

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТРЁХМЕРНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

Шматков Алексей Алексеевич, Токарев Михаил Юрьевич

*Кафедра сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова)*

DEVELOPMENT OF A 3D ULTRA-HIGH RESOLUTION SEISMIC SYSTEM FOR SHALLOW WATER

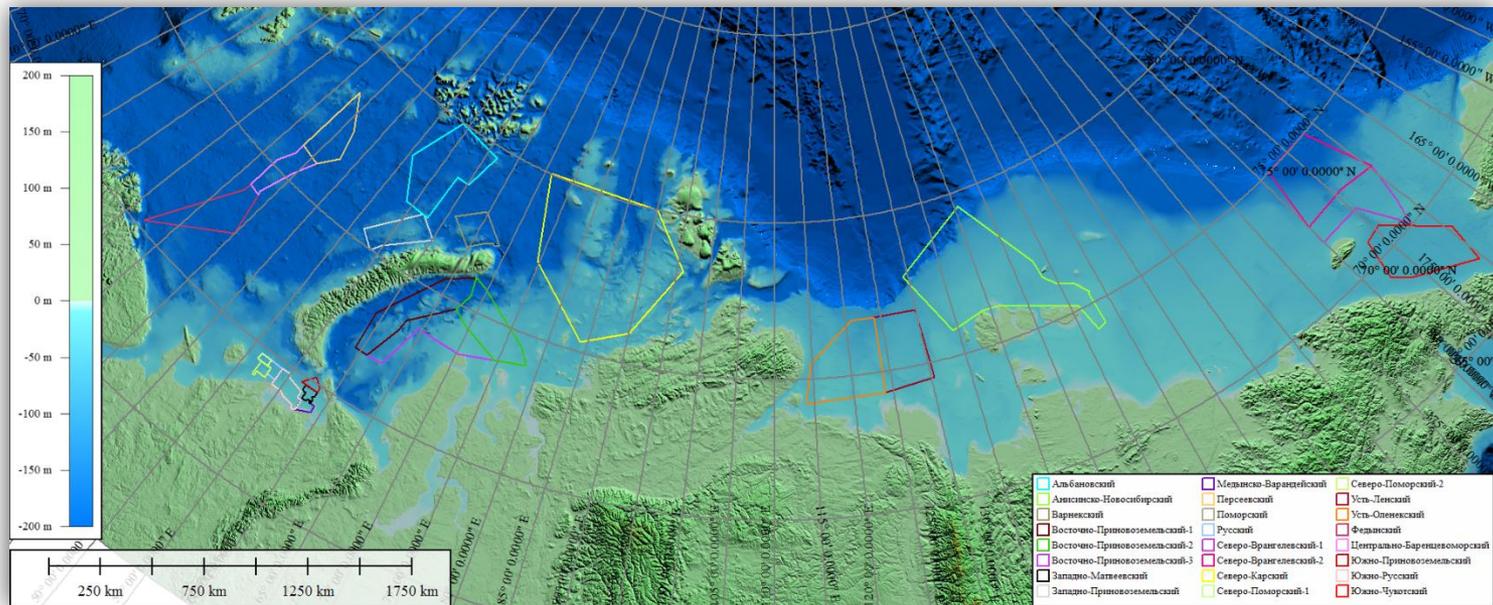
Alexey Jr. Shmatkov & Mikhail Tokarev

*Department of Seismics and geoacoustics of Geology Faculty,
Lomonosov Moscow State University*

Введение

Introduction

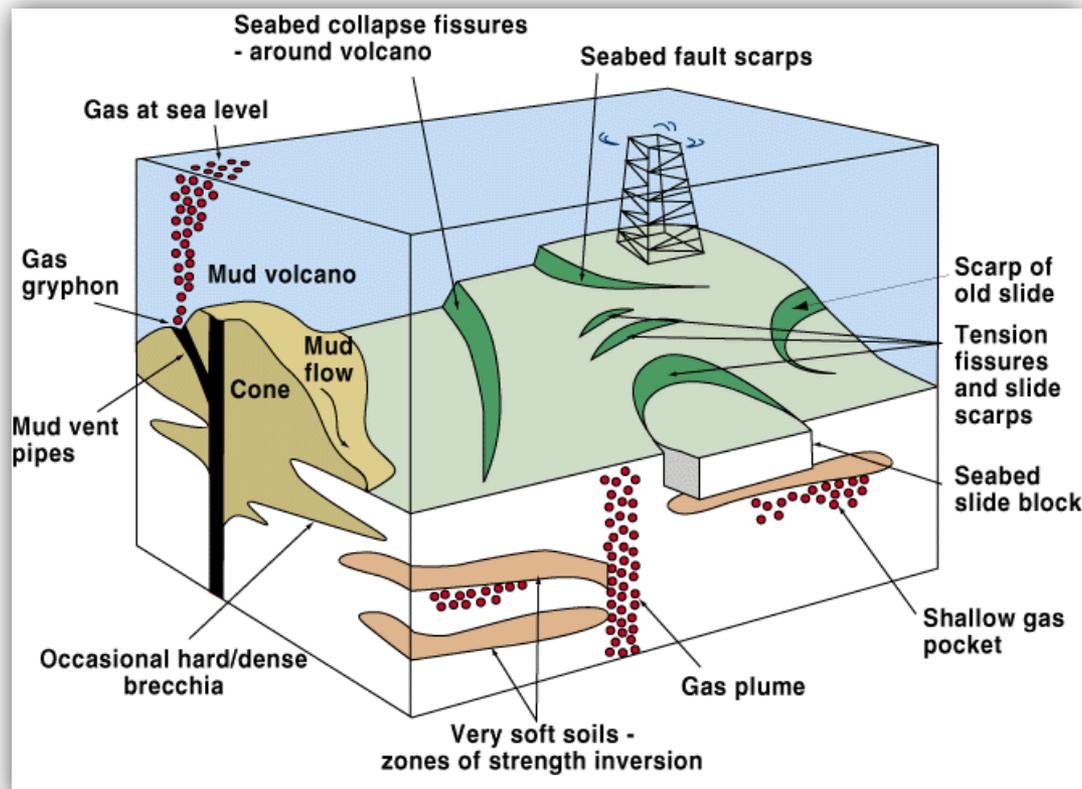
- ❑ Растущий рынок инженерно-геологических изысканий требует развития технологий для картирования потенциально опасных геологических объектов
- ❑ *Growing market of engineering surveys require development of new techniques for geohazard mapping*
- ❑ Многие участки работ расположены на мелководных частях шельфа (глубина воды менее 50 м)
- ❑ *Water depth at most survey areas are less than 50 meters*
- ❑ Стандартные (профильные) методы наблюдений не позволяют с достаточной детальностью изучать строение верхней части донных отложений
- ❑ *Linear surveys does not allow detailed mapping the most potentially dangerous geological hazards and upper-section of subbottom layers*



Опасные инженерно-геологические явления

Geohazards

- ❑ Опасные инженерно-геологические явления можно определить, как результат деятельности геологических процессов, возникающих в земной коре под действием различных природных и антропогенных факторов, или их сочетания, которые имеют потенциальную возможность стать опасными и причинить вред человеку, окружающей среде или сооружениям
- ❑ *Geohazards can be defined as local and/or regional site and soil conditions having a potential of developing into a failure event that could cause loss of life or damage to health, environment or assets. The event-triggering sources can be ongoing geological processes or human induced changes caused by the field operator or by 3rd party activities*



Методы инженерно-геофизических изысканий

Engineering 2D seismics techniques

		Высокоразрешающая сейсморазведка High-resolution (HR)	Сейсморазведка «сверхвысокого» разрешения Ultra high-resolution (UHR)
Длина косы, м	<i>Streamer length, m</i>	1200	150
Число каналов	<i>Number of channels</i>	192	48
Расстоянием между каналами, м	<i>Channel spacing</i>	6.25	3.125
Шаг возбуждения, м	<i>Shot point interval, m</i>	6.25	3.125 / 1.5625
Размер бина, м	<i>Bin size, m</i>	6.25	3.125 / 1.5625
Сеть наблюдений, м	<i>Sail-lines spacing, m</i>	200 (100) × 500	100 × 200
Источник	<i>Source</i>	Пневмоисточники <i>Air-gun's</i>	«спаркер» / «бумер» <i>Sparker / boomer</i>
Полоса частот, Гц	<i>Bandwidth, Hz</i>	10 - 500	150 - 2500
Разрешение (по вертикали), м	<i>Vertical resolution</i>	≈ 2 - 3	≈ 0.5 - 1

Недостатки профильных наблюдений

Disadvantages of linear surveys

- ❑ Низкая пространственная разрешающая способность вследствие относительно редкой сети наблюдений
- ❑ *Low spatial resolution due to sparse survey grid*
- ❑ Межпрофильное расстояние превышает линейные размеры опасных инженерно-геологических явлений
- ❑ *Sail-line spacing more than linear size of geohazards*
- ❑ Высокая вероятность появления боковых отражений в случае сложного строения геологической среды
- ❑ *Possibility of out-of-the-plane reflection in case of complex structure of survey area*



**Существующие методики
трёхмерных сейсмоакустических
наблюдений на мелководных
акваториях**

*Existing 3D ultra-high resolution
techniques for shallow water
investigation*

Классификация методик по способу буксировки

Classification of techniques according to the method of towing

«Жёсткая рама» <i>Rigid frame</i>	Буксировка на выстрелах <i>Towing on booms</i>	Параваны <i>Paravanes</i>
Opus3D (Бельгия / <i>Belgium</i>)	University of Lausanne (Швейцария / <i>Switzerland</i>)	P-Cable (Норвегия / <i>Norway</i>)
SEAMAP-3D (Германия / <i>Germany</i>)		
SEISCAT (Бельгия / <i>Belgium</i>)	Университет имени Христиана Альбрехта / University of Kiel (Германия / <i>Germany</i>)	
Kite (США / <i>USA</i>)	IFREMER (Франция / <i>France</i>)	
Chirp3D (Великобритания / <i>UK</i>)	Университет Райса / Rise University (США / <i>USA</i>)	
Sub-Bottom Imager (Канада / <i>Canada</i>)	Gardline (Великобритания / <i>UK</i>)	
Аквасвип-3Д (Россия / <i>Russia</i>)	Fugro	

Буксировка на «жёсткой раме»

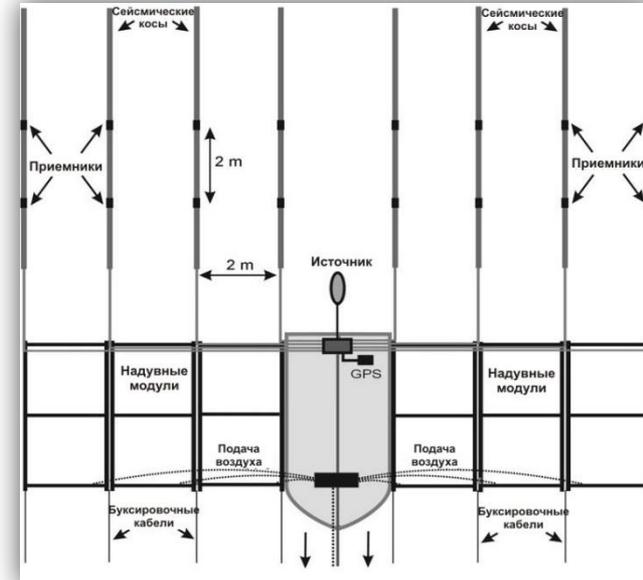
Rigid frame

Преимущества / Advantages

- ❑ Высокая точность позиционирования отдельных элементов / *High positioning accuracy*
- ❑ Минимально возможное расстояние между приёмниками / *Minimum spacing between receivers*
- ❑ Высокая маневренность системы / *High maneuverability*

Недостатки / Disadvantages

- ❑ Рама может являться источником шума при буксировке / *Frame can be source of noise*
- ❑ Малоэффективно применение многоканальных сейсмических кос / *Multichannel streamers are useless*
- ❑ Масштабируемость ограничена / *Scalability is limited*



Буксировка на выстрелах

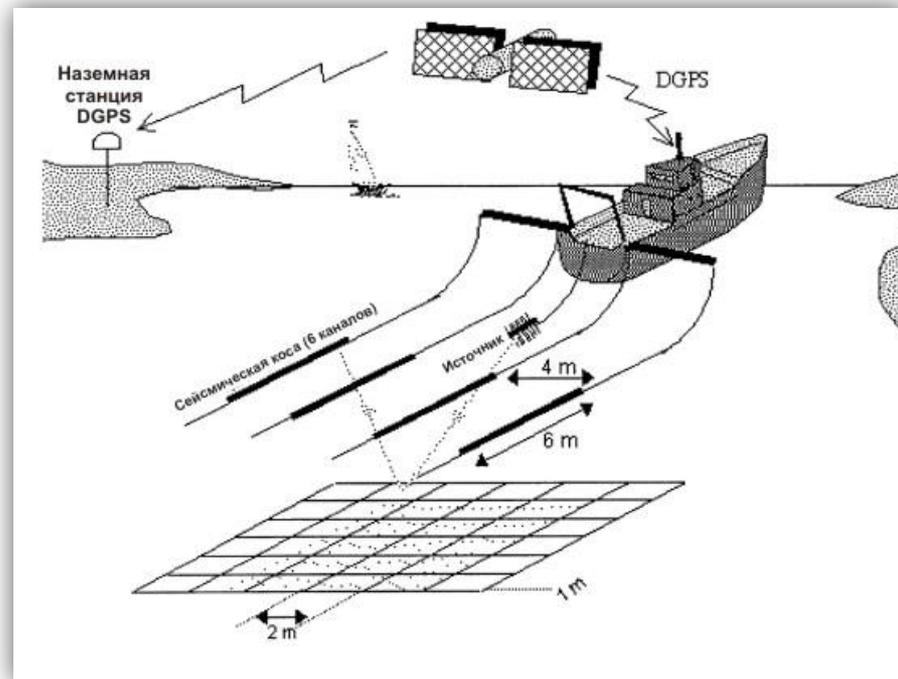
Towing on booms

Преимущества / Advantages

- ❑ Наиболее простой в реализации / *The most easy to implement*
- ❑ Простота спускоподъёмных операций / *Easy deploy and recovery*
- ❑ Возможность достижения большой ширины покрытия при работе с достаточно широкого судна / *The possibility of wide coverage on the vessel with a wide stern*

Недостатки / Disadvantages

- ❑ Малоэффективен при работе с одноканальными косами / *Useless for short streamers*
- ❑ Высокий уровень шумов вблизи судна / *High level of noise near vessel*
- ❑ Вероятность запутывания кабельных линий при небольшом расстоянии между косами / *Chance tangling cable lines when the distance between the streamers are small*
- ❑ Менее точное позиционирование / *Less positioning accuracy*



Буксировка параванами

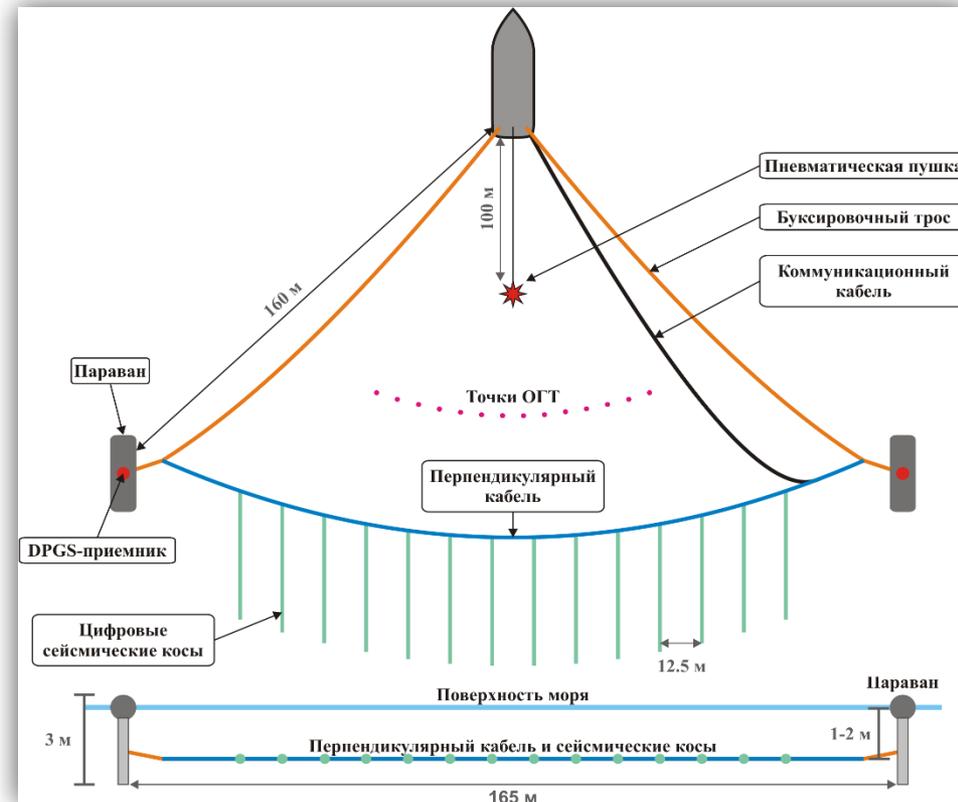
Paravanes

Преимущества / Advantages

- ❑ Максимальная полоса покрытия / *Maximum wide of coverage*
- ❑ Легко адаптировать систему наблюдения для решения широкого круга задач / *Easy adapt for solving different tasks*
- ❑ Небольшой уровень шумов от судна / *Low noise level from vessel*
- ❑ Стабильное положение приёмного массива в плохих гидрометеорологических условиях / *Stable positioning of array in bad weather conditions*

Недостатки / Disadvantages

- ❑ Наименее точное позиционирование / *Worst positioning accuracy*
- ❑ Необходимость применения дополнительного оборудования для буксировки / *Additional equipment is needed*



Основные параметры существующих систем

Main parameters of existing systems

		Opus3D	Lausanne	P-Cable 3D
Число кос	<i>Number of streamers</i>	8	3	14
Число каналов в косе	<i>Number of channels (per streamer)</i>	2	24	8
Общее число каналов	<i>Number of channels</i>	16	72	112
Расстояние между каналами, м	<i>Channel spacing, m</i>	2	2.5	3.125
Способ буксировки	<i>Towing method</i>	Жесткая решетка / Rigid frame	Выстрелы / Booms	Параваны / Paravane
Расстояние между косами, м	<i>Streamer spacing, m</i>	2	7.5	12.5
Минимальное удаление, м	<i>Minimum offset, m</i>	7	5	100
Максимальное удаление, м	<i>Maximum offset, m</i>	11.5	65	150
Тип источника	<i>Source type</i>	«бумер»	пневмоисточник	пневмоисточник
Расстояние между пунктами возбуждения, м	<i>Shot point interval, m</i>	0.5	5	6.25
Расстояние между профилями, м	<i>Sail-line spacing, m</i>	6	11.25	50
Ширина покрытия за один проход судна, м	<i>Width of coverage, m</i>	7	7.5	65
Размер бина, м	<i>Bin size, m</i>	1 × 1	1.25 × 3.75	6.25 × 6.25
Кратность (средняя)	<i>Fold (average)</i>	4	6	10

Анализ существующих методик

Analysis of existing techniques

- ❑ Большинство систем требуют применения специального оборудования
- ❑ *Most techniques required special equipment*
- ❑ Высокая стоимость проведения полевых работ
- ❑ *Relatively high cost of survey*
- ❑ Многие системы ориентированы на решение конкретных задач и возможности адаптации к другим условиям съёмки ограничены
- ❑ *Most techniques solve one task and possibilities of adaptation are small*
- ❑ Для решения инженерно-геологических задач более эффективно буксировать косы на выстрелах или с помощью параванов
- ❑ *Towing with booms and paravanes is preferable for solving engineering tasks*
- ❑ Для увеличения пространственной разрешенности необходимо много сейсмических кос, что повышает стоимость системы
- ❑ *For increasing spatial resolution multiple streamers are needed, which advance the cost of system*
- ❑ Большие удаления требуют применения источников и приёмников с широкой диаграммой направленности
- ❑ *Due to far offset sources and receivers with wide directivity are needed*
- ❑ Наиболее эффективны системы с максимально возможной полосой покрытия
- ❑ *Systems with wide coverage are efficiently*

Причины ограниченного применения трёхмерных наблюдений в ИГИ

Why is HRS 3D acquisition not standard practice

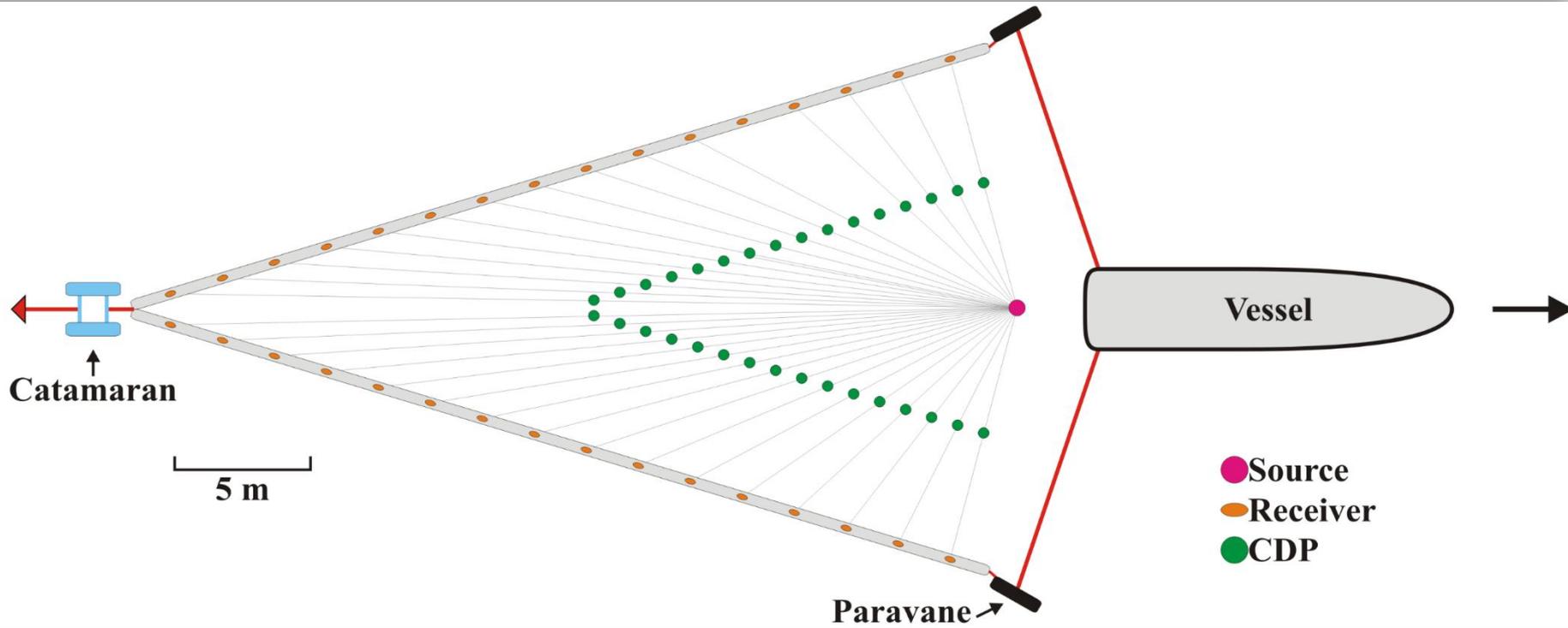
- ❑ Изыскательские компании не готовы выполнять трёхмерные съемки в рамках проведения стандартного комплекса исследований, поскольку это требует наличия дополнительных источников и специализированных приёмных систем на судне
- ❑ *Contractors are not interested in conducting 3D HR/UHR surveys as a part of standard project because it needed additional sources and receiver systems*
- ❑ Высокая стоимость работ не выгодна как заказчику, так и исполнителю, поскольку применение нестандартных методов увеличивает риски и требует дополнительного судового времени, что приводит к уменьшению прибыли
- ❑ *High cost means that operators do not want to commit to the work, but also that contractors do not want to commit to the outlay if the returns are not commercially viable and risks are increasing*
- ❑ Ограниченное время, отведенное на проведение комплекса инженерно-геологических изысканий до бурения скважины или строительства сооружения, за которое сложно провести полевые работы, обработать и проинтерпретировать дополнительный объем трёхмерных высокоразрешающих данных
- ❑ *Short time for engineering surveys before drilling or building doesn't allow to acquire all needed data, process and interpret additional volume of 3D HR/UHR data*

Требования к технологии наблюдений

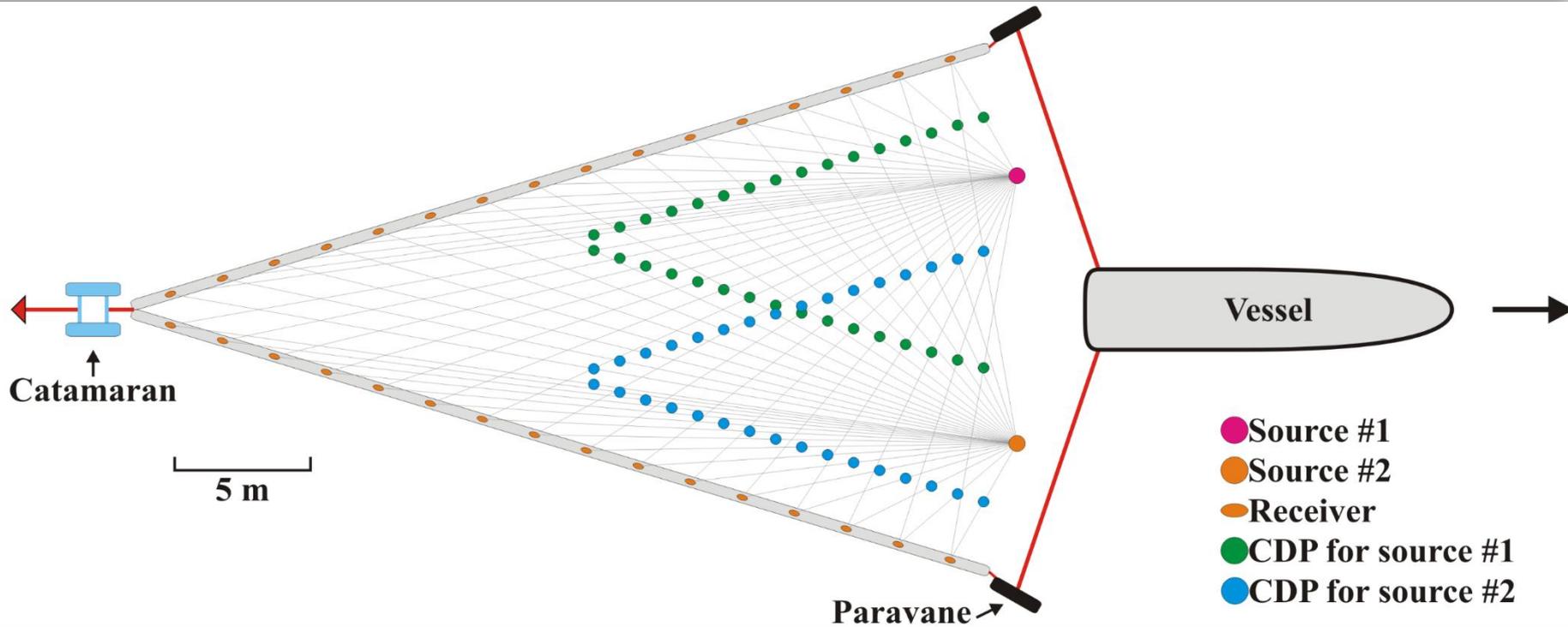
Seismic system requirements

- ❑ Использование стандартного приёмоизлучающего оборудования, применяемого при проведении профильных наблюдений, с минимальным набором дополнительных технических средств
- ❑ *Using standard source and receiving equipment from 2D seismic surveys with minimum additional equipment*
- ❑ Максимально широкая полоса покрытия за один проход судна с достаточной дискретизацией геологической среды
- ❑ *Maximal wide of coverage during one sail-line with needed sampling of geological medium*
- ❑ Возможность адаптации приёмоизлучающей системы и параметров съёмки к конкретным техническим и геологическим условиям
- ❑ *Possibility to adapt system and it's parameters for solving another tasks and in according with available equipment*
- ❑ Простота спускоподъёмных операций и высокая маневренность при проведении работ
- ❑ *Easy deploy and recovery, high maneuverability during survey*

Предлагаемая методика наблюдений *New technique*

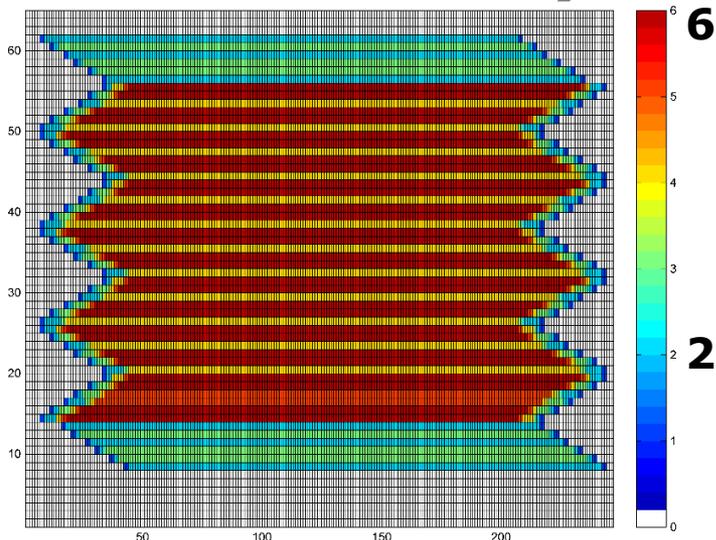


Предлагаемая методика наблюдений *New technique*

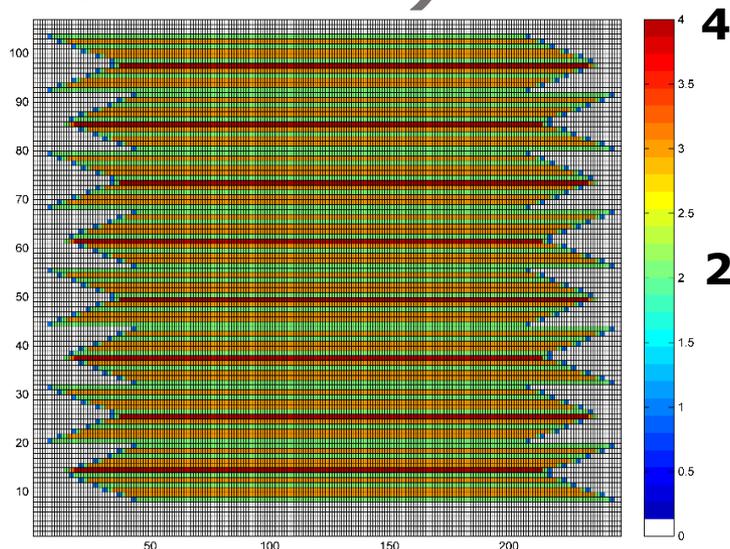


Анализ кратности (размер бина 1 × 1 м)

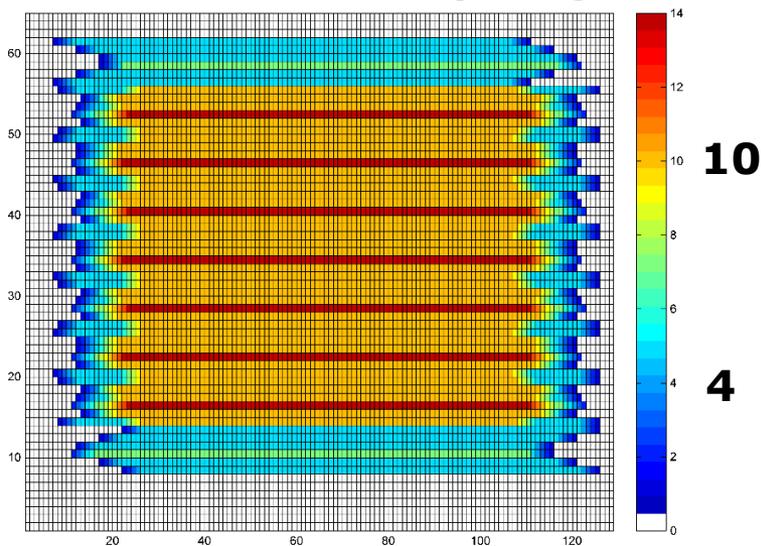
Fold analysis (bin size 1 × 1 m)



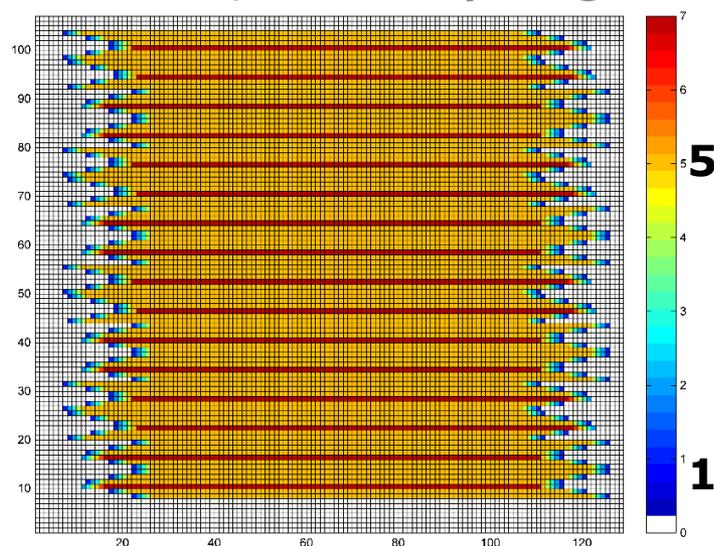
1 источник, 3 м между линиями
1 source, 3 m line spacing



1 источник, 6 м между линиями
1 source, 6 m line spacing



2 источника, 6 м между линиями
2 sources, 6 m line spacing



2 источника, 12 м между линиями
2 sources, 12 m line spacing

**Практическое применение
разработанной методики
трёхмерных сейсмоакустических
наблюдений на мелководных
акваториях**

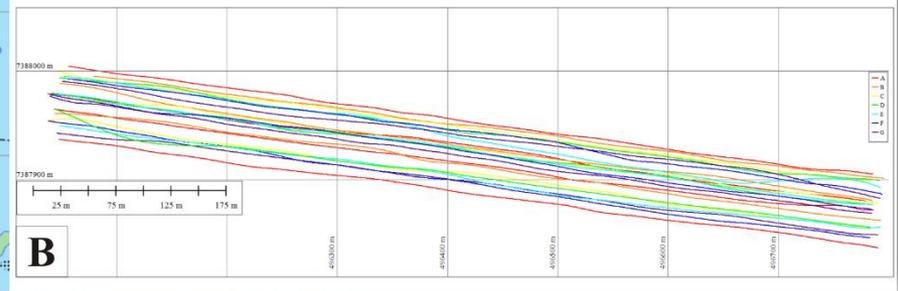
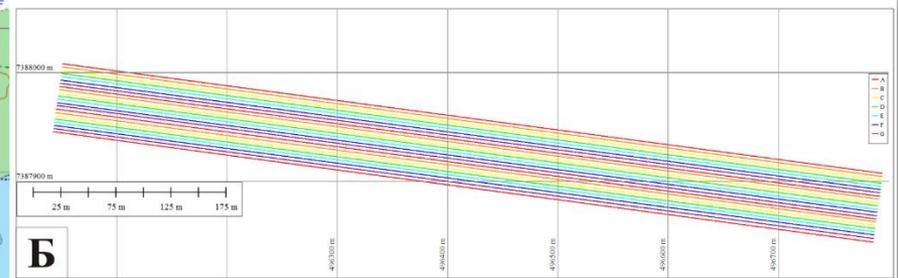
*Sea-trials of new technique of 3D
ultra-high resolution seismic for
shallow water*

Опытно-методические работы *Sea-trials*

- ❑ Получено 22 профиля длиной 750 м
- ❑ *22 profiles acquired (750 m length each)*
- ❑ Общая длина профилей 16.5 км
- ❑ *Overall length of profiles – 16.5 km*
- ❑ Плановое межпрофильное расстояние 3 м
- ❑ *Planned sail-line spacing - 3 m*



**НИС «Студент»
R/V "Student"**



Аппаратура *Equipment*



Источник CSP-D 2400
HV power supply CSP-D 2400



Излучатель типа «спаркер»
Sparker source



Сейсмоакустическая коса и станция Геонт-Шельф × 2
Seismic streamer and recording system Geont-Shelf × 2



Параметры съемки

Survey parameters

Приёмная система

Receiving system

- Сейсмоакустические косы – 2 × 16-канальные
- Seismic streamers – 2 × 16-channels*

- Шаг между каналами – 2 м
- Channel spacing – 2 m*

- Расстояние между оголовьем кос – 12 м
- Streamer's head spreading – 12 m*

- Минимальное удаление – ≈6.5 м
- Minimum offset – ≈6.5 m*

- Максимальное удаление – ≈33.5 м
- Maximum offset – ≈33.5 m*

- Скорость движения судна – 2.5 узла (1.2-1.5 м/с)
- Vessel speed - 2.5 knots (1.2-1.5 m/s)*

Параметры съемки

Survey parameters

Источник типа «спаркер»

Sparker source

- Энергия – 100 Дж
- Energy – 100 J*
- Число электродов – 100
- Number of electrodes – 100*
- Интервал возбуждения – 0.5 с
- Shot point interval – 0.5 s*

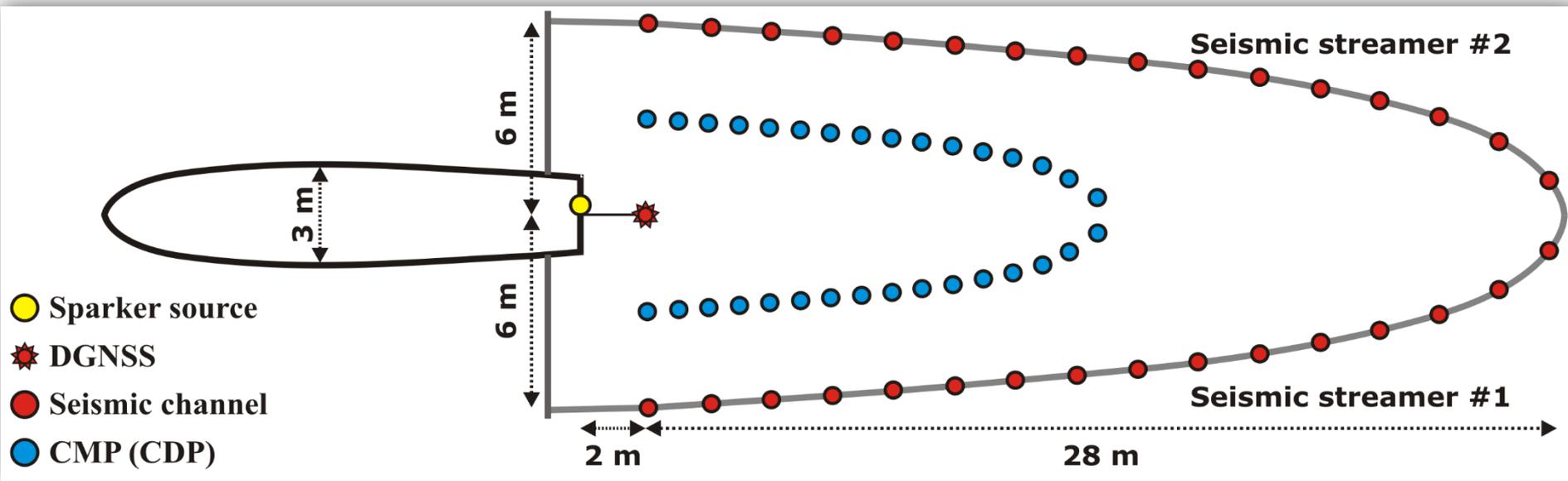
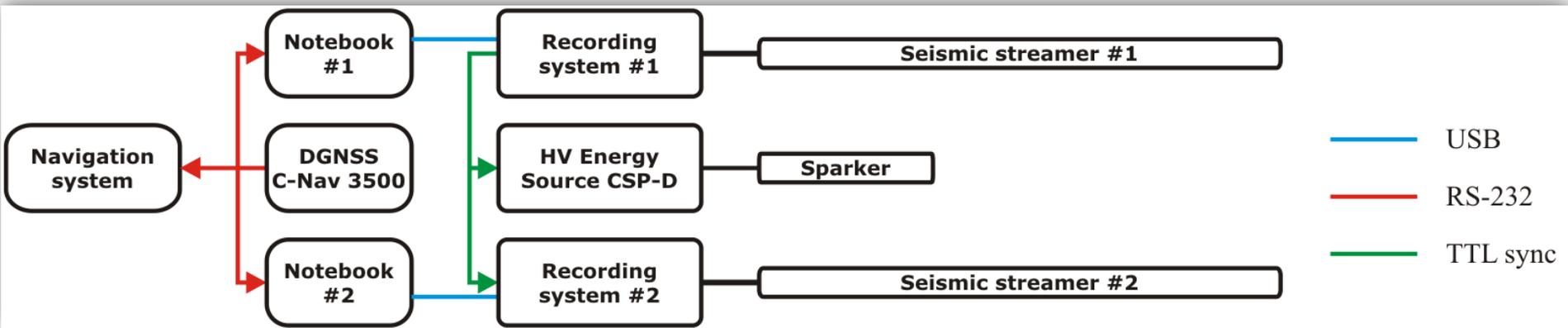
Система регистрации

Recording system

- Интервал дискретизации – 0.1 мс
- Sample interval – 0.1 ms*
- Длина записи – 200 мс
- Recording length – 200 ms*

Аппаратура и методика

Equipment and method



Внешний вид системы наблюдений Receiver array layout



Обработка данных трёхмерных сейсмоакустических наблюдений

*Processing of 3D ultra-high
resolution seismic data*

Граф обработки

Processing flow

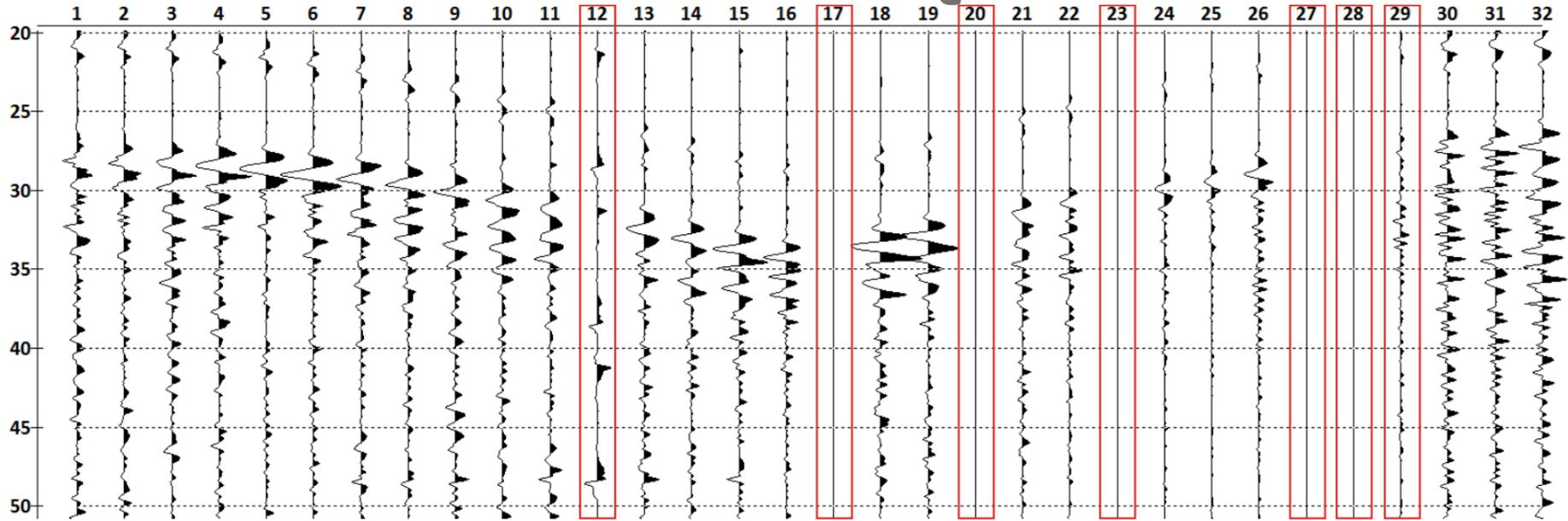
1. Загрузка полевых сейсмограмм в систему обработки
2. Ввод статических поправок за аппаратную задержку
- 3. Расчет и присвоение геометрии наблюдений,** контроль качества
4. Амплитудная коррекция и полосовая фильтрация
5. Подавление помех-выбросов фильтрацией в частотно-временной области
- 6. Уменьшение влияния волн-спутников**
7. Балансировка амплитуд
- 8. Расчет статических поправок**
9. Ввод кинематических поправок и суммирование по методу ОГТ

- 1. Importing of field data to processing project*
- 2. Applying static corrections for time delays*
- 3. Computing and applying of geometry, QC**
- 4. Amplitude correction and bandpass filtering*
- 5. Burst noise removal with using TFD*
- 6. De-ghosting** with using adaptive recursive filtering
- 7. Balancing amplitudes*
- 8. Computing of static corrections**
- 9. NMO and stack*

Обработка проведена с использованием RadExPro
Processing was done with using RadExPro Software

Контроль качества полевых данных

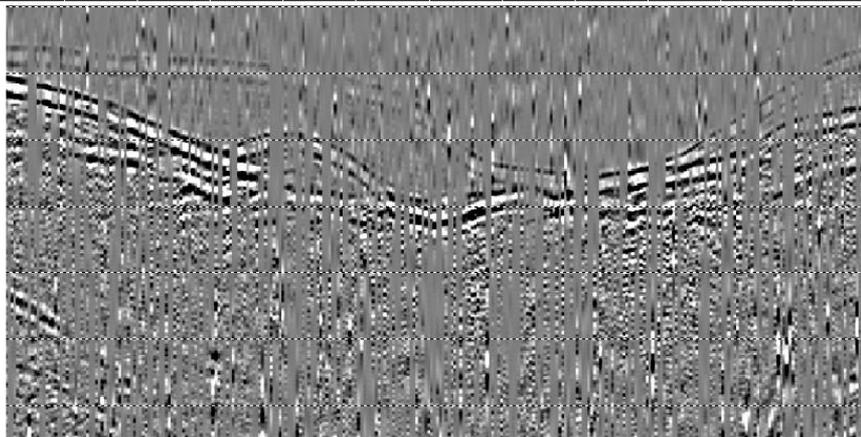
Field data QC



Сейсмограмма ОПВ. Цветом выделены каналы со слабым усилением

Common source gather. Channels with low S/N ratio marked red

CHAN 18
FFID 525 550 575 600 625 650 675 700 725 750 775 800



Zero-amplitude zones

- Каналы со слабым усилением
- Channels with low S/N ratio*
- Помехи-выбросы («спайки»)
- Burst noise and spikes*
- Изменение согласованности сигнала
- Changing of wavelet coherency*
- Зоны нулевых амплитуд сейсмических трасс
- Zero-amplitudes zones*

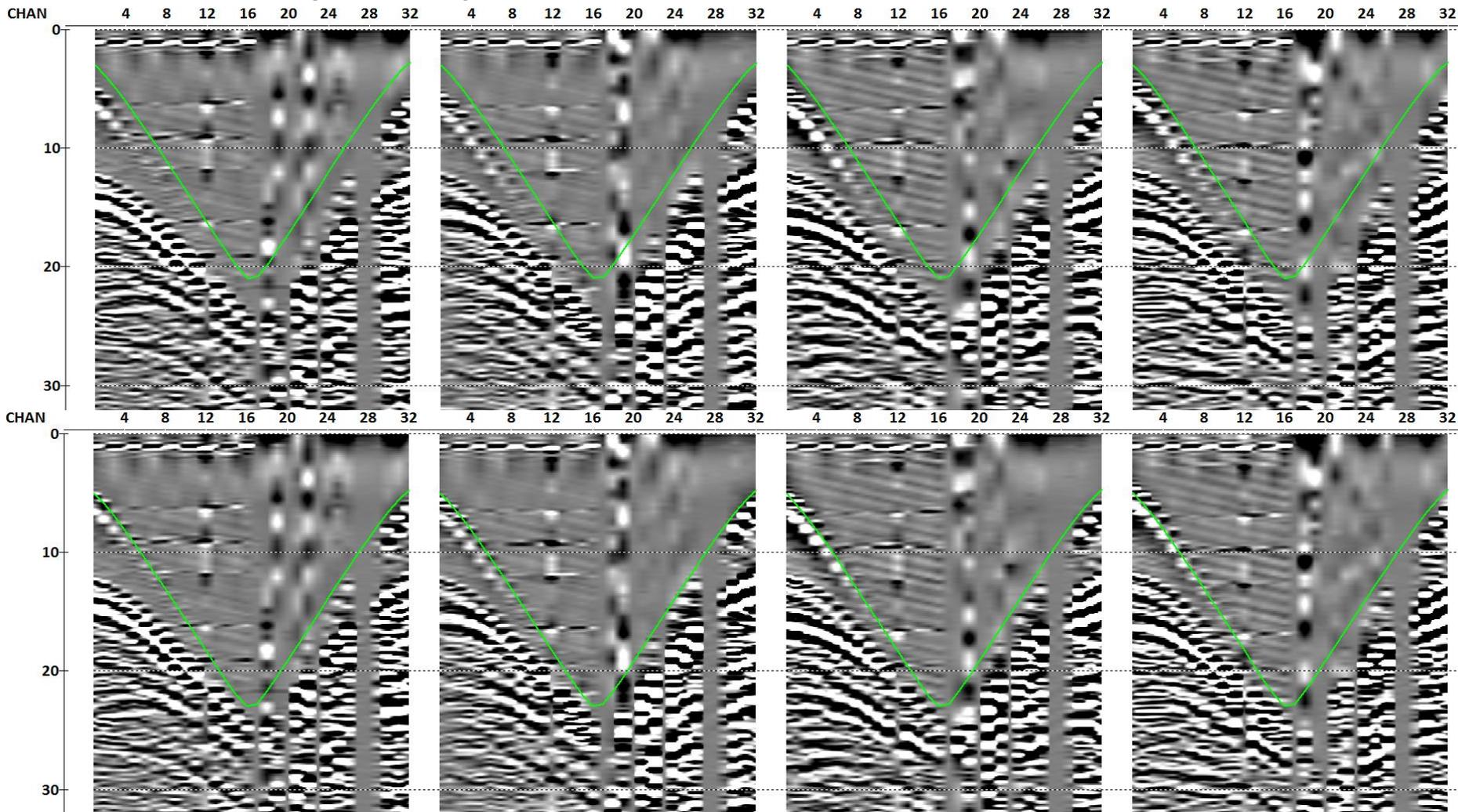
Контроль качества расчёта геометрии

Geometry QC

Уравнение цепной линии

Catenary line equation

$$y(x) = a * \cosh\left(\frac{x}{a}\right) = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a})$$

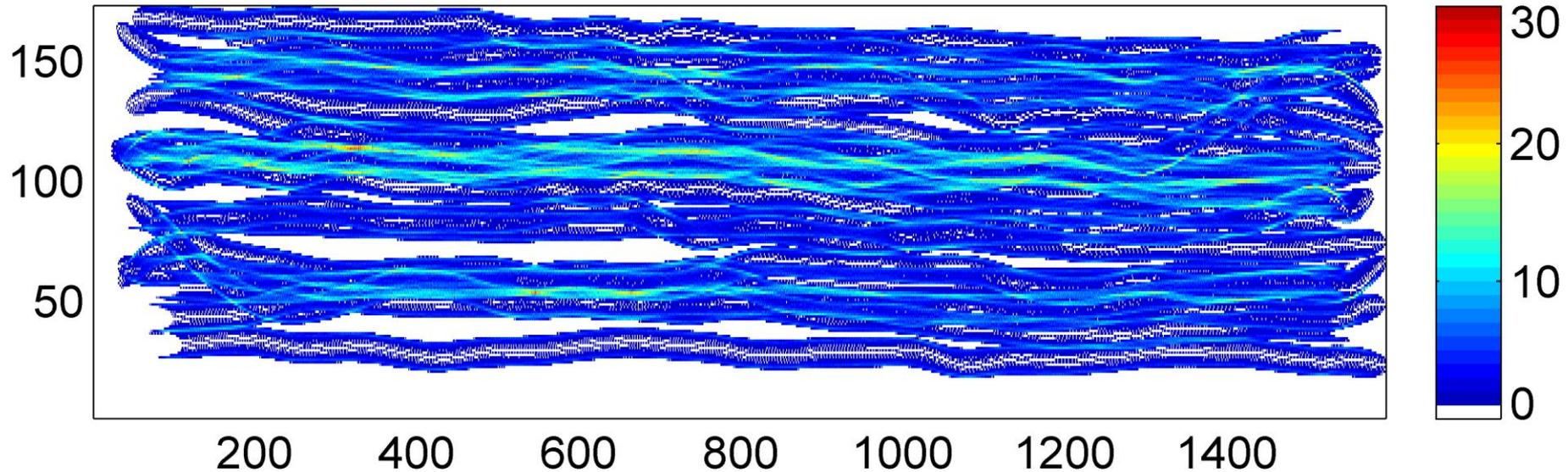


Сравнение времен первых вступлений прямой волны на сейсмограммах ОПВ

Comparison of computed and theoretical times of direct wave

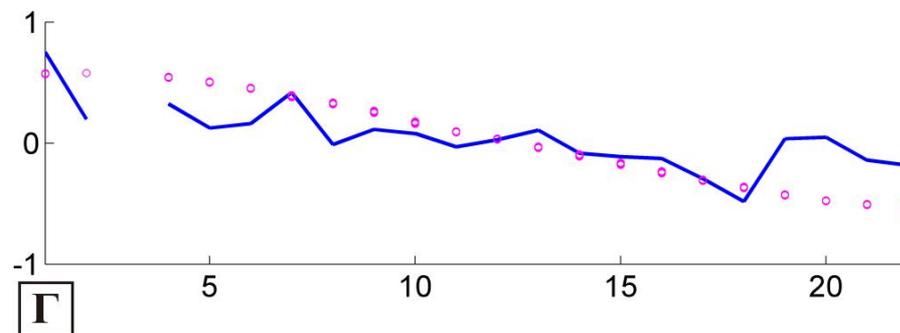
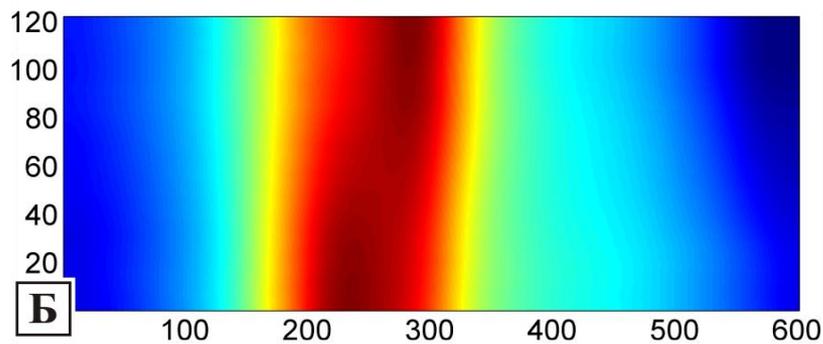
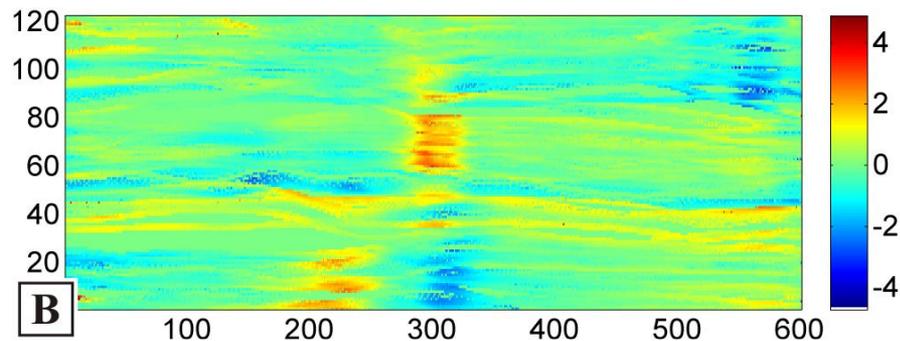
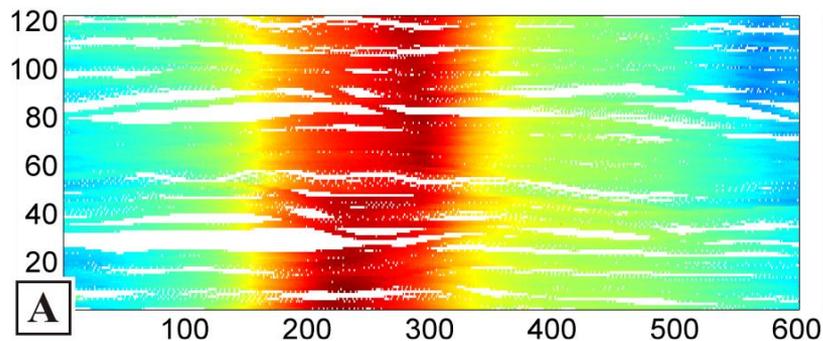
Бинирование и расчет карт кратности

Binning and fold map



Размер бина	<i>Bin size</i>	0.5 × 0.5
Минимальная кратность	<i>Minimum fold</i>	1
Средняя кратность	<i>Average fold</i>	5
Максимальная кратность	<i>Maximum fold</i>	30

Расчет статических поправок *Computing static corrections*



(А) Пикировка морского дна
First break (bottom) pick

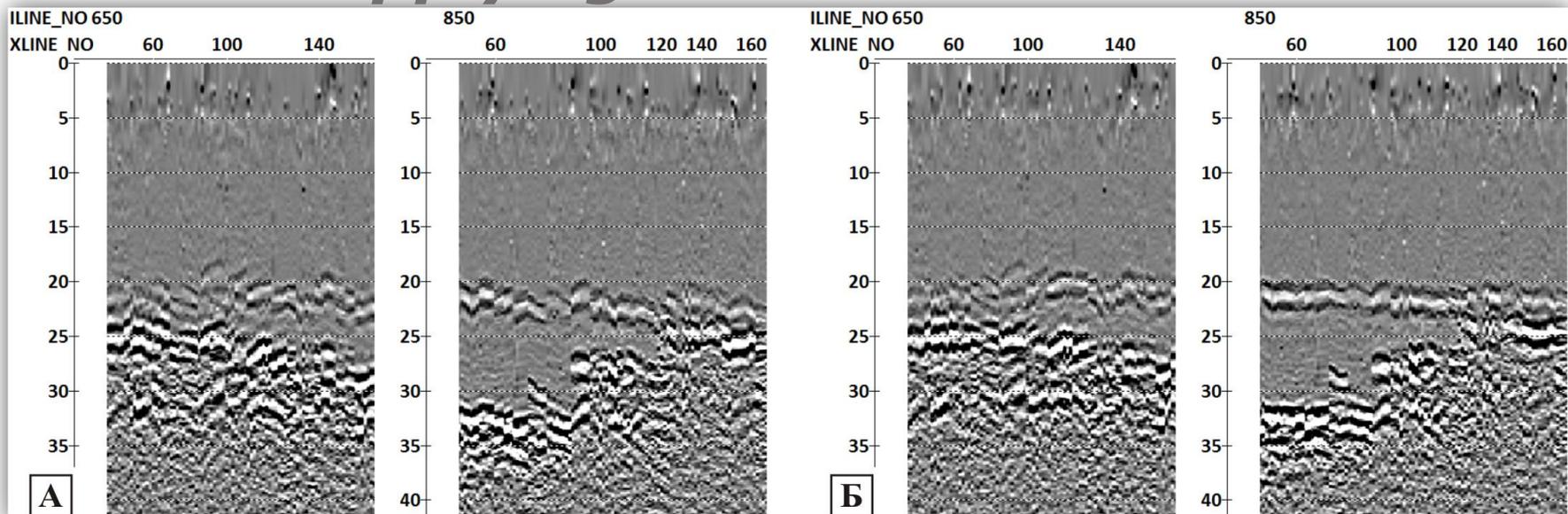
(Б) Пикировка после осреднения в пространственном окне
Averaged pick

(В) Разница между ними
Difference between them

(Г) Сравнение предсказанных значений уровня воды
Comparison with predicted tides

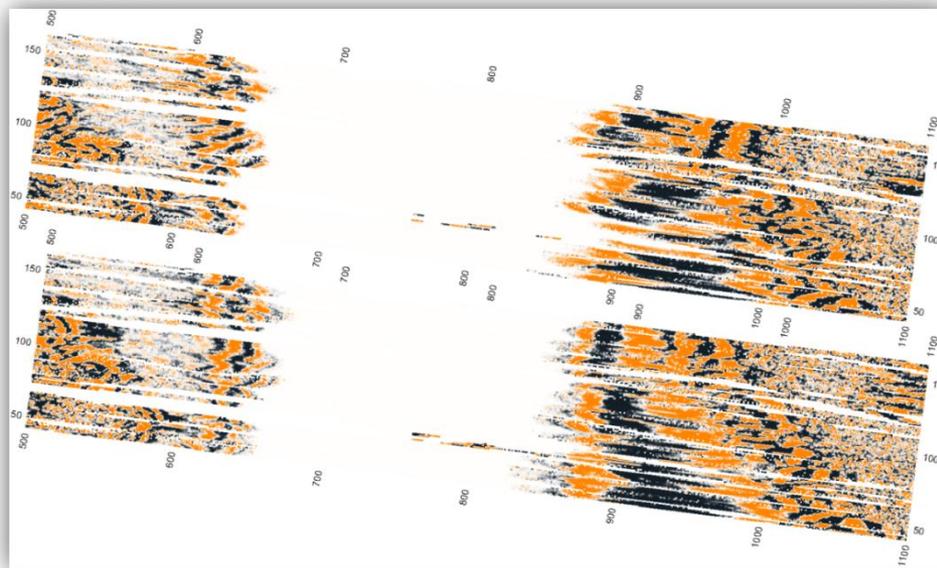
Применение статических поправок

Applying static corrections



До учета статических поправок
Before statics

После учета статических поправок
After statics

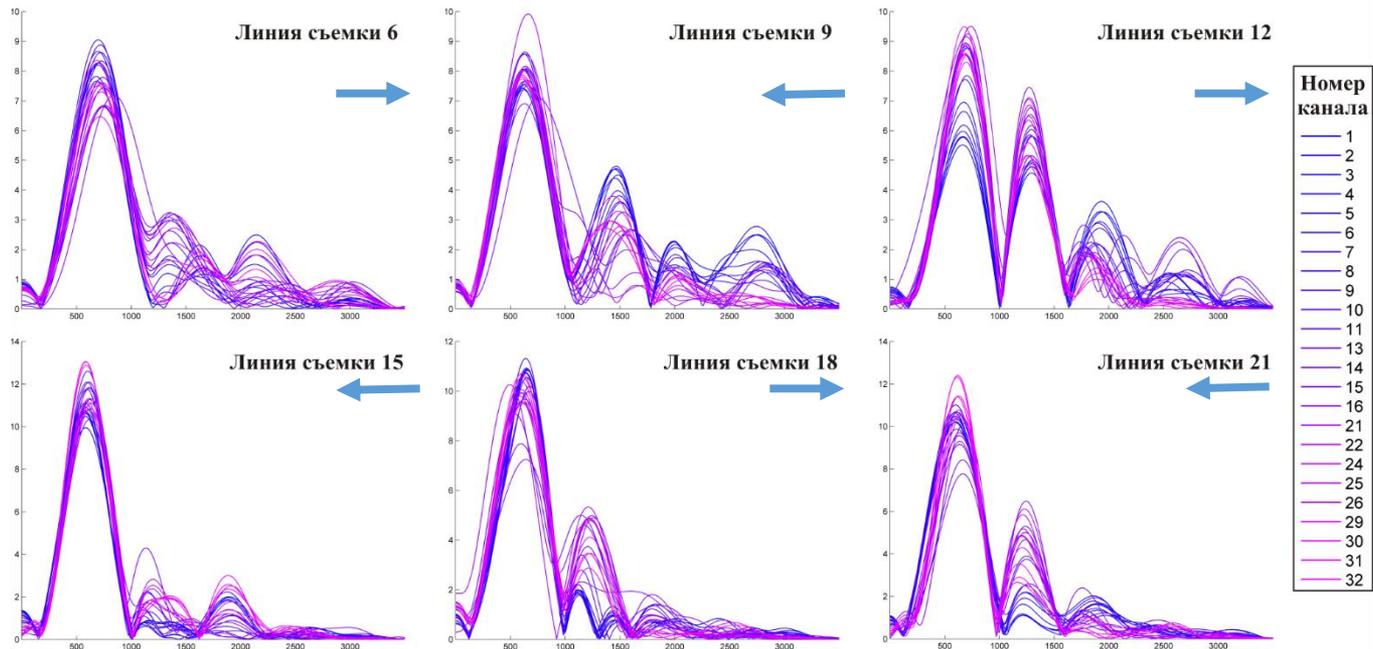
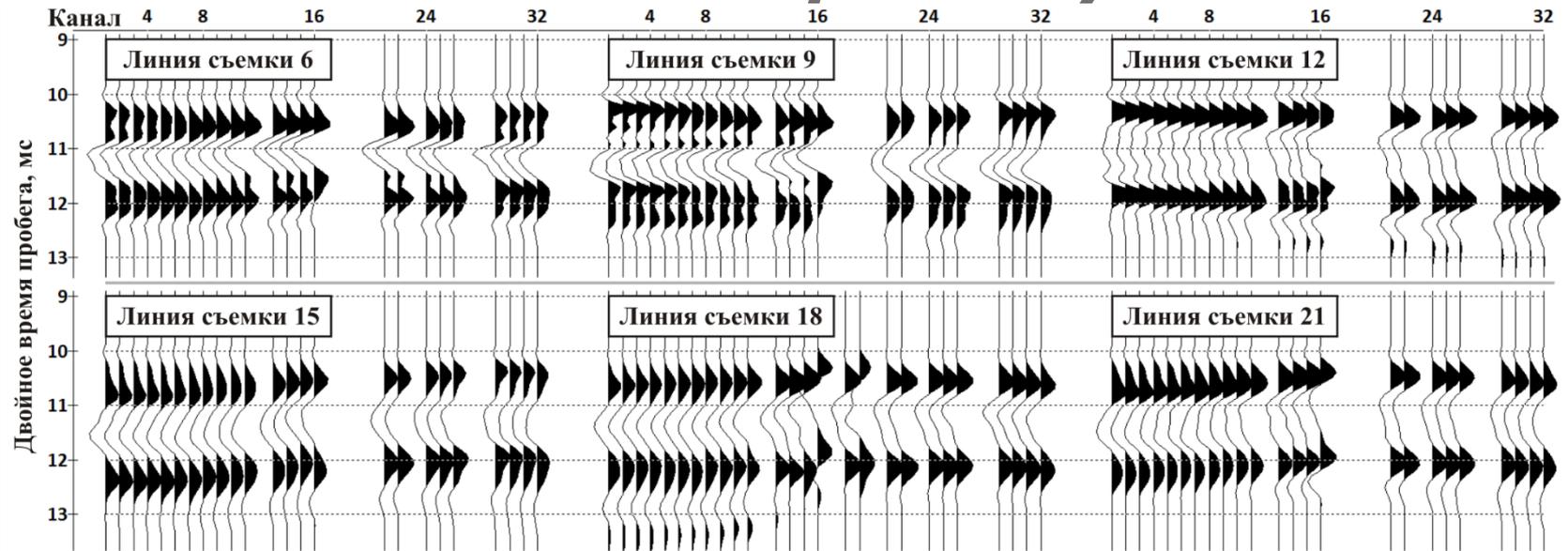


До учета статических поправок
Before statics

После учета статических поправок
After statics

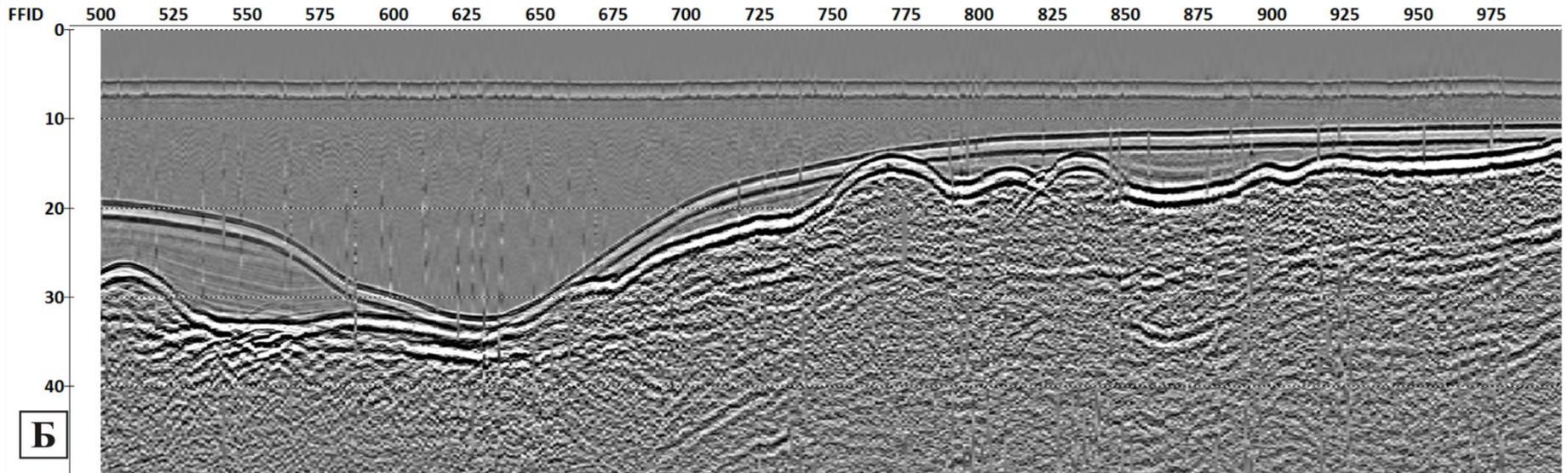
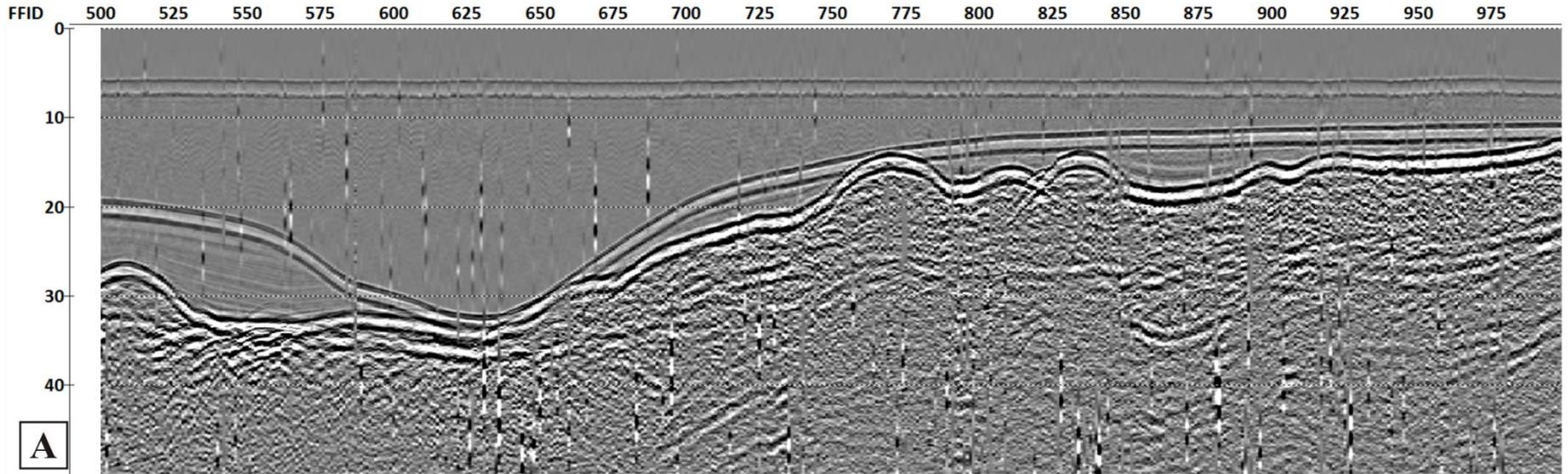
Анализ формы импульсов

Wavelet shape analysis

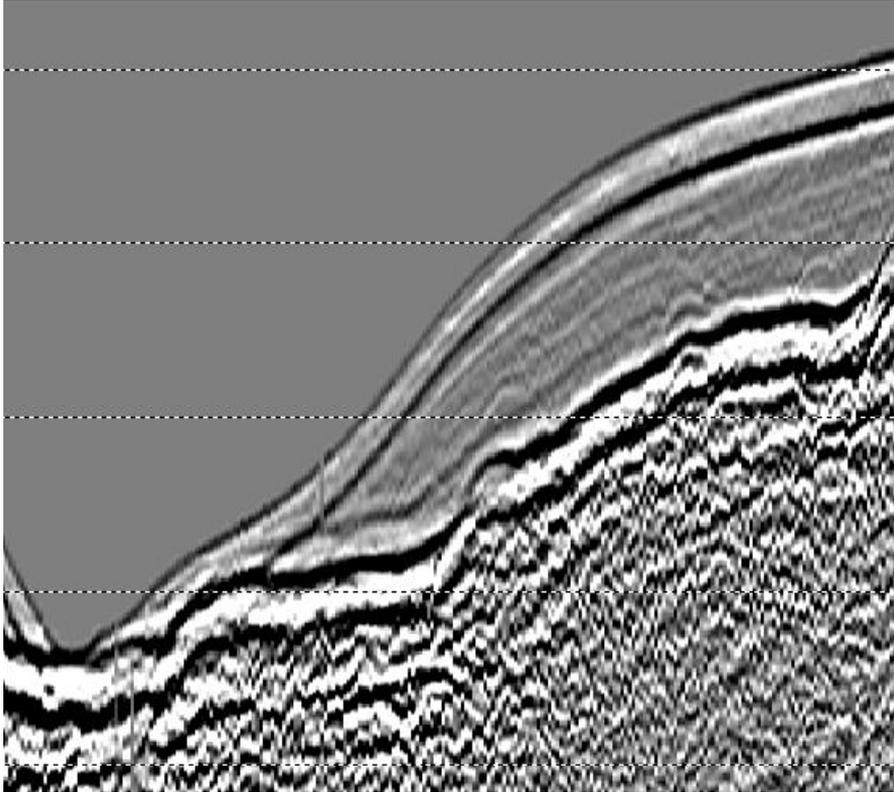


Подавление помех-выбросов

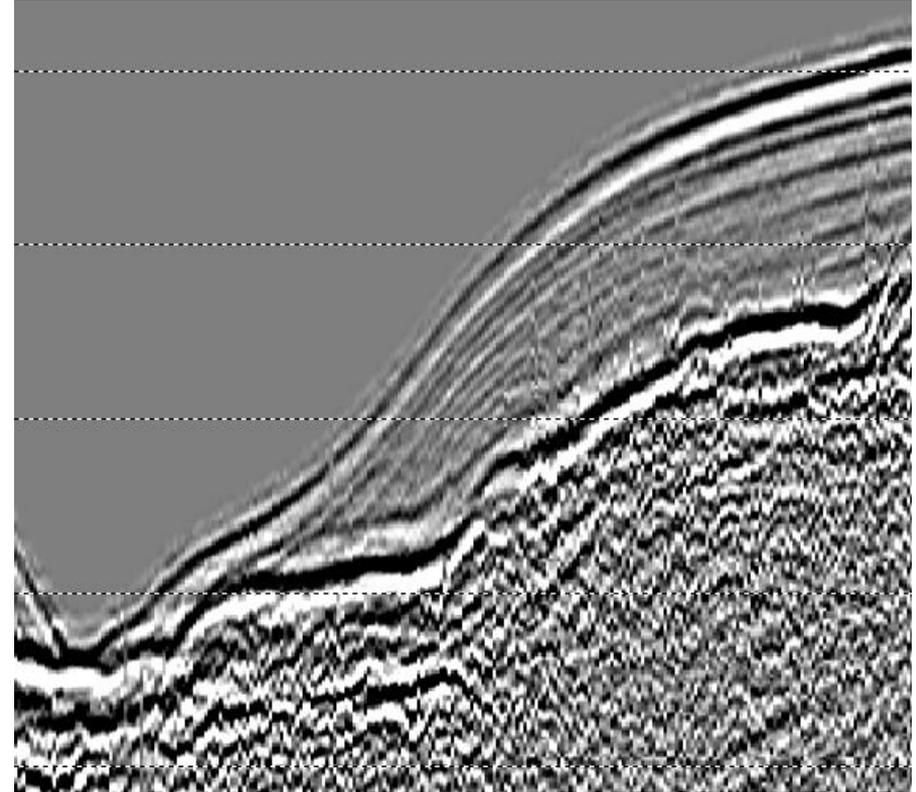
Burst noise and spikes removal



Адаптивная рекурсивная фильтрация (подавление волн-спутников) *Adaptive recursive filtering (de-ghosting)*



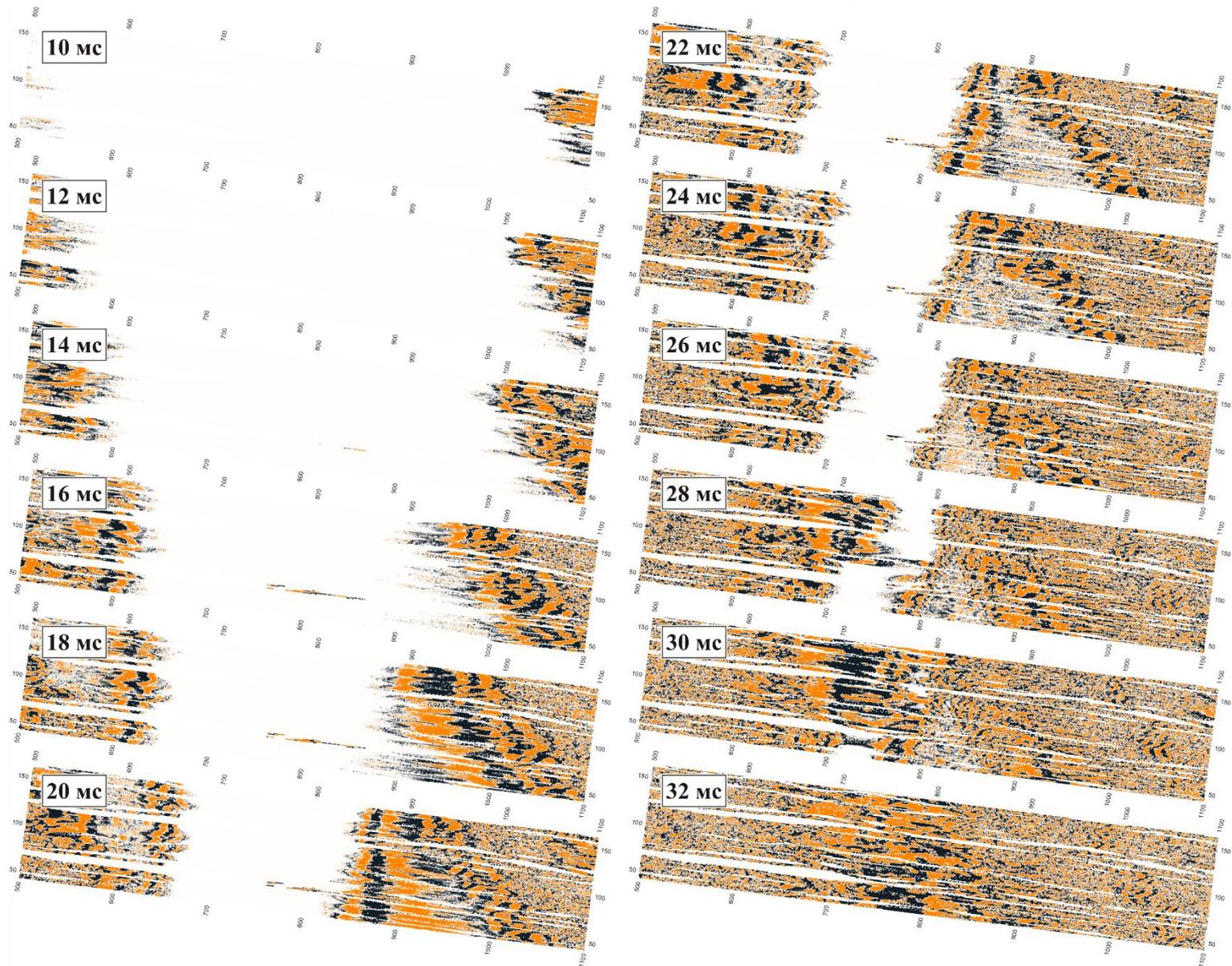
До применения процедуры
Before de-ghosting



После применения процедуры
After de-ghosting

Полученный сейсмический куб

Final seismic cube



Полученный сейсмический куб

Final seismic cube

