

## Обратные задачи деконволюции изображений, диагностики поверхности, голографии и томографии подповерхностных неоднородностей.

*К.П.Гайкович*

Бесконтактные неразрушающие методы физической диагностики двумерных и трехмерных распределений параметров неоднородных сред представляют интерес в огромной области научных и практических приложений. Извлечение полезной информации из данных таких бесконтактных измерений предполагает постановку и решение соответствующих обратных задач.

К классу двумерных задач в первую очередь относятся задачи реконструкции изображений, неизбежно искажаемых и сглаживаемых аппаратной функцией прибора – телескопа, радиотелескопа, микроскопа, наконец, обычного фотоаппарата. Математически такое искажение описывается двумерным интегралом – сверткой (конволюцией) истинного двумерного распределения (изображения) и аппаратной функции. Если аппаратная функция прибора известна (а ее обычно можно измерить), то существует возможность реконструировать истинное изображение, решая интегральное уравнение. Такие задачи решать непросто, поскольку они оказываются математически некорректными (информационно недоопределенными). Специфику методов решения определяют способы устранения этой недоопределенности (регуляризации), которые вводят в алгоритмы имеющуюся априорную информацию об искомом решении.

На рис.1 идея реконструкции изображений демонстрируется на примере численного моделирования с использованием в решении интегрального уравнения метода обобщенной невязки Тихонова, в котором используется информация о принадлежности решения к функциональному пространству Соболева.

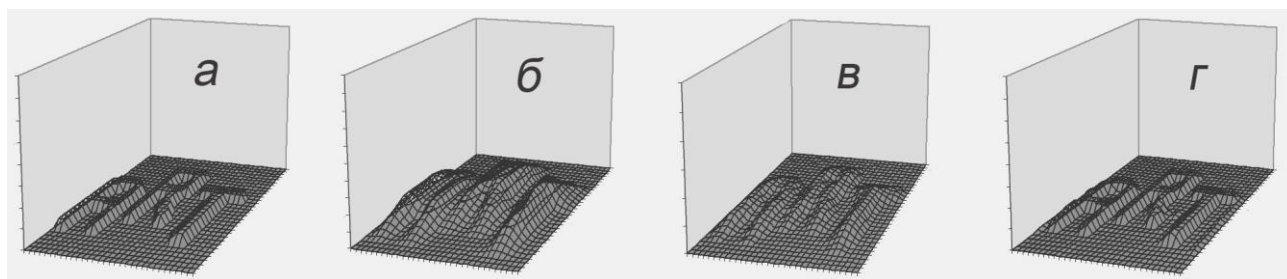


Рис.1

Можно видеть, как исходное изображение (а) замывается гауссовой аппаратной функцией так, что в «наблюдаемом» изображении (б) буквы становятся неразличимыми. Результат восстановления при точности данных 1% позволяет различить текст в реконструированном изображении (в), а при точности 0,01% оно восстанавливается практически точно (г).

В ИФМ РАН такой подход нашел применение к задачам зондовой микроскопии (сканирующей ближнеполевой оптической (СБОМ), электронной, ОЖЕ, туннельной), а также в сканирующей магнитной диагностике пленой ВТСП. Результаты опубликованы в монографиях: К. П. Gaikovich. *Inverse Problems in Physical Diagnostics*. Nova Science Publishers Inc., New York, 2004; G. A. Maximov, Z. F. Krasil'nik, A. V. Novikov, V. G. Shengurov, D. O. Filatov. D. E. Nikolitchev, V. F. Dryakhlushin, K. P. Gaikovich. *Composition Analysis of Single*

GeSi/Si Nanoclusters by Scanning Auger Microscopy . Nanophysics, Nanoclusters, and Nanodevices, Ed. by E.Duote. Nova Science Publishers Inc., New York, 2006.

На рис.2 показан пример изображения ближнего поля излучения полупроводникового лазера, измеренного вблизи излучающей поверхности системой СБОМ (рис.2а).

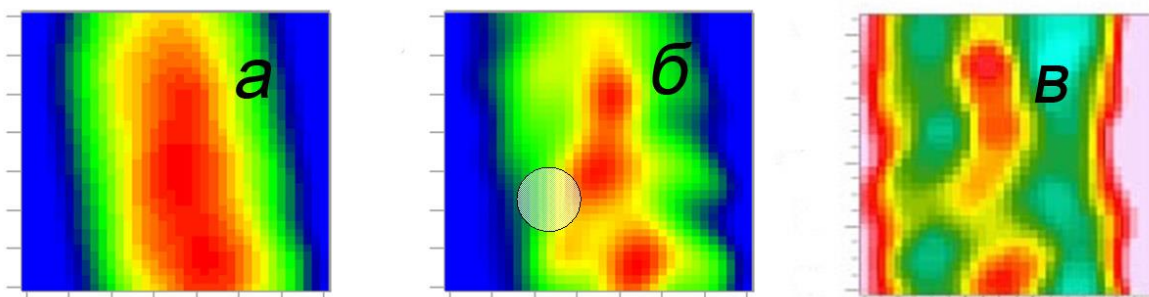


Рис.2

Реконструкция этого изображения (рис.2б) с учетом аппаратной функции зонда, масштаб сглаживания которой показан кружком, позволяет различить более мелкомасштабные детали в излучении. Сравнение с изображением рельефа поверхности (рис.2в), полученным с помощью атомно-силового микроскопа, показывает, что восстановленные неоднородности излучения хорошо соответствуют неоднородностям излучающей поверхности.

Весьма эффективным оказался развитый нами метод реконструкции изображений в сканирующей туннельной микроскопии, где масштаб осреднения передаточной функцией соответствует размеру крайнего атома на игле туннельного микроскопа.

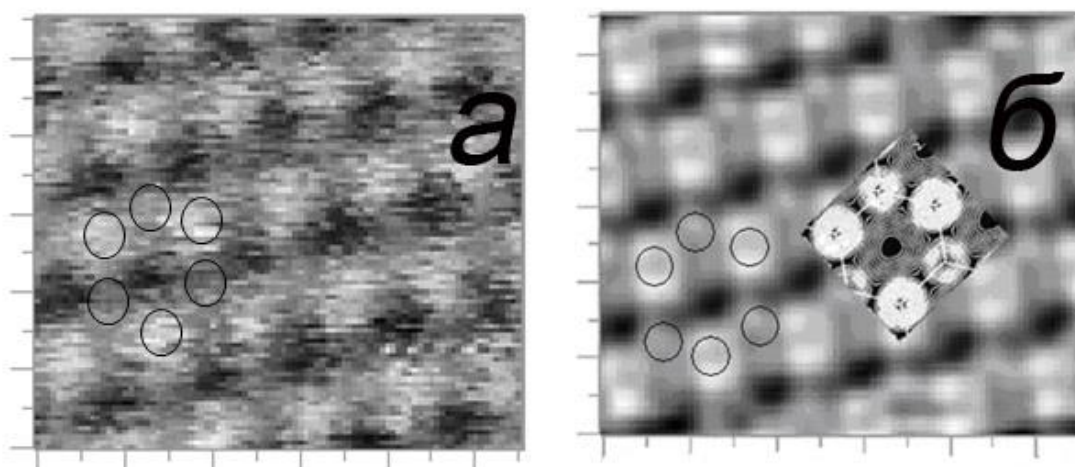


Рис.3

На рис.3а можно видеть измеренное туннельным микроскопом изображение поверхности пиролитического графита. На нем из-за влияния атомов сдвинутого второго слоя можно отчетливо различить только половину из 6 атомов решетки, положение которых показано кружочками. Однако на восстановленном изображении, характеризующем распределение поверхностной плотности электронных состояний (рис.3б), отчетливо различимы все атомы решетки. Более того, сопоставление с теоретическим распределением (вставка) показывает, что оказалось, что метод позволяет восстановить и некоторые детали субатомного масштаба.

Двумерные обратные задачи не обязательно связаны с проблемой искажения изображения передаточной функцией. Такова, например, задача восстановления двумерного распределения поверхностного тока на замагниченной пленке высокотемпературного сверхпроводника по

измерением создаваемого им магнитного поля. Для решения этой задачи удалось получить интегральные уравнения типа двумерной свертки, связывающее каждую из компонент поверхностного тока с двумерным распределением  $z$ -компоненты магнитного поля, измеренного на некоторой высоте  $z$  над пленкой. Численное моделирование задачи позволило оптимизировать схему измерений и установить точность решения.

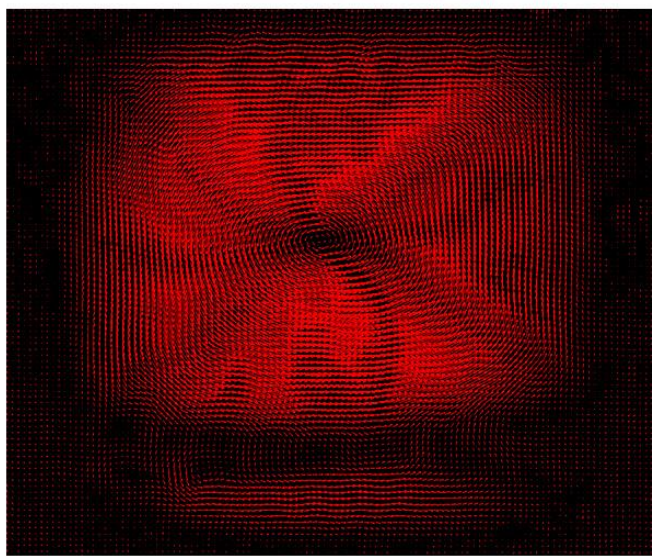
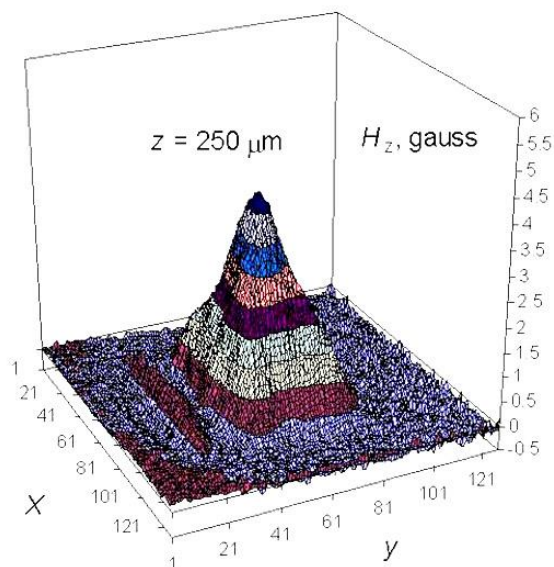


Рис.4

Это позволило реализовать метод восстановления поверхностного тока в экспериментах и осуществить его визуализацию. На рис.4 можно видеть пример такого восстановления. Слева показано двумерное распределение модуля  $z$ -компоненты магнитного поля, измеренного на высоте  $z = 250$  мкм над квадратной пленкой со стороной 1 см, а справа – визуализация восстановленного векторного поля поверхностного тока на этой пленке. Метод был применен для исследования обтекания током дефектов на пленках и воздействия лазерных импульсов на распределение сверхпроводящего тока.

Естественным развитием методов диагностики поверхности стало исследование возможностей диагностики трехмерных подповерхностных неоднородностей параметров сред. Такие методы могут быть основаны на измерениях поля внешнего источника (электромагнитного или акустического), рассеянного неоднородностями, или на измерениях собственного теплового излучения среды. Соответственно, объектами анализа могут быть внутренние неоднородности диэлектрической проницаемости, плотности или температуры среды. Чтобы определять трехмерные распределения параметров, помимо двумерного сканирования вдоль поверхности над областью неоднородностей, необходимо также проводить эти измерения в зависимости от третьего параметра, определяющего глубинную чувствительность. Таким параметром может быть, например, частота сигнала, от которой зависит толщина слоя, в котором формируется излучение.

Спецификой развиваемых нами методов являлось использование ближнеполюсных измерений, позволяющих, так же, как и в СБОМ, реализовать субволновую разрешающую способность. При этом в качестве параметров, определяющих глубинную чувствительность, оказалось возможным использовать не только частоту, но и расстояние приемного зонда над поверхностью и размер его апертуры (*Письма в ЖЭТФ*, 2000, **72**(11), 792; *Phys. Rev. Lett.*,

2002, **88**(10), 104302). В ходе этих исследований на протяжении ряда лет удалось преодолеть многочисленные теоретические и практические трудности в решении этих сложнейших трехмерных задач (*Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(18), 183902; *Inverse Problems*, 2010, **26**(12), 125013; *Изв. вузов. Радиофизика*, 2011, **54**(6), 431; *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108**(16), 163902).

Был предложен метод сканирующей ближнепольной томографии неоднородностей в многослойной среде, позволяющей в ряде случаев свести трехмерную задачу к многократному решению одномерной задачи для каждой пары компонент поперечного спектра глубинного профиля неоднородностей. Это позволило преодолеть фундаментальные ограничения на размерность сетки, на которой ищется решение, и, следовательно, на достижимый уровень разрешающей способности. Различные варианты метода (многочастотный, многоуровневый, многоапертурный) были исследованы в численном моделировании для определения трехмерных неоднородностей комплексной диэлектрической проницаемости сред в СВЧ диапазоне, проводимости земной коры в УНЧ диапазоне, температурных неоднородностей по СВЧ тепловому излучению, рефракционных акустических неоднородностей под морским дном. Были предложены методы использования в субволновой томографии плоских «совершенных» и «квазисовершенных» линз из «левосторонних» метаматериалов. Наконец, для случаев, когда зондируемый объект является внутренне однородным (что чаще всего и имеет место на практике), предложен метод преобразования восстановленного поперечного спектра неоднородности в числовую форму его поверхности, т. е. метод компьютерной голографии.

Развитую теорию ближнепольной сканирующей томографии удалось реализовать экспериментально совместно с Институтом прикладной физики НАН Беларуси для томографии и голографии диэлектрических неоднородностей в грунте. Измерения (см. схему на рис.5) выполнялись с помощью приемно-передающей сканирующей системы, состоящей из двух идентичных жестко связанных дипольных антенн и векторного анализатора цепей Agilent E5071B, который позволял излучать зондирующий сигнал на 801 частоте в диапазоне 1,7 – 7 ГГц и измерять комплексные амплитуды поля, рассеянного на неоднородностях.

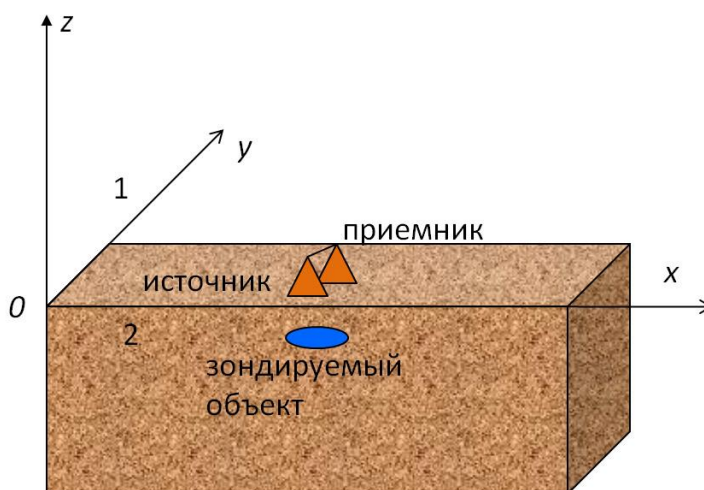


Рис.5

Оказалось, однако, что рассеяние на неоднородностях поверхности (даже визуально гладкой) практически полностью зашумляет поле, рассеянное на подповерхностных объектах. Проблему удалось решить путем трансформации многочастотных данных во временную область и соответствующей трансформации решаемого уравнения. Оказалась, что в

синтезированном таким образом псевдоимпульсе вклад поверхностного и подповерхностного рассеяния разделяется, и подповерхностный объект может быть отчетливо виден при визуализации поперечного распределения этого параметра в определенном диапазоне значений эффективной глубины рассеяния (параметр, определяемый временем задержки сигнала в среде относительно поверхностного максимума). Уже этот результат – возможность визуализации и локализации поперечного и глубинного положения неоднородностей в ближней зоне является чрезвычайно полезным для их качественной диагностики. Естественно, что и результаты томографии, основанные на таких высококачественных данных, радикально улучшились. Были выполнены исследования метода для различных диэлектрических неоднородностей, как распределенных, так и внутренне однородных.

Приведем результаты для тестового образца из слабоконтрастного диэлектрика, имеющего форму параллелепипеда с размерами  $4 \times 3 \times 2$  см, на глубине  $z = -4$  см в песчаном грунте.

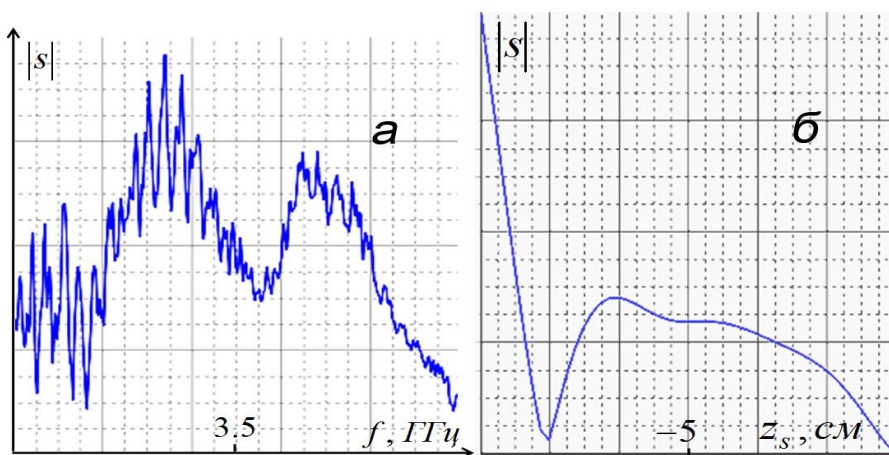


Рис.6.

На рис.6а показана измеренная частотная зависимость модуля комплексной амплитуды сигнала, принимаемого в точке над серединой тестового объекта, а на рис.6б – соответствующая величина псевдоимпульса в зависимости от эффективной глубины рассеяния  $z_s$ . Можно видеть резкий максимум, соответствующий рассеянию на поверхностных неоднородностях, а после глубокого провала – распределение, создаваемое рассеянием на подповерхностном объекте. На рис.7 показаны двумерные распределения модуля комплексной амплитуды псевдоимпульса в области над тестовым объектом для нескольких значений эффективной глубины рассеяния.

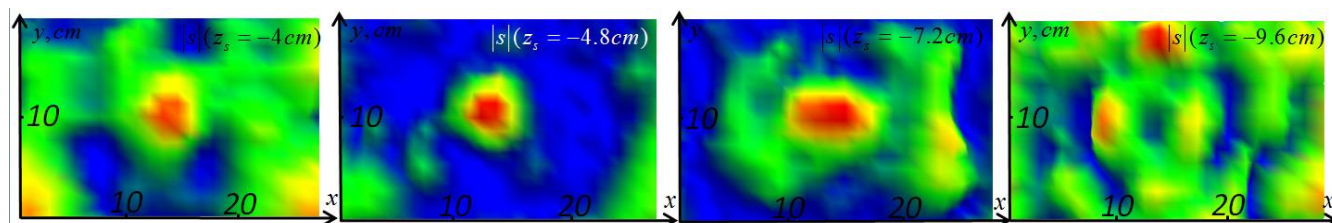


Рис.7

Оказалось, что в некотором интервале значений эффективных глубин рассеяния объект отчетливо виден, а за его пределами постепенно исчезает. Продемонстрированная возможность обнаружения и весьма точной локализации подповерхностных объектов явилась хорошей основой для применения более утонченных методов диагностики – голографии и

томографии подповерхностных неоднородностей, основанных на решении обратной задачи рассеяния.

На рис.8 показаны голографические изображения поверхности представленные в виде двух функций  $x_1(y,z)$  и  $x_2(y,z)$ , полученные из решения обратной задачи рассеяния для рассматриваемого тестового объекта.

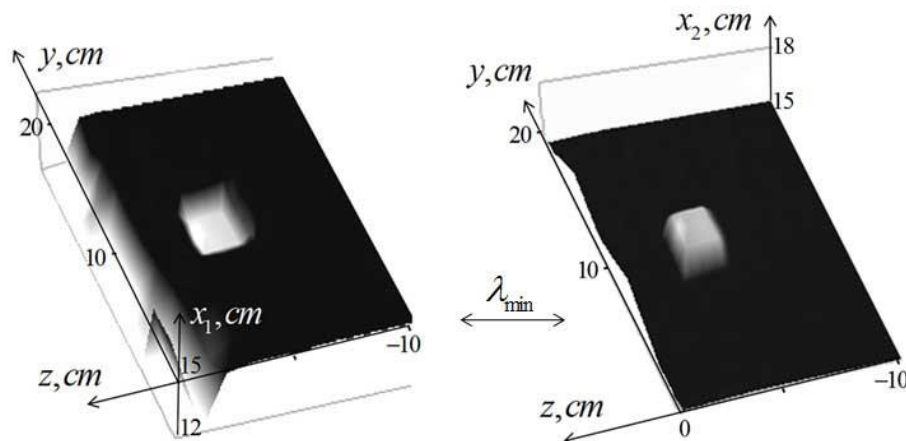


Рис.8

Результаты голографии показывают хорошую воспроизводимость формы и положения тестового объекта. Сравнение с наименьшей длиной волны показывает, что ближнеполюсные измерения действительно позволяют реализовать субволновую разрешающую способность.

Более сложной задачей является задача томографии (восстановление трехмерного распределения комплексной диэлектрической проницаемости) для распределенных неоднородностей. Задача еще более усложняется, если эти неоднородности не малы и необходимо учитывать поправки за пределами борновского приближения. На рис.9-10 показаны результаты измерений и восстановления неоднородности комплексной диэлектрической проницаемости, создаваемой образцом тающего льда с исходными размерами  $10 \times 10 \times 4$  см на глубине  $z = -9$  см в грунте.

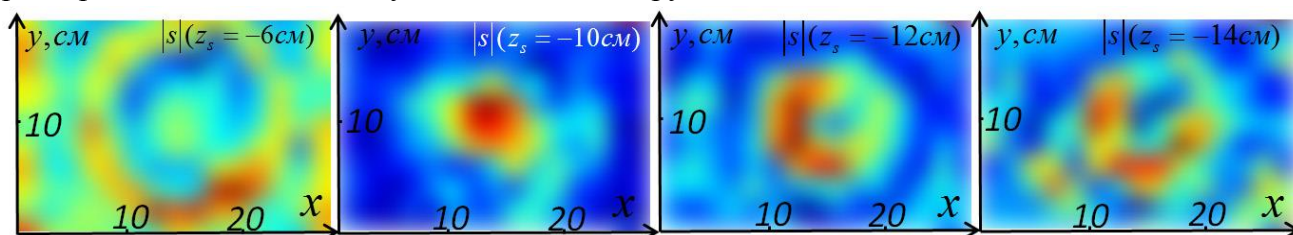


Рис.9

Показанные на рис.9 двумерные распределения модуля комплексной амплитуды псевдоимпульса показывают, что данная неоднородность наблюдается, начиная с больших эффективных глубин рассеяния, чем для образца на рис.7, расположенного ближе к поверхности.

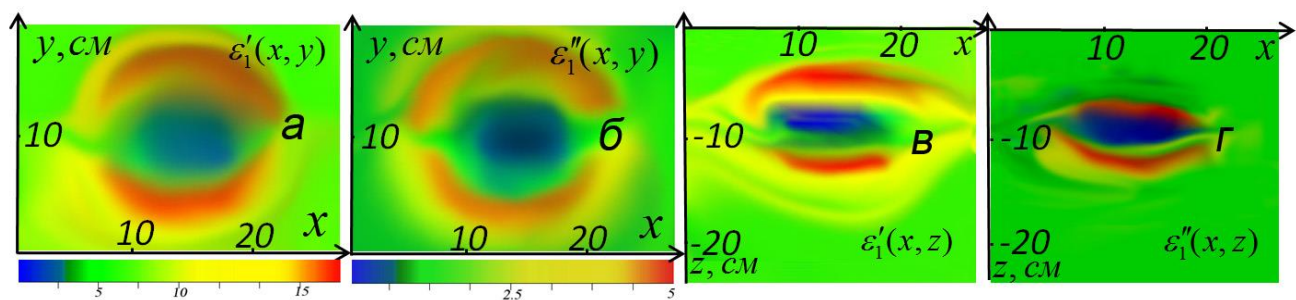


Рис.10

На томограммах (рис.10а, 10б) представлено поперечное сечение действительной и мнимой части неоднородности комплексной диэлектрической проницаемости, создаваемой диффузией воды в песок вокруг тающего льда на глубине 9 см. На рис.10в, 10г демонстрируется вертикальное сечение диэлектрических параметров образца в плоскости  $xz$ . На рисунках можно отчетливо видеть область низких значений диэлектрических параметров, соответствующая положению образца льда и области повышенных значений этих параметров вокруг образца, обусловленные высокими значениями диэлектрических параметров диффундирующей в процессе таяния воды.

Полученные результаты демонстрируют перспективность развитых методов ближнепольной многочастотной диагностики подповерхностных неоднородностей. Они могут найти важное практическое применение в биомедицинской диагностике и дефектоскопии с использованием как электромагнитных, так и акустических сигналов.