



Сущенко Андрей Андреевич

В 2013 г. Андрей Андреевич Сущенко с отличием окончил Дальневосточный федеральный университет по специальности «Прикладная математика и информатика». С 2013 г. работает в Институте прикладной математики ДВО РАН и на кафедре информатики, математического и компьютерного моделирования Школы естественных наук ДВФУ. В настоящее время руководит образовательной программой «Прикладная математика и информатика – Системное программирование» ДВФУ.

Работы А.А. Сущенко посвящены исследованию задачи реконструкции морского дна и неоднородностей в толще океана.

За годы работы был руководителем грантов Министерства образования и науки РФ «Применение математического моделирования в задачах сложного теплообмена» № 11.92.2014 и «Математические аспекты радиационно-кондуктивного переноса тепла» № 1.12730.2018/12.2; стипендий Немецкой службы академических обменов DAAD 2014, 2018; стипендий Президента РФ для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики «Разработка облачного сервиса для обработки гидроакустических изображений» (2016–2018) и «Облачный сервис дистанционного зондирования Земли и океана» (2019–2021); гранта РФФИ «Исследование задач акустической томографии океана методами теории переноса излучения» № 18-31-00050.

Работает над кандидатской диссертацией «Моделирование процесса дистанционного зондирования океана» под руководством д.ф.-м.н. И.В. Прохорова.

Опубликовано 26 работ в изданиях, включенных в БЦ Scopus и WoS, 4 работы – в изданиях, включенных в список ВАК, более 35 работ – в материалах всероссийских и международных конференций.

УДК 519.63+519.688+534.23

DOI: 10.37102/0869-7698_2021_216_02_11

А.А. СУЩЕНКО

Об актуальности исследования задач акустической томографии методами теории переноса излучения

Проблемы освоения Мирового океана – поиск полезных ископаемых, мониторинг и охрана подводных сооружений, картографирование морского дна – приобретают глобальный характер. Все они в той или иной степени являются задачами акустической томографии, главная цель которых состоит в определении количественных характеристик неоднородности структуры на основании измерений обратно рассеянного поля. Как правило, характеристики среды и источника считаются известными. Можно выделить несколько областей применения методов решения обратных задач рассеяния: медицина, дефектоскопия, акустика океана, сейсмология.

СУЩЕНКО Андрей Андреевич – младший научный сотрудник (Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток), старший преподаватель (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток).
E-mail: sushchenko.aa@dvfu.ru

Работы, посвященные исследованию этих прикладных задач, многочисленны, для их решения авторы в основном используют приближение однократного рассеяния. Учет многократного рассеяния неизбежно делает задачу нелинейной и некорректной. Во-первых, возникает неединственность решения при реконструкции неоднородностей, во-вторых – неустойчивость решения к измеряемым данным.

В статье дан обзор литературы, демонстрирующий современное положение в области моделирования процессов дистанционного зондирования океана как обратных задач для уравнения переноса излучения. Описана актуальность анализа объемного рассеяния в океане, который необходим при решении задач акустической томографии (восстановление коэффициента донного рассеяния, батиметрия, реконструкция неоднородностей в толще океана), а также существующие исследовательские пробелы в решении данных прикладных задач.

Ключевые слова: акустическая томография, уравнение переноса излучения, объемное рассеяние, гидролокация, батиметрия.

On the relevance of studying the problems of acoustic tomography by methods of radiation transfer theory.

A.A. SUSHCHENKO (Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok, Far Eastern Federal University, Vladivostok).

The issues in the studying of the world's ocean such as mineral exploration, monitoring and safety of underwater constructions, sea-bottom mapping assume as global character. All of them, to one degree or another, are the problems of acoustic tomography. The main goal of them is determination of quantitative characteristics of structural inhomogeneity based on measurements of the backscattered field. Typically, the properties of the medium and source are assumed to be known. There are several areas of application for solving inverse scattering problems: medicine, flaw detection, ocean acoustics, seismology. There are numerous papers devoted to the study of these applied problems. Authors mainly use the single scattering approximation to solve them. The problem inevitably becomes nonlinear and incorrect when considering the multiple scattering in a medium. Firstly, there is the non-uniqueness in the solution during inhomogeneities reconstruction. Secondly, there is the instability to measured data. The article provides literature review of the relevance directions of modeling of ocean remote sensing processes as inverse problems for the radiation transfer equation. The paper includes the relevance of analysis of the volume scattering in the ocean which is necessary for solving acoustic tomography problems such as the reconstruction of the sea-bottom scattering coefficient, bathymetry, reconstruction of inhomogeneities in the ocean water. In the conclusion, the existing research gaps in solving these applied problems are described.

Key words: acoustic tomography, radiative transfer equation, volume scattering, sonar remote sensing, bathymetry.

Введение

Сегодня проблемы освоения Мирового океана приобретают глобальный характер. Многие из них связаны с задачами акустической томографии, которые заключаются в определении внутренних характеристик среды на основании измерений рассеянного поля. Распространение акустических волн в океане зависит от нескольких параметров водной среды: температуры, плотности, солености, океанических течений. Флуктуации этих характеристик приводят к рассеянию и затуханию, а иногда и к полной потере распространяемого сигнала. В современной литературе учет объемного рассеяния в океане представлен в качестве эмпирических моделей. Согласно натурным экспериментам, описанным в работе И.Б. Андреевой, объемное рассеяние в океане может достигать 10 % от общего ослабления сигнала [7].

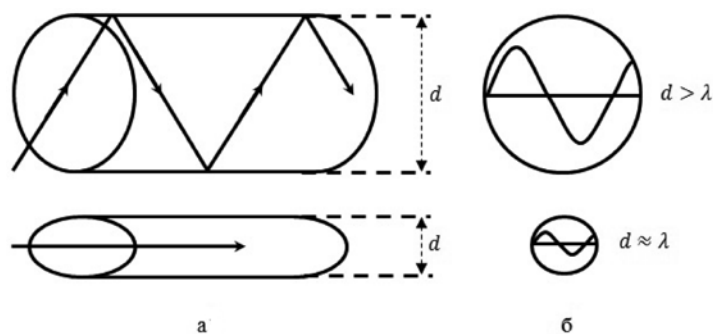
Помимо объемного рассеяния существуют и другие причины ухудшения качества гидроакустических изображений. Например, шум в акустическом сигнале, вызванный неустойчивостью при перемещении приемно-передающей антенны. Алгоритмы компенсации траекторных нестабильностей рассмотрены в работах В.Б. Костоусова [4], В.В. Витязева [9], Х.Дж. Кэллоу [41]. Кроме того, потеря полезной части сигнала может происходить вследствие нестационарности, рефракции и иных физических эффектов. Подобные потери могут быть компенсированы с использованием теории восстановления сигнала в пропущенных отчетах, описанной в работах В.А. Котельникова [25], Я.И. Хургина [37], Л.А. Айзенберга [5].

Остановимся подробнее на задачах акустической томографии. Первая из них, заключающаяся в восстановлении коэффициента донного рассеяния на основе сигнала, принятого гидролокатором бокового обзора, на практике тесно связана с синтезированием апертуры

антенны гидролокатора бокового обзора (ГБО). Данный процесс подробно исследован в работах [1, 2, 50] и др. Также актуальна задача батиметрии (построение рельефа морского дна), в которой, в отличие от предыдущей задачи, где дно предполагается плоским, определяется функция, описывающая изменения глубины донной поверхности. Анализ данных о глубинах океана посвящены работы [19, 20, 23, 43].

В качестве основного фактора, влияющего на продуктивность восстановления гидроакустических изображений, рассмотрим объемное рассеяние в океане. Среди исследований этой области можно выделить работы, основанные на практических испытаниях [6, 18, 46, 48]. Авторы предоставляют информацию о виде индикатрисы рассеяния в зависимости от среды распространения, частоты сигнала, размеров рассеивателей. В указанных работах также проведен анализ приближения однократного рассеяния в плотных скоплениях объемных неоднородностей. Установлена взаимосвязь между скоростью ветра и количеством рассеивателей в океане.

Для представления объемного рассеяния в океанической среде рассматриваются два подхода: волновой и лучевой (см. рисунок), описывающие распространение сигнала в случайно-неоднородной среде. В первом объемное рассеяние входит в модель как случайная величина, реконструкция и учет которой требуют значительных ограничений на класс функций, описывающих решение. Второй подход основан на кинетической модели распространения излучения, в которой объемное рассеяние представляет собой вероятность изменения траектории распространения луча. При этом предполагается, что рассеиватели распределены в среде равномерно. Последний подход хорошо описан в работах А. Исимау (напр., [21]).



Лучевая (а) и волновая (б) схемы распространения излучения λ – длина волны, d – диаметр канала)

В основе кинетической модели лежит уравнение переноса излучения. Исследование начально-краевых задач, а также первые попытки обоснования численных методов решения уравнения переноса излучения описаны В.С. Владимировым [16] и Т.А. Гермогеновой [17]. Данные работы стали фундаментом для обоснования новых подходов в численном решении уравнения и, как правило, рассматривались многими авторами через призму конкретных прикладных задач. Так, в работах Л.П. Басса дано обоснование сеточных алгоритмов решения и их применение в зондировании биологических тканей (напр., [13]). Д.С. Аниконовым задачи томографии рассматриваются как неклассические задачи для уравнения переноса излучения [10]. Авторами вводятся понятия «мера видимости», «индикатор неоднородности», указаны прототипы плохо видимых сред. Подобные подходы формируют новые способы решения задач томографии, позволяющие качественно и количественно исследовать структуру просвечиваемой среды. В монографии Т.А. Сушкевич [36] представлены авторские результаты по методам численного решения уравнения переноса излучения в рассеивающих, излучающих, поляризующих и деполаризующих, преломляющих природных и искусственных средах. К наиболее современным результатам в

численном моделировании процесса распространения излучения можно отнести работы В.П. Будака [15], С.М. Пригарина [28] и И.В. Прохорова [35].

По существу, кинетическая модель адекватно описывает процесс распространения излучения различной природы в случайно-неоднородных средах. Однако эффекты отражения и преломления, возникающие на границах раздела сред, либо не поддаются описанию в рамках уравнения, либо описывают эти явления приближенно. Существуют границы, на которых эффектами отражения и преломления можно пренебречь. В этом случае задаются условия сопряжения типа непрерывной склейки решения. Решения краевых задач такого типа исследованы во второй половине прошлого века в работах К. Черчиньяни [38], Г.И. Марчука [26], В.М. Новикова [27]. Тем не менее, некоторые результаты исследований, посвященных изучению краевых задач для уравнений переноса излучения со специальным интегралом столкновений, описывающим комптоновское рассеяние, опубликованы сравнительно недавно [10, 11, 39].

Чтобы учесть эффекты на поверхности раздела сред, в теории переноса вводят различные условия сопряжения для решений уравнения. Начально-краевые задачи для уравнения переноса излучения с диффузными и френелевскими условиями сопряжения подробно изучены в работах И.В. Прохорова [30, 32, 33] и А.А. Амосова [40]. Условия сопряжения френелевского типа подходят для описания взаимодействия с гладкими поверхностями. Для шероховатых поверхностей имеет место диффузное отражение и преломление на границе раздела сред. Диффузное отражение по закону Ламберта хорошо описывает взаимодействие акустического сигнала с морским дном при высокочастотном зондировании.

Что касается водной среды, то сегодня отсутствует фундаментальная теория объемного рассеяния в океане, которая требует анализа решения прямых и обратных задач для уравнения переноса акустического излучения. Существуют вопросы корректности решения задач с диффузными и френелевскими условиями сопряжения в многокомпонентной среде. Остается открытой тема влияния объемного рассеяния на качество восстановления гидроакустических изображений. С практической точки зрения, существует запрос на создание методов улучшения обработки акустического сигнала. Таким образом, возникает задача построения упрощенных моделей, позволяющих, с одной стороны, решить задачи акустической томографии, с другой – построить модели, остающиеся физически адекватными.

Объемное рассеяние в океане

Океан – хаотичная среда, имеющая как детерминированные, так и случайные характеристики. Распространение акустических лучей в океане зависит от температуры, солености и плотности [44], которые, в свою очередь, изменяются от течений, поверхностного слоя, вихрей, внутренних волн и других океанических особенностей, в то время как давление в первую очередь контролируется изменениями глубины. Все эти характеристики изменяются во времени и в пространстве и определяют поле скорости звука. С помощью модели общей циркуляции можно рассчитать поля температуры и солености с учетом приливных воздействий. Эта модель решает полностью нелинейные, негидростатические уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска для несжимаемой жидкости с пространственной дискретизацией конечного объема на ортогональной вычислительной сетке. Пример реализации подобных вычислительных схем представлен в работе [46]. Автор приводит расчеты звукового поля для источника гармоник, работающего на частотах 100, 400, 800 и 1500 Гц на глубине 350 м. Как следует из работы [46], скорость звука сильно изменяется с глубиной зондирования, однако при дистанционном зондировании морского дна на малых изменениях глубины скорость звука можно считать константой. Этот факт позволяет использовать модели с постоянной скоростью звука, что в значительной мере упрощает решение задач.

В современной литературе учет объемного рассеяния в океане представлен только в виде эмпирических и полуэмпирических моделей. Однако согласно результатам исследования [7], объемное рассеяние может достигать 10 % от общего поглощения сигнала, что позволяет выделить детерминированный шум в распространяющемся излучении и, следовательно, увеличить дальность зондирования и контрастность гидроакустического изображения.

Существует несколько классов обратных задач рассеяния в океане, каждая из которых определяется следующими параметрами: размер рассеивателей, длина волны распространяемого сигнала, размер области зондирования. Рассмотрим случай, когда размер рассеивателей много меньше длины волны, а сама длина волны много меньше масштабов области. Такие ограничения позволяют использовать кинетическую модель, исследование которой весьма популярно в оптике. Примером использования подобных допущений может выступать гидролокация океана высокочастотным сонаром, с помощью которого решается ряд прикладных задач: картографирование морского дна, поиск полезных ископаемых, мониторинг подводных сооружений и подводных трасс.

По существу, предметом интереса являются алгоритмы решения задач дистанционного зондирования неоднородностей. По ряду причин качество гидроакустических изображений ухудшается. Исследователю необходимо сначала определить природу возникновения детерминированного шума, а затем использовать эту информацию при восстановлении. Весьма очевидным считается шум, вызванный траекторными нестабильностями при движении аппарата [3, 9, 41]. Эти исследования направлены на повышение разрешающей способности в условиях траекторных нестабильностей носителя антенны, что требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому в данном направлении актуальной остается проблема устойчивой работы алгоритмов построения изображений путем саморегулирования и адаптации к изменению параметров траекторного сигнала и минимизации вычислительных затрат на их реализацию.

Другой классической проблемой ухудшения сигнала считается его изменение вследствие нестационарности, рефракционных и иных физических эффектов, что проявляется в виде многолучевости, интерференции и может приводить не только к искажениям передаваемой информации, но иногда и к ее полной потере. Теория восстановления сигнала в пропущенных отчетах берет свое начало с работ В.А. Котельникова [25] и весьма успешно продолжена Я.И. Хургиным [37], Л.А. Айзенбергом [5] и многими другими авторами. Ввиду того что почти любое техническое устройство работает на уровне цифровых сигналов, будь то телескоп, медицинский ЭКГ-аппарат, видеокамера, спектрометр или какой-либо датчик, развитие теоремы отсчетов с 1936 г. по сегодняшний день накопило большой багаж успехов.

Далее рассмотрим работы [7, 18, 48], в которых в качестве детерминированного шума исследуется объемное рассеяние в океане. В них содержательно изложена информация о виде индикатрисы рассеяния в зависимости от среды распространения и частоты сигнала, от размеров рассеивателей. Проведен анализ приближения однократного рассеяния в плотных скоплениях объемных неоднородностей. Установлена взаимосвязь между скоростью ветра и количеством рассеивателей в океане. Ввиду наличия в работах большого количества натуральных экспериментов, разрабатываемые ими модели носят эмпирический характер. Таким образом, сегодня отсутствует фундаментальная теория объемного рассеяния в океане, что порождает необходимость решения актуальных задач по построению новых методов обработки рассеянного сигнала с целью выделения из него информации о структуре исследуемой среды.

Как следует из работ В.П. Глотова (напр., [18]), источники объемного рассеяния в океане представлены в виде звукорассеивающих слоев двух типов: глубоководные слои, представляющие скопления биологических объектов (пузырные рыбы и макропланктон), а также поверхностные слои, содержащие воздушные пузырьки (разрушение ветровых волн) и биологические объекты, мигрирующие из глубоких слоев океана к

поверхности. В качестве модели рассеивающей среды автором принят стохастический комплекс из крупномасштабной абсолютно мягкой поверхности и подстилающего слоя воздушных пузырьков. В слое хаотически, но в среднем равномерно расположены резонансные пузырьки, радиус которых много меньше длины волны. Частоты выбираются низкими, следовательно, рассеяние на неровностях рассматривается в приближении касательной плоскости. В работе [18] получены зависимости объемного рассеяния от частоты излучения, угла скольжения и статистических параметров взволнованной поверхности и слоя пузырьков.

В толще моря существуют как отдельные дискретные рассеиватели, так и простирающиеся горизонтально биологические скопления, залегающие обычно на глубинах до 1000 м. «Призрачное дно» образовано именно этой полупрозрачной для звука биологической пленкой, которая при заходе солнца поднимается до глубины 100–150 м, а на рассвете опускается на 300–600 м [14].

В работах Ю.П. Лысанова (напр., [24]) исследуется борновское приближение для описания рассеяния звука случайными неоднородностями, границы которых считаются фрактальными. Выбранная автором модель основана на статистическом подходе к определению флуктуаций. В работе получена формула для определения коэффициента объемного рассеяния в зависимости от частоты и угловых характеристик излучения, а также дана оценка фрактальной размерности неоднородностей.

Таким образом, в приведенных выше работах отсутствует анализ целого класса прикладных задач, в которых акустическое излучение распространяется на частотах порядка десятков килогерц, размер рассеивателей считается много меньше длины волны, а длина волны много меньше масштабов зондирования. Эти факты позволяют нивелировать зависимость сигнала от фазы и работать только с амплитудой, используя кинетическую модель распространения излучения. Схожая модель исследована в работах И.Б. Андреевой и Л.Л. Тарасова (напр., [6]). Авторами исследовано уравнение переноса излучения, записанное для лучевой интенсивности рассеянной компоненты поля. Среда предполагается заполненной случайно распределенными рассеивателями, занимающими в пространстве некоторый конечный объем. С использованием модифицированного борновского приближения в работе [8] получена явная формула для измерения принимаемой мощности в зависимости от диаграмм направленности приемной и передающих антенн, расстояний до объекта от приемника и источника и объема рассеивающей области. Полученные результаты апробированы на реальных измерениях.

Задачи акустической томографии

Рассмотрим подробнее основные задачи акустической томографии. Начнем с задачи восстановления коэффициента донного рассеяния на основе сигнала, принятого гидролокатором бокового обзора (ГБО). Исследования в этой области ведутся начиная с середины XX в. Вопросы увеличения дальности зондирования, улучшения качества получаемого изображения до сих пор остаются актуальными. Весьма перспективным направлением является синтезирование апертуры антенны ГБО, установленного на борту необитаемого подводного аппарата. Ввиду широкой диаграммы направленности приемной антенны восстанавливаемое изображение морского дна растягивается вдоль траектории движения, а в случае конечного импульса испускания сигнала – и по оси дальности зондирования. Существуют отдельные работы по фокусировке изображений, однако все они посвящены обработке уже готового 8-битного изображения, что в свою очередь значительно сокращает информацию при восстановлении, так как исходный сигнал гидролокатора имеет как минимум 32-битное разрешение. Эффект объемного рассеяния только усиливает ошибку при реконструкции изображения. Следовательно, остается актуальным вопрос фокусировки объектов на гидроакустических изображениях.

Далее рассмотрим актуальность задачи батиметрии, которая направлена на исследование морфологии морского дна, мониторинг экологического состояния водных ресурсов и построение трехмерной модели-карты высот. Наиболее известен метод решения этой задачи, основанный на гидролокации дна многолучевым сонаром. Получение, демонстрация и интерпретация новых, более детальных статистических данных по батиметрии Мирового океана и его различных частей (т.е. батиметрический анализ) проведены Б.А. Казанским [22], В.В. Завьяловым [20], Э. Факирисом [42] и др. Авторами разработаны модели батиметрической системы навигации, получены батиметрические функции дна некоторых морей. Остается открытым вопрос восстановления рельефа в затененных участках и при скользящих углах обзора. Кроме того, в последнее время весьма актуальным становится измерение батиметрии с использованием спутников. Таким образом, задача батиметрии решается как задача дистанционного зондирования Земли с применением не звуковых, а оптических методов исследования. Одним из популяризаторов данного подхода является Г.П. Аншаков [12]. Он рассматривает этот метод исследования бассейнов рек и озер как безальтернативный ввиду дороговизны использования гидролокаторов. Очевидно, что методы теории переноса как никогда уместны для решения этой задачи.

Еще одной актуальной задачей акустической томографии является реконструкция неоднородностей в толще океана. Наряду с вышеперечисленными это классическая задача томографии, которая неразрывно связана с решением прямой задачи, заключающейся в определении интенсивности излучения в каждой точке области, в каждый момент времени, в каждом направлении. Существует множество методов решения уравнения переноса излучения, часть из которых описана в работах [15, 28, 35]. Основная цель всех исследователей – минимизировать ошибку в зависимости от времени расчета.

Хорошо известно, что модель, основанная на интегро-дифференциальном уравнении переноса, адекватно описывает процесс распространения излучения различной природы в случайно-неоднородных средах [21, 38]. Однако эффекты отражения и преломления, возникающие на границах раздела сред, либо не поддаются описанию в рамках уравнения, либо описывают некоторые аналоги этих явлений. Например, взаимодействие волнового поля со слаборефрагирующей средой зачастую описывают с помощью введения римановой метрики [19]. В этом случае излучение распространяется вдоль кривых, незначительно меняющихся в масштабах, сравнимых с длиной волны.

Излучение, проходящее через границу, не может быть описано самим уравнением переноса, поэтому на поверхности раздела сред вводят различные условия сопряжения: френелевские моделируют зеркальное отражение и преломление по закону Снеллиуса потока излучения на поверхности раздела двух сред; диффузные подходят для описания шероховатой поверхности [21]. Последние условия сопряжения можно наблюдать при высокочастотном акустическом зондировании дна океана [31] или при отражении световых лучей на матовой поверхности твердого тела [21, 38].

Краевые задачи с обобщенными условиями сопряжения значительно сложнее задач с условиями сопряжения типа непрерывной склейки решения, и в последнее время это направление исследований интенсивно развивается. В работах [33, 34, 40] рассмотрены задачи для стационарного и нестационарного уравнений переноса с обобщенными условиями сопряжения в разных постановках и при различных ограничениях на строение области и оператор сопряжения.

В работе [33] нами показана корректность задачи Коши для уравнения переноса в R^3 с френелевскими условиями сопряжения, в работе [32] – разрешимость аналогичной начально-краевой задачи, но с диффузными условиями сопряжения. Доказательство существования и единственности решения основано на сведении исходной начально-краевой задачи к абстрактной задаче Коши для эволюционного уравнения и применении теоремы Хилле–Иосиды. Из этой же теоремы выводятся условия стабилизации нестационарного решения.

Таким образом, различные условия сопряжения, с одной стороны, позволяют моделировать более сложную структуру среды распространения излучения, с другой – ставят перед исследователями новые проблемы создания эффективных численных методов решения уравнения переноса.

Вернемся к обратной задаче. Практическим примером проблемы реконструкции неоднородностей является определение глубоководных рассеивающих слоев (ГРС). Пелагические животные, которые образуют ГРС, представляют собой важную связь в пищевой сети между зоопланктоном и высшими хищниками, в то время как оценка состава, плотности и местоположения ГРС важна для понимания динамики мезопелагической экосистемы и для прогнозирования распределения высших хищников. Состав и плотность ГРС часто оценивают по тралам. Вместо этого местоположение и биомасса ГРС могут быть оценены с помощью активных акустических методов, хотя оценки часто сводятся в единое целое без учета размера или конкретной информации о таксонах. В работе [45] авторы решают задачу определения характеристики фауны в ГРС с использованием гидролокатора DIDSON. Ими определены оценки численной плотности и длины животных на разных глубинах и в разных местах вдоль побережья Кона на о-ве Гавайи. Было подсчитано и измерено 7068 животных. Численная плотность варьирует в диапазоне 1–7 животных на 1 м³. Численные плотности были на несколько порядков выше, чем те, которые оценены по тралам, и средние размеры животных также были намного больше. Авторы провели анализ объемного рассеяния, полученного с помощью стандартных методов обработки эхосигнала.

Другой подход к решению задачи реконструкции неоднородностей описан в работе [47], где изучаются оптические свойства фитопланктона. Необходимые входные данные для запуска каждой оптической модели были получены из измерений; действительная и мнимая части показателя преломления определялись из внутриклеточного углерода и коэффициента поглощения, а также распределения частиц по размерам с помощью счетчика Коултера. В ходе экспериментов установлено, что показатель преломления оболочки является наиболее важным фактором, влияющим на коэффициент обратного рассеяния. Гексаэдральные и однородные сферические модели дают относительно хорошие результаты для коэффициентов поглощения и затухания, но для увеличения точности необходим учет объемного рассеяния. Результаты исследования [47] предполагают, что представление сотовой структуры более важно, чем форма моделируемых частиц, чтобы воспроизвести присущие фитопланктону оптические свойства, особенно для измерения обратного рассеяния.

На практике при решении задач акустической томографии исследователи (зачастую без должного обоснования) широко используют приближенные феноменологические формулы, вычисления по которым могут приводить к серьезному рассогласованию с экспериментальными данными. Таким образом, возникает задача построения упрощенных моделей, позволяющих, с одной стороны, решить задачи акустической томографии, а с другой – построить модели, остающиеся физически адекватными.

Заключение

Как следует из приведенного выше обзора литературы, сегодня существует запрос на разработку новых методов решения задач акустической томографии.

В задаче реконструкции морского дна необходимы новые математические модели для описания процесса дистанционного зондирования морского дна, что, в свою очередь, позволит расширить знания о решениях краевых задач для уравнения переноса излучения. Актуальны и алгоритмы построения гидроакустических изображений на основе принимаемого ГБО-сигнала, которые учитывают параметры приемной и передающих антенн гидролокатора и наличие объемного рассеяния в среде.

В задаче батиметрии остается актуальным исследование ее как задачи дистанционного зондирования Земли методами теории переноса. Объединение оптического и акустического подходов в измерении рельефа морского дна позволит значительно увеличить точность картографирования.

В задаче акустической томографии океана остаются открытыми вопросы о корректной разрешимости начально-краевых задач для нестационарного уравнения переноса в многокомпонентной среде. Исследования данного направления частично проведены в работах для ограниченных сред и двухкомпонентной неограниченной среды [29, 35, 40]. Кроме того, остается актуальной задача восстановления коэффициента объемного рассеяния звука как решения обратной задачи для уравнения переноса излучения. Касательно данной задачи можно отметить работу для случая точечного импульсного источника и существенных ограничений на диаграммы направленности приемной и передающей антенн [49].

В заключение отметим одно обстоятельство, несомненно важное при изучении открытых проблем в акустической томографии. Для практических исследований было бы очень желательно, чтобы теоретические результаты, полученные на основе методов математического и компьютерного моделирования, подкреплялись данными натурных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов И.Б., Золотарёв В.В., Мадисон Е.А. Подготовка гидролокационной информации для ее распознавания на борту АНПА // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2013. Т. 5. С. 501–504.
2. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. Институт проблем морских технологий. М.: Наука, 2005. 398 с.
3. Агеев А.Л. и др. Применение методов микронавигации и автофокусировки для синтезирования апертуры многоканального ГБО // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2013. Т. 3. С. 140–148.
4. Агеев А.Л. и др. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных неустойчивостей // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2013. Т. 5. С. 496–500.
5. Айзенберг Л.А. Формулы Карлемана в комплексном анализе. Новосибирск: Наука, 1990. 246 с.
6. Андреева И.Б., Тарасов Л.Л. Акустические свойства морских организмов, образующих звукорассеивающие слои океана // Акуст. журн. 2003. Т. 49. С. 318–324.
7. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45. С. 437–444.
8. Андреева И.Б., Белоусов А.В. О допустимости использования приближения однократного рассеяния акустических волн в задачах о скоплениях гидробионтов // Акуст. журн. 1996. Т. 42. С. 560–562.
9. Андросов В.В. и др. Алгоритмы автофокусировки радиоизображений в условиях динамичных траекторных неустойчивостей // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 1. С. 64–70.
10. Аниконов Д.С., Ковтанюк А.Е., Прохоров И.В. Использование уравнения переноса в томографии. М.: Логос, 2000. 224 с.
11. Аниконов Д.С., Коновалова Д.С. Краевая задача для уравнения переноса с чисто комптоновским рассеянием // Сиб. мат. журн. 2005. Т. 46. С. 3–16.
12. Аншаков Г.П. и др. Моделирование решения задач батиметрии водоемов самарской области средствами дистанционного зондирования Земли // Вестн. Самар. гос. аэрокосмич. ун-та. 2013. Т. 42. С. 49–58.
13. Басс Л.П. и др. Моделирование распространения оптического излучения в фантоме биологической ткани на суперЭВМ МВС1000/М // Мат. моделирование. 2005. Т. 18. С. 29–42.
14. Безруков Ю.Ф. Океанология. Ч. 1. Физические явления и процессы в океане. Симферополь: Таврич. нац. ун-т им. В.И. Вернадского, 2006. 159 с.
15. Будаков В.П. и др. Быстрый и точный алгоритм численного моделирования переноса излучения в мутной среде на основе метода синтетических итераций // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. С. 739–746.
16. Владимиров В.С. Математические задачи односкоростной теории переноса частиц // Тр. МИАН СССР. 1961. Т. 61. С. 3–158.
17. Гермогенова Т.А. Локальные свойства решений уравнения переноса. М.: Наука, 1986. 272 с.
18. Готов В.П. Низкочастотное рассеяние звука ветровыми воздушными пузырьками, возникающими под морской поверхностью с крупномасштабными неровностями // Акуст. журн. 1978. Т. 24. С. 854–860.
19. Деревцов Е.Ю. Численное решение задачи рефракционной томографии в цилиндрической области // Сиб. журн. индустр. математики. 2015. Т. 18. С. 99–110.

20. Завьялов В.В., Клюева С.Ф., Лабюк Ф.И. Анализ статистической структуры поля глубин для целей батиметрической навигации // Транспортное дело России. 2015. С. 227–230.
21. Исимиру А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. 280 с.
22. Казанский Б.А. Батиметрический анализ Тихого океана по цифровым данным ETOPO 2' // Тихоокеан. геология. 2006. Т. 25. С. 115–123.
23. Казанский Б.А. Батиметрия морей Западно-Тихоокеанской переходной зоны по цифровым данным ETOPO 2' // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26. С. 56–64.
24. Копыл Е.А., Лысанов Ю.П. Об угловой зависимости коэффициента рассеяния звука на анизотропных объемных неоднородностях океана // Акуст. журн. 2004. Т. 50. С. 671–675.
25. Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи // УФН. 2006. Т. 176. С. 762–770.
26. Марчук Г.И., Лебедев В.И. Численные методы в теории переноса нейтронов. М.: Атомиздат, 1981. 456 с.
27. Новиков В.М., Шихов С.Б. Теория параметрического воздействия на перенос нейтронов. М.: Энергоиздат, 1982. 192 с.
28. Пригарин С.М. Статистическое моделирование эффектов, связанных с многократным рассеянием импульсов наземных и космических лидаров в облачной атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. С. 747–751.
29. Прохоров И.В., Сущенко А.А. Задача Коши для уравнения переноса излучения в неограниченной среде // Дальневост. мат. журн. 2018. Т. 18, № 1. С. 101–111.
30. Прохоров И.В. Задача Коши для уравнения переноса излучения с обобщенными условиями сопряжения // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2013. Т. 53. С. 753–766.
31. Прохоров И.В., Сущенко А.А. Исследование задачи акустического зондирования морского дна методами теории переноса излучения // Акуст. журн. 2015. Т. 61. С. 400–408.
32. Прохоров И.В., Сущенко А.А., Ким А. Начально-краевая задача для уравнения переноса излучения с диффузными условиями сопряжения // Сиб. журн. индустр. математики. 2017. Т. 20. С. 75–85.
33. Прохоров И.В., Сущенко А.А. О корректности задачи Коши для уравнения переноса излучения с френелевскими условиями сопряжения // Сиб. мат. журн. 2015. Т. 56. С. 922–933.
34. Прохоров И.В. О разрешимости начально-краевой задачи для интегродифференциального уравнения // Сиб. мат. журн. 2012. Т. 53. С. 377–387.
35. Прохоров И.В., Ким А. Теоретический и численный анализ начально-краевой задачи для уравнения переноса излучения с френелевскими условиями сопряжения // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2018. Т. 58, № 5. С. 762–777.
36. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 661 с.
37. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. М.: Едиториал УРСС, 2020. 224 с.
38. Черчиньяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана. М.: Мир, 1978. 496 с.
39. Яровенко И.П. О разрешимости краевой задачи для уравнения переноса излучения с учетом комптоновского рассеяния // Дальневост. мат. журн. 2014. Т. 14. С. 109–121.
40. Amosov A.A. Boundary value problem for the radiation transfer equation with reflection and refraction conditions // J. Math. Sci. 2013. Vol. 191. P. 101–149.
41. Callow H.J. et al. Autofocus for circular synthetic aperture imaging // Proc. Inst. Acoust. 2010. Vol. 32. P. 31–36.
42. Fakiris E. et al. Multi-frequency, multi-sonar mapping of shallow habitats-efficacy and management implications in the National Marine Park of Zakynthos, Greece // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, N 4. P. 461.
43. Fezzani R. et al. Fusion of Swath Bathymetric Data: Application to AUV Rapid Environment Assessment // IEEE J. Ocean Eng. 2019. Vol. 44. P. 111–120.
44. Frosch R.A. Underwater sound: Deep-ocean propagation // Science. 1964. Vol. 146. P. 889–894.
45. Giorli G. et al. Deep sea animal density and size estimated using a Dual-frequency IDentification SONar (DID-SON) offshore the island of Hawaii // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 160. P. 155–166.
46. Hosseini S.H., Akbarinasab M., Khalilabadi M.R. Numerical simulation of the effect internal tide on the propagation sound in the Oman sea // J. Earth and Space Phys. 2018. Vol. 44. P. 215–225.
47. Poulin C. et al. Diel variations of the attenuation, backscattering and absorption coefficients of four phytoplankton species and comparison with spherical, coated spherical and hexahedral particle optical models // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2018. Vol. 217. P. 288–304.
48. Stanton T.K. Volume scattering: Echo peak PDF // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. Vol. 77. P. 762–770.
49. Sushchenko A.A., Vornovskikh P.A. Remote sensing applications to acoustical tomography: case of unaccounted objects // Proc. Intern. Conf. on Days on Diffraction 2019. St.-Petersburg, 2019. P. 196–200.
50. Zhong H. et al. Complex Image Registration Algorithm for Interferometric Synthetic Aperture Sonar in GPU Environment // Proc. 2018 11th Intern. Congr. on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics, CISP-BMEI 2018. 2019. Beijing, China, 2018. P. 1–9.