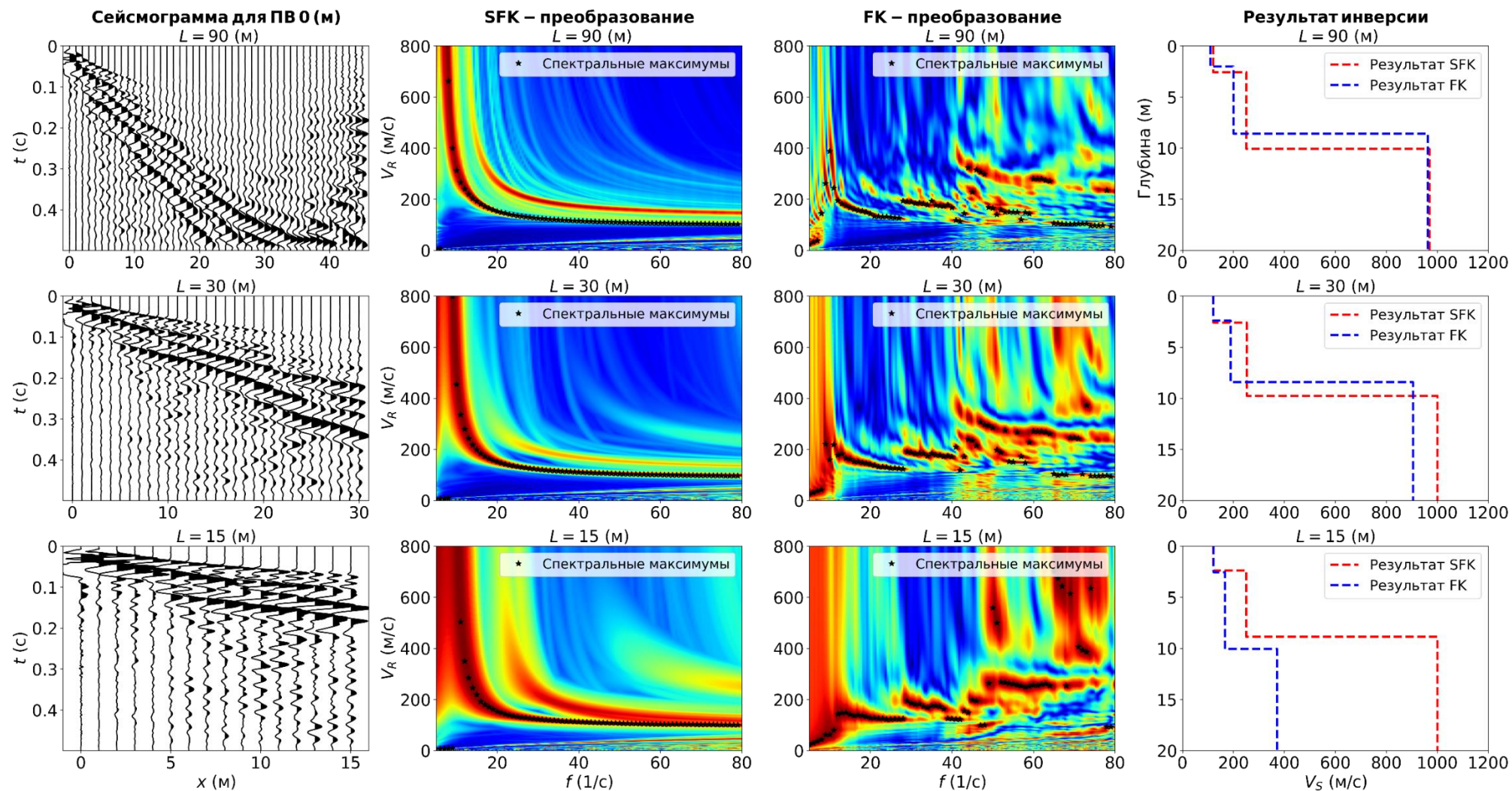


Слой	V_S (м/с)	V_P (м/с)	ρ (кг/м ³)	h (м)
1	300	500	1700	7
2	600	1500	1800	12
3	1000	2000	2200	∞

В каждую трассу сейсмограммы добавляется аддитивный белый Гауссовский шум с SNR = -15 дБ.

При использовании разработанного алгоритма повышается точность построения дисперсионной кривой при наличии случайных помех в данных

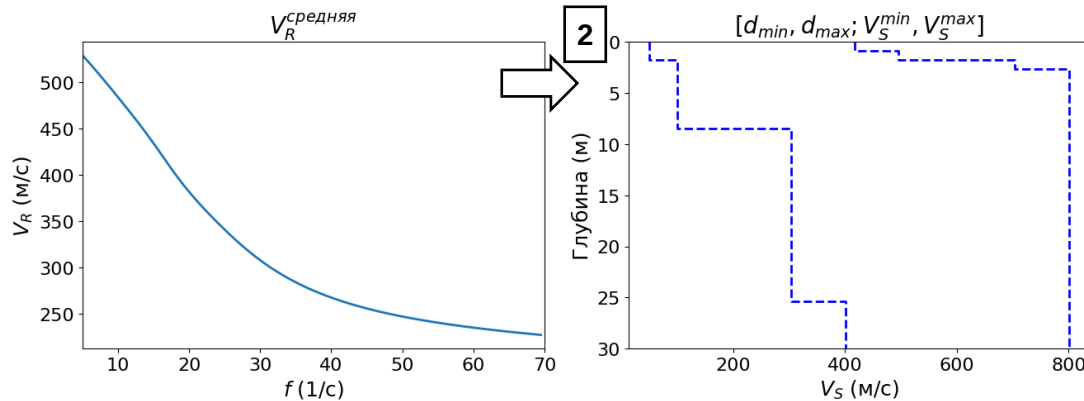
Этап 2 – Спектральный анализ. Сопоставление SFK и FKT



При использовании разработанного алгоритма **повышается точность** построения дисперсионной кривой при уменьшении длины линии наблюдения: **спектральные максимумы сконцентрированы** в пределах фундаментальной моды, рабочий **диапазон частот не уменьшается**.

Этап 3 – Инверсия алгоритмами SSA и GWO

Оценка диапазонов поиска параметров



d_{min} и d_{max} [Сох, Teague, 2016]:

$$d_{min}^i \approx \begin{cases} \lambda_{min}/3 & \text{при } i = 1 \\ d_{max}^{i-1} & \text{при } i > 1 \end{cases}$$

$$d_{max}^i \approx \begin{cases} \lambda_{min} & \text{при } i = 1 \\ d_{min}^i + \Xi \cdot \lambda_{min} & \text{при } i = 2 \\ d_{min}^i + \Xi \cdot (d_{max}^{i-1} - d_{min}^{i-1}) & \text{при } i > 2 \end{cases}$$

V_S^{min} и V_S^{max} :

$V_R(\lambda) \rightarrow V_S(d)$, при $d \approx \lambda/2$, $V_S \approx 1.16V_R$

$$V_S^{i,min,max} = V_S(d_{mean}^i) -/+0,5V_S(d_{mean}^i)$$

Основные входные параметры:

число итераций, коэффициент слоистости

Salp Swarm Algorithm (SSA)

В пространстве поиска по определенным траекториям перемещаются поисковые агенты (популяция).

Популяция состоит из

Лидеров:

$$X_{ld}^m = \begin{cases} G_{ld} + c_l^1((ub_d - lb_d)c^2 + lb_d), & c^3 \geq 0.5 \\ G_{ld} - c_l^1((ub_d - lb_d)c^2 + lb_d), & c^3 < 0.5 \end{cases}$$

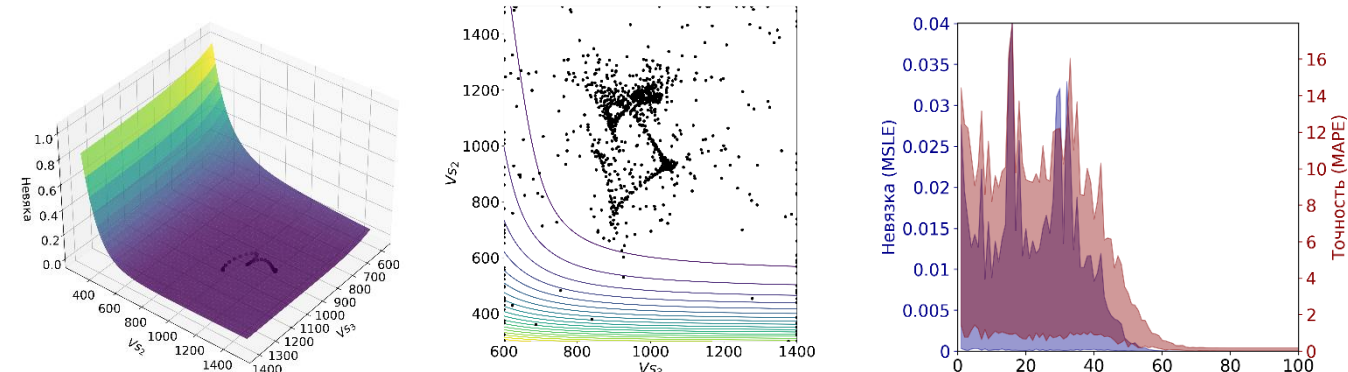
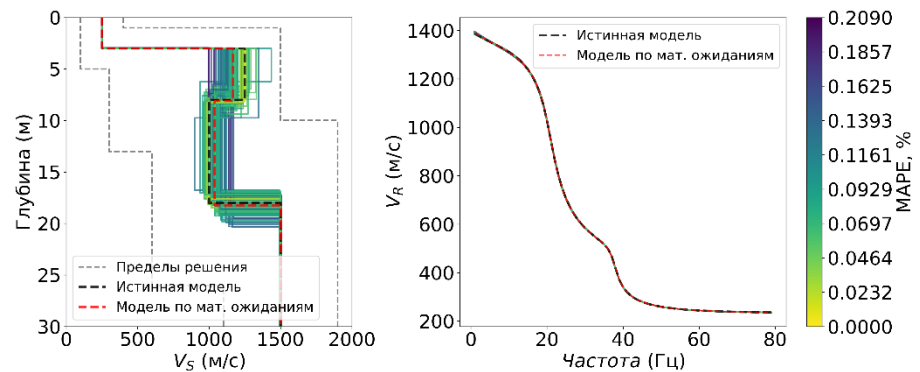
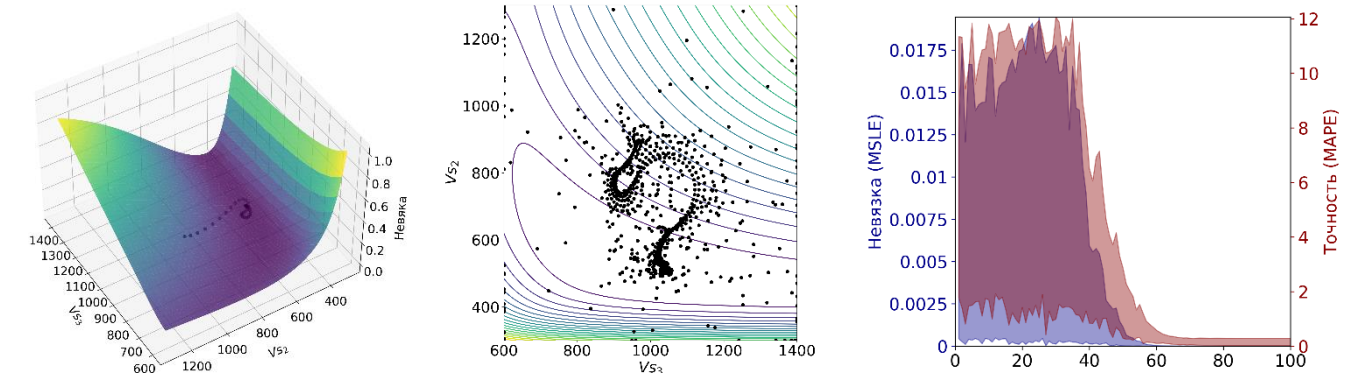
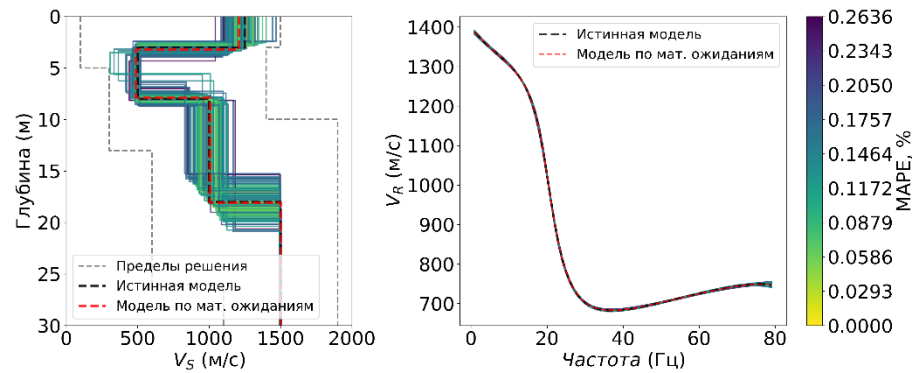
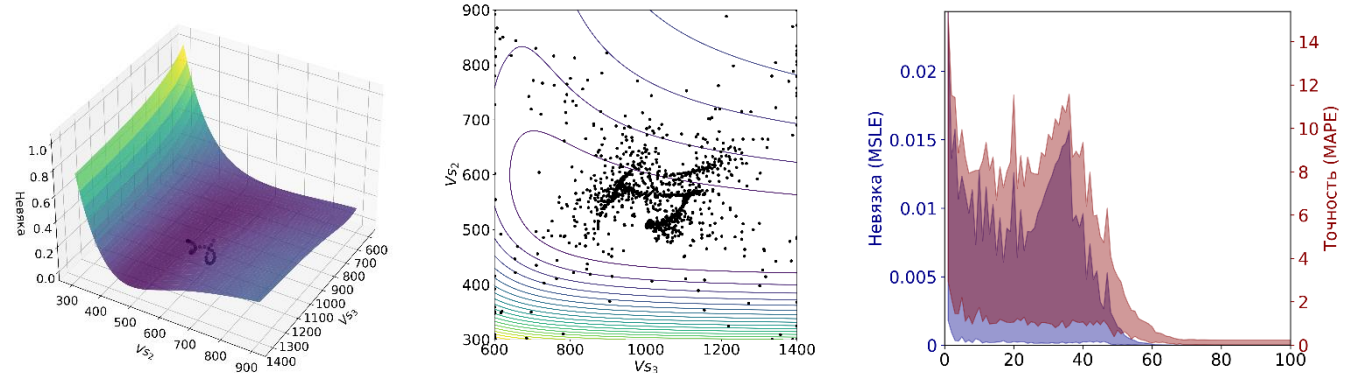
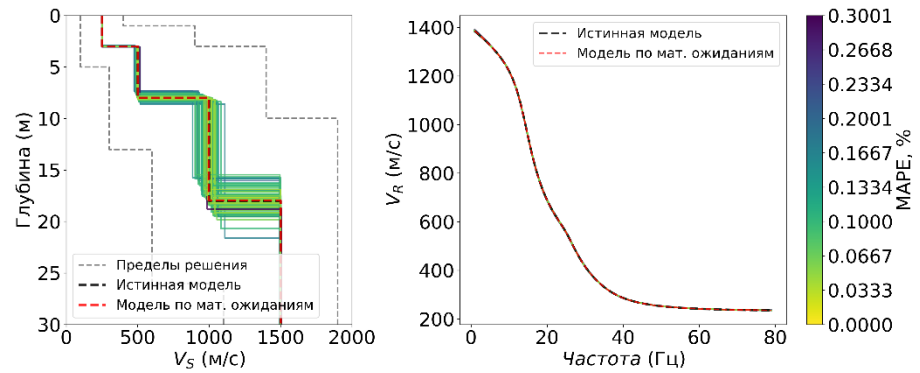
$$c_l^1 = 2e^{-\left(\frac{4l}{L}\right)^2}, c^2 = rand(0, 1), c^3 = rand(0, 1)$$

и последователей:

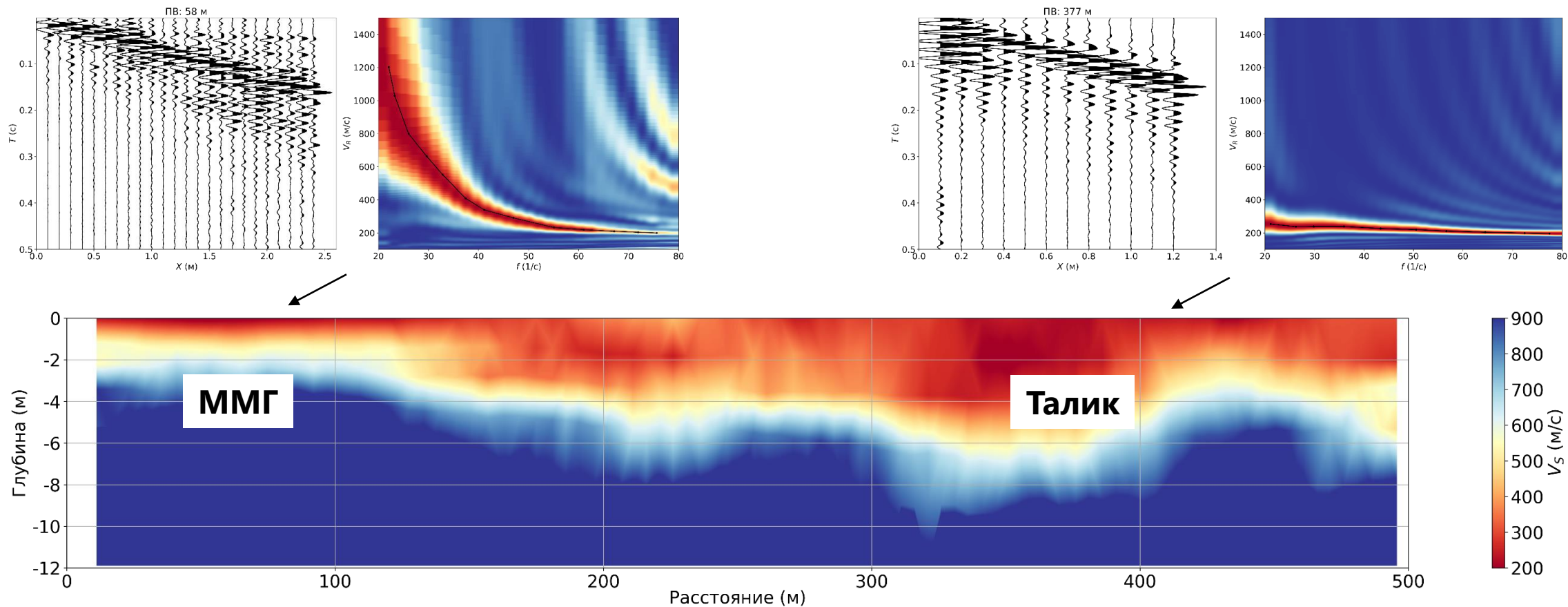
$$X_{ld}^k = \frac{((x - x_0) - v_0)}{dt} + v_0 t = \frac{1}{2}(X_{ld}^{k-1} - X_{ld}^k) + X_{ld}^k = \frac{1}{2}(X_{ld}^{k-1} + X_{ld}^k)$$

В цикле по итерациям считается невязка для всех агентов, агент с наименьшей невязкой назначается целью, положение остальных агентов обновляется согласно заданным уравнениям

Этап 3 – Инверсия алгоритмами SSA и GWO



Апробация на реальных данных. Малоглубинная сейсморазведка. Алтай

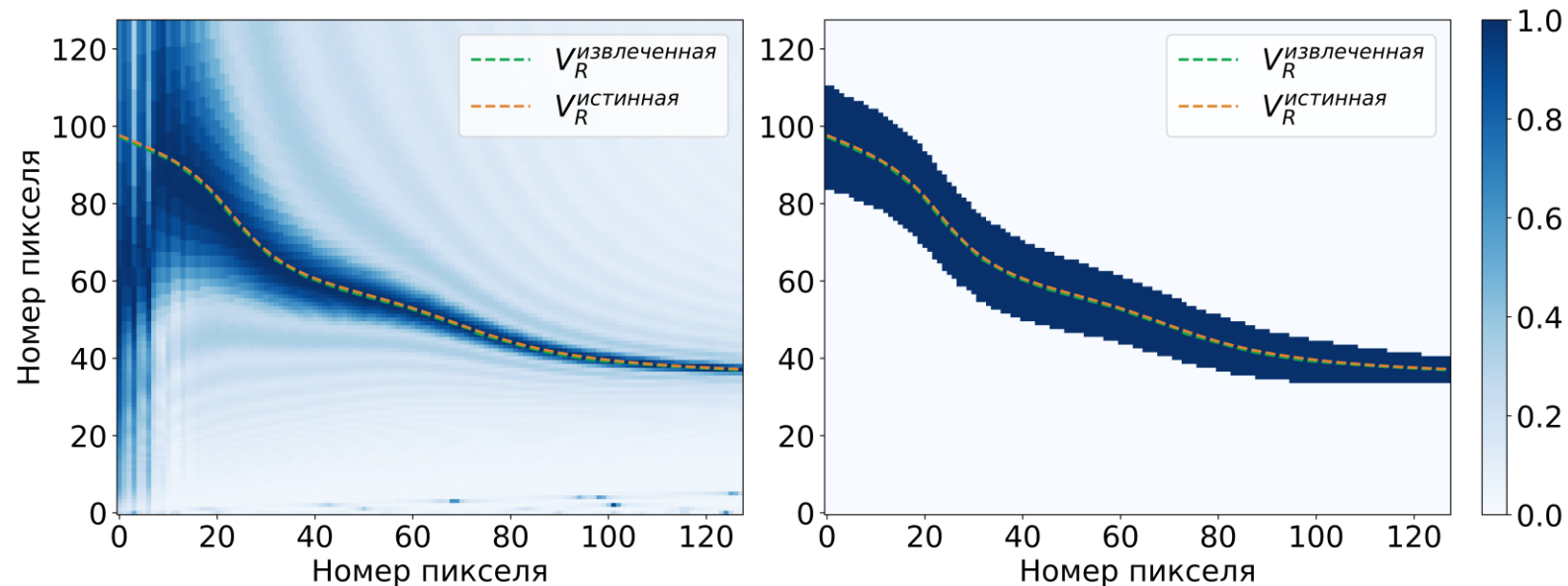


- ❑ Длина профиля: 500 метров
- ❑ Шаг смещения LandStreamer: 5 метров
- ❑ Общее время измерений: 4 часа

- ❑ Количество сейсмограмм: 100
- ❑ Тип обработки: **автоматическая**
- ❑ Время построения разреза: менее 1 минуты

Апробация ИНС-1 – АЕ

Синтетика



Пример входного изображения (слева) и восстановленной маски (справа)

Реальные данные

