

УДК 584.17

**Николай Лукич Халаев**

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, кандидат технических наук, SPIN-код: 1907-8506, AuthorID: 633019, Россия, Владивосток, e-mail: halaevn@mail.ru

**Павел Анатольевич Стародубцев**

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, доктор технических наук, профессор, AuthorID: 561533, Россия, Владивосток, e-mail: spa1958@mail.ru

**Артем Александрович Эм**

Дальневосточный федеральный университет, инженерная школа, кафедра приборостроения, SPIN-код: 2053-3840, AuthorID: 1040463, Россия, Владивосток, e-mail: art\_of\_motion@mail.ru

**Евгений Павлович Стародубцев**

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, Россия, Владивосток, e-mail: spa1958@mail.ru

**Евгений Николаевич Бакланов**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, доцент кафедры «Судовождение», SPIN-код: 1503-6517, AuthorID: 707217, Россия, Владивосток, e-mail: baklanoven@mail.ru

**Эдуард Владимирович Москаленко**

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, Россия, Владивосток, e-mail: vunc-vmf-tovmi@mail.ru

**Реконструктивная акустическая томография и ее теоретические основы**

*Аннотация.* Представлен аналитический материал теоретических основ современной реконструктивной томографии океанской среды. Целью проведенных исследований, представленных в работе, является формирование математического аппарата реконструкции возмущений морской среды по «срезовой» информации, полученной от объектов естественного происхождения. Объект исследований представлен самой морской средой и ее основными характеристиками. Предмет исследования есть результаты реконструкции возмущений морской среды по «срезовой» информации.

*Ключевые слова:* акустика, реконструктивная томография, акустическая томография, родоновский образ.

**Nikolai L. Khalaev**

Pacific Higher Naval Collage after S.O. Makarov, PhD in engineering science, SPIN-cod: 1907-8506, AuthorID: 633019, Russia, Vladivostok, e-mail: halaevn@mail.ru

**Pavel A. Starodubtcev**

Pacific Higher Naval Collage after S.O. Makarov, doctor of technical sciences, professor, AuthorID: 561533, Russia, Vladivostok, e-mail: spa1958@mail.ru

**Artem A. Em**

Far Eastern federal University, engineering school, department of instrument engineering, SPIN-cod: 2053-3840, AuthorID: 1040463, Russia, Vladivostok, e-mail: art\_of\_motion@mail.ru

**Evgenii P. Starodubtcev**

Pacific Higher Naval Collage after S.O. Makarov, Russia, Vladivostok, e-mail: spa1958@mail.ru

**Evgenii N. Baklanov**

Far Eastern State Technical Fisheries University, associate professor of the department of navigation, SPIN-cod: 1503-6517, AuthorID: 707217, Russia, Vladivostok, e-mail: baklanoven@mail.ru

**Eduard V. Moskalenko**

Pacific Higher Naval Collage after S.O. Makarov, Russia, Vladivostok, e-mail: vunc-vmf-tovmi@mail.ru

**Reconstructive acoustic tomography and its theoretical bases**

*Abstract.* The analytical material of the theoretical foundations of modern reconstructive tomography of the ocean environment is presented. The aim of the studies presented in this work is to form a mathematical apparatus for reconstructing disturbances in the marine environment from «slice» information received from objects of natural origin. The object of research is represented by the marine environment itself and its main characteristics. The subject of the research is the results of the reconstruction of disturbances in the marine environment from the «slice» information.

*Key words:* acoustics, reconstructive tomography, acoustic tomography, Rodon image.

**Введение**

Водная среда всегда притягивала человека своей таинственностью ограниченно наблюдаемого пространства (невозможности естественным образом созерцать водное пространство от горизонта до горизонта). Стекло маски ныряльщика позволяло повысить резкость и контрастность видимых в воде предметов. Однако до глубин 6–10 м лучи света проникают сквозь морскую воду, как лучи света сквозь окна, а на глубинах 80–90 м цвет воды становится голубовато-зеленым. Свыше глубин 300 м вода имеет черно-синий мутный цвет.

Только акустические волны дают возможность раздвинуть границы обзора пространства. Причем дальность этих границ зависит от частоты акустических волн: чем меньше частота – тем больше дальность обзора. Именно этот фактор дал толчок развитию важного направления в гидроакустике – акустической томографии [1].

### Основная часть

Под акустической томографией обычно понимают направление акустики, занимающееся формированием (получением, восстановлением) акустических томограмм, т.е. масштабных изображений акустических неоднородностей в определенных сечениях трехмерных объектов. К акустическим неоднородностям относят параметры объектов, влияющие на распространение, отражение и рассеяние акустических волн (плотность, скорость звука, отражающая способность и пр.) [2].

Методы акустической томографии преимущественно используются в медицинской диагностике, неразрушающем контроле изделий, геофизике, а также в гидроакустике. Наибольшее распространение акустическая томография получила в медицине как один из наименее вредных способов диагностики различных заболеваний у людей.

Акустическая томография обобщает результаты, полученные не только в акустике, но и в таких областях, как рентгенотехника, оптика и радиолокация, причем само понятие томографии и первые алгоритмы томографической реконструкции пришли в акустику из других областей. В результате в акустике оказались смешанными понятия эхоскопии, звуковидения, голографии и томографии, и зачастую одни и те же понятия называются различными терминами [2].

Настоящий материал затрагивает вопросы, связанные с *реконструктивной томографией*, которую также часто называют вычислительной томографией [3]. Несмотря на отсутствие четких границ в классификации методов акустической томографии, под реконструктивной томографией обычно понимают такие методы получения изображений, которые требуют проведения измерений накапливающего характера (обычно говорят о формировании многих проекций, например, исследуемый объект облучается с разных сторон и каждый раз измеряется совокупность отраженных сигналов) с последующей реконструкцией неоднородностей при помощи цифровых методов обработки измеренных данных.

Реконструктивная (неразрушающая) акустическая томография – относительно новый раздел акустики, начавший интенсивно развиваться с середины 70-х гг. прошлого столетия, когда стала очевидной возможность реализации алгоритмов реконструкции изображений неоднородностей на имеющейся компьютерной технике [3]. Идея неразрушающего томографирования вообще и в исследовании неоднородностей в водной среде, в частности, представлена на рис. 1.

Представлен теневой способ регистрации изображения. Если освещать группу предметов сверху, можно наблюдать их раздельное отображение. Если предметы освещать сбоку, то получается наложение двух изображений друг на друга, т.е. искажение образа (позиция 1, а). Чтобы избежать такого искажения необходимо найти иной способ регистрации, когда результат будет таким или близким к такому, который показан на позиции 1, б. Это можно достигнуть, применяя компьютерный метод обработки информации [4].

В основе такого томографирования лежит идея, состоящая в том, что структуру неоднородности следует представить рядом параллельных поперечных сечений в интересующей нас плоскости. Тогда главная задача томографии с использованием компьютера (компьютерная томография) состоит в получении двухмерного изображения поперечного сечения исследуемой неоднородности [5, 6]. Принцип получения проекций показан на рис. 2.

Звуковое излучение проникает сквозь неоднородность исследуемой области размером  $2a$ . Область просвечивается параллельным пучком когерентного звукового излучения. Направление лучей составляет некоторый угол  $\varphi$  с осью  $x$ . Лучи ослабляются неоднородностями внутри объекта пропорционально их плотности. С противоположной стороны области предполагаются устройства, регистрирующие интенсивность каждого луча, прошедшего через область. При этом предполагается, что лучи распространяются в области вдоль прямой линии  $l$ . Регистрируемое излучение  $R(s, \varphi)$  называется *радоновским образом*, или *радоновской проекцией*, а процесс преобразования с математическим описанием – *преобразованием Радона* [6].

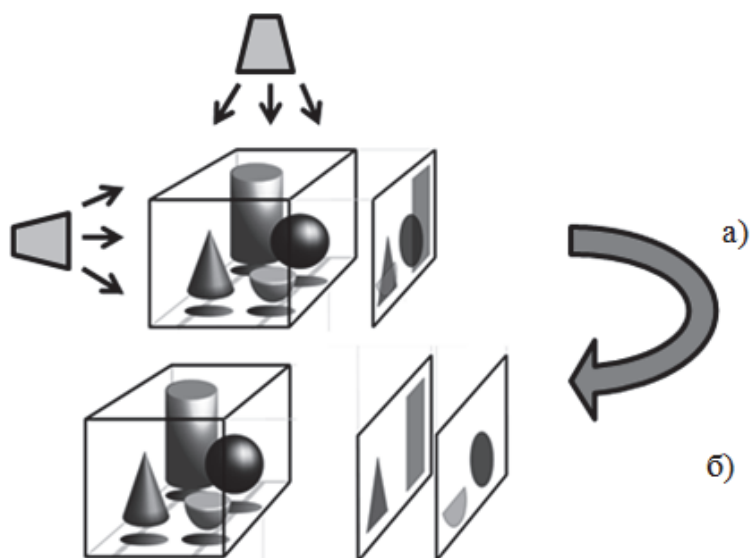


Рис. 1. Идея неразрушающего томографирования  
Fig 1. The idea of non-destructive tomography

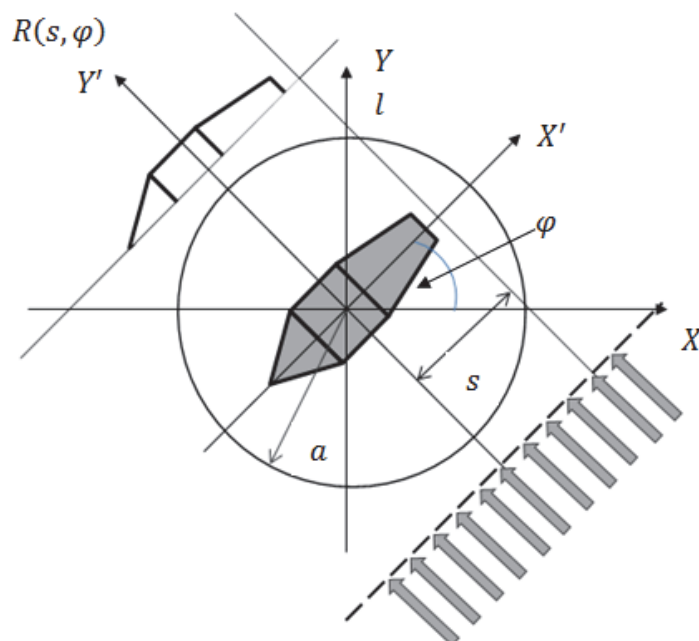


Рис. 2. Схема получения теневых проекций  
Fig. 2. Scheme for obtaining shadow projections

При использовании звуковых колебаний сразу возникла первая серьезная проблема, связанная с сопоставимостью размеров подлежащих реконструкции неоднородностей и длины волны звука (в рентгеновском излучении неоднородности существенно превышают длину волны излучения – там подобной проблемы нет). В результате потребовалось усовершенствовать известные алгоритмы томографии, чтобы они стали пригодными для акустики; так возникла *дифракционная акустическая томография*. В настоящее время реконструктивная акустическая томография позволяет оценить потенциальные возможности получения каче-

ственных акустических изображений; некоторые из алгоритмов реконструктивной томографии начинают внедряться в практику [6].

Рассмотрение методов и алгоритмов реконструктивной томографии сопровождается оценкой их основных характеристик. К основным характеристикам систем акустической томографии будем относить две: функция рассеяния точки и разрешение.

*Функция рассеяния точки (ФРТ)* – изображение точечной (локальной) неоднородности. По степени «размазанности» ФРТ можно судить о качестве реконструкции изображения произвольной неоднородности. Заметим, что точное восстановление неоднородностей невозможно, так как реконструктивная томография относится к некорректно поставленным обратным задачам акустики. Регуляризация подобных задач приводит к «загрублению» решения.

*Разрешение* – наименьшее расстояние между двумя точечными (локальными) неоднородностями, которые воспринимаются отдельно на полученном изображении. Разрешение чаще всего определяют как ширину функции рассеяния точки на уровне 0,707. Отметим, что разрешение (resolution) не следует путать с разрешающей способностью (resolutionability), которая обратно пропорциональна разрешению. Чем меньше разрешение (или чем больше разрешающая способность), тем лучше алгоритм реконструкции. В акустической томографии разрешающую способность обычно не используют в качестве количественной характеристики, ограничиваясь исследованием разрешения [7, 8, 9].

Задача акустической реконструктивной томографии не является линейной и, строго говоря, перечисленных выше характеристик недостаточно для полного сопоставления алгоритмов восстановления изображений. Однако более детальное рассмотрение приводимых методов, алгоритмов и их характеристик выходит за пределы уровня излагаемого материала.

Большинство материалов, приводимых в данной статье, базируется на зарубежной научной периодике, а также на исследованиях, проводимых в рамках исследовательской работы инженерной школы кафедры Ф и ОТД ТОВВМУ им. С.О. Макарова. Список литературы, предложенный в конце работы, дает дополнительный материал для расширения круга знаний.

### Классическая реконструктивная томография

Особенности получения томографических образов с использованием низкочастотного звукового диапазона связаны с внушительными финансовыми затратами на изготовление излучающей и регистрирующей аппаратуры. Этот фактор диктует необходимость придерживаться классического способа реконструктивной томографии, как показано на рис. 3.

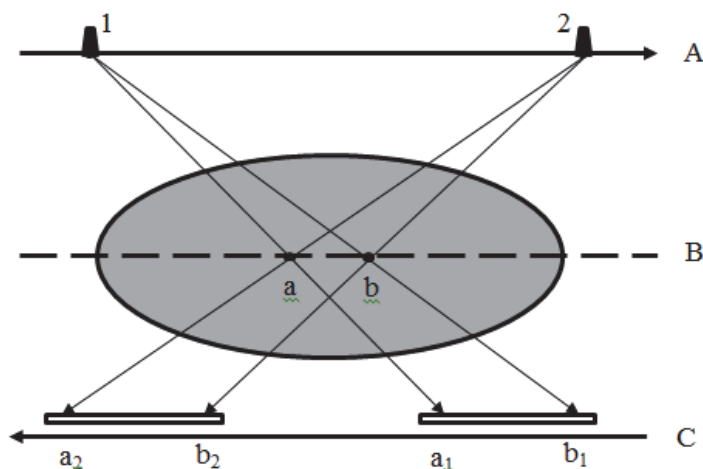


Рис. 3. Схема классического томографирования  
Fig. 3. Classic tomography scheme

Если необходимо получить изображение объекта в плоскости  $B$ , то регистратор должен быть установлен в плоскости  $C(a_1, b_1)$ , а источник звука – в плоскости  $A(l)$ . Источник звука и регистратор перемещаются в противоположных направлениях с одинаковой скоростью. В этом случае точка пересечения осей излучателя в разные моменты времени будет лежать на плоскости  $B$  и находиться в одной точке. Поэтому изображение точек  $a$  и  $b$  на регистраторе будет неподвижно в плоскости  $C$ . В то же время точки, которые лежат вне плоскости  $B$ , будут отображаться в различные места регистратора на плоскости  $C$ . Поэтому на регистраторе изображение плоскости  $B$  четкое, а изображения остальных сечений объекта размазываются за счет движения, создавая искажения томографического изображения [10].

### Преобразование Радона и его применение в акустической томографии

Допустим, что на плоскости  $xOy$ , как показано на рис. 4, задана некоторая функция акустических неоднородностей  $O(x, y)$ . Введем некоторую прямую  $L$ , определяемую двумя параметрами:  $\varphi$  и  $s$ . Первый из них задает угол поворота вспомогательной системы координат  $x'Oy'$  относительно системы координат  $xOy$ , а второй – расстояние от прямой  $L$  до начала систем координат, равное расстоянию до оси ординат системы координат  $x'Oy'$ .

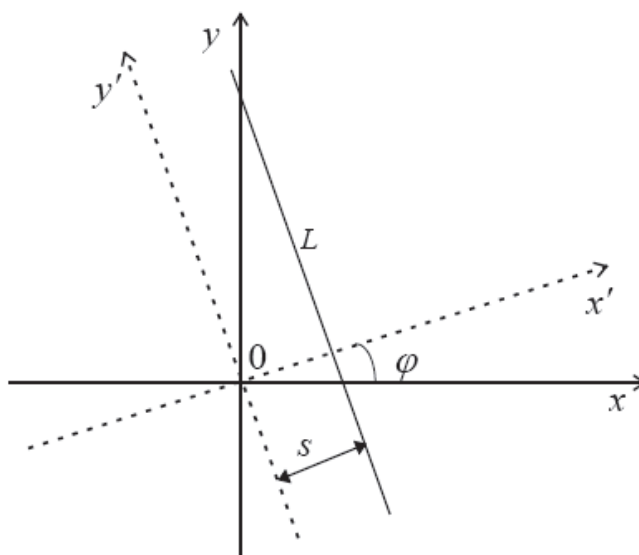


Рис. 4. Образ функции в пространстве Радона  
Fig. 4. The image of a function in Radon space

Определим следующую функцию  $R(s, \varphi)$ :

$$R(s, \varphi) = \int_L O(x, y) dl \quad (1)$$

Выражение (1) называется *преобразованием Радона* и означает интегрирование функции неоднородностей по прямой  $L$ . Функция  $R(s, \varphi)$  называется *образом функции*  $O(x, y)$  в пространстве Радона, или *проекцией*. Преобразование Радона – это интегральное преобразование функции нескольких переменных, родственное преобразованию Фурье. Благодаря этому преобразованию стало возможным восстанавливать изначальную функцию, зная ее преобразование.

*Классическая задача томографии* может быть сформулирована следующим образом: неизвестна функция  $O(x, y)$ , но известна функция  $R(s, \varphi)$ , являющаяся образом  $O(x, y)$  в пространстве Радона; требуется по функции  $R(s, \varphi)$  определить  $O(x, y)$ .

Для решения классической задачи томографии требуется найти преобразование, обратное преобразованию Радона. Впервые эта операция была выполнена Иоганном Радонем в 1917 г. и опубликована в трудах Саксонской академии наук.

Перед рассмотрением алгоритмов восстановления неоднородностей в классической теории томографии подчеркнем, что исходная предпосылка классической томографии заключается в постулировании того факта, что данные измерений можно представить в виде преобразования Радона от восстанавливаемой функции. Таким образом, если существует функция неоднородностей, для которой удастся измерить ее преобразование Радона, то такую задачу томографии можно рассматривать как классическую. В рентгеновской томографии, как правило, и измеряется преобразование Радона, описывающее в этом случае затухание сигнала на пути распространения от источника излучения до чувствительного элемента. Акустическая томография, первоначально формулировавшаяся как обобщение классической томографии на случай акустических измерений, исходила из той же математической модели измерений.

Зададим вопрос: как для акустических сред может использоваться преобразование Радона? Для ответа на этот вопрос попытаемся подобрать модели взаимодействия неоднородностей с акустическими волнами, которые с определенной степенью точности можно описать, применяя преобразование Радона.

1. Пусть функция неоднородностей  $O(x, y)$  представляет собой поглощение звука на единице длины. Рассмотрим прохождение плоской волны через область таких неоднородностей в лучевом приближении, как показано на рис. 5.



Рис. 5. Прохождение плоских волн через область неоднородностей  
Fig. 5. Passage of plane waves through the region of inhomogeneities

Допустим, что амплитуда акустического давления в плоской волне имеет значение  $p_0$ , а амплитуда акустической волны в точке расположения приемника давления –  $p_H$ . Очевидно, что при отсутствии поглощения  $p_H = p_0$ ; при постоянном поглощении  $p_H = p_0 \cdot e^{-\gamma L}$ , при поглощении, зависящем от координат,  $p_H = p_0 \cdot e^{-\int_L \gamma(l) dl}$ , где  $\gamma(l)$  – функция, описывающая поглощение по лучу  $L$ . Если принять пространственное распределение поглощения  $\gamma$  в качестве функции неоднородностей  $O(x, y)$ , последнее выражение можно представить в виде  $\int_L O(x, y) dl = \ln \frac{p_0}{p_H}$  и, сравнив его с (1), записать выражение для радоновского образа функции неоднородностей:

$$R(s, \phi) = \ln \frac{p_0}{p_H(s, \phi)}.$$

Таким образом, если измерять функцию  $R(s, \phi)$ , описываемую выражением (2), то задача восстановления неоднородностей поглощения сводится к классической реконструктивной томографии [10].

2. В качестве второго примера рассмотрим неоднородности скорости звука, при наличии которых функцию неоднородностей будем записывать в виде

$$O(x, y) = \frac{c(x, y) - c_0}{c(x, y)},$$

где  $c_0$  – скорость звука в отсутствии неоднородностей.

По-прежнему будем рассматривать излучение плоской волны, а локальный приемник располагать на расстоянии  $D$  от источника. Тогда

$$\int_L O(x, y) dl = c_0 \left( \int_L \frac{dl}{c_0} - \int_L \frac{dl}{c(x, y)} \right), \quad (2)$$

причем первый интеграл в скобках характеризует время распространения звука от источника до точки измерения при отсутствии неоднородностей, а второй – при их наличии. Следовательно, для рассматриваемых неоднородностей получим

$$R(s, \phi) = c_0 \Delta t(s, \phi), \quad (3)$$

где  $\Delta t(s, \phi)$  – изменение времени распространения звука, обусловленное неоднородностями [10].

Если излучаемая волна имеет постоянную частоту, а значения  $c_0$  и  $D$  считаются известными, то радоновский образ  $R(s, \phi)$ , заданный формулой (3), определяет фазовый сдвиг между измеренным и опорным сигналами. Таким образом, и в этом случае восстановление неоднородностей удалось свести к классической реконструктивной томографии.

Теперь необходимо ответить на вопрос: какую из описанных выше двух моделей предпочтительно использовать? Исторически вначале была предложена модель неоднородностей поглощения, являющаяся полным аналогом модели рентгеновской томографии, а затем, с целью улучшения качества реконструированного изображения, разработана вторая модель, связанная с неоднородностями скорости звука.

Сравнение моделей видно из таблицы [6]. Очевидно, что фазовые измерения (для второй модели) являются более точными, чем амплитудные (первая модель), однако не всегда удастся грамотно осуществить переход от измерения фазы к измерению времени распространения (особенно при невысоком отношении «сигнал–шум»), так как при увеличении времени распространения фаза в определенные моменты будет скачком изменяться на  $2\pi$ .

### Сравнение моделей взаимодействия неоднородностей с акустическими волнами Comparison of models of interaction of inhomogeneities with acoustic waves

| Модель неоднородностей        | Вид измерений | Основные приближения                                                        | Основные недостатки                                                               |
|-------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Неоднородности поглощения     | Амплитудные   | Пренебрежение эффектами рефракции и дифракции (коротковолновая асимптотика) | Низкая чувствительность измерений к неоднородностям                               |
| Неоднородности скорости звука | Фазовые       |                                                                             | Возможная неоднозначность при фазовых измерениях; значительная погрешность модели |

Более информативные измерения во второй модели одновременно приводят и к более сильному влиянию на восстановленное изображение сделанных приближений. Так, пренебрежение дифракцией теоретически не позволяет качественно восстанавливать изображения неоднородностей с размерами, сопоставимыми с длиной волны, а наличие рефракции приводит к существенному «размазыванию» результатов реконструкции.



Несмотря на то, что модели неоднородностей, сводящие задачу реконструкции изображений к классической задаче томографии, имеют значительные недостатки, исследование классических алгоритмов томографии позволяет проиллюстрировать многие ее важные принципы, которые в более сложном виде реализуются в дифракционной акустической томографии.

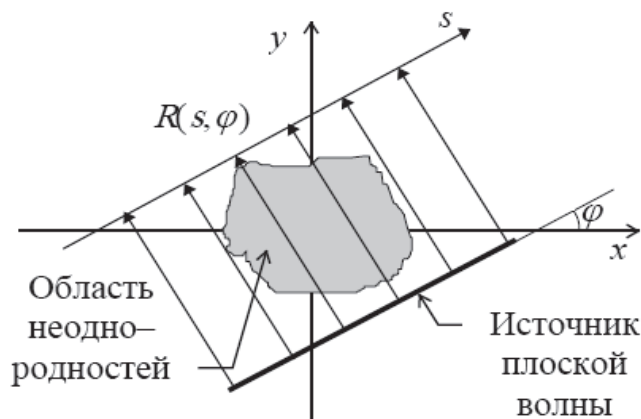


Рис. 6. Классическая схема томографии  
Fig. 6. Classical tomography scheme

При использовании классической схемы измерений, как показано на рис. 6, область неоднородностей облучается источником плоской волны, ориентированным под углом  $\varphi$  к оси абсцисс, и с противоположной стороны области неоднородностей на оси  $s$  измеряются характеристики прошедшего поля, обеспечивающие формирование радоновского образа функции неоднородностей [8].

Измерения повторяются во всем диапазоне углов  $\varphi$ . Очевидно, что из-за выбранной лучевой безрефракционной модели взаимодействия поля с неоднородностями в классической томографии справедливо соотношение

$$R(-s, \pi + \varphi) = R(s, \varphi),$$

следовательно, диапазон измерений функции  $R(s, \varphi)$  может быть представлен пределами:  $-\infty < s < +\infty, 0 \leq \varphi < \pi$ .

При вычислениях преобразования Радона от модельных неоднородностей, когда функция неоднородностей  $O(x, y)$  задается в декартовой системе координат, выражение (1) удобнее записывать в виде

$$R(s, \varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} O(s \cdot \cos(\varphi) - y' \cdot \sin(\varphi), s \cdot \sin(\varphi) + y' \cos(\varphi)) dy', \quad (4)$$

заменив интегрирование по прямой интегрированием по координате  $y'$  (см. рис. 4) и используя известные формулы координатных преобразований при повороте системы координат.

При проведении математического моделирования были выбраны гауссовские импульсы, описываемые соотношением

$$O(x, y) = \sum_{i=1}^2 \exp\left\{-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2b^2}\right\}. \quad (5)$$

Функция (5) промоделирована на графической модели и имеет вид, указанный на рис. 7 [10].

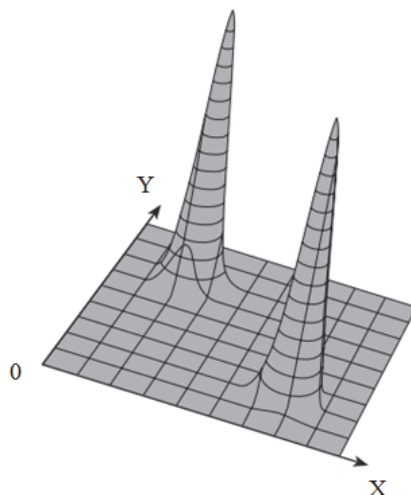


Рис. 7. Графическое изображение функции двух гауссовских импульсов  
Fig. 7. Graphic representation of the function of two Gaussian pulses

Радоновский образ выражения (5) имеет вид

$$R(s, \varphi) = \sum_{i=1}^2 b\sqrt{2\pi} \cdot \exp\left\{\frac{(x_i \cos(\varphi) + y_i \sin(\varphi) - s)^2}{2b^2}\right\}. \quad (6)$$

Графическое изображение радоновского образа изображено на рис. 8.

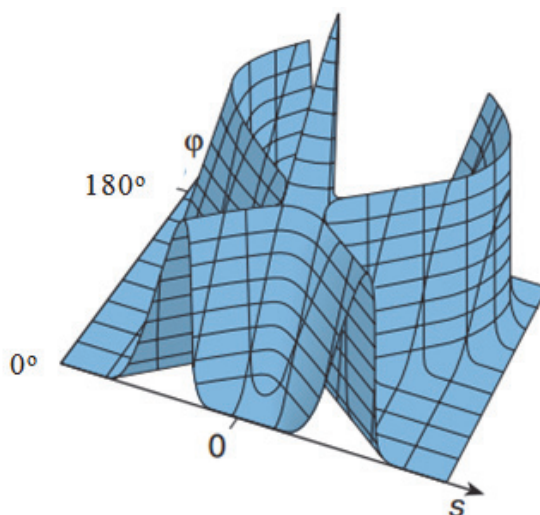


Рис. 8. Графическое изображение радоновского образа  
Fig. 8. Graphic image of the radon image

### Заключение

Анализ математических и графических моделей показывает, что функция и образ совсем не похожи друг на друга. Однако между радоновским образом и функцией, порождающей его, имеется взаимно однозначное соответствие, которое и лежит в основе всех алгоритмов реконструкции томографических изображений.

Для завершения операции формирования окончательного образа необходимы:

- операция обратного проецирования;
- модификация проецирования радоновского образа;
- восстановление изображения сверточным алгоритмом.

Последние направления томографирования морской среды являются в настоящее время предметом научно-исследовательской деятельности инженерной школы ТОВВМУ имени С.О. Макарова.

### Список литературы

1. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990. 279 с.
2. Троицкий И.Н. Статистическая теория томографии. М.: Радио и связь, 1989. 239 с.
3. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Изд-во МГУ, 1989.
4. Morse P.M., Ingard K.U. Theoretical acoustics. New York: McGraw-Hill, 1968.
5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
6. Осетров А.В. Акустическая томография (обзор) // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 5. С. 3–29.
7. Devaney A. J. Acoustic tomography // Inverse problems of acoustic and elastic waves. Philadelphia, 1984. P. 250–273.
8. Lan, C.Q. Limited angle diffraction tomography and its application to planar scanning systems / Lan C.Q., Xu K.K., Wage G. // IEEE Trans. On Sonics and Ultras. 1985. Vol. 32, № 1. P. 9–16.
9. Pan, S.X. A computational study of reconstruction algorithms for diffraction tomography: interpolation versus filtered backpropagation / Pan S.X., Kak A.C. // IEEE Trans. on Acoustic, Speech and Signal Proc. 1983. Vol. 31, № 5. P. 1262–1275.
10. Осетров А.В. Теория пространственно-временной дифракционной томографии при сканировании одиночного приемопередатчика по плоскости // Акуст. журн. 1991. Т. 37, № 3. С. 528–534.
11. Халаев, Н.Л. Некоторые концептуальные положения процесса мониторинга океанской среды: монография / Халаев Н.Л., Стародубцев П.А., Димидов В.Е. Владивосток: Изд. дом ДВФУ, 2012. 224 с.

© Халаев Н.А., Стародубцев П.А., Эм А.А., Стародубцев Е.П., Бакланов Е.Н., Москаленко Э.В., 2020

Для цитирования: Научные труды Дальрыбвтуза. 2020. Т. 53, № 3. С. 30–40.

Статья поступила в редакцию 17.06.2020; принята к публикации 28.09.2020.