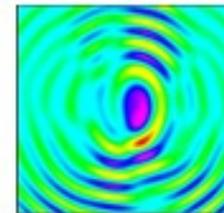


**Международная конференция  
"Суперкомпьютерные дни в России",  
25-26 сентября 2023 г.**



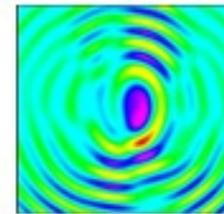
## **Суперкомпьютерные технологии в ультразвуковом неразрушающем контроле малоконтрастных дефектов твердых тел**

**Базулин Е.Г., Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серёжников С. Ю.  
Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, НИВЦ,  
ООО ЭХО+, Москва**

**Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, НИВЦ**

# Ультразвуковая томография.

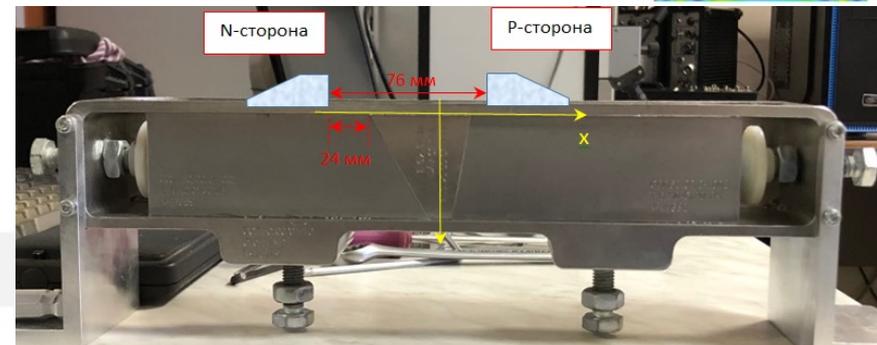
## Приложение к неразрушающему контролю



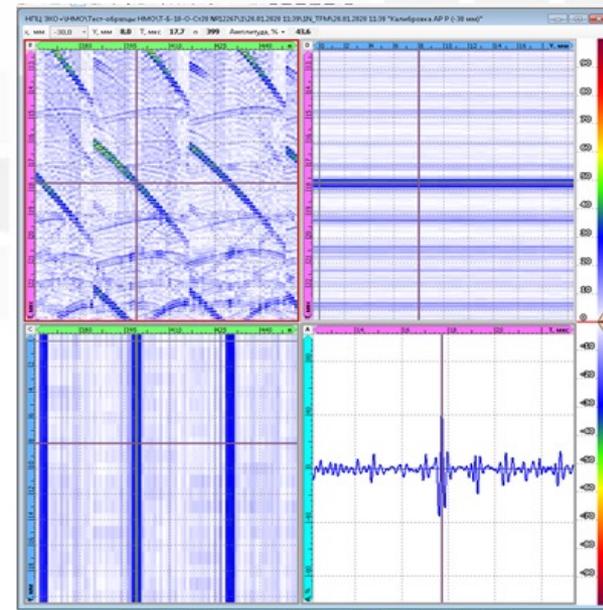
- Целью неразрушающего контроля является надёжное выявление опасных дефектов объектов повышенной опасности, для обеспечения их безаварийной эксплуатации. Диагностика состояния сварных соединений и основного металла опасных объектов (трубопроводы и оборудование атомных станций, магистральные и промышленные газопроводы, компрессорные станции, уникальные изделия машиностроения и другие).

- На практике наибольшее распространение получил ультразвуковой контроль, как обладающий высокой чувствительностью, мобильностью, экономичностью и экологичностью, а также радиационный (рентген).

- Используемые методы ультразвукового контроля не являются томографическими, малоракурсное зондирование, данные только на отражение.



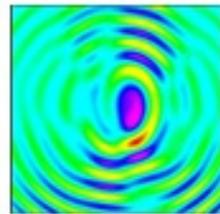
Стенд ультразвуковой томографии сварки пластин



Запись экспериментальных данных на стенде



# Постановка задачи волновой томографии



## Постановка задачи

Волновое уравнение в областях 1, 2 и 3

$$c(r)u_{tt}(r,t) - \Delta u(r,t) = f(r,t)$$

$$u(r,t \square 0) \square u_t(r,t \square 0) \square 0,$$

где  $c(r) \equiv c_0 = const$ , в областях 1 и 3,  $c_0$  - известна.

На нижней границе:  $\partial_n^k u(r,t) = p(r,t)$ ,  $k =$  либо 0, либо 1.  $p(r,t)$  – известна.

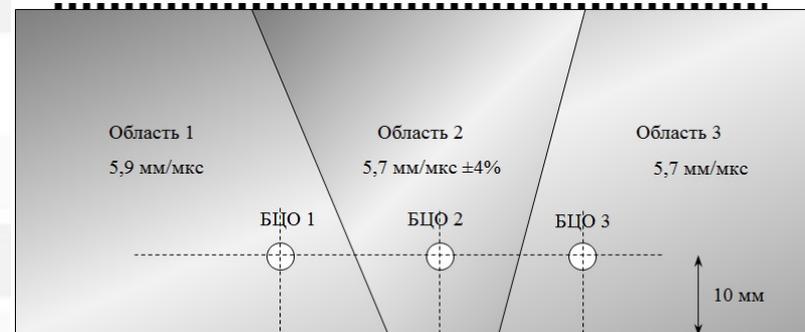
$p(r,t)=0$  - свободная поверхность или неподвижная.

На остальных внешних границах – условие прозрачности.

$u(r,t) \square U(r,t)$  - известна на верхней границе.

Минимизация невязки:  $\Phi(u(c)) \square \sum_{j \square 1}^M \frac{1}{2} \int_0^T \int_{\partial R} E^2(s,t) ds dt$

$$E(s,t) = \begin{cases} u(s,t) - U(s,t) : s \in A, \text{ где } U(s,t) - \text{измерена} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$$



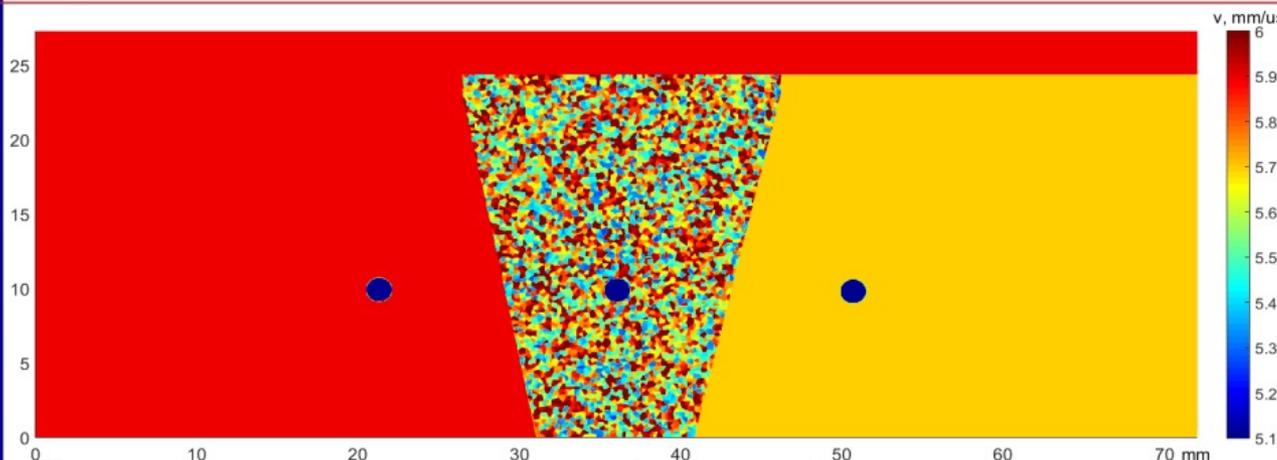
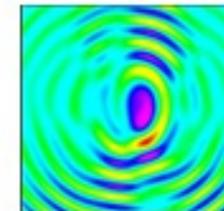
Сопряженная задача:  $c(r)w_{tt}(r,t) - \Delta w(r,t) = E(r,t)|_{r \in \partial R}$ ,  $w(r,t=T) = w_t(r,t=T) = 0$ ,  $\partial_n^k w(r,t) = 0$

В этой постановке эксперим. данные могут отсутствовать на части границы.

Формула для вычисления градиента функционала невязки, можно использовать стандартные методы минимизации функционала:

$$\Phi' \square \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial c} \right]_{dc} \square \sum_{j \square 1}^M \int_{\Omega} \left\{ \left[ \int_0^T w_t^j(r,t) u_t^j(r,t) dt \right] dc(r) \right\} dr$$

# Томографический контроль плоских объектов с отражающим дном



Фантом объекта с отражающим дном

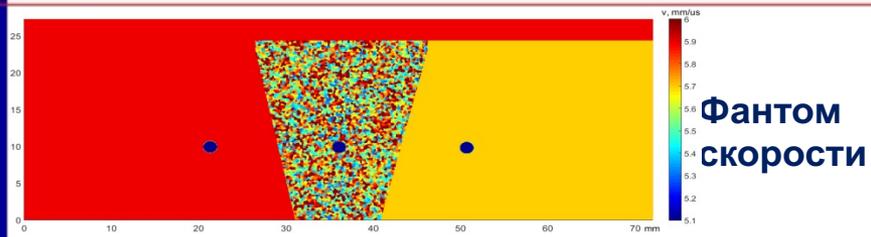
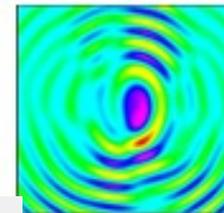
Предложена схема томографической диагностики ультразвуковыми антенными решётками плоских объектов с известным отражающим дном образца, доступ возможен только с одной стороны.

Проведены численные эксперименты по восстановлению внутренней структуры сварного шва, трещин и отверстий при наличии структурного шума, вызванного многократным отражением от границ кристаллитов.

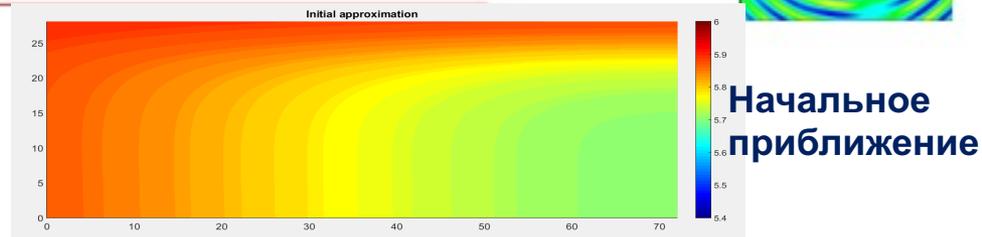
Исследованы возможности градиентного метода по обнаружению дефектов с разным контрастом. Минимизация в несколько этапов – от низких частот к высоким. Результат каждого этапа - это начальное приближение для следующего этапа.

Проведено сравнение томографических методов и традиционных методов диагностики по отраженным волнам.

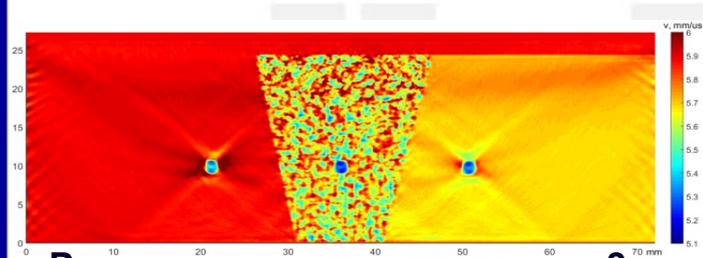
# Решение модельной обратной задачи для образца с тремя БЦО (низкий контраст 10%)



Фантом скорости



Начальное приближение



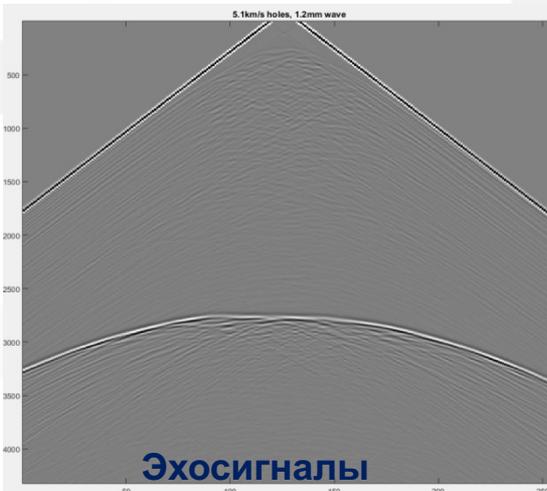
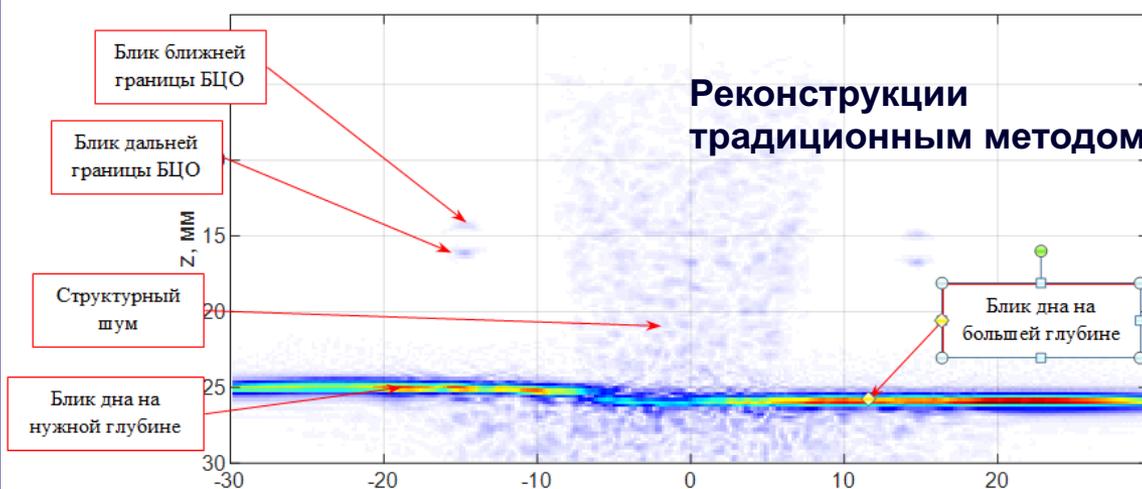
Реконструкция, длина волны 3 мм+1,2 мм

Скорость звука в металле слева 5.9 км/с, справа и в сварном шве 5.7 км/с.

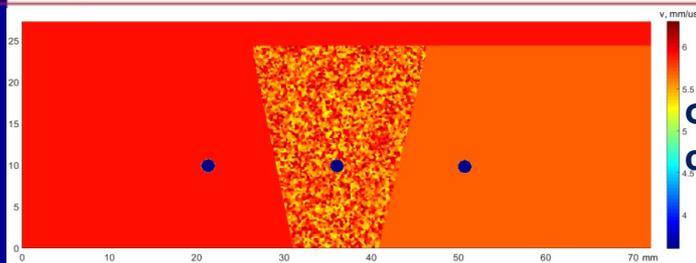
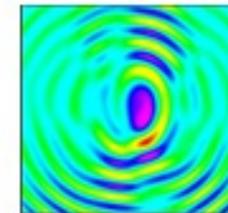
Кристаллиты размером ~ 0.5 мм. Разброс скорости в кристаллитах +-8%. Отверстия диаметром 2мм. Размер фантома 70x25 мм, шаг сетки 0.04мм (1750x625).

Отражающее дно – свободная граница.

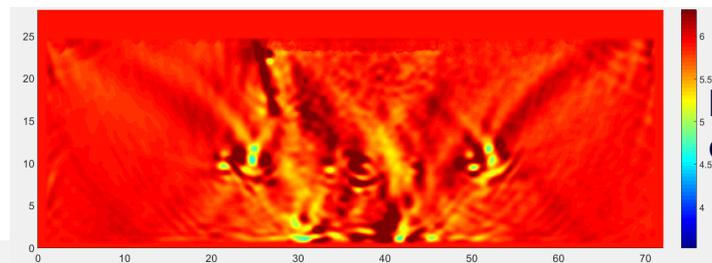
256 пьезоэлементов с шагом 0.3мм, 32 источника.



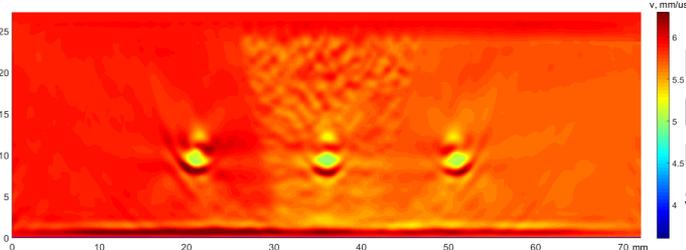
# Решение модельной обратной задачи для образца с тремя БЦО (средний контраст 40%)



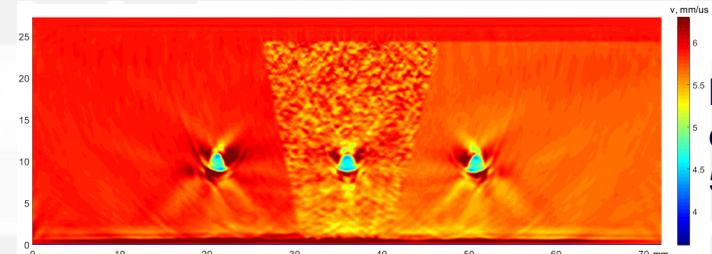
Фантом скорости



Реконструкция с волной 3 мм



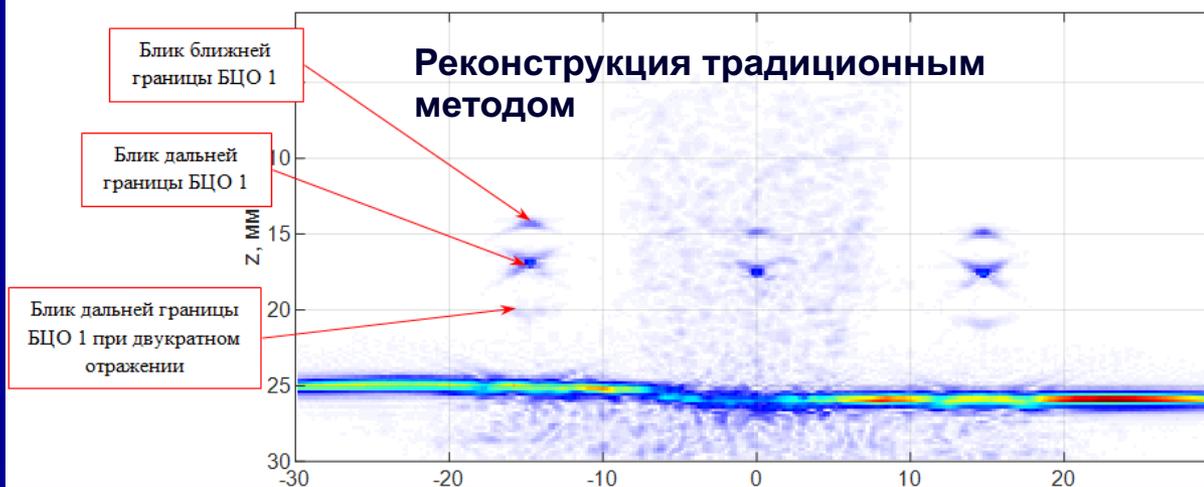
Реконструкция с волной 5 мм



Реконструкция с волной 5+2.5+1.2мм

При реконструкции сразу на высокой частоте попадаем в локальный минимум.

При реконструкции традиционным методом получаем только верхнюю и нижнюю границы. Алгоритм не позволяет учесть известное положение дна.



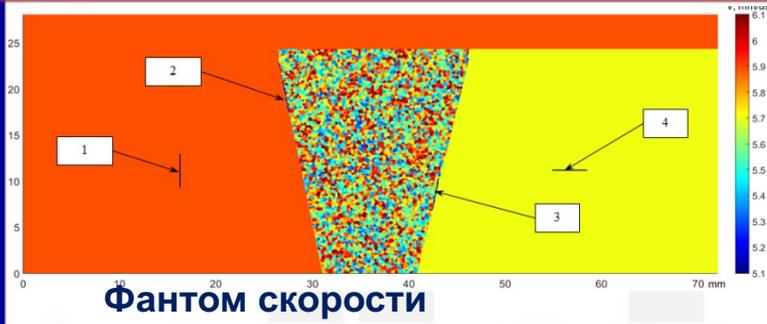
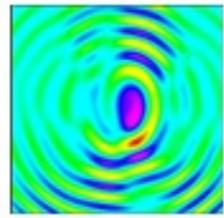
Реконструкция традиционным методом

Блик ближней границы БЦО 1

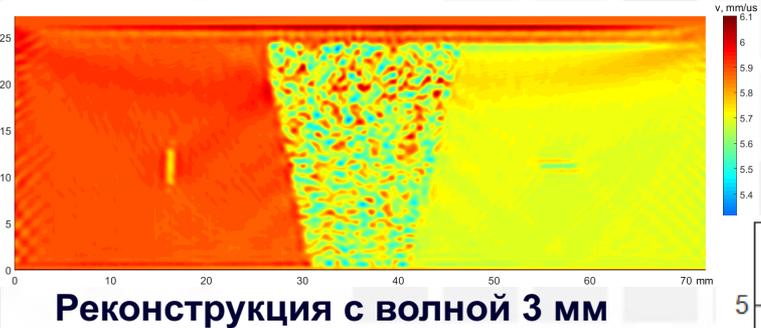
Блик дальней границы БЦО 1

Блик дальней границы БЦО 1 при двукратном отражении

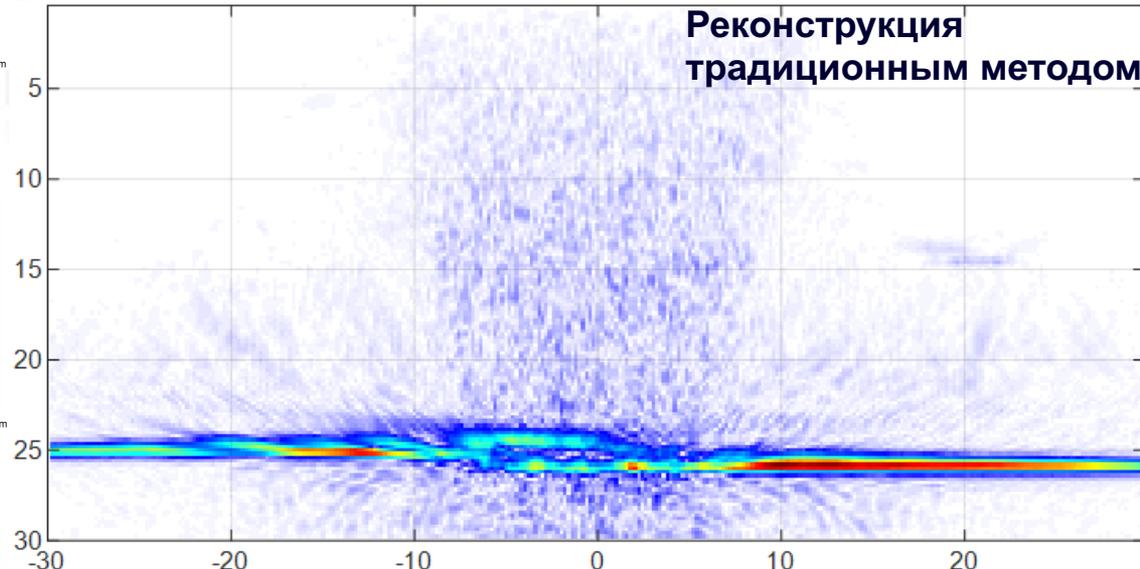
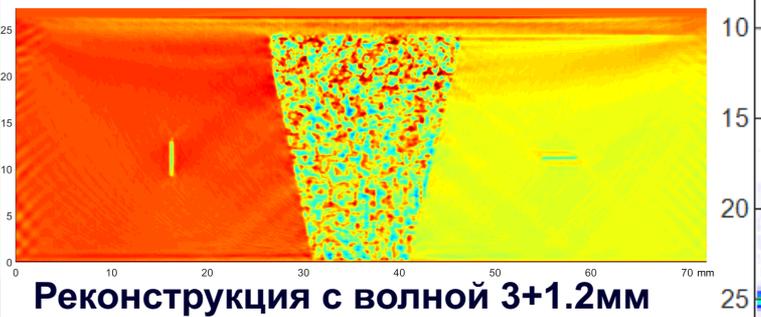
# Модельная обратная задача для образца с четырьмя трещинами (низкий контраст 10%)



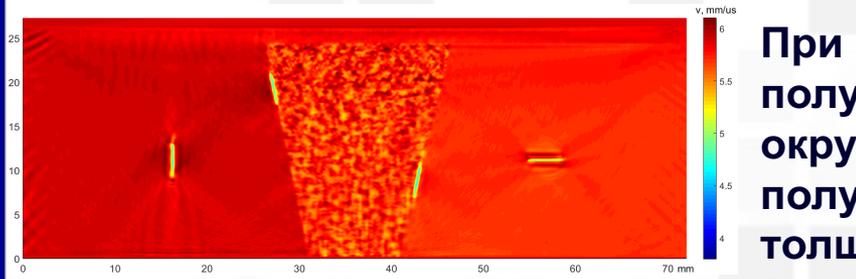
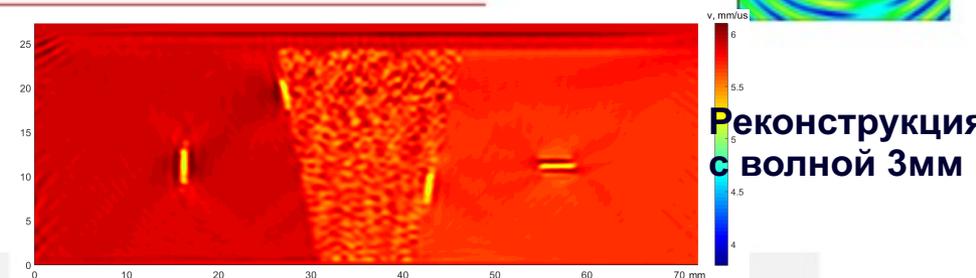
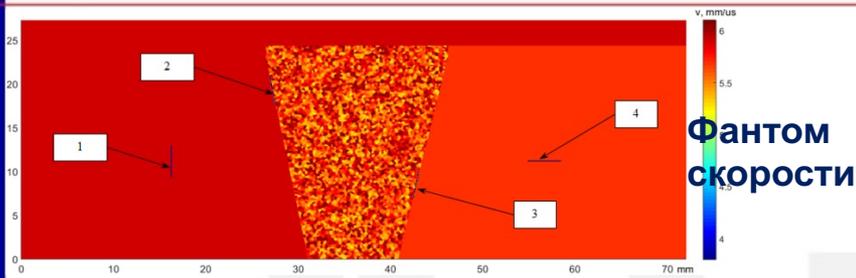
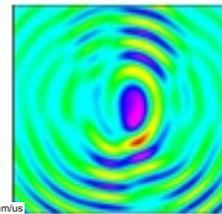
Трещины с толщиной 0.12 мм (3 точки сетки). Трещины 1 и 4 достаточно хорошо видны. Трещины 2 и 3 на границе наплавленного металла обнаружить не удаётся из-за низкого контраста.



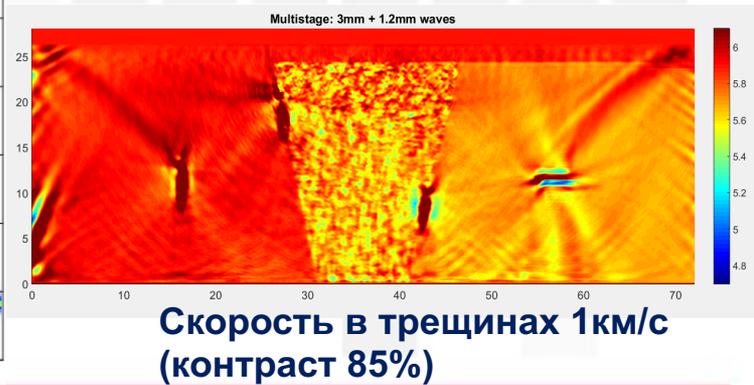
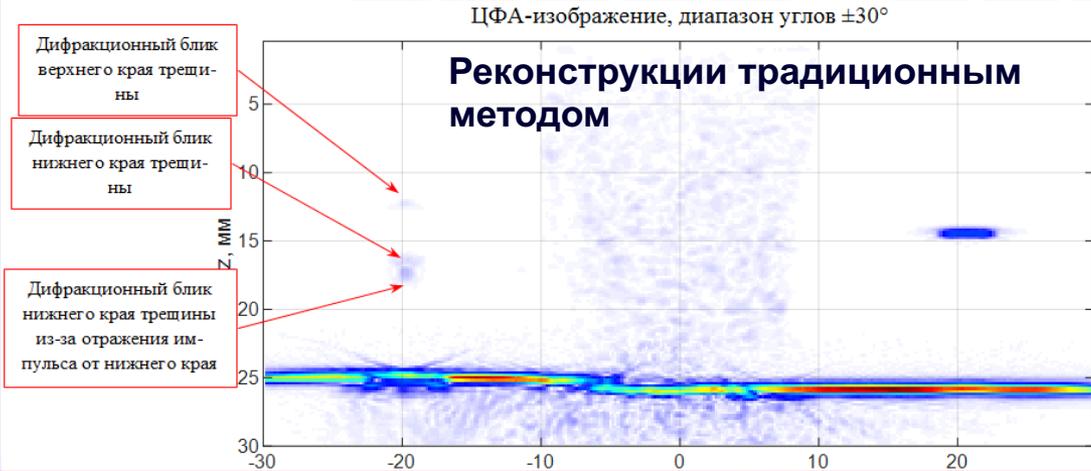
Традиционным методом удаётся обнаружить только горизонтальные трещины, где происходит отражение.



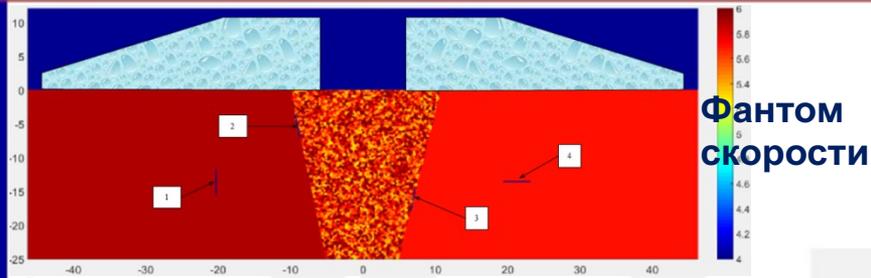
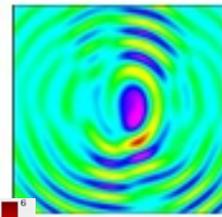
# Модельная обратная задача для образца с четырьмя трещинами (средний контраст 40%)



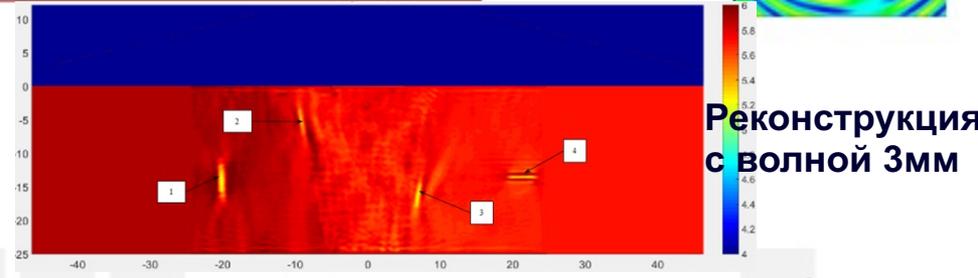
При скоростях в трещинах более 2 км/с удается получить, что скорость в трещине ниже, чем в окружающей среде. Точное значение скорости получить не удастся, что связано с малой толщиной трещин. При скорости в трещинах менее 2 км/с удается получить положение, размер и наклон трещины.



# Модельная задача на призмах для образца с четырьмя трещинами (средний контраст 40%)



Фантом скорости

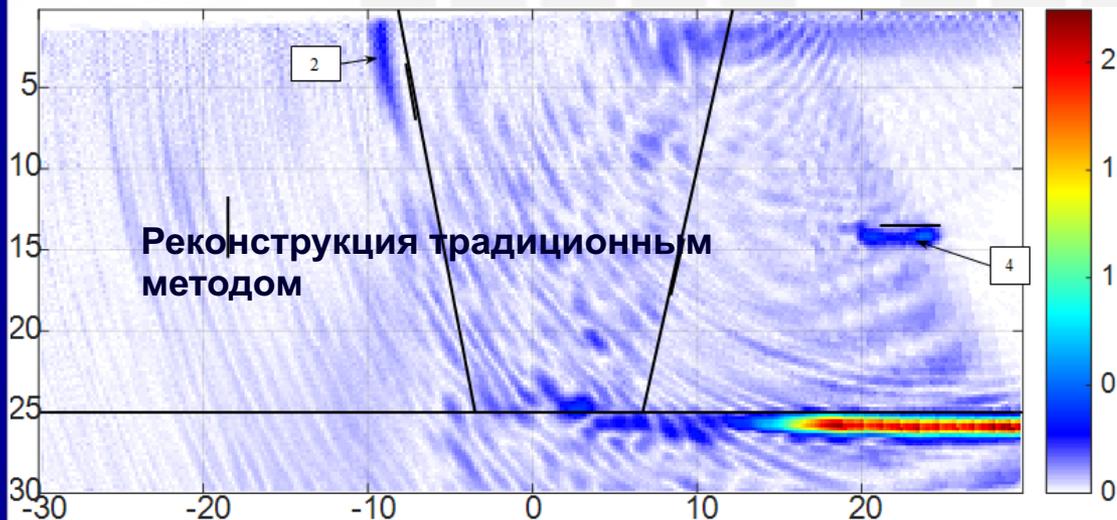


Реконструкция с волной 3мм

Антенные решетки расположены на неметаллических призмах со скоростью 2.7 км/с, под углом  $20^\circ$  по 64 элемента с каждой стороны. Пространство между призмами полностью отражающее.

Неметаллические призмы с меньшей скоростью ухудшают реконструкцию из-за искажения волнового фронта и сужения диаграммы направленности в призме.

При наличии призм часть энергии теряется на отражение от границ призм. Появляется мёртвая зона-треугольник между призмами.



Реконструкция традиционным методом

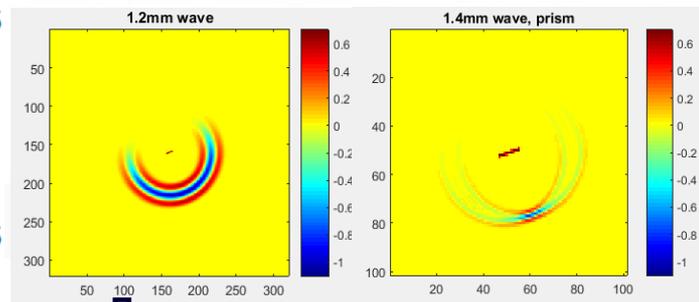
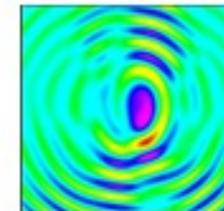


Диаграмма направленности в металле и в призме

# Скорость вычислений на различных процессорах



Суперкомпьютер «Ломоносов-2»:

Процессоры: Haswell-EP E5-2697v3 2.6 GHz 14 cores;

Intel Xeon Gold 6142 2.6 GHz 16 cores; Nvidia Tesla P100; Nvidia Tesla V100.

Особенность задачи - большое количество источников (32 или 48), для которых однотипные расчеты выполняются независимо. Размер расчетной сетки 800×2400 точек соответствует объему данных ~ 32 МБ. Этот объем помещается в кэш-памяти типичных многоядерных CPU. Поскольку основная память работает значительно медленнее кэша CPU, то эффективно каждому CPU выделяется один источник. Массив данных делится поровну между ядрами процессора.

Инструкции AVX привели к увеличению производительности в 3,5–4 раза.

GPU имеют достаточно встроенной памяти для размещения всех данных для типичной задачи реконструкции. Для 48 источников объем данных составляет 1,5 ГБ. Таким образом, вычисления можно проводить даже на одном GPU.

Для получения приближенного решения необходимо около 100 итераций. На каждой итерации выполняется 4000 шагов во времени.

Platform	Intel Haswell-EP	Intel Xeon Gold	NVidia P100	NVidia V100
Time, CPU*hours	6,4	3.5	1,7	1.1

Время вычислений решения обратной задачи на различных процессорах

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, НИВЦ