

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

На правах рукописи



Калинина Вера Игоревна

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ МОРСКОГО ДНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ
ИМПУЛЬСОВ

01.04.06 - акустика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Хилько Александр Иванович

Нижний Новгород – 2019

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Развитие модели формирования сложных акустических импульсных сигналов в море в результате рассеяния в слоистом дне, учитывающей случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения.....	23
1.1. Модель формирования сложных акустических импульсов в море со слоистым дном.....	23
1.2. Анализ применимости развитой модели формирования отраженных от слоистого дна когерентных акустических импульсов.....	28
1.3. Анализ структуры сложных акустических импульсов при когерентном зондировании в море со слоистым дном.....	29
1.4. Разработка модели реверберационных помех, возникающих при когерентном акустическом зондировании морского дна за счет рассеяния на случайных неоднородностях донной поверхности и взволнованной поверхности воды.....	35
1.4.1. Реверберационные помехи, возникающие при рассеянии когерентных акустических зондирующих импульсов на случайных неоднородностях донного рельефа.....	35
1.4.2. Реверберационные помехи, возникающие при рассеянии когерентных акустических зондирующих импульсов на ветровом волнении.....	40
1.5. Модель аддитивных шумов, наблюдаемых при зондировании морского дна когерентными акустическими импульсами.....	42
1.6. Выводы.....	43
Глава 2. Разработка алгоритмов реконструкции геоакустических параметров морского дна и исследование их устойчивости к шумам и помехам при когерентном зондировании.....	45
2.1. Разработка алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании.....	45
2.1.1. Описание алгоритма когерентного траекторного накопления (КТН).....	50
2.1.2. Описание функционалов невязки, используемых при реконструкции параметров слоистого дна.....	52
2.1.3. Описание релаксационно-итерационного метода поиска решений.....	61
2.2. Анализ решения обратной задачи по реконструкции параметров верхних осадочных слоев при когерентном импульсном зондировании морского дна.....	63
2.2.1. Уточнение интервалов поиска параметров осадочных слоев.....	65

2.2.2. Исследования применения функционалов невязки, основанных на спектральных свойствах корреляционных матриц, на примере реконструкции параметров модели верхних осадочных слоев.....	68
2.2.3. Релаксационно-итерационный метод оценки параметров слоев и исследование устойчивости решений к шумам при реконструкции донных осадочных слоев.....	78
2.2.4. Примеры использования метода последовательной релаксации при реконструкции параметров дна, состоящего из 3 жидких слоев, лежащих на жидком полупространстве.....	81
2.3. Сравнительный анализ робастности реконструкции параметров упругих донных слоев при использовании различных критериев минимизации.....	87
2.4. Выводы.....	96
Глава 3. Экспериментальная проверка метода когерентной реконструкции структуры морского дна.....	98
3.1. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании в лабораторном бассейне.....	98
3.1.1. Методы накопления акустических сигналов и подавления реверберационных помех и шумов.....	101
3.1.2. Оценка параметров модели морского дна в условиях физического моделирования.....	105
3.2. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном сейсмопрофилировании в акватории Каспийского моря.....	112
3.2.1. Структура сигналов, шумов и реверберационных помех при зондировании дна когерентным источником.....	115
3.2.2. Сейсмическое профилирование донных слоев при использовании когерентного межимпульсного накопления.....	122
3.3. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном сейсмопрофилировании в мелководном районе Черного моря.....	131
3.3.1. Измерение АЧХ излучателя в морских условиях.....	133
3.3.2. Сейсмическое профилирование при использовании когерентного межимпульсного накопления и оценка параметров донных слоев.....	137
3.4. Выводы.....	145
Заключение.....	147
Список литературы.....	149

Введение

Актуальность работы

Значительная и постоянно растущая часть морского дна в относительно мелководных шельфовых районах Мирового океана активно исследуется в настоящее время в интересах сейсморазведки. Практический интерес вызывает поиск новых месторождений как в глубоководных районах морского шельфа, так и в окраинных морях, в частности, на арктическом шельфе. В настоящее время наиболее развитой и широко применяемой является технология, основанная на использовании мощных сейсмоакустических импульсов, излучаемых источниками взрывного типа, главным образом, пневматическими излучателями (пневмопушками), электромагнитными излучателями (бумерами) и электроискровыми разрядниками (спаркерами) [20, 22, 43, 44, 47, 67, 69]. Техническая реализация современных методов морской сейсморазведки имеет высокий уровень развития и включает, в том числе, специализированные малошумные суда, которые буксируют излучающие и многоканальные приемные решетки, размер которых может достигать несколько километров. При этом уровень излучения групповых пневмопушек достигает 240-260 дБ/м (относительно 1 мкПа). Однако обратной стороной широкого использования такой технологии является существенное негативное акустическое низкочастотное воздействие на морскую экосистему [50, 56], поскольку требования увеличения глубины проникновения зондирующих сигналов в морское дно и пространственного разрешения донной структуры приводят к необходимости повышения мощности зондирующих импульсов. Кроме того, в спектрах их излучений преобладают низкочастотные компоненты (ниже 100 Гц), что ограничивает возможности реконструкции донных неоднородностей с высоким разрешением в диапазоне относительно небольших глубин. Наконец, использование мощных источников взрывного типа связано с необходимостью применения громоздкого оборудования и крупнотоннажных судов, что затрудняет их использование при решении целого ряда важных задач, таких как сейсмоакустическое зондирование мелководных районов, прибрежных акваторий, речных пойм и т. п.

Имеющиеся трудности и противоречия—могли бы быть устранены при использовании методов пространственного и временного накопления отраженных сигналов, что позволило бы ослабить мощность зондирующих импульсов [67]. Однако применение такого рода перспективных технологий накопления ограничивается низкой когерентностью сигналов, возбуждаемых не только пневмопушками, но и другими сейсмоакустическими источниками взрывного типа.

Как показывают оценки и наблюдения, значительный запас углеводородов содержится в морском дне в виде газогидратов, а также в газонасыщенных слоях. Структура таких залежей недостаточно исследована, в том числе из-за того, что имеющиеся методы профилирования морского дна эффективны при реконструкции донных слоев на относительно больших глубинах. Газогидраты же чаще всего располагаются на сравнительно небольших глубинах (первые сотни метров). Более подробное исследование газонасыщенных слоев и газогидратов важно также и при морских инженерных работах. В частности, при морском бурении и эксплуатации месторождений углеводородов, а также при использовании новых активных методов воздействия на продуктивные донные слои, газонасыщенные слои могут перейти в активное взрывоопасное состояние. Для повышения безопасности инженерных сейсмических работ необходимо использовать относительно маломощные источники, при этом важно не только детально знать структуру дна, но и контролировать динамику ее изменений.

В условиях отмеченных ограничений в использовании традиционных методов зондирования морского дна возникает задача поиска альтернативных путей к разработке методов и средств морской сейсмоакустики. Одним из подходов к решению такой задачи, предложенным в ИПФ РАН [1, 37], является использование когерентных акустических источников, позволяющих выполнять эффективное накопление полезных сигналов во временной и пространственной областях. Такой подход, с общей радиофизической точки зрения, представляется достаточно очевидным, однако, до настоящего времени он не получил значительного развития. В настоящей диссертационной работе представлены результаты дальнейшей разработки методов акустического зондирования морского дна с помощью когерентных широкополосных сложных импульсов (сложномодулированных импульсных сигналов с большим значением базы – произведения частотной полосы сигнала на его длительность).

Важной практической задачей является, помимо реконструкции горизонтов границ раздела донных слоев, реконструкция геоакустических параметров морского дна. К данным параметрам относятся, прежде всего, плотность пород и скорости распространения в них продольных и поперечных волн. Такое расширение объема геофизической информации относительно донных пород, очевидно, существенно расширяет практические возможности морской сейсморазведки в целом. С этой целью активно развиваются и используются на практике алгоритмы сейсмической инверсии [17, 35, 39, 66, 78, 93]. По существу, такие алгоритмы направлены на решение обратной задачи сеймики, то есть на восстановление упругих параметров геологической среды по зарегистрированному приемниками акустическому волновому полю. Важно, что задача оценки геоакустических параметров слоистого дна является по своей постановке стохастической, поскольку в реальных условиях

работы приемно-излучающего комплекса необходимо учитывать прием полезных зондирующих сигналов на фоне всей совокупности шумов и помех. Этот аспект значительно усложняет методы решения и требует детального анализа всех особенностей конкретной задачи, включая статистический анализ отдельных источников шума. В этой связи представляется актуальным дальнейшее развитие физических и математических (численных) моделей рассеяния зондирующих сигналов в слоисто-неоднородном морском дне на фоне шумов и реверберационных помех различного типа. Такое развитие моделей, а так же алгоритмы реконструкции должны обеспечивать повышенную устойчивость и точность оценок геоакустических параметров морского дна при решении конкретных задач морской сейсмоакустики.

Существующие к настоящему времени методы и средства акустического зондирования морского дна

Акустические источники и схемы зондирования. В настоящее время для осуществления морской сейсморазведки широко используются некогерентные пневматические, искровые либо взрывные сейсмоакустические источники при их буксировке в подводном положении и приеме акустических сигналов горизонтально буксируемой решеткой гидрофонов [14, 17, 35, 37, 39, 44, 45, 66, 78, 93]. Такие источники являются низкочастотными (обычно они излучают мощные импульсы в интервале частот до 150 Гц). Генерируемые ими короткие импульсы имеют низкую воспроизводимость. Это ограничивает возможности накопления и согласованной обработки. Один из возможных и уже апробированных способов преодоления отмеченных трудностей заключается в использовании параметрических гидроакустических источников, обладающих высокой пространственной направленностью и широкими возможностями частотной перестройки излучения [44]. Однако эффективность такого метода ограничена его существенной энергозатратностью и трудностями контроля характеристик генерируемых акустических сигналов, которые зависят от зоны нелинейного взаимодействия акустических полей. В ряде работ исследовались также возможности реконструкции морского дна при использовании в качестве зондирующих акустических сигналов шумоизлучения кораблей, а также аддитивного шума океана [14, 17, 81]. При этом было установлено, что для достижения требуемой точности при реконструкции параметров морского дна требуется большое усреднение шумовых сигналов, что трудно достичь при необходимости обследования дна на больших площадях.

В ИПФ РАН впервые экспериментально была продемонстрирована перспективность использования когерентных низкочастотных (200-300 Гц) узкополосных гидроакустических

(ГА) излучателей электромагнитного типа в сейсмике в целом, и, в частности, при реконструкции морского дна, как при их стационарном расположении на земле в специальном бассейне, так и при их постановке в подводное положение с борта корабля [36]. В указанных работах было показано, что использование когерентных излучателей имеет ряд преимуществ, связанных с возможностью когерентного накопления акустических сигналов, а также измерении зондирующих импульсов, что невозможно сделать при использовании источников взрывного типа. Кроме того, когерентные акустических источники обычно имеют малый вес и размеры, что дает возможность их постановки и буксировки в подводном положении малоразмерными судами. При этом была отмечена необходимость создания для дальнейшего использования более широкополосных и мощных излучателей (акустических излучателей). Для зондирования дна широкое применение получили и высокочастотные (5-10 кГц) ГА источники [44, 66]. Однако с помощью таких систем возможна лишь реконструкция параметров донной поверхности и осадочных слоев на небольших глубинах. В ряде отечественных и зарубежных работ обсуждались возможности использования измеренных на протяженных акустических трассах возбуждаемых низкочастотных (НЧ) ГА излучателями узкополосных импульсов для получения усредненных оценок параметров дна путем сравнения измеренных распределений интенсивностей с расчетными зависимостями [9, 36, 93]. Однако, при таких схемах акустического зондирования, во-первых, глубина реконструкции донных слоев невелика, и, во-вторых, можно получить лишь оценки параметров дна, усредненные по всей протяженной трассе.

Алгоритмы реконструкции параметров морского дна. Для оценки параметров морского дна широко используются алгоритмы сейсмической инверсии. При этом решается обратная стохастическая задача сейсмике, то есть восстановление распределения упругих параметров геологической среды по зарегистрированному акустических волновому полю [4, 6, 25, 27, 63, 69, 71, 73, 773, 79, 86, 87]. В большинстве методов инверсия заключается в отыскании параметров геофизической модели, при которых минимизируется целевая функция, что обеспечивает определение параметров модели, наиболее близких тем, что определяют характеристики наблюдаемых акустических сигналов. В целом, стохастическая задача инверсии сложна. Она является некорректной задачей, и ее решение не единственно. Универсальных решений задачи акустической инверсии не существует. Многочисленные методы и алгоритмы акустической инверсии основываются на различных особенностях задачи [21, 22].

Реализация акустической инверсии связана с преодолением различных трудностей. При этом используются различные приближенные методы и учитываются различные особенности задачи. В частности, при построении алгоритмов инверсии на решение накладываются ограничения, которые заключаются в том, что решение должно соответствовать некоторой

опорной модели, построенной по скважинным данным [35, 10, 21]. В качестве оператора, пересчитывающего модель морского дна в акустическом поле, для типичных схем зондирования морского дна, для которых углы падения зондирующего поля на границы двух сред с различными упругими свойствами, отличны от нормального, учитывается трансформация продольных и поперечных волн с использованием уравнения Нотта-Цёппритца [4]. При инверсии широко используется оптимизация, минимизирующая целевую функцию. Целевая функция включает в качестве слагаемых невязку между наблюдаемым и синтетическим волновым полем и, как уже отмечалось, различные регуляризирующие ограничения на допустимую степень отклонения результата от некоторой опорной модели среды. Это обеспечивает устойчивость и пространственную связность решения [63]. Рассчитываемое волновое поле для каждой итерации процесса оптимизации, заключающейся в минимизации целевой функции, соответствует серии последовательных приближений искомой геофизической модели морского дна. Используются также методы геостатистической инверсии [63], когда выбираются и усредняются наиболее вероятные реализации, обеспечивающие наименьшую невязку между соответствующим им модельным и наблюдаемым волновым полем. При этом используется многоатрибутный анализ и более сложный аппарат нейронных сетей [78]. В таких, и в ряде других методов инверсии, устранение искажений выполняется при осуществлении подавления регулярных помех, восстановления амплитуд и миграции [6, 63]. Методы полной упругой инверсии [4] на основе исходных данных и волнового моделирования не получили широкого распространения. Их недостатками являются слабая устойчивость, обусловленная объединением процессов миграции и инверсии в одну оптимизационную процедуру, а также необходимость серьезных вычислительных затрат для достижения приемлемой точности.

Используются также акустическая инверсия полнократных сейсмических данных, заключающаяся в восстановлении вертикального распределения акустического импеданса по трассе однократно отраженного поля продольных волн в каждой точке поверхности при проведении операций вычитания всех кратных волн, введении необходимых амплитудных поправок за геометрическое расхождение, обмен, поглощение, а также выполнения миграции [6]. После реконструкции распределения акустического импеданса выполняется оценка распределения пористости и газонасыщенности продуктивных коллекторов.

Разработаны алгоритмы инверсии редких импульсов с ограничениями (CSSI, Constrained Sparse Spike Inversion) и различные реализации нейросетевой инверсии, одним из наиболее совершенных из которых является «генетический» метод (Genetic Inversion) [63]. Трудностями, возникающими при проведении инверсии CSSI, являются оценка формы импульса и внесение в решение низкочастотной составляющей. Для решения последней задачи, актуальной для всех

видов сейсмической инверсии, используется низкочастотная трендовая акустическая модель, построенная по наблюдаемым скважинным данным [4]. Импульс обычно оценивается статистически или с помощью оптимизационной процедуры, как обеспечивающей наилучшее соответствие синтетической трассы реальной трассе в окрестности скважины.

Решение инверсионной обратной задачи усложняется тем, что модель лишь приближенно описывает геологическую среду, процессы, происходящие при распространении реального волнового поля, сложнее тех, что описываются расчетным алгоритмом, а зарегистрированные данные осложнены присутствием различного рода помех [63].

Известные способы инверсии делятся на две группы: итеративные инверсии и неитеративные инверсии [35, 63]. Неитеративная инверсия представляет собой инверсию, выполняемую посредством принятия некоторой простой фоновой модели и уточнения модели на основе входных данных. В данном способе не используют уточненную модель в качестве входных данных для следующего этапа инверсии. В случае применения к сейсмическим данным эти способы обычно называют визуализацией, миграцией, дифракционной томографией или инверсией Борна. Итеративная инверсия представляет собой инверсию, включающую в себя повторяющиеся уточнения модели свойств недр, при которых найденная модель будет удовлетворительно объяснять экспериментальные данные. Если инверсия сходится, то конечная модель (решение) будет лучше объяснять экспериментальные данные и будет более точно аппроксимировать фактические свойства донных пород. Итеративная инверсия обычно дает более точную модель, чем неитеративная инверсия, однако, она требует значительно больших вычислительных затрат. Такая затратность по вычислениям является следствием того, что все способы инверсии требуют большого количества вычислительно интенсивных моделирований. Время вычисления любого индивидуального моделирования пропорционально количеству инвертируемых источников, а геофизические данные обычно содержат большое количество источников. Задача усложняется для итеративной инверсии, так как количество моделирований, которое необходимо вычислить, пропорционально количеству итераций инверсии, при этом, как правило, требуется от нескольких сотен до нескольких тысяч итераций.

Методы оптимизации целевой функции являются либо локальными, либо глобальными [35, 78]. Глобальные методы просто предполагают вычисление целевой функции для совокупности геофизических моделей и выбор набора из одной или нескольких моделей из совокупности, которые приближенно минимизируют целевую функцию. Если требуется дальнейшее улучшение, то этот новый выбранный набор моделей можно использовать в качестве базиса для генерации новой совокупности моделей, которые опять можно проверить относительно целевой функции. Методы глобальной инверсии включают в себя метод Монте-

Карло, метод модельной закалки, генетические и эволюционные алгоритмы [63]. К сожалению, глобальные методы оптимизации обычно сходятся крайне медленно и поэтому большинство геофизических инверсий основано на локальной оптимизации целевой функции. Локальная оптимизация целевой функции повторяется с использованием новой уточненной модели в качестве начальной для следующего градиентного поиска. Процесс продолжается до тех пор, пока не обнаружится, что уточненная модель удовлетворительно объясняет экспериментальные данные. Часто используемые способы локальной инверсии целевой функции включают в себя метод градиентного поиска, метод сопряженных градиентов и метод Ньютона [4]. В качестве выборок сейсмических данных в таком методе может выступать любой тип выборки, который можно смоделировать за один прогон программы прямого сейсмического моделирования. Как правило, выборки соответствуют сейсмическому взрыву, хотя взрыв может быть произведен и не точечным источником. Для точечных источников индекс выборки соответствует положению индивидуальных точечных источников. Для того, чтобы вычислить градиент целевой функции, отдельно вычисляется градиент вклада в целевую функцию от каждой выборки, затем суммируются эти вклады. В геофизических задачах число выборок обычно соответствует количеству геофизических источников и является числом от порядка 10000 до 100000, существенно увеличивая точность инверсии. Следует отметить, что вычисление результата инверсии требует вычисления производной от целевой функции по каждому из параметров геофизической модели, число которых, обычно, очень велико. При этом вычисления могут быть крайне длительны. Существует потребность в более эффективном способе вычисления градиента целевой функции без существенного снижения точности ее локальной оптимизации. Ряд современных способов снижения требований к мощности вычислительных средств, заключающихся в объединении выборок данных, соответствующих набору источников, проанализирован в [78]. Все предложенные методы приводят к снижению точности инверсии. При этом не используются особенности физической модели, связывающей искомые параметры геологической среды и зарегистрированное сейсмическое волновое поле.

Оптимизация целевой функции. Оптимизация целевой функции осуществляется с помощью минимизации значения в отношении модели \mathbf{M} – вектор N параметров, (m_1, m_2, \dots, m_N) , описывающих модель геологической среды, целевой функции $S(\mathbf{M})$, которая является мерой несоответствия между наблюдаемыми (измеряемыми) геофизическими данными и соответствующими данными, вычисленными с помощью предполагаемой модели. Часто используемой при локальной геофизической инверсии целевой функцией S является следующая функция [35, 39, 78, 93]:

$$S(\mathbf{M}) = \sum_{g=1}^{N_g} \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{t=1}^{N_t} W(\Psi_{calc}(\mathbf{M}, g, r, t, w_g) - \Psi_{obs}(g, r, t, w_g)), \quad (\text{B.1})$$

где: W - функция критерия минимизации или функционал невязки (чаще всего используется $W(x) = x^2$ - критерий наименьших квадратов, то есть критерий L_p , в случае которого $p=2$), g - индекс выборки - сейсмограммы (для данных точечного источника это соответствует отдельным источникам), N_g - число сейсмограмм, r - индекс приемника в сейсмограмме, N_r - число приемников в сейсмограмме, t - индекс временной выборки в записи данных, N_t - число временных выборок, Ψ_{calc} - расчетные геофизические данные из модели \mathbf{M} , Ψ_{obs} - измеряемые геофизические данные, и w_g - функция пространственных координат или времени (форма импульса источника) для сейсмограммы g , т.е. сигнал источника без эффектов фильтрации среды. Целью инверсии посредством оптимизации целевой функции является уточнение модели \mathbf{M} таким образом, чтобы целевая функция являлась минимальной. Модель среды уточняется следующим образом:

$$\mathbf{M}^{(k+1)} = \mathbf{M}^{(k)} - \alpha^{(k)} \nabla_{\mathbf{M}} S(\mathbf{M}), \quad (\text{B.2})$$

где k - номер итерации, α - скалярный размер уточнения модели, $\nabla_{\mathbf{M}} S(\mathbf{M})$ - градиент целевой функции, взятый с учетом параметров модели. Вариации модели вычисляются умножением градиента целевой функции на длину шага α , которая должна циклически вычисляться, а градиент целевой функции с учетом (B.1) определяется следующим образом:

$$\nabla_{\mathbf{M}} S(\mathbf{M}) = \sum_{g=1}^{N_g} \nabla_{\mathbf{M}} W(S(\mathbf{M}, w_g)). \quad (\text{B.3})$$

В качестве решения акустической инверсии выступают оценки $\tilde{\mathbf{M}}$, при которых $S(\tilde{\mathbf{M}}) \rightarrow \min$. Поскольку акустические измерения осуществляются в присутствии шумов и случайных помех, оценки $\tilde{\mathbf{M}}$ являются случайными величинами, качество которых определяется статистическими характеристиками, например, такими, как дисперсия, смещенность и состоятельность [4].

Из (B.3) видно, что градиент целевой функции может быть получен путем вычисления для каждого параметра модели \mathbf{M} градиентов вкладов в целевую функцию от каждой из выборок, которых обычно много (порядка до 10^4 - 10^6). Необходимые для решения задачи инверсии вычисления становятся очень длительными и дорогостоящими. Кроме того, устойчивость алгоритмов инверсии с использованием вычислений градиентов к шумам и помехам невелика, а требования к априорной информации (исходным геофизическим моделям) высоки.

Проблемы инверсии и пути их преодоления. Несмотря на многочисленные исследования, направленные на совершенствование универсальных алгоритмов геофизической инверсии (B.1-B.3), в настоящее время разработка эффективных методов инверсии, в частности, методы

оценки параметров неоднородностей морского дна, остается актуальной [6, 39, 63]. Методы и алгоритмы инверсии при выполнении морской сейсморазведки должны быть менее затратными и более устойчивыми к шумам и помехам. Как следует из анализа работ и исследований по геофизической и, в частности, сейсмической инверсии, одним из путей, позволяющих выполнять инверсию быстрее и точнее, является детальный учет всех особенностей задачи. Для этого, в том числе, необходимо [4, 63, 78]:

- учитывать особенности совместной работы источников и приемных элементов при морском сейсмоакустическом зондировании морского дна;
- разработать более точные геофизические модели \mathbf{M} , а также модели Ψ_{calc} формирования акустических полей, отраженных от морского дна, которые должны учитывать, в числе прочего, влияние шумов и реверберационных помех;
- с использованием модели Ψ_{calc} осуществлять согласованную фильтрацию акустических сигналов для максимального накопления полезных сигналов и подавления аддитивных шумов и мультипликативных помех;
- оптимизировать структуру целевой функции S так, чтобы она имела повышенную устойчивость к шумам и реверберационным помехам;
- осуществлять априорный анализ структуры целевой функции S в многопараметрическом пространстве (m_i) на основании которого разработать эффективный метод поиска решений;
- исследовать и выполнять оценки достоверности результатов инверсии.

Как отмечено в работах [1-2, 36-37], одним из путей преодоления перечисленных трудностей, в частности, при акустическом зондировании морского дна, является использование в качестве источника когерентного акустического излучателя. В настоящей диссертационной работе предпринята дальнейшая разработка предложенных в ИПФ РАН [1-2, 36-37, 78] и в других работах, методов акустического зондирования морского дна с помощью когерентных акустических широкополосных сложных импульсов. Возбуждающие такие сигналы акустические (гидроакустические) излучатели обладают высокой временной стабильностью излучаемых сигналов и обеспечивают возможности гибкого управления излучением. Использование таких источников могло бы позволить выполнять различные модификации согласованной с условиями зондирования частотно-пространственно-временной обработки, обеспечивающей эффективное накопление акустических сигналов и подавление шумов и реверберационных помех. Такого рода когерентная обработка может выполняться как по отношению к отдельным зондирующим импульсам, так и по отношению к набору таких импульсов, распределенных во времени, а также и совместной работе набора источников и приемников. Дальнейшее развитие идей, сформулированных в [36], могло бы быть связано с

решением актуальных прикладных задач, заключающихся в разработке экологически чистых технологически безопасных методов и средств когерентного зондирования сложнопостроенными акустическими импульсами морского дна в мелководных районах дельт больших рек и в мелководном арктическом шельфе России. Для разработки оптимальных методов инверсии параметров морского дна при зондировании морского дна когерентными импульсами с контролируемыми параметрами возможно уточнение геофизических моделей M , а также модели Ψ_{calc} формирования акустических импульсов, отраженных от морского дна, путем включения в них шумов и реверберационных помех. Это позволит сформировать устойчивую к шумам и реверберационным помехам целевую функцию S , разработать эффективный метод поиска решений и оценить достоверность результатов инверсии.

Цели и задачи работы

Целью диссертации является разработка физических основ и исследование возможностей реконструкции параметров морского дна при использовании в качестве источников зондирующих сигналов когерентных акустических излучателей, в частности:

- 1) развитие физических и численных моделей формирования когерентных сложных акустических импульсов, рассеянных в упругом слоистом дне, с учетом донной и поверхностной реверберации;
- 2) разработка алгоритмов реконструкции геоакустических параметров морского дна при его зондировании когерентными акустическими импульсами;
- 3) анализ статистических характеристик и устойчивости к шумам и помехам оценок геоакустических параметров пород морского дна путем численного стохастического моделирования и при проведении лабораторных и натурных экспериментов.

Научная новизна работы

В диссертации развит перспективный метод реконструкции слоистой структуры морского дна, основанный на использовании когерентных акустических импульсов.

В работе впервые:

- показано, что использование когерентных акустических источников дает возможность реконструкции параметров морского дна при существенном (на несколько порядков) уменьшении амплитуд излучаемых акустических сигналов по сравнению с использованием источников взрывного типа;

- разработана модель формирования акустических импульсов, принимаемых в водном слое в результате рассеяния в упругом слоистом дне, учитывающая случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения, позволяющая корректно определять пороги уровней шумов при реконструкции параметров дна;
- разработан итерационный алгоритм послойной реконструкции геоакустических параметров морского дна, характеристики которого (дисперсия и сходимость к истинным значениям параметров) исследованы методом стохастического моделирования;
- экспериментально апробирован алгоритм оценки параметров морского дна с использованием когерентных акустических зондирующих импульсов в условиях физического моделирования и в натуральных условиях мелководных районов Каспийского и Черного морей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для решения современных задач морской сейсморазведки и учета экологических требований при проведении инженерных работ, альтернативой использованию источников взрывного типа является применение когерентных широкополосных излучателей. Формируемые такими излучателями сигналы при относительно малых амплитудах зондирования позволяют использовать методы когерентного частотного, пространственного и временного накопления, при этом реконструкция структуры и параметров морского дна выполняется с точностью и чувствительностью, не меньшей, чем при использовании более мощных (до нескольких порядков) источников взрывного типа.

2. Разработанные алгоритмы и методы обработки принимаемых когерентных сигналов, включающие релаксационно-итерационный поиск решения с использованием различных функционалов невязки, позволяют повысить точность оценок геоакустических параметров донных слоев при решении практических задач морской сейсмоакустики.

Практическая значимость работы

Материалы диссертации могут быть использованы при выполнении геофизических исследований и работ, связанных с морской поисковой и инженерной сейсмоакустикой. Особый интерес результаты диссертации могут представлять при проведении таких работ в условиях повышенных требований по ограничению уровня акустического воздействия на морскую экосистему. В частности, результаты диссертации могут представлять интерес при сейсморазведке в мелководных районах окраинных морей, в шельфовых районах, в том числе, в

Арктике, а так же при контроле состояния морского дна при проведении подводных инженерных работ.

Методы исследования

В диссертации для решения поставленных задач используются методы и подходы, развитые в акустике и радиофизике. Так, для анализа особенностей формирования акустических импульсных сигналов при отражении от упругого слоистого дна океана использовались: геометроакустическое приближение, предположение о малости возмущений среды, методы статистического анализа акустических сигналов в случайно неоднородной слоистой среде. Использовались также методы выделения акустических сигналов на фоне шумов и реверберационных помех, а также методы решения обратных задач, основанных на оценке наблюдаемых объектов с помощью алгоритмов оптимизации целевых функций. Исследования статистической структуры решений при акустическом наблюдении осуществлялись также методами численного стохастического моделирования. При проведении экспериментальных исследований в бассейне, а также в морских условиях, применялись специально разработанные излучающие и приемные системы, методы экспериментальной сейсмоакустики.

Достоверность результатов обеспечивается взаимным соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, использованием общепризнанных теоретических подходов в качестве основы для разработки физико-математических моделей и алгоритмов реконструкции, современных методов численного моделирования и обработки экспериментальных данных. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских журналах и многократно докладывались на всероссийских конференциях.

Публикации и апробация результатов работы

Данная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты работы опубликованы в 11 статьях в реферируемых журналах из списка ВАК [95-105], 23 трудах сборников международных и всероссийских конференций [106–108, 111-130]. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ИПФ РАН, ИФЗ РАН, ИОФ РАН и на следующих всероссийских, региональных и международных конференциях:

1. Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, каждый год, начиная с 2006 г. по 2019 г. включительно).

2. XII школа-семинар им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенная с XXI сессией Российского акустического общества (РАО) (Москва, 2009).
3. XXII сессия Российского акустического общества и сессия Научного совета по акустике РАН (Москва, 2010).
4. XIII школа-семинар им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенная с XXIII сессией Российского акустического общества (Москва, 2011).
5. XXIV сессия Российского акустического общества и сессия Научного совета по акустике РАН (Москва, 2011).
6. Всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных системах» (Н. Новгород, 2011).
7. XII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (Москва, 2011).
8. XI Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2012).
9. XXV сессия Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН (Москва, 2012).
10. XIV школа-семинар им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенная с XXVI сессией Российского акустического общества (Москва, 2013).
11. XII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2014).
12. 20-я Нижегородская сессия молодых ученых (Арзамас, 2015).
13. Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Москва, 2015).
14. XIII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2016).
15. XV научная школа-семинар академика Л. М. Бреховских "Акустика океана", совмещенная с XXII сессией Российского акустического общества (Москва, 2016).
16. V Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)» (Москва, 2016).
17. II Всероссийская акустическая конференция, совмещенная с XXX сессией Российского акустического общества (Н. Новгород, 2017).
18. Научно-практическая конференция «Сейсмические Технологии-2017» (Москва, 2017).
19. XVI школа-семинар им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенная с XXXI сессией Российского акустического общества (Москва, 2018)

20. XIV Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2018).

Цикл работ автора по разработке высокочастотных акустических систем наблюдения в океане в 2010 г. получил грант по программе Американского акустического общества «Поддержка лучших научных работ молодых ученых». В 2011 г. во время обучения в аспирантуре автор диссертации В.И. Калинина была удостоена стипендии имени академика Г.А.Разуваева. На сессии РАО в 2011 г. доклад В.И. Калининой, включающий результаты диссертационной работы, отмечен грамотой РАО как один из лучших докладов молодых ученых.

Работы, результаты которых частично вошли в диссертацию, были поддержаны РФФИ (гранты 09-02-00044, 12-02-005439, 16-29-02081); программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы океанологии: геология, физика, биология, экология», программой ОФН РАН «Фундаментальные основы акустической диагностики природных и искусственных сред», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт № 02.740.11.0565), программой «Ведущие научные школы» (НШ-339.2014.2), Грантом Президента СП-3549.2015.5, Грантом от «07» сентября 2016 г. №ГУ/2016 по программе «УМНИК» (Фонд содействия инновациям).

Личный вклад автора

Автор диссертации принимала участие в постановке задач, решаемых в работе, исследованиях, анализе и формулировке результатов. Автором лично был разработан программный комплекс для численных экспериментов по решению прямой и обратной задачи отражения акустических импульсов от слоистого морского дна, исследования влияния помех и шумов, методов оценки параметров морского дна с использованием различных функционалов невязки и их робастности. В эксперименте в Каспийском море автор участвовала в обработке экспериментальных данных. Эксперименты в бассейне и в Черном море были выполнены при непосредственном участии автора диссертации, обработкой и интерпретацией результатов также занимался автор. Все приведенные в диссертации и вошедшие в работы [95-108, 111-130] результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. В статьях [100-105] и трудах конференций [118-121, 126-129] вклад автора был определяющим, остальные публикации были подготовлены автором на паритетных началах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Список литературы состоит из 130 наименований, включая 34 публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 159 страниц и включает 67 рисунков и 8 таблиц.

Глава 1 посвящена развитию модели формирования сложных акустических импульсных сигналов в море в результате рассеяния в слоистом дне, учитывающая случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения.

В разделе 1.1 описывается используемая в работе схема зондирования морского дна, состоящего из набора упругих слоев, когерентными сложно модулированными импульсами. Рассматривается помещенная в океанический волновод система наблюдения, состоящая из совокупности ненаправленных независимых друг от друга когерентных излучателей звука (излучающая антенна), и расположенная на относительно небольшом горизонтальном расстоянии от излучателя система ненаправленных гидрофонов (приемная антенна). Излучателем возбуждается импульсный сигнал. Также в разделе 1.1 приводятся основные уравнения, на основе которых была разработана численная модель формирования отраженных сложных акустических импульсов в море с упругим слоистым дном. Получена формула для спектральных компонент импульса, отраженного от нижних границ слоев в геометроакустическом приближении, в которой коэффициенты отражения и преломления определяются из уравнений Цеппритца для амплитуд волн на границах упругих слоев [54].

В разделе 1.2 описываются условия применимости развитой геометроакустической модели формирования отраженных сигналов.

В разделе 1.3 анализируется структура сигналов при когерентном акустическом зондировании морского дна. Принимаемый сигнал формируется как сумма прямого импульса, импульса, отраженного от поверхности воды, импульса, отраженного от поверхности дна, набора из $k = \sum_{i=1}^N 4^i$ импульсов, отраженных от нижних границ донных слоев, а также реверберационных компонент отражения от свободной взволнованной поверхности воды и случайных неоднородностей рельефа дна. Развитая модель позволяет исследовать взаимосвязь основных параметров задачи и на этой основе оптимизировать решающие правила, обеспечивающие максимальное накопление полезных сигналов, а также снизить требования к априорным данным, то есть найти наилучшую процедуру поиска решения обратной задачи.

В разделе 1.4 приводится описание разрабатываемой модели реверберационных помех, возникающих при когерентном акустическом зондировании морского дна за счет рассеяния зондирующих импульсов на всех случайных граничных и объемных неоднородностях водной толщи и дна. Как показывают оценки, наибольший вклад в реверберационную помеху вносит

рассеяние на случайных неоднородностях донной поверхности, а также рассеяние на свободной поверхности воды вследствие ветрового волнения. Для оценки вклада таких компонент используется коэффициент рассеяния высокочастотного звука и метод касательной плоскости Бреховских-Исаковича [12]. Приведены расчеты реверберации по разным моделям волновода и набора жидких слоев.

В разделе 1.5 обсуждается влияние аддитивных шумов, наблюдаемых при зондировании морского дна когерентными акустическими импульсами.

В разделе 1.6 сформулированы выводы по данной главе.

Глава 2 посвящена разработке алгоритмов реконструкции геоакустических параметров морского дна и исследованию их устойчивости к шумам и помехам при когерентном зондировании. В качестве искоемых параметров слоя при решении обратной задачи реконструкции оцениваются его толщина, плотность, продольная и поперечная скорости грунта.

В разделе 2.1 приводится схема и описание алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании. При построении данного алгоритма используются априорные данные о зондируемой среде и данные выполненных ранее экспериментов, а также целевая функция оценки искоемых параметров среды, основанная на детальном анализе особенностей формирования отраженных от слоистого дна импульсных сигналов, шумов и реверберационных помех (Глава 1).

Параграф 2.1.1 содержит описание предложенного алгоритма когерентного траекторного накопления (КТН), который заключается в адаптивном (учитывающем наклон каждого слоя) межимпульсном накоплении сигналов, отраженных от разных границ донных слоев. Такое когерентное траекторное накопление позволяет дополнительно увеличивать отношение сигнала к шуму, что демонстрируется при дальнейшей обработке экспериментальных данных.

Параграф 2.1.2 содержит описание функционалов невязки, используемых при реконструкции параметров слоистого дна. Как показал дальнейший анализ, различные функционалы невязки имеют различную чувствительность и статистическую устойчивость при оценке отдельных параметров морского дна. В работе используются: стандартный функционал – L_p -норма, модифицированный алгоритм оценивания – процессор AMUSIC [52] и новый функционал – нейроподобная свертка сигналов [98]. Формулы, используемые для расчетов, подробно представлены в диссертации.

Параграф 2.1.3 содержит описание релаксационно-итерационного метода поиска решений, используемого в работе.

В разделе 2.2 приводится анализ решения обратной задачи по реконструкции параметров донных слоев на примере импульсного зондирования верхних осадочных слоев.

В параграфе 2.2.1 описывается возможность сужения интервалов поиска параметров осадочных слоев с использованием априорной информации и аналитических зависимостей принимаемого сигнала (амплитуд и времен прихода отраженных от слоев импульсов) от параметров расположения излучателя и приемной системы, а также от самих геоакустических параметров донных слоев.

В параграфе 2.2.2 представлены особенности восстановления параметров двухслойных осадков с использованием функционалов невязки, основанных на спектральных свойствах корреляционных матриц (AMUSIC).

В параграфе 2.2.3 приводятся результаты работы послойного итерационного метода и анализа устойчивости решений к шумам при реконструкции донных осадочных слоев.

В параграфе 2.2.4 приводятся примеры использования метода последовательной релаксации при реконструкции параметров дна, состоящего из 3 жидких слоев, лежащих на жидком полупространстве, с применением функционала невязки типа AMUSIC, а также демонстрируются возможности и преимущества использования комбинации процессоров, рассчитанных при различных начальных приближениях.

В разделе 2.3 проводится сравнительный анализ робастности реконструкции параметров упругих донных слоев при использовании различных функционалов невязки.

В разделе 2.4 сформулированы выводы по данной главе.

В **Главе 3** обсуждаются результаты экспериментальной апробации метода когерентной реконструкции структуры морского дна. Эксперименты проводились в условиях физического моделирования в бассейне и в морских условиях в Каспийском и Черном морях.

В разделе 3.1 описывается установка для экспериментальной апробации метода реконструкции структуры морского дна в условиях лабораторного бассейна. В качестве упругого слоя, параметры которого оцениваются, использовался слой плексигласа. Приведены результаты численного моделирования эксперимента по указанным данным на основе разработанной в **Главе 1** модели.

В параграфе 3.1.1 обсуждаются методы накопления акустических сигналов и возможности ослабления реверберационных помех и шумов благодаря применению импульсного стробирования, подбору относительного положения излучателя и приемника и отключению привода механизма перемещения каретки гидрофона, который вносил наибольший вклад в аддитивные помехи при измерениях. Это позволило повысить отношение сигнал/шум на 40 дБ.

В параграфе 3.1.2 приведены оценки параметров слоя плексигласа с использованием разработанной модели и функционала невязки типа L_2 -нормы. Показано, что в конкретной установке для физического моделирования и при используемых алгоритмах точность

реконструкции донного слоя плексигласа составила для плотности и скорости поперечной волны величину порядка 3–4 %, а для скорости продольной волны и толщины плексигласа – порядка 2–3 % (относительно значений параметров, взятых из справочника).

Раздел 3.2 содержит описание условий и оборудования при проведении совместных с ИО РАН экспериментов в акватории Каспийского моря с глубинами около 400 м с использованием когерентного излучателя.

В параграфе 3.2.1 приводится структура зондирующих сигналов, анализ спектрального состава и статистических характеристик аддитивных шумов, наибольший вклад в которые вносили шумы судна-буксировщика, а также исследование структуры реверберационных помех.

В параграфе 3.2.2 производится апробация предложенного метода КТН (глава 2) на примере накопления 100 импульсов на одном из участков траектории, где излучались ЛЧМ импульсы в диапазоне от 150 до 250 Гц длительностью 0.125 сек. Когерентное траекторное накопление позволило дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму от 10 до 15 дБ, что дало возможность на глубинах залегания донных слоев порядка 500 м надежно выявить ранее не наблюдаемую нижнюю кромку газонасыщенных слоев.

Раздел 3.3 посвящен описанию условий и оборудования при проведении экспериментов в мелководном районе Черного моря с глубинами около 50 м с использованием когерентного излучателя.

В параграфе 3.3.1 анализируются результаты испытаний и приводятся результаты измерения амплитудно-частотной характеристики излучателя в морских условиях.

В параграфе 3.3.2 приводится апробация предложенного метода КТН и оценка параметров донных слоев. В результате пространственного когерентного накопления по приемной антенне и КТН 10 импульсов на одном из участков траектории, где излучались ЛЧМ импульсы в диапазоне от 200 до 8000 Гц длительностью 0.5 сек, удалось увеличить отношение сигнала к шуму до 10 дБ.

В разделе 3.4 сформулированы выводы по данной главе.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. А.И. Хилько за помощь в определении научных направлений, постановке задач, интерпретации полученных результатов и подготовке публикаций. Автор также выражает благодарность своим соавторам – к.ф.-м.н. И.П. Смирнову, к.ф.-м.н. В.А. Лазареву и А.Г. Хоботову за помощь в разработке методов оценки параметров морского дна и интерпретации результатов численных экспериментов, к.ф.-м.н. А.И. Малеханову – за ценные советы и замечания в процессе работы над диссертацией. Автор выражает благодарность своим коллегам В.В. Уварову и В.Б. Быстранову за помощь в проведении натуральных экспериментов.

Глава 1. Развитие модели формирования сложных акустических импульсных сигналов в море в результате рассеяния в слоистом дне, учитывающей случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения

Для обеспечения высокой чувствительности и разрешения при решении обратной задачи по реконструкции параметров донных неоднородностей с помощью когерентных сложных акустических импульсов необходимо учитывать все основные особенности формирования таких сигналов. В частности, необходимо использовать более точные геофизические модели M_R , а также модели формирования акустических полей Ψ_{calc} , которые должны учитывать, в том числе, влияние шумов и реверберационных помех. Это позволит при реконструкции параметров дна учитывать особенности совместной когерентной работы источников и приемных элементов, осуществлять согласованную пространственную, частотную и временную фильтрацию акустических сигналов для максимального накопления полезных сигналов и подавления аддитивных шумов и мультипликативных помех. Априорная информация при решении обратной задачи акустического зондирования морского дна собирается в виде параметрической модели, включающей в себя модели: среды, системы наблюдения, отраженных слоистым морским дном акустических сигналов, реверберационных помех и аддитивных шумов.

1.1. Модель формирования сложных акустических импульсов в море со слоистым дном

Успех решения обратной задачи акустического зондирования морского дна в существенной степени зависит от адекватности модели формирования сигналов, отраженных от морского дна. Решение задачи отражения сейсмоакустических импульсов от дна рассматривалось ранее, при этом, часто, использовалась модель морского дна M_R в виде однородных жидких или упругих слоев [67], которая называлась моделью редких импульсов. В настоящей диссертации, в качестве основной геофизической модели морского дна будет рассматриваться именно такая модель. В такой модели при расчете поля, необходимо учитывать вклад поперечных волн, а также эффекты, связанные с обменными эффектами трансформации различных типов волн при их отражении и преломлении на многочисленных границах дна в виде слоистого полупространства. Каждый из упругих слоев в такой модели может быть описан шестью параметрами: толщиной слоя, плотностью грунта, скоростью

продольных и поперечных волн, декрементами затухания продольных и поперечных волн; соответственно, размерность пространства параметров равна $M=6(N+1)$, где N — число слоев (толщина нижнего слоя h_N считается бесконечной).

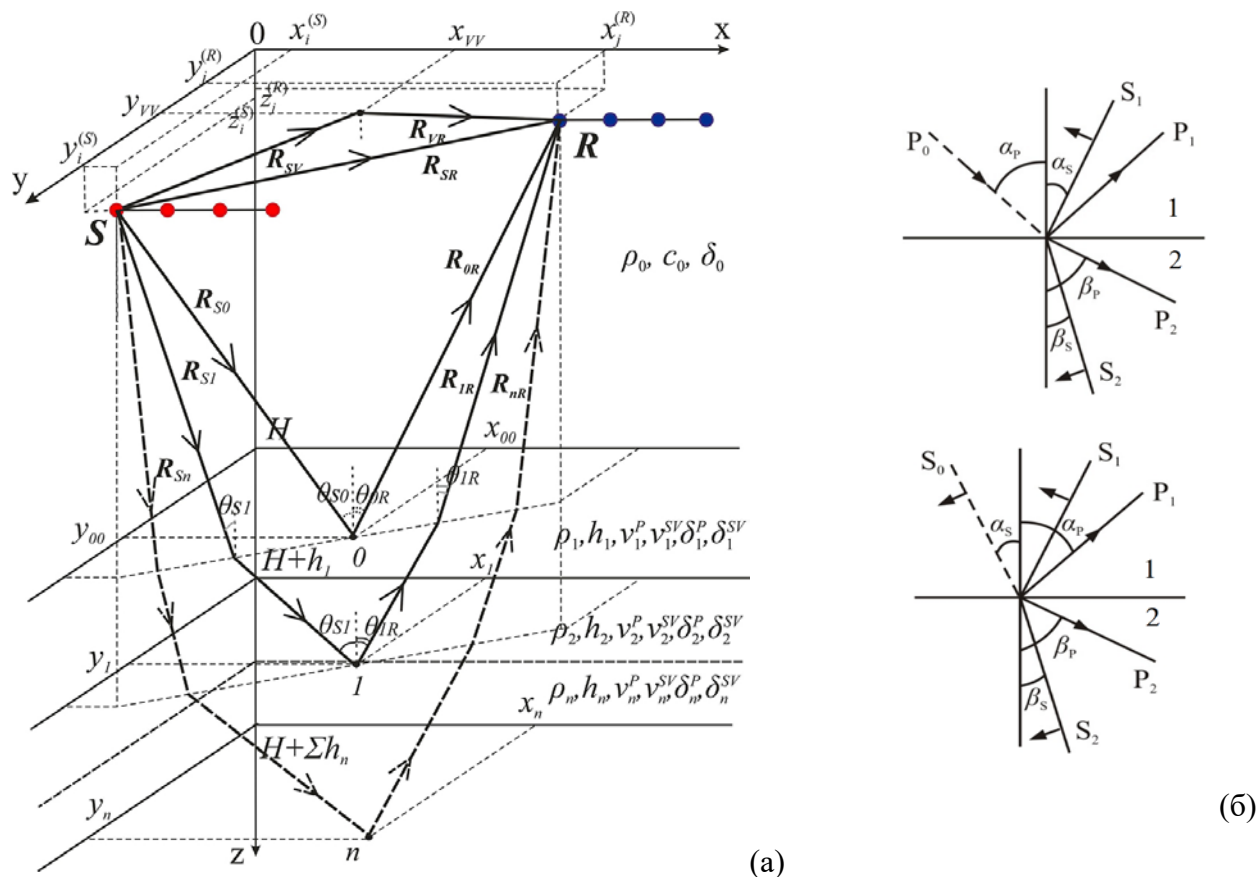


Рисунок 1.1 – Формирование отраженных импульсов от слоистого дна (а – траектория импульса при однократном отражении от нижней границы n -го слоя; б – отражение и преломление продольных (слева) и поперечных (справа) волн на границах упругих слоев)

Рассмотрим модель формирования когерентных сложно модулированных импульсов в море с упругим плоскостойким дном. Будем полагать, что гидроакустический волновод представляет собою однородный слой жидкости $0 < z < H$ с плотностью жидкости ρ_0 , скоростью распространения звука c_0 и декрементом затухания δ_0 . Дно, согласно принятой геофизической модели, будем представлять последовательностью из N упругих слоев, высотой h_n , $n=1..N$. Нижний упругий слой считаем бесконечно глубоким: $h_{N+1} = \infty$. Будем рассматривать помещенную в океанический волновод систему наблюдения, состоящую из совокупности (S) ненаправленных независимых друг от друга когерентных излучателей звука S_i , размещенных в точках множества $\{\mathbf{r}_i^{(S)} = (x_i^{(S)}, y_i^{(S)}, z_i^{(S)})\}$, $i=1..K_S$ (излучающая антенна), и, расположенной на

относительно небольшом горизонтальном расстоянии от излучателя, системы (R) ненаправленных гидрофонов R_j , расположенных в точках множества $\{\mathbf{r}_j^{(R)} = (x_j^{(R)}, y_j^{(R)}, z_j^{(R)})\}$, $j=1\dots K_R$ (приемная антенна) (рис. 1.1,слева). Излучателем S_i возбуждается импульсный сигнал $g_i(\omega) = C_i(\omega) g_S(\omega)$, где $g_S(\omega)$ - спектральная плотность импульса, $C_i(\omega)$ — комплексная амплитуда возбуждения i -го излучателя.

Рассмотрим полное поле, отраженное от дна, состоящего из упругих слоев в которых плотности — ρ_k , скорости продольных (p -волн) и поперечных (sv -волн) волн в слое k — $v_k^{(0)}$ и $v_k^{(1)}$, соответственно, декременты затухания — $\delta_k^{(0)}$ и $\delta_k^{(1)}$, волновые числа — $k_k^{(0)} = \omega / v_k^{(0)}$ и $k_k^{(1)} = \omega / v_k^{(1)}$. Рассмотрим точку приема R , расположенную внутри волновода на горизонтальном расстоянии r_{SR} от источника S . Пренебрегая волнами, испытывающими более чем двукратное прохождение через отдельные слои, представим спектральную амплитуду полного импульса в точке приема суммой волн, отраженных от нижних границ донных слоев:

$\hat{g}(\omega) = \sum_{n=1}^N \hat{g}_n(\omega)$, где $\hat{g}_n(\omega)$ — сумма волн, отраженных от нижней границы слоя $n=1, \dots, N$:

$\hat{g}_n(\omega) = \sum_{k=0}^{2^n-1} \hat{g}_n^{(k)}(\omega)$. Каждая из приходящих в приемник волн $\hat{g}_n^{(k)}$, отраженных от нижней

границы слоя n , может быть однозначно представлена своим номером k , записанным в двоичном коде $k = (s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2$, где $s_i, z_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, \dots, n$ — двоичные знаки, показывающие тип волны при ее прохождении через слой i : 0 — продольная, 1 — поперечная. При этом волны, которые распространяются вниз нумеруются первыми n индексами s_1, s_2, \dots, s_n , а вверх идущие волны — индексами z_n, \dots, z_1 . Например, волны, приходящие в приемник от нижней границы первого слоя, имеют следующие двоичные номера: $(00)_2$ - продольная вниз и продольная вверх волны, $(01)_2$ - продольная вниз и поперечная вверх волны, $(10)_2$ - поперечная вниз и продольная вверх волны, $(11)_2$ - поперечная вниз и поперечная вверх волны.

Поэтому $\hat{g}(\omega) = \sum_{n=1}^N \hat{g}_n(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{2^n-1} \hat{g}_n^{(k)}(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{s_1=0}^1 \dots \sum_{s_n=0}^1 \sum_{z_n=0}^1 \dots \sum_{z_1=0}^1 \hat{g}_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega)$. Полагая для

удобства $s_0 = z_0 = 0$ (волна в жидкости всегда продольная), представим каждое из полей

$\hat{g}_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega)$ в малоугловом приближении в виде:

$$\hat{g}_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega) = \frac{g_S(\omega) e^{-i\phi_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} - \Delta_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}}}{R_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}} \prod_{m=0}^{n-1} W_{m,m+1}^{(s_m)}(\theta_{mn}^{(s_m)}) V_n^{(s_n z_n)}(\theta_{mn}^{(s_n)}) \prod_{m=n}^1 W_{m,m-1}^{(z_m)}(\theta_{mn}^{(z_m)}), \quad (1.1)$$

где $R_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} = R_{S_n} + \sum_{m=1}^n R_{mn}^{(s_m)} + \sum_{m=n}^1 R_{mn}^{(z_m)} + R_{nR}$ — полное расстояние, которое проходит волна,

$\varphi_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega) = k_0 (R_{S_n} + R_{nR}) + \sum_{m=1}^n k_m^{(s_m)} R_{mn}^{(s_m)} + \sum_{m=n}^1 k_m^{(z_m)} R_{mn}^{(z_m)}$ — полный фазовый набег волны,

$\Delta_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega) = (R_{S_n} + R_{nR}) \delta_0(\omega) + \sum_{m=1}^n R_{mn}^{(s_m)} \delta_m^{(s_m)}(\omega) + \sum_{m=n}^1 R_{mn}^{(z_m)} \delta_m^{(z_m)}(\omega)$ — полный коэффициент

затухания. Для волны типа $(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2$, приходящей от источника S в приемник R , начальный угол падения на дно приближенно равен

$\theta^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} = r_{SR} \left(2H - z_R - z_S + \frac{1}{c_0} \sum_{m=1}^n v_m^{(s_m)} h_m + \frac{1}{c_0} \sum_{m=n}^1 v_m^{(z_m)} h_m \right)^{-1}$. Угол падения этой волны $\theta_{mn}^{(s_m, z_m)}$ на

слой m задается по начальному углу падения $\theta^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}$ законами преломления Снеллиуса, а

расстояние, которое она проходит в этом слое (рис.1, слева), $R_{mn}^{(s_m, z_m)} = h_m \sqrt{1 + \left(\frac{v_m^{(s_m, z_m)}}{c_0} \theta_{mn}^{(s_m, z_m)} \right)^2}$.

Далее, $W_{m, m+1}^{(s_m s_{m+1})}(\theta)$ — коэффициент преломления волны типа s_m в волну типа s_{m+1} при переходе

ее из слоя m в слой $m+1$ под углом падения θ на нижнюю границу слоя m , $W_{m, m-1}^{(z_m z_{m-1})}(\theta)$ —

коэффициент преломления волны типа z_m в волну типа z_{m-1} при переходе ее из слоя m в слой

$m-1$ под углом падения θ , $V_n^{(s_n z_n)}(\theta)$ — коэффициент отражения волны типа s_n в волну типа z_n

от нижней границы слоя n под углом падения на нее θ . Коэффициенты отражения и преломления для волн всех типов, падающих из слоя 1 на границу со слоем 2 (рис. 1.1),

определяются формулами Цёппритца [54]:

- коэффициент отражения p -волны при падении p -волны

$$V_P^P = 1 - \frac{2}{D} [\gamma_1 \gamma_2 (m \sin \alpha_p \cos 2\beta_s - \cos 2\alpha_s \sin \beta_p)^2 + \gamma_1 \cos \beta_p \cos \beta_s \times \\ \times (\cos 2\alpha_s + 2m\gamma_2 \sin \beta_s \sin \alpha_p)^2 + m\gamma_2 \cos \beta_p \cos \alpha_s],$$

- коэффициент отражения sv -волны при падении p -волны

$$V_P^{sv} = \frac{2 \cos \alpha_p}{D} [2 \cos \beta_p \cos \beta_s (2m\gamma_2 \sin \alpha_p \sin \beta_s + \cos 2\alpha_s) \cdot (m\gamma_2 \sin \beta_s - \gamma_1 \sin \alpha_s) + \\ + \gamma_2 (m \cos 2\beta_s + 2\gamma_1 \sin \alpha_s \sin \beta_p) \cdot (m \sin \alpha_p \cos 2\beta_s - \sin \beta_p \cos 2\alpha_s)],$$

- коэффициент отражения p -волны при падении sv -волны

$$V_{sv}^P = \frac{2\gamma_1 \cos \alpha_s}{D} [2 \cos \beta_p \cos \beta_s (2m\gamma_2 \sin \alpha_p \sin \beta_s + \cos 2\alpha_s) \cdot (m\gamma_2 \sin \beta_s - \gamma_1 \sin \alpha_s) + \\ + \gamma_2 (m \cos 2\beta_s + 2\gamma_1 \sin \alpha_s \sin \beta_p) \cdot (m \sin \alpha_p \cos 2\beta_s - \sin \beta_p \cos 2\alpha_s)],$$

- коэффициент отражения sv -волны при падении sv -волны

$$V_{SV}^{SV} = 1 - \frac{2 \cos \alpha_s}{D} [4 \cos \beta_s \cos \beta_p \cos \alpha_p (m \gamma_2 \sin \beta_s - \gamma_1 \sin \alpha_s)^2 + \\ + \gamma_2 \cos \alpha_p (m \cos 2\beta_s + 2\gamma_1 \sin \alpha_s \sin \beta_p)^2 + m \gamma_2 \cos \beta_p],$$

- коэффициент преломления p -волны при падении p -волны

$$W_p^P = \frac{2 \cos \alpha_p}{D} [m \gamma_2 \cos(2\beta_s - \alpha_s) + \gamma_1 \cos(2\alpha_s - \beta_s)],$$

- коэффициент преломления sv -волны при падении p -волны

$$W_p^{SV} = -\frac{2 \cos \alpha_p}{D} [m (\sin \alpha_s - 2\gamma_2 \sin \beta_s \cos(\beta_p - \alpha_s)) + \gamma_1 \sin(2\alpha_s - \beta_p)],$$

- коэффициент преломления p -волны при падении sv -волны

$$W_{SV}^P = -\frac{2\gamma_1 \cos \alpha_s}{D} [m \gamma_2 \sin(2\beta_s - \alpha_p) + (\sin \beta_s - 2\gamma_1 \sin \alpha_s \cos(\alpha_p - \beta_s))],$$

- коэффициент преломления sv -волны при падении sv -волны

$$W_{SV}^{SV} = \frac{2\gamma_1 \cos \alpha_s}{D} [m (\gamma_2^2 \sin \alpha_p \sin 2\beta_p + \cos 2\beta_s \cos \alpha_p) + \\ + (\gamma_1^2 \sin 2\alpha_p \sin \beta_p + \cos 2\beta_s \cos \alpha_p)],$$

где $\gamma_{1,2} = \frac{v_{1,2}^{(1)}}{v_{1,2}^{(0)}}$, $m = \frac{\rho_2 v_2^{(0)}}{\rho_1 v_1^{(0)}}$, $\frac{\sin \alpha_p}{v_1^{(0)}} = \frac{\sin \alpha_s}{v_1^{(1)}} = \frac{\sin \beta_p}{v_2^{(0)}} = \frac{\sin \beta_s}{v_2^{(1)}}$ (закон Снеллиуса),

$$D = m^2 \gamma_2 \cos(\alpha_p - \alpha_s) (\cos^2 2\beta_s + \gamma_2^2 \sin 2\beta_s \sin 2\beta_p) + \gamma_1 \cos(\beta_p - \beta_s) (\cos^2 2\alpha_s + \gamma_1^2 \sin 2\alpha_s \sin 2\alpha_p) + \\ + m [\gamma_1 \cos \alpha_p \cos \beta_s + \gamma_2 \cos \beta_p \cos \alpha_s - 2\gamma_1 \gamma_2 \sin(2\alpha_s - \alpha_p \sin(2\beta_s - \beta_p))].$$

В используемом геометроакустическом приближении параметры отраженных от границ слоев волн зависят от частоты: $\hat{g}_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega) = A_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} g_S(\omega) e^{-i\omega \tau_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}}$, где

$$A_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} = \frac{1}{R_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}} \prod_{m=0}^{n-1} W_{m,m+1}^{(s_m s_{m+1})}(\theta_{mm}^{(s_m)}) V_n^{(s_n z_n)}(\theta_{nn}^{(s_n)}) \prod_{m=n}^1 W_{m,m-1}^{(z_m z_{m-1})}(\theta_{mm}^{(z_m)}) e^{-\Delta_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega_0)},$$

$\Delta_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega_0)$ — коэффициент затухания на центральной частоте импульса.

С учетом представленных выше выражений, суммарная спектральная амплитуда принимаемого импульса будет определяться следующим образом:

$$\hat{g}_R(\omega) = \sum_{n=1}^N \hat{g}_n(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{2^n-1} \hat{g}_n^{(k)}(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{s_1=0}^1 \dots \sum_{s_n=0}^1 \sum_{z_n=0}^1 \dots \sum_{z_1=0}^1 \hat{g}_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}(\omega) = \\ = \sum_{n=1}^N \sum_{s_1=0}^1 \dots \sum_{z_1=0}^1 A_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} g_S(\omega) e^{-i\omega \tau_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}}. \quad (1.2)$$

При этом принимаемый импульсный сигнал будет определяться выражением:

$$g_R(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{s_1=0}^1 \dots \sum_{z_1=0}^1 A_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} g_S(t - \tau_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}), \quad (1.3)$$

где $\tau_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} = \frac{R_{Sn} + R_{nR}}{v_0} + \sum_{m=1}^n \frac{R_{mn}^{(s_m)}}{v_m^{(s_m)}} + \sum_{m=n}^1 \frac{R_{mn}^{(z_m)}}{v_m^{(z_m)}}$ — время распространения волны от источника к приемнику.

Будем осуществлять фильтрацию поступившего на приемную систему сигнала с помощью согласованного фильтра $G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g_R(t) g_S^*(t-\tau) dt$. С учетом принятых выше определений сигнал с выхода согласованного фильтра будет определяться следующим выражением:

$$G(\tau) = \sum_{n=1}^N \sum_{s_1=0}^1 \dots \sum_{z_1=0}^1 A_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2} F_S(\tau - \tau_n^{(s_1 \dots s_n z_n \dots z_1)_2}), \quad (1.4)$$

где τ — параметр фильтра, $F_S(\tau)$ — функция неопределенности импульсного сигнала

$$F_S(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g_S(t) g_S^*(t-\tau) dt.$$

1.2. Анализ применимости развитой модели формирования отраженных от слоистого дна когерентных акустических импульсов

Геометракустическая модель, для которой полагается, что все неоднородности имеют характерные размеры много больше длины волны поля, используемая для анализа формирования когерентных акустических импульсов в море с дном в виде упругих слоев и учитывающая реверберацию, является приближенной. Ее применение обосновано, если при зондировании морского дна будут выполняться некоторые условия. К таким условиям относятся следующие положения:

1. При отражении поля точечного источника от границ раздела слоев используется формула для коэффициентов отражения плоских волн; расстояния от излучателя и приемника до дна должны быть много больше, чем длина волны. Так, для примера, при типичных условиях зондирования в море, $H = 200 \div 600 \text{ м}$, $x_S = 0 \text{ м}$, $z_S = 30 \text{ м}$, $x_R = 60 \text{ м}$, $z_R = 3 \text{ м}$, $y_S = y_R$, центральная частота излучаемого сигнала примерно 200 - 700 Гц длины волны $\lambda \approx 7,5 - 2 \text{ м}$. Тогда $|H - z_S|, |H - z_R| \gg \lambda$.

2. Диапазон углов падения зондирующего сигнала ограничивается величиной порядка 10° . Так, поскольку угол при отражении от дна: $\theta_{00} = \arctan \frac{\sqrt{(x_R - x_S)^2 + (y_R - y_S)^2}}{2H - z_R - z_S}$, для

типичных параметров модели наблюдения максимальная величина угла падения $\theta_{00} = 9,5^\circ$ при

$H = 200\text{м}$, и $\theta_{00} = 3^0$ при $H = 600\text{м}$, остальные акустических компоненты от более глубоких границ будут отражаться под меньшими углами.

3. В модели слоистого дна будем полагать, что слои горизонтально-однородные. Будем считать слои однородными по всем направлениям внутри каждого, а границы между слоями плоскими, т.е. $\sigma \ll \lambda$, где $\sigma = \sqrt{\langle \zeta^2 \rangle}$ - среднеквадратическое смещение неровной поверхности от ее среднего уровня, $z = \zeta(\mathbf{r})$ - уравнение границы, $\mathbf{r} = \{x, y\}$, λ - длина волны.

4. В модели формирования реверберации случайные неоднородности предполагаются плавными и крупными (параметр Релея $\gg 1$).

5. Многократность рассеяния не учитывается. Двукратно отраженные от границ слоев акустических импульсы, а тем более многократно отраженные импульсы намного слабее по интенсивности. В этой ситуации, будем, рассматривать лишь преломленные и однократно отраженные от границ донных слоев компоненты сложного суммарного акустических поля.

Данные приближения позволяют применить лучевой метод для расчета амплитуд акустических импульсов в море с дном в виде слоистого полупространства, неоднородным по высоте донным рельефом и ветровым волнением.

1.3. Анализ структуры сложных акустических импульсов при когерентном зондировании в море со слоистым дном

Развитая выше модель позволяет исследовать взаимосвязь основных параметров задачи и на этой основе оптимизировать решающие правила, обеспечивающие максимальное накопление полезных сигналов, а также снизить требования к априорным данным, то есть, найти наилучшую процедуру поиска решения обратной задачи. Согласно используемой модели, спектральная плотность отраженных от упругого слоистого дна сигналов зависит от взаимного положения источника и точки приема, параметров зондирующих импульсов, а также геоакустических параметров и толщины слоев. Зависимости модуля коэффициентов отражения продольной и поперечной волны от углов для границ из модели слоистого дна характеризуются многочисленными особенностями, в частности, имеется ряд критических углов, при которых наблюдается полное внутреннее отражение, а также возбуждаются граничные волны. Кроме того, фаза отраженной волны может существенно меняться. На структуру отраженного от слоистого полупространства акустического поля существенно влияет частотно зависимое затухание, которое, в общем случае, проявляется и в коэффициентах отражения и преломления, например, наиболее сильно при критических углах возбуждения граничных волн Релея [18]. Как показывают расчеты, для типичных наблюдаемых в натуральных условиях характеристик

упругих сред, указанные выше эффекты обычно проявляются при углах падения и наблюдения, превышающих 20° - 30° . В рамках развиваемой в настоящем исследовании модели будем полагать, что углы падения и наблюдения не превышают десяти градусов.

Число акустических импульсов, отраженных от слоистого упругого дна. Поскольку при пересечении каждой из границ упругого слоя возникают две упругие волны – продольная и поперечная, число импульсов, отраженных от слоистого полупространства будет равно $k = 1 + \sum_{i=1}^N 4^i$, то есть, например, при модели из десяти слоев, полное число импульсов приближается к 10^6 . Каждый из таких импульсов несет информацию о донных слоях. При этом, для каждого лежащего на большой глубине слоя формируется целая совокупность отраженных от его границ импульсов, которые возникают при преломлении на всех выше лежащих слоях по мере распространения зондирующих импульсов от источника к приемной системе. Такие импульсы распределяются по большому интервалу задержек. Кроме того, имеют место эффекты многократного отражения, когда импульсы, прежде чем достигнут точки расположения приемника, могут отразиться несколько раз от границ слоев. В этом случае число наблюдаемых импульсов может многократно возрасти так, что весь интервал задержек приходов импульсов будет заполнен большим количеством импульсов, которые в результате интерференции формируют спекл-подобную квазистохастическую структуру. Реконструируемая при решении обратной задачи информация о донных слоях содержится в параметрах отраженных от дна импульсов, их задержках, амплитудах и фазах. Однако выше лежащие слои маскируют (искажают) нижележащие слои. То есть в акустическом сигнале, отраженном от заглубленного слоя, содержится информация и обо всех вышележащих слоях. В результате из-за сложности структуры отраженных акустических импульсов выделить информацию об отдельном глубоко лежащем слое трудно, либо невозможно, особенно при увеличении глубины акустических зондирования, когда вследствие затухания и потерь при отражении и преломлении уровень полезных сигналов становится очень малым.

Многократное рассеяние импульсов в дне. Необходимо отметить, что двукратно отраженные от границ слоев акустических импульсы, а тем более многократно отраженные импульсы намного слабее по интенсивности. В этой ситуации, будем, прежде всего, использовать и анализировать возможности использования при акустических зондировании морского дна лишь преломленные и однократно отраженные от границ донных слоев компоненты сложного суммарного акустических поля.

Структура акустических импульсов, рассеянных морским дном. В число акустических поля компонент входят прямое поле g от источника, а также поле, отраженное морской поверхностью $g^{(v)}$, которые не зависят от донных параметров, и являются помехами при

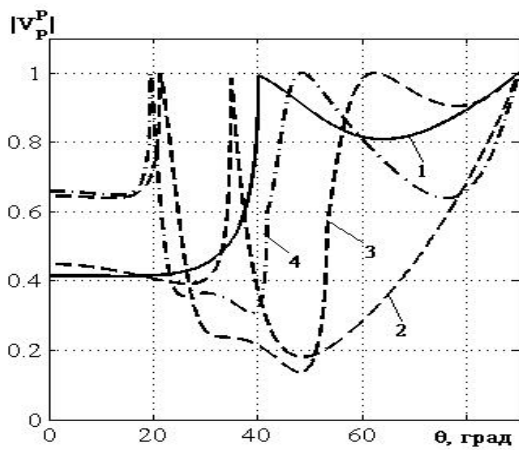
реконструкции дна. Другой особенностью является то, что поле $g^{(0)}$, отраженное верхней границей первого донного слоя, зависит только от параметров этого верхнего слоя. Кроме этого, заметим, что поле $g^{(1)}$, отраженное верхней границей второго донного слоя, зависит только от параметров первых двух слоев. Аналогичные особенности имеют место и для границ остальных слоев. Наконец, отраженное верхней границей слоя N поле $g^{(N)}$ зависит от всех волновых компонент. Для морского дна в виде слоистого полупространства, амплитуды компонент $g, g^{(V)}, g^{(0)}, \dots, g^{(N)}$ чаще всего монотонно убывают (мощность первых двух на 10-20 дБ превосходит мощности прочих), а времена прихода соответствующих компонент полей на антенну монотонно возрастают [12, 32]. Если донные слои достаточно толстые, а зондирование дна осуществляется достаточно короткими акустическими импульсами, волновые компоненты, соответствующие различным слоям не пересекаются и не интерферируют. В общем случае отраженные от каждой границы сигналы представляют собою наборы распределенных по оси задержек акустических импульсов. При этом суммарный, отраженный от дна сигнал имеет сложную интерференционную структуру. По мере заглубления границы, число отраженных от нее акустических импульсов быстро нарастает, их амплитуды уменьшаются, и они распределяются во все большем интервале задержек. Результирующее отраженное от слоистого упругого дна акустическое поле может выглядеть сильно изрезанным, приобретая хаотический вид. Идентификация волн в таких условиях возможна лишь с помощью априорной информации в виде модели. При этом реконструкцию можно осуществлять только последовательно, начиная от самого верхнего слоя, продвигаясь к нижележащим слоям. В любом случае, оптимизация поиска решений в многомерном пространстве параметров возможна лишь при использовании закономерностей формирования акустических сигналов и связей всех параметров.

Число и комплексные амплитуды отраженных от слоистого дна сигналов зависят от упругих характеристик сред и характеризуются многочисленными особенностями, которые учитываются в развитой в диссертации модели формирования сигналов. В общем случае, падающая на границу между двумя упругими средами плоская звуковая волна образует четыре плоские волны: две отраженные и две преломленные. Количество возникающих отраженных и преломленных волн зависит от упругих свойств сред. При достаточно малых углах падения (можно приближенно полагать малыми углы меньше 10°) все отраженные и преломленные волны представляют собой плоские волны, уносящие энергию падающего излучения от границы раздела. Однако, например, если скорость поперечной волны $v'_{1,2}$ для какой-либо преломленной волны $t_{1,2}$ больше скорости продольной v^i_1 падающей волны, то для углов

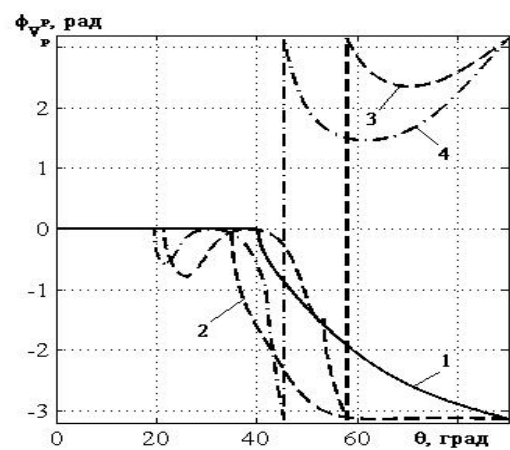
падения θ^i , больших так называемого критического угла $(\theta^i)_{1,2}^{t_{sp}} = \arcsin \frac{v_1^i}{v_{1,2}^i}$, нормальная компонента $(\mathbf{k}_{1,2}^i)_n$ волнового вектора соответствующей преломленной волны становится мнимой, а сама прошедшая волна превращается в неоднородную волну, бегущую вдоль поверхности раздела и экспоненциально убывающую вглубь среды 2. Однако падение волны на границу раздела под углом, большим критического $(\theta^i)_{1,2}^{t_{sp}}$, может и не приводить к полному отражению, поскольку энергия падающего излучения может проникать во вторую среду в виде волн другой поляризации. На рис. 1.2 – рис. 1.4 показаны, в качестве примеров, амплитудные и фазовые характеристики коэффициентов отражения и преломления от границ двух упругих сред (параметры сред указаны в таблице 1.1) в зависимости от углов падения продольной волны. Отметим, что анализ структуры таких коэффициентов для различных сред и углов падения позволяет априорно выявить особенности формирования отраженных от упругого слоистого дна импульсов, классифицировать их и учитывать их при решении обратной задачи, например, при регуляризации задачи, когда следует удалить из поиска параметры, содержащиеся в не отражающихся от границ волнах.

Таблица 1.1 – Расчетные параметры

Среда	$\rho, \text{кг/м}^3$	$v^P, \text{м/с}$	$v^{SV}, \text{м/с}$
верхняя среда - глина	1600	2000	400
(1) песчаники	2500	3100	1000
(2) мергель	2400	3500	1800
(3) доломит	2700	5500	2500
(4) известняк	2600	6000	3000



(а)



(б)

Рисунок 1.2 – Модуль (а) и фаза (б) коэффициента отражения продольной волны при падении продольной волны на границу двух упругих сред

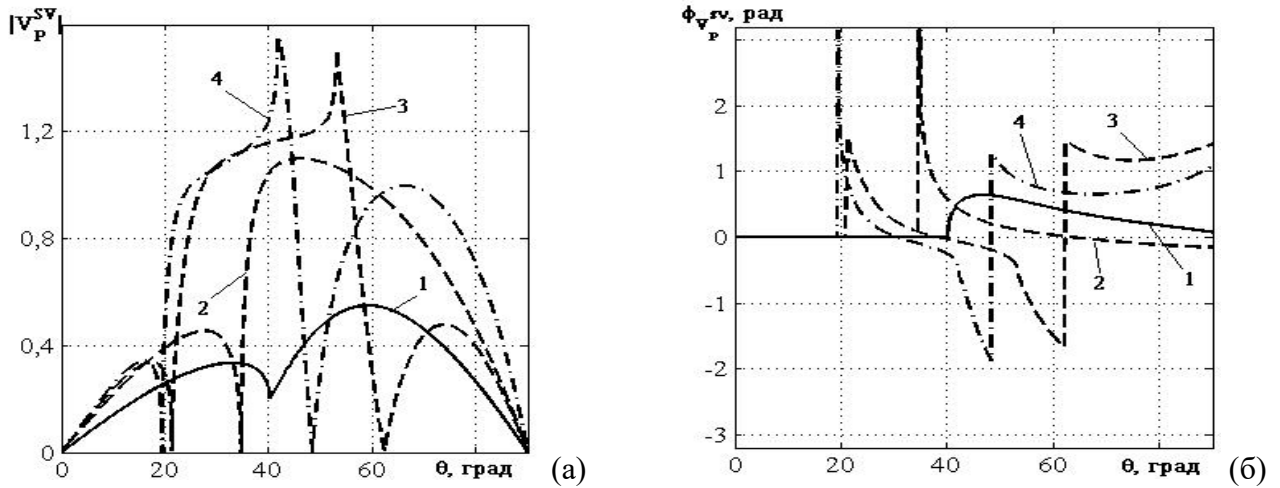


Рисунок 1.3 – Модуль (а) и фаза (б) коэффициента отражения поперечной волны при падении продольной волны на границу двух упругих сред

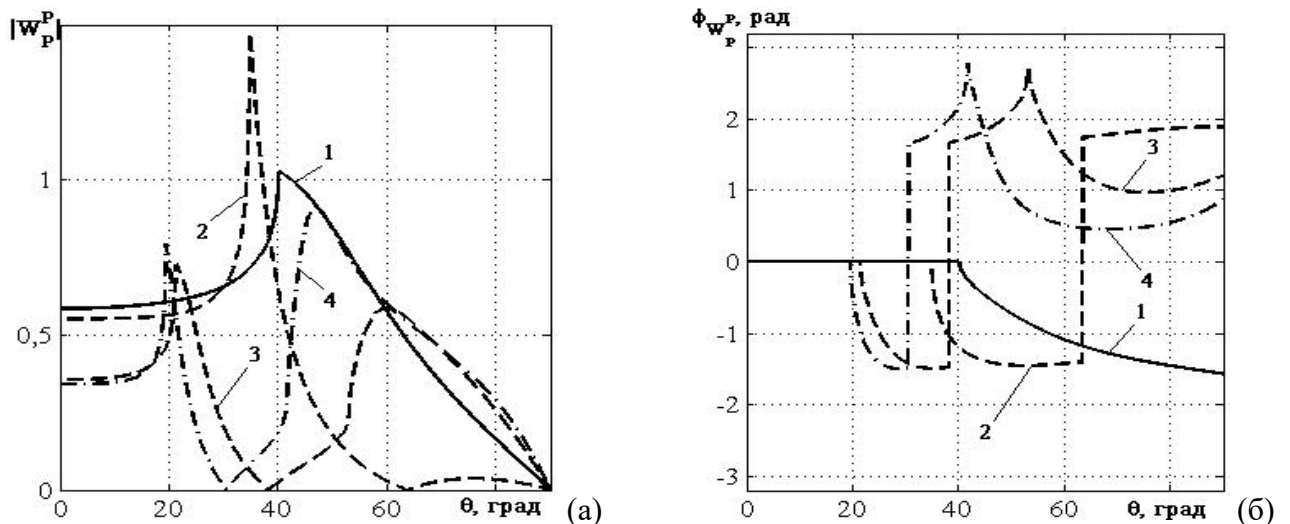


Рисунок 1.4 – Модуль (а) и фаза (б) коэффициента прохождения продольной волны при падении продольной волны на границу двух упругих сред

Рассмотрим, с помощью развитой выше модели, структуру акустических импульсов для типичных условий морского шельфа, структура дна которого имеет вид полупространства из совокупности упругих слоев (рис. 1.5, слева). На рис. 1.5 справа показаны результаты расчетов структуры акустических импульсов с выхода согласованного фильтра, отраженных от дна из шести упругих слоев, включающих слой газогидратов (слой №5), лежащих на упругом полупространстве. Зондирующие ЛЧМ импульсы с окном Блэкмана-Харриса, длительностью 0.125 сек, возбуждались в полосе частот Δf от 150 до 250 Гц, источником с мощностью 300 Вт. На рис. 1.5 (б) сверху представлена реализация суммарного отраженного от заданного слоистого дна сигнала, а снизу приведены отдельные компоненты импульса до интерференции,

соответствующие суммам всех монотипных и обменных волн, которые образуются при отражении от нижней границы каждого слоя. Тонкими стрелками на рис.1.5 обозначена верхняя граница слоя газогидратов, которая из-за наличия в вышележащих слоях упругих волн, имеет множество пиков, влияющих на общий суммарный сигнал. Толстой стрелкой обозначена нижняя граница слоя газогидратов, которую на интерференционной картине, вследствие большого затухания и наложения других отражений, сложно идентифицировать.

Видно, что отраженные от разных границ импульсы, соответствующие различным волновым компонентам пересекаются. При их интерференции формируется сложная структура, интерпретация которой, в частности, идентификация компонент, затрудняется. В целом, видно, что уровни различных волновых компонент, отраженных от слоистого полупространства, отличаются на 2-4 порядка, причем средние их значения быстро спадают с глубиной. Волновые компоненты, связанные с переизлучением энергии в поперечные волны, в целом, относительно малы, так, что их измерение возможно лишь при высоком уровне излучения и слабых помехах и шумах.

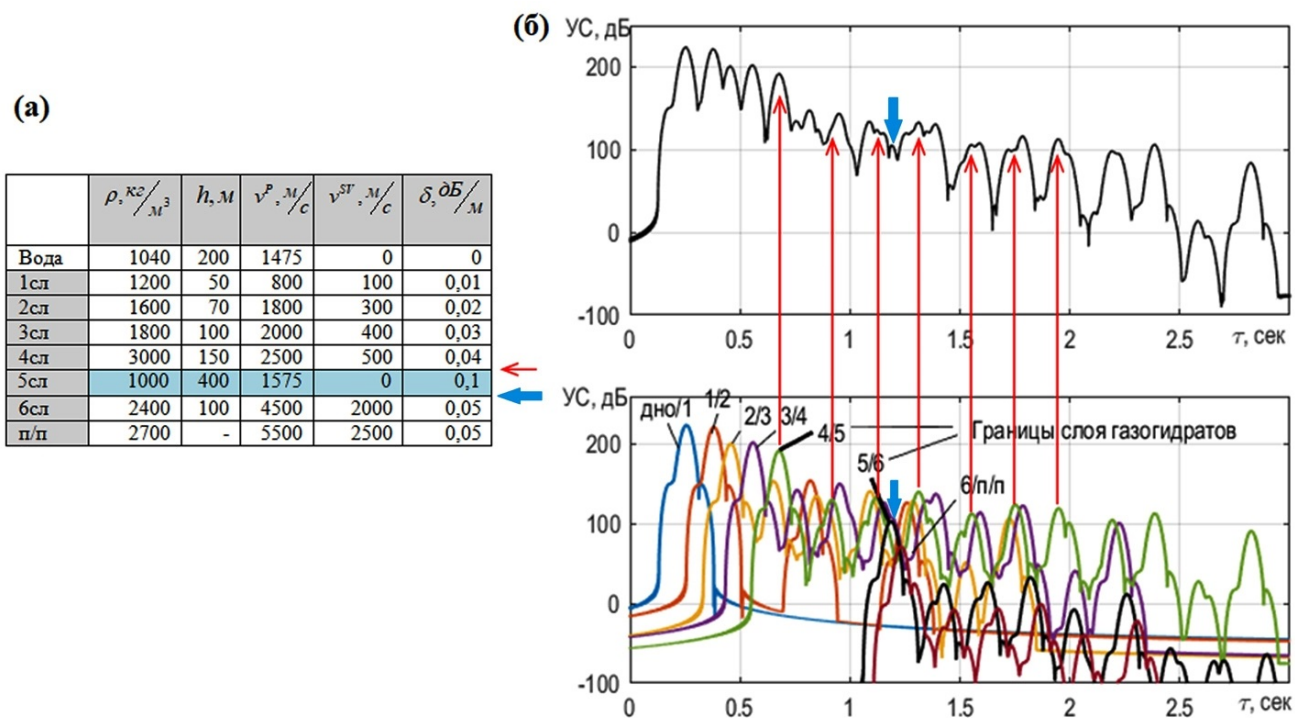


Рис. 1.5 – (а) – геоакустическая модель дна; (б) – реализация сигнала, отраженного от морского дна в виде шести упругих слоев на упругом полупространстве (сверху - суммарный сигнал, снизу - компоненты импульса, представляющие собой суммы всех монотипных и обменных волн, отраженных от каждой границы)

Из сравнения уровней рассчитанных сигналов и помех и типичных условиях наблюдения (рис. 1.5 (а)), можно приближенно оценить возможность реконструкции параметров слоев с

достаточно контрастными границами при их залегании на глубинах порядка 200÷300 метров. Существует возможность улучшения ситуации путем наращивания мощности зондирующих импульсов, а также подавления шумов и помех буксировщика. Однако такие возможности требуют преодоления многочисленных технических трудностей и повышают требования к экспериментальному оборудованию. Кроме того, остается требование минимизации экологического урона, что накладывает предел увеличению мощности зондирующих сигналов.

1.4. Разработка модели реверберационных помех, возникающих при когерентном акустическом зондировании морского дна за счет рассеяния на случайных неоднородностях донной поверхности и взволнованной поверхности воды

При акустическом зондировании морского дна, во всем диапазоне частот и задержек при измерениях, полезные сигналы маскируются мультипликативными реверберационными помехами, возникающими за счет рассеяния зондирующих импульсов на всех случайных граничных и объемных неоднородностях водной толщи и дна. Как показывают оценки, наибольший вклад в реверберационную помеху вносит рассеяние на донной поверхности, а также рассеяние на ветровом волнении. В отличие от когерентных составляющих поля, отражающихся от границ слоев дна по зеркальному закону, реверберация происходит на неоднородностях во всех точках границы дна и поверхности моря.

1.4.1. Реверберационные помехи, возникающие при рассеянии когерентных акустических зондирующих импульсов на случайных неоднородностях донного рельефа

Спектральная плотность мощности донной реверберации от источника S на приемник R может быть найдена интегрированием углового спектра по полному телесному углу Ω_R лучей, приходящих на отдельный гидрофон приёмной антенны:

$$\left|g^{(b)}(\omega)\right|^2 = \int \int_{\Omega_R} N_b(\mathbf{e}_R, \omega) d\Omega(\mathbf{e}_R). \quad (1.5)$$

Для углового спектра донной реверберации будем использовать метод касательной плоскости Бреховских-Исаковича [12]:

$$N_b(\mathbf{e}_R, \omega) = \frac{1}{R_{QR}^2} \left| \Lambda_0(\mathbf{e}_R) \right|^2 \frac{1}{\left| \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{n} \rangle \right|} m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) I^{(S)}(Q, \omega), \quad (1.6)$$

$$I^{(S)}(Q, \omega) = \frac{\left| \hat{g}_S(\omega) \right|^2}{R_{SQ}^2}, \quad (1.7)$$

$$\Delta_0(\mathbf{e}_R) = \exp\left[-\delta_0(R_{SQ} + R_{QR})\right], \quad (1.8)$$

где $\Delta_0(\mathbf{e}_R)$ — коэффициент затухания звука в воде, $m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ — коэффициент (зеркального) рассеяния высокочастотного звука в точке дна $Q = Q(\mathbf{e}_R)$, описываемый формулой [12]:

$$\begin{aligned} m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) &= \frac{(V\tilde{F})^2}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{\kappa^2}{2\delta^2 q^2}\right), \\ \tilde{F} &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\kappa^2}{q^2}\right), \quad q^2 = (e_{1z} - e_{2z})^2, \\ \kappa^2 &= \|\mathbf{e}_{1\perp} - \mathbf{e}_{2\perp}\|^2 = (e_{1x} - e_{2x})^2 + (e_{1y} - e_{2y})^2, \end{aligned} \quad (1.9)$$

где $\mathbf{e}_1 \equiv \mathbf{e}_{SQ}$, $\mathbf{e}_2 \equiv \mathbf{e}_{QR}$ — направления падающей и рассеянной волн в точке Q соответственно, δ — среднеквадратичный наклон донной поверхности, $R_{SQ, RQ}$ — расстояния от точки Q до точек S и R , соответственно.

Суммарная донная реверберация при излучении импульсного сигнала:

$$p^{(bot)}(t) = \iint_{\Omega_R} d\Omega(\mathbf{e}^{(R)}) \frac{1}{\sqrt{\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{n} \rangle}} \left| \Delta_0(\mathbf{e}^{(R)}) \right| \sqrt{m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)} \xi(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \frac{1}{R_{SQ} R_{RQ}} g_S(t - \tau(\mathbf{e}^{(R)})), \quad (1.10)$$

где $\xi(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ — случайные амплитуды — независимые между собой нормальные величины с нулевыми средними и единичными дисперсиями, $\tau(\mathbf{e}_R) \equiv (R_{SQ} + R_{RQ})/c_0$. Соответственно, после согласованной фильтрации, получаем:

$$G^{(bot)}(\tau) = \sqrt{W} \iint_{\Omega_R} d\Omega(\mathbf{e}^{(R)}) \frac{1}{\sqrt{\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{n} \rangle}} \left| \Delta_0(\mathbf{e}^{(R)}) \right| \sqrt{m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)} \xi(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \frac{1}{R_{SQ} R_{RQ}} F_S(\tau - \tau(\mathbf{e}^{(R)})), \quad (1.11)$$

При этом $\langle G^{(bot)}(\tau) \rangle = 0$ и

$$\begin{aligned} \langle G^{(bot)}(\tau) \rangle^2 &= W \iint_{\Omega_R} d\Omega(\mathbf{e}^{(R)}) \frac{1}{\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{n} \rangle} \left| \Delta_0(\mathbf{e}^{(R)}) \right|^2 m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \frac{1}{R_{SQ}^2 R_{RQ}^2} \left| F_S(\tau - \tau(\mathbf{e}^{(R)})) \right|^2 = \\ &= \frac{W}{2\pi\delta^2} \int_0^{\pi/2} \frac{\text{tg } \theta_R}{R_{RQ}^2(\theta_R)} d\theta_R \int_0^{2\pi} d\varphi_R (V\tilde{F})^2 \frac{\exp\left(-\frac{\kappa^2}{2\delta^2 q^2} - 2\delta_0 c_0 \tau(\mathbf{e}^{(R)})\right)}{R_{SQ}^2(\theta_R, \varphi_R)} \left| F_S(\tau - \tau(\mathbf{e}^{(R)})) \right|^2, \end{aligned} \quad (1.12)$$

где $R_{SQ}(\theta_R, \varphi_R) = \sqrt{h_S^2 + (x_Q - x_S)^2 + (y_Q - y_S)^2}$, $R_{RQ}(\theta_R) = h_R / \cos \theta_R$ — расстояния от точки излучения до точки рассеяния и от точки рассеяния до точки приема соответственно, $h_R = H - z_R$, $h_S = H - z_S$, $q^2 = (e_{1z} - e_{2z})^2 = (\cos \theta_R + h_S / R_{SQ})^2$, $x_Q = x_R + h_R \text{tg } \theta_R \cos \varphi_R = x_R + R_{RQ}(\theta_R) \sin \theta_R \cos \varphi_R$, $y_Q = y_R + h_R \text{tg } \theta_R \sin \varphi_R = y_R + R_{RQ}(\theta_R) \sin \theta_R \sin \varphi_R$, $\kappa^2 = (e_{1x} - e_{2x})^2 + (e_{1y} - e_{2y})^2 = (\sin \theta_R \cos \varphi_R - (x_S - x_Q) / R_{SQ})^2 + (\sin \theta_R \sin \varphi_R - (y_S - y_Q) / R_{SQ})^2$. Время прихода

рассеянной волны: $\tau(\mathbf{e}_R) = (R_{RQ} + R_{SQ}) / c_0$. Коэффициент отражения от донной поверхности:

$$V = \frac{m \cos \theta_R - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_R}}{m \cos \theta_R + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_R}}, \text{ где } m = \frac{\rho_1}{\rho_0}, n = \frac{c_0}{c_1^{(0)}}.$$

Для того чтобы рассчитать реверберацию от наклонного дна (клина) применим следующий математический прием. Пусть дно – это плоскость, проходящая через точку $(0,0,H)$ и перпендикулярная вектору $\mathbf{n} = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha)$ (случай $\alpha = 0$ соответствует исходному горизонтальному дну). Тогда для расчета реверберации можно использовать ту же формулу (1.12), в которой следует сделать замены:

$$\begin{aligned} h_S &\rightarrow h'_S = (H - z_S) \cos \alpha, \\ h_R &\rightarrow h'_R = |x_R \sin \alpha \cos \beta + (z_R - H) \cos \alpha|, \\ x_R &\rightarrow x'_R = \sqrt{x_R^2 + (z - H)^2 - (h'_R)^2} + (H - z_S) \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1.13)$$

На рис. 1.6 представлены расчеты средней интенсивности донной реверберации (формула 1.12), приходящей на отдельные гидрофоны горизонтальной антенны для различных значений параметров τ и δ . T_i на рисунке 1.6 – это время прихода импульса от слоя i .

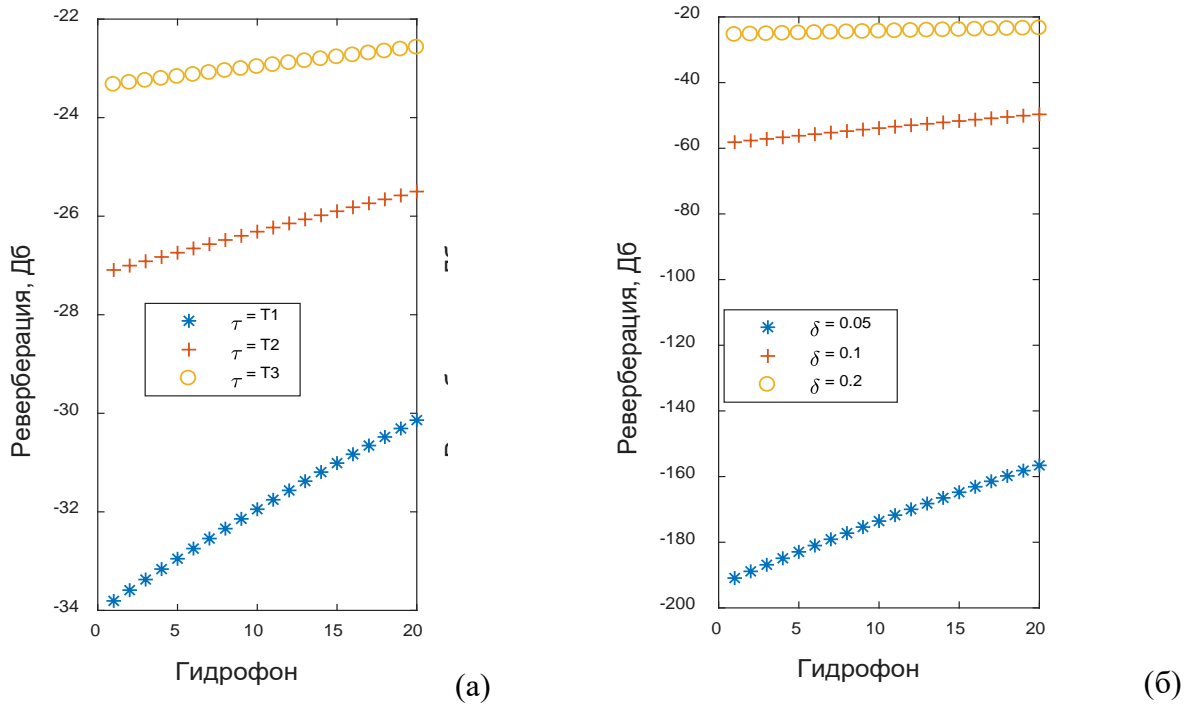


Рисунок 1.6 – Расчет средней интенсивности донной реверберации, приходящей на отдельные гидрофоны горизонтальной антенны: (а) – фиксирован параметр $\delta = 0.015$, (б) – фиксирован параметр $\tau = T1$

На рисунке 1.7 приведены расчеты средней интенсивности донной реверберации (формула 1.12) на выходе согласованного фильтра отдельного гидрофона, как функции задержки τ для различных углов наклона α , β и среднеквадратичных отклонений случайных неоднородностей рельефа дна δ (м). Параметры данных расчетов: $H = 200\text{ м}$ - глубина водного слоя, $z_S = 30\text{ м}$ - глубина расположения источника, $z_R = 3\text{ м}$ - глубина расположения приемника, $x_R = 60\text{ м}$ - расстояние между источником и приемником, $F_{pulse} = 200\text{ Гц}$ - начальная частота излучения, $\Delta F_{pulse} = 100\text{ Гц}$ - полоса ЛЧМ импульса, $T_{pulse} = 0.125$ - длительность импульса, $c_0 = 1475\text{ м/с}$ - скорость в воде, $\rho_0 = 1040\text{ кг/м}^3$ - плотность воды.

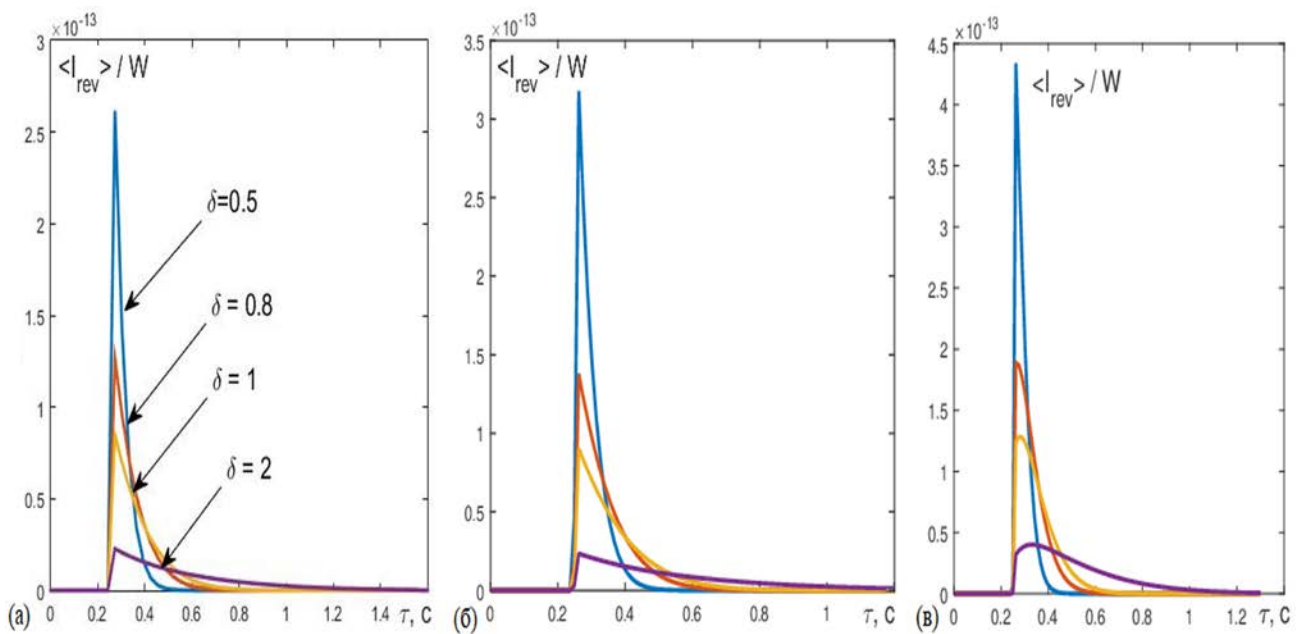


Рисунок 1.7 – Расчет средней интенсивности донной реверберации на выходе согласованного фильтра отдельного гидрофона как функция задержки τ для различных углов наклона α, β и среднеквадратичных отклонений случайных неоднородностей рельефа дна δ (м): (а) - $\alpha = \beta = 0$, (б) - $\alpha = \pi/4, \beta = 0$, (в) - $\alpha = 0, \beta = \pi/2$

Расчеты показывают, что поскольку параметр δ является среднеквадратичным наклоном локальных неоднородностей дна, распределенных по нормальному закону с нулевым средним, поэтому меньшим значениям δ отвечают более плоские поверхности. В частности, значение $\delta = 0$ соответствует плоскому горизонтальному дну. При импульсном зондировании реверберационные сигналы распределяются вдоль оси задержек в виде откликов согласованного фильтра, соответствующих рассеянию в импульсных объемах, имеющих форму эллиптических колец. Реверберация образуется импульсами, отражаемыми от неоднородностей дна со случайными амплитудами; значения амплитуд определяются диаграммами рассеяния с

максимумами, соответствующими зеркальным направлениям от источника к приемнику. Поэтому отражение от удаленных участков данной поверхности возможны только при наличии достаточно крутых неоднородностей, т.е. больших δ . При малых δ , когда наклоны неоднородностей малы, реверберация возможна только от малого участка (эллипса), лежащего на дне вблизи середины отрезка линии «источник-приемник». При этом, однако, амплитуды рассеянных импульсов большие, так как соответствующие диаграммы рассеяния узкие. С увеличением δ - области возможной реверберации расширяются. Соответственно растут времена приходящих импульсов, но падают амплитуды рассеянных импульсов. Уравнение эллипса, от границы которого отражаются импульсы со временами прихода τ , имеет вид:

$$\frac{(x-x(R))^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

$$a = \frac{R}{2} \sqrt{(1-y_1-y_2)^2 - 4y_1y_2}, \quad b = \sqrt{1 - \frac{x_R^2}{R^2}} a,$$

$$x(R) = \frac{1}{2}(1+y_1-y_2)x_R,$$

$$y_1 = \frac{(H-z_S)^2}{R^2-x_R^2}, \quad y_2 = \frac{(H-z_R)^2}{R^2-x_R^2}, \quad R = c_0\tau.$$
(1.14)

Минимальное время прихода импульса реверберации находится из уравнения:

$$\tau_{\min} = \frac{1}{c_0} \min_x \sqrt{x^2 + (H-z_S)^2} + \sqrt{(x-x_R)^2 + (H-z_R)^2}.$$

Для параметров рис. 1.7, $\tau_{\min} = 0.2521$, а

например, уравнение эллипса для $\tau = 0.2522$: $\frac{(x-27.7944)^2}{4.82729^2} + \frac{y^2}{4.76409^2} = 1$ (рис. 1.8).

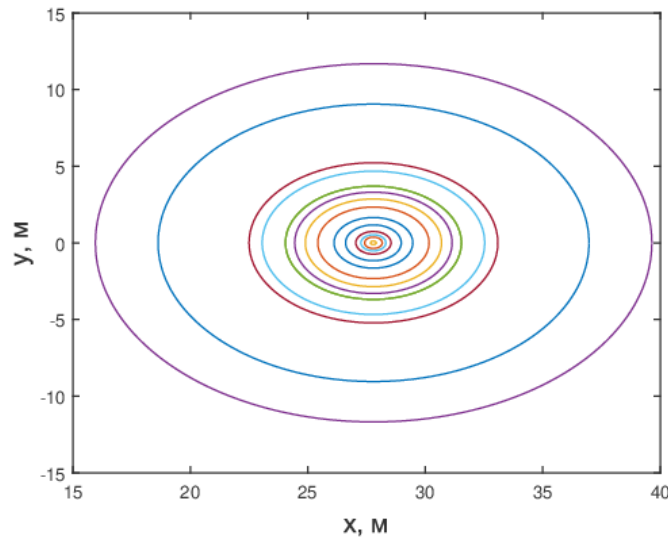


Рисунок 1.8 – Семейства эллипсов для времен запаздывания реверберационных импульсов от $\tau = \tau_{\min} = 0.2521$ до $\tau = 0.2526$.

1.4.2. Реверберационные помехи, возникающие при рассеянии когерентных акустических зондирующих импульсов на ветровом волнении

Для расчета ветровой реверберации будем использовать формулу, аналогичную (1.11)

$$G^{(surf)}(\tau) = \sqrt{W} \int \int_{\Omega_R} d\Omega(\mathbf{e}^{(R)}) \frac{1}{\sqrt{|\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{n} \rangle|}} \left| \Delta_0(\mathbf{e}^{(R)}) \sqrt{m_s(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)} \xi(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \frac{1}{R_{SQ} R_{RQ}} F_S(\tau - \tau(\mathbf{e}^{(R)})) \right|, \quad (1.15)$$

где $m_s(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ — коэффициент (зеркального) рассеяния высокочастотного звука в точке свободной поверхности $Q = Q(\mathbf{e}_R)$, описываемый формулой [12]:

$$m_b(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \frac{(V_{surf} \tilde{F})^2}{2\pi\delta_{surf}^2} \exp\left(-\frac{\kappa^2}{2\delta_{surf}^2 q^2}\right),$$

$$\tilde{F} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\kappa^2}{q^2}\right), \quad q^2 = (e_{1z} - e_{2z})^2, \quad (1.16)$$

$$\kappa^2 = \|\mathbf{e}_{1\perp} - \mathbf{e}_{2\perp}\|^2 = (e_{1x} - e_{2x})^2 + (e_{1y} - e_{2y})^2,$$

где $\mathbf{e}_1 \equiv \mathbf{e}_{SQ}$, $\mathbf{e}_2 \equiv \mathbf{e}_{QR}$ — направления падающей и рассеянной волн в точке Q соответственно, δ — среднеквадратичный наклон донной поверхности, $R_{SQ, RQ}$ — расстояния от точки Q до точек S и R соответственно. После преобразований получаем для поверхностной реверберации расчетную формулу:

$$\begin{aligned} \langle G^{(surf)}(\tau) \rangle^2 &= W \int \int_{\Omega_R} d\Omega(\mathbf{e}^{(R)}) \frac{1}{|\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{n} \rangle|} \left| \Delta_0(\mathbf{e}^{(R)}) \right|^2 m_s(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \frac{1}{R_{SQ}^2 R_{RQ}^2} \left| F_S(\tau - \tau(\mathbf{e}^{(R)})) \right|^2 = \\ &= \frac{W}{2\pi\delta^2} \int_0^{\pi/2} \frac{\text{tg } \theta_R}{R_{RQ}^2(\theta_R)} d\theta_R \int_0^{2\pi} d\varphi_R (V\tilde{F})^2 \frac{\exp\left(-\frac{\kappa^2}{2\delta_{surf}^2 q^2} - 2\delta_0 c_0 \tau(\mathbf{e}^{(R)})\right)}{R_{SQ}^2(\theta_R, \varphi_R)} \left| F_S(\tau - \tau(\mathbf{e}^{(R)})) \right|^2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

где $R_{SQ}(\theta_R, \varphi_R) = \sqrt{h_S^2 + (x_Q - x_S)^2 + (y_Q - y_S)^2}$, $R_{RQ}(\theta_R) = h_R / \cos \theta_R$ — расстояния от точки излучения до точки рассеяния и от точки рассеяния до точки приема соответственно, $h_R = z_R$, $h_S = z_S$, $q^2 = (e_{1z} - e_{2z})^2 = (\cos \theta_R + h_S / R_{SQ})^2$, $x_Q = x_R + h_R \text{tg } \theta_R \cos \varphi_R = x_R + R_{RQ}(\theta_R) \sin \theta_R \cos \varphi_R$, $y_Q = y_R + h_R \text{tg } \theta_R \sin \varphi_R = y_R + R_{RQ}(\theta_R) \sin \theta_R \sin \varphi_R$, $\kappa^2 = (e_{1x} - e_{2x})^2 + (e_{1y} - e_{2y})^2 = (\sin \theta_R \cos \varphi_R - (x_S - x_Q) / R_{SQ})^2 + (\sin \theta_R \sin \varphi_R - (y_S - y_Q) / R_{SQ})^2$. Время прихода рассеянной волны: $\tau(\mathbf{e}_R) = (R_{RQ} + R_{SQ}) / c_0$. Коэффициент отражения от свободной поверхности воды (ρ_{surf} , c_{surf} —

плотность и скорость воздуха соответственно): $V_{surf} = \frac{m \cos \theta_R - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_R}}{m \cos \theta_R + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_R}}$, где $m = \frac{\rho_{surf}}{\rho_0}$,

$$n = \frac{c_0}{c_{surf}}.$$

На рисунках 1.9 – 1.10 представлены расчёты интенсивностей приходящих на приемник отраженных компонент по отдельности: прямого сигнала (d), сигнала, отраженного от поверхности воды (s), сигнала, отраженного от донной поверхности (b), отраженных от отдельных слоев сигналов (1-6), а так же поверхностной и донной реверберации для различных среднеквадратичных наклонов локальных неоднородностей дна δ при разных толщинах волновода 300 м (сверху) и 50 м (снизу). Для интерпретации вклада скорости ветра в интенсивность поверхностной реверберации можно использовать эмпирическую формулу Кокса-Манка [12]: $\delta^2 = (3 + 5.12v) \cdot 10^{-3}$, где v – скорость ветра. Например, $\delta = 0.5$ соответствует ветровому волнению при скорости ветра $v \sim 10$ м/с.

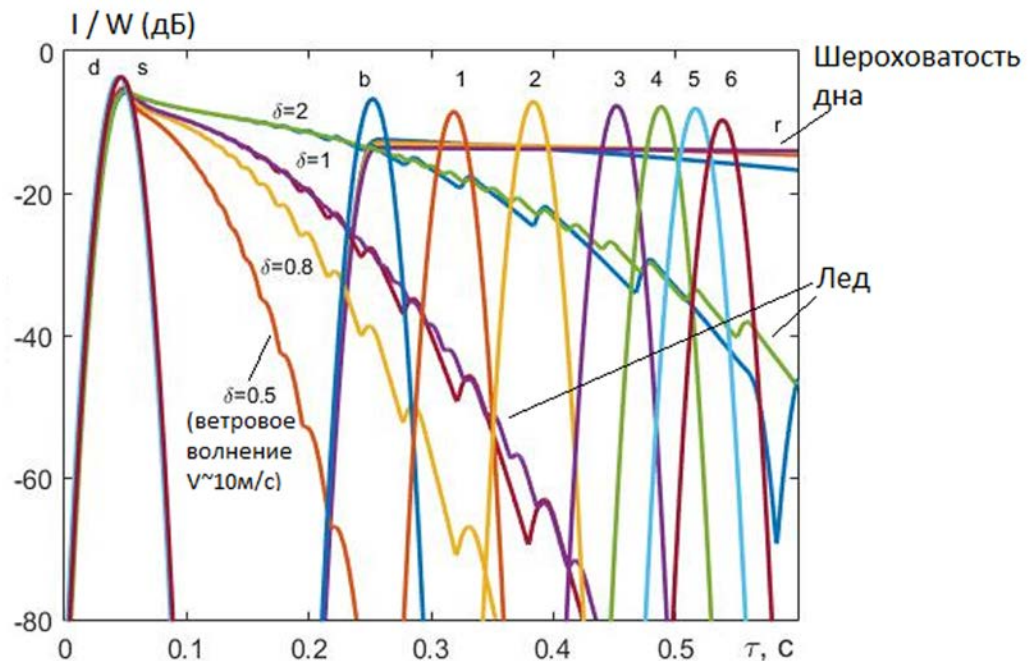


Рисунок 1.9 – Расчёт интенсивностей отдельных компонент отраженного сигнала, поверхностной и донной ревербераций для различных δ при толщине волновода 300 м

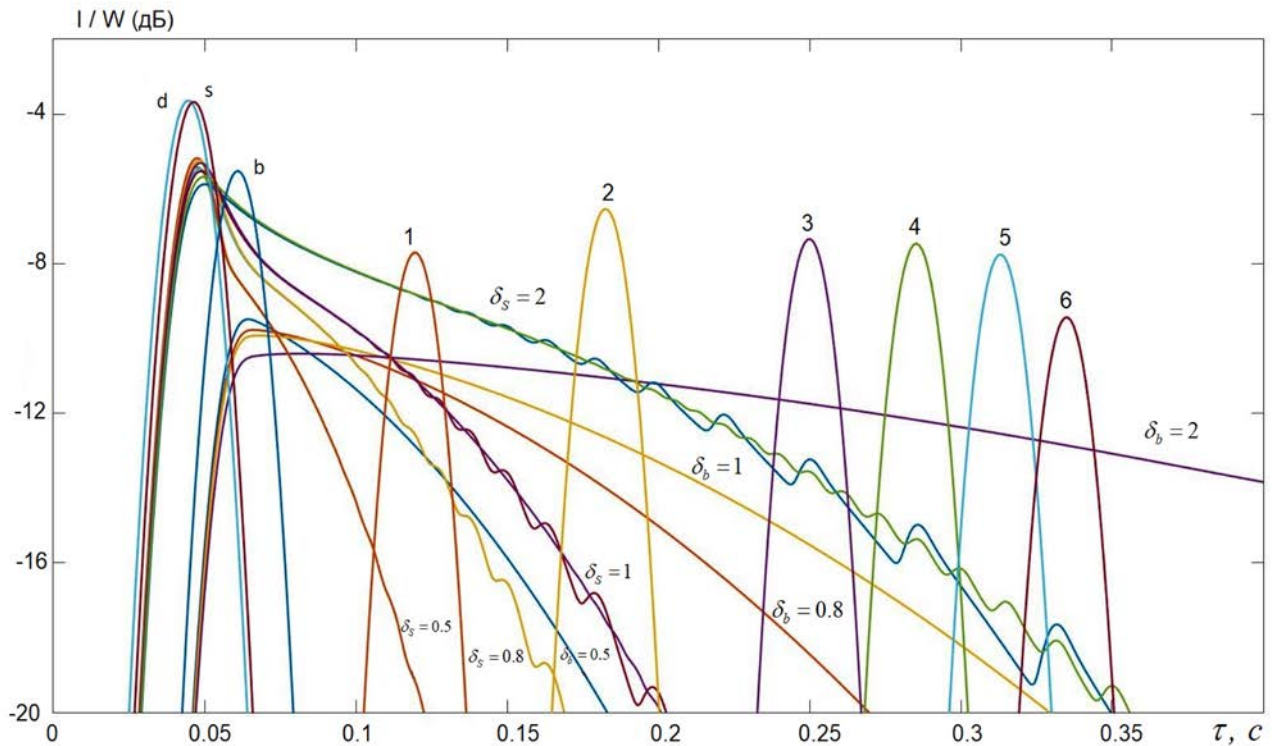


Рисунок 1.10 – Расчёт интенсивностей отдельных компонент отраженного сигнала, поверхностной и донной ревербераций для различных δ при толщине волновода 50 м

1.5. Модель аддитивных шумов, наблюдаемых при зондировании морского дна когерентными акустическими импульсами

Кроме реверберационных помех, полезные акустических сигналы маскируются и аддитивными шумами. Как показывают эксперименты, наибольший вклад в шумы при акустических зондировании морского дна в большинстве случаев вносит шум научно-исследовательского судна-буксировщика (НИС). Такие шумы часто не являются гауссовыми. Разработка теоретической модели такого шума практически невозможна, так как их структура зависит от особенностей конструкции и режимов работы механизмов судна. Для анализа возможностей зондирования морского дна когерентными акустическими импульсами можно воспользоваться эмпирической моделью шумов. На рис. 1.11 показан пример характеристик шумов НИС, измеренных при проведении акустических зондирования в Черном море [95, 96]. Уровень таких помех может на два ÷ три порядка (в зависимости от частотного диапазона) превышать шумы океана. При проведении сейсмоакустического зондирования дна для ослабления такого рода помех принимаются специальные меры, в частности, используются НИС - буксировщики с пониженными уровнями шумов. Кроме этого, приемные решетки располагаются на большом удалении от буксировщика. В рассматриваемом эксперименте также оказалось возможным понизить уровни акустических помех (кривая 2 на рис. 1.11 слева)

оптимизацией режимов работы механизмов НИС при буксировке. В проведенных натурных измерениях в полосе от 100 до 700 Гц, шумы формировались как набор компонент, имеющих различную природу. Каждая из шумовых компонент локализовалась в своем частотном интервале и имела присущие ей временные закономерности. Различными для каждой шумовой компоненты оказываются и их когерентность и статистическая структура. Для частотных интервалов такие компоненты обозначены на рис. 1.11 слева буквами А, Б, В, Г, для которых статистические распределения получены при одинаковых размерах статистических ансамблей, равных $3 \cdot 10^5$ независимых отсчетов, при нормировке на стандарт. Из представленных данных видно, что статистическое распределение некоторых из шумовых компонент (например, компонента Б, в частотном интервале от 80 до 120 Гц) близко к нормальному (гауссовое распределение на рис. 1.11 справа, показано сплошной линией). Вместе с тем, распределение шумовой компоненты В, в частотном интервале от 40 до 60 Гц, имеет двухмодальную структуру, одна из которых, более энергонасыщенная узкополосная компонента, имеет распределение, близкое к распределению χ^2 . Такого рода помеха имеет распределение с «тяжелыми крыльями» (рис. 1.10 справа).

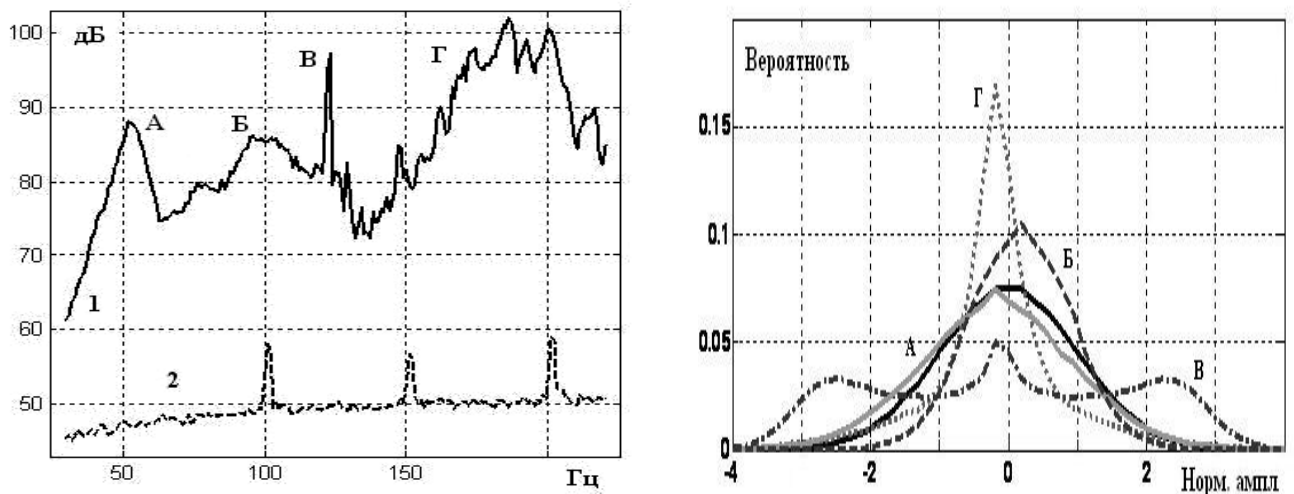


Рисунок 1.11 – Усредненный на интервале стационарности шум (слева), статистическая структура шумов (справа)

1.6. Выводы

В главе 1 уточнена геофизическая модель **М**, а также модель формирования акустических сигналов Ψ_R (расчетная модель Ψ_{calc}), в которой учитывается влияние шумов и реверберационных помех. Развита модель формирования сложных акустических когерентных импульсов в море с упругим слоистым дном, учитывающая случайные неоднородности донного

рельефа и присутствие ветрового волнения. Разработаны программы расчета принимаемых акустических сигналов, а также выполнен анализ структуры полей.

Установлено, что при отражении от упругого слоистого дна, формируется набор акустических импульсов, соответствующих каждой границе. Все его элементы несут информацию о границе и могут быть использованы при реконструкции ее параметров.

Показано, что при увеличении неоднородностей донной поверхности и ветрового волнения, реверберационные помехи маскируют отклики от глубоко залегающих донных слоев. Показано, что глубина, при которой отклики от границ становятся по величине равными реверберации, уменьшается с ростом декремента затухания в донных слоях, дисперсии случайной неоднородности донного рельефа и скорости ветра, и растет с увеличением акустической контрастности границ, полосы частот зондирующих импульсов и размеров приемной решетки гидрофонов. Получены количественные оценки глубины для конкретных значений данных параметров.

Глава 2. Разработка алгоритмов реконструкции геоакустических параметров морского дна и исследование их устойчивости к шумам и помехам при когерентном зондировании

2.1. Разработка алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании

Анализ методов решения задачи. Реконструкция строения морского дна является в общем случае некорректной стохастической обратной задачей и может быть сведена к оценке значений параметров донных слоев методами статистической проверки гипотез, в качестве которых выступают значения параметров модели морского дна \mathbf{M} [6, 35, 39, 63]. Гипотеза $\tilde{\mathbf{M}}$ принимается, если целевая функция $S(\tilde{\mathbf{M}}) \rightarrow \min$. Выбор оптимальной целевой функции S связан со статистикой шумов и помех. Как показывают результаты экспериментов, помехи, возникающие при акустическом зондировании морского дна, могут иметь распределения с «тяжелыми крыльями», что может привести к ужесточению требований при оценивании параметров донных слоев. Оценка параметров слоев может быть улучшена использованием решающих статистик (функционалов невязки), адаптированных к статистическим распределениям шумов.

Постановка обратной задачи. Будем полагать модель \mathbf{M} морского дна - заданной (в нашем исследовании это модернизированная модель редких импульсов \mathbf{M}_R). Необходимо отыскать вектор истинных значений \mathbf{m} (m_1, m_2, \dots, m_N) параметров модели \mathbf{M}_R . В данной работе такими параметрами будут: толщина слоя, плотность, продольная и поперечная скорости грунта: $\mathbf{p} = \{\rho_i, h_i, v_i^P, v_i^{SV}\}$, $i=1..N$. Предполагаемые значения (гипотезы) о значениях параметров принимаются в качестве искомым значений (решений), если они соответствуют экстремуму целевой функции $S(\mathbf{M})$ при выполнении статистического критерия. Статистические характеристики решения (смещенность, дисперсия и состоятельность) должны удовлетворять исходно заданным статистическим требованиям.

Целевая функция. В настоящей диссертации, при решении задачи реконструкции строения морского дна, используется развитая в главе 1 модель Ψ_R , определяющая формирования сигналов и помех для геофизической модели морского дна \mathbf{M}_R . Развитая модель, в отличие от моделей, получивших широкое использование в геофизических исследованиях, является стохастической. Используя модель Ψ_R , можно построить оптимальную целевую функцию, детально изучив ее свойства. Из-за присутствия шумов и помех в измеряемых при

зондировании данных, целевая функция $S(\mathbf{M})$ является случайной, а ее экстремум должен определяться в рамках статистического анализа. При этом важной характеристикой целевой функции является ее высокая устойчивость (робастность) к шумам и помехам, что может быть достигнуто, если целевая функция обеспечивает эффективное накопление полезных сигналов и подавление шумов и помех.

Поиск решения. Для типичных натуральных условий, число параметров N , описывающих морское дно, может достигать 10^2 и больше. Для нахождения решения обратной задачи необходимо выполнить поиск экстремума целевой функции $S(\mathbf{M})$ в многомерном пространстве размерностью $4 * N$, где N – количество слоев. Ввиду большой размерности пространства параметров, предполагается использование оптимальных алгоритмов поиска. Обычно (это особенность обратных задач) выбор оптимального алгоритма поиска решений основывается на детальном анализе и учете всех особенностей формирования сигналов и помех для рассматриваемой задачи. Результаты такого анализа используются при поиске решений методом релаксации, состоящей в последовательной максимизации функционала по отдельным параметрам (группам параметров) при фиксированных значениях прочих [93]. Успех реализации подобных методов зависит, главным образом, от стратегии поиска: удачности выбора последовательности определяемых параметров, начальных значений прочих параметров и т.д. Эффективность восстановления параметров сигнала и его робастность определяются выбором целевой функции, с трудом поддаются априорной теоретической оценке и требуют апробации.

Статистические параметры решения. Поскольку из-за шумов и помех, экстремум целевой функции $S(\mathbf{M})$ имеет статистическую структуру, его значения принимаются в качестве решения при выполнении статистического критерия. При этом, статистические характеристики решения (смещенность, дисперсия и состоятельность) полученных оценок параметров донных слоев должны удовлетворять исходно заданным статистическим требованиям.

Алгоритм послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании. При построении развитого в диссертации алгоритма реконструкции структуры морского дна использовались данные выполненных ранее экспериментов, а также детальный анализ особенностей формирования отраженных от слоистого дна импульсных сигналов и шумов и реверберационных помех (модель $\Psi_{\mathbf{R}}$, глава 1).

Алгоритм решения обратной задачи акустического зондирования морского дна с помощью когерентных импульсов включает в себя следующие операции:

- а) выбор целевых функций $S(\mathbf{M})$, обеспечивающих когерентное накопление полезных сигналов;
- б) релаксационно-итерационный (РИТ) поиск решений;

- в) получение оценок значений параметров морского дна удовлетворяющих статистическому критерию;
- г) получение статистических характеристик для оценок значений параметров морского дна;
- д) оценка устойчивости алгоритма к шумам и помехам.

Построить оптимальную целевую функцию из общих соображений при решении обратной задачи обычно не удается. Это можно сделать лишь на основе детального анализа всех особенностей конкретной задачи. Рассмотрим основные особенности задачи реконструкции структуры морского дна при акустическом когерентном зондировании, влияющие на выбор целевой функции. Исходя из анализа модели формирования сигналов, шумов и помех (\mathbf{M}_R), основными факторами, влияющими на выбор целевой функции $S(\mathbf{M})$ можно считать следующее.

Когерентность акустических источников. Важной особенностью рассматриваемой в диссертации задачи, является то, что в качестве зондирующих сигналов, используются когерентные акустические сигналы. Это дает, во-первых, полную информацию об излучаемых сигналах, и, во-вторых, имеет место полная повторяемость зондирующих сигналов при их непрерывном излучении. При распространении зондирующих импульсов по акустическим трассам между источником и приемными гидрофонами, когерентность зондирующих сигналов может разрушиться за счет влияния случайных неоднородностей среды. В рамках рассмотренной в диссертации модели Ψ_R разрушение когерентности проявляется в возникновении реверберационного шума – мультипликативной помехи. При этом считается, что случайные вариации среды (неоднородность донного рельефа, ветровое волнение и ледовый покров) малы (применимо Борновское приближение [12]). При этом сигналы, отраженные от слоистого дна не ослабляются. Они остаются когерентными, как по частотным, так и по пространственным координатам. По мере роста масштабов случайных возмущений, когерентность в указанных координатах может разрушиться. С учетом приведенных соображений, интересующая нас целевая функция должна включать в себя алгоритмы накопления, в которых используется априорная информация о структуре излучаемых зондирующих сигналов и структуре приемной антенны.

Статистическая структура шумов и помех. В используемой в диссертации модели L_R , шумы и помехи не являются гауссовыми, однородными и стационарными. В частном случае, когда шумы формируются множеством равноценных источников, их можно приближенно считать гауссовыми. Однако статистическое распределение аддитивных шумов, возбуждаемых механизмами судна буксировщика, имеют «тяжелые» крылья. При такой ситуации, целевая функция может быть адаптирована к статистике шумов и помех. Как следует из анализа шумов

и реверберационных помех в модели M_R , уровни шумов и меняются в зависимости от положения спектральных компонент шума, скорости ветра и параметров неоднородности донного рельефа.

Структура акустических сигналов, отраженных от слоистого упругого дна. При зондировании дна акустическим импульсом, отраженный от упругого слоистого дна акустический сигнал имеет сложную структуру и состоит из большого числа импульсов, положение по оси задержек и амплитуда каждого из которых определяется отражением и преломлением продольных и поперечных волн на границах упругих слоев. Например, сигнал от верхнего слоя зависит только от двух его границ и акустических параметров слоя (плотности, двух скоростей, двух декрементов затухания, толщины слоя и углов отражения и преломления). Сигнал же от нижнего слоя включает в себя большую совокупность импульсов, преломляющихся на всех границах выше лежащих слоев и зависящих от акустических параметров всех слоев. При этом при преломлении на каждой границе имеет место трансформация продольных и поперечных волн. Такие импульсы распределяются по оси задержек и быстро спадают по амплитуде, так, что их амплитуды на 30-70 дБ меньше сигнала от первого слоя. Анализ зависимостей полезных сигналов от параметров слоев показывает, что их структура имеет различную чувствительность к величине изменений параметров донных слоев. Так, например, положения импульсных откликов на оси задержек наиболее чувствительны к изменчивости скорости волн и толщине слоев, а амплитуды откликов в существенной степени зависят от плотности грунтов и величины скачков импедансов на границах слоев.

С учетом отмеченных особенностей были исследованы некоторые целевые функции, которые, как показал дальнейший анализ, имеют различную чувствительность и статистическую устойчивость при оценке параметров морского дна. При выборе целевых функций учитывались выше перечисленные выше важные особенности формирования сигналов, шумов и помех. Исследованные целевые функции имеют следующую структуру.

Первым блоком целевой функции является блок Н - блок накопления полезных сигналов (рис. 2.1). В этом блоке осуществляется частотное, пространственное и временное накопление акустических сигналов, отраженных от упругого слоистого дна. Поскольку акустические источники зондирующих сигналов, исследуемые в диссертации, являются когерентными, в качестве зондирующего может излучаться сложный широкополосный импульс, в частности, импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ импульс) длительностью T и полосой частот (f_2-f_1) . В этом случае когерентное накопление по частоте и времени может осуществляться путем согласованной фильтрации, когда коэффициент накопления равен $T \cdot (f_2 - f_1)$. Следующий этап накопления заключается в пространственном накоплении в пределах

протяженной приемной антенны. Наконец, следует, если это возможно, осуществлять межимпульсное накопление.

Второй блок целевой функции выполняет операцию вычисления нелинейной невязки между измеренными и вычисленными данными (блок НЕВ), структура которой адаптируется к статистике шумов и помех.

Третий блок целевой функции (блок СПГ) обеспечивает статистическую проверку гипотез с использованием статистических критериев.

Четвертый блок целевой функции (блок ПР) выполняет поиск решения с использованием РИТ метода.

Полученные с помощью рассмотренной целевой функции оценки параметров морского дна являются случайными величинами. В этой связи рассматриваемый в диссертации алгоритм реконструкции параметров морского дна (рис. 2.1) включает в себя блок оценки статистических параметров (ОСП), а также блок остановки поиска решений (ОП). Еще одним важным этапом работы алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании является формирование априорной информации о строении дна, океана и системы наблюдения (блок АИ), который формируется на основе ранее известных геофизических данных и априорных экспериментов, интервалов поиска решений, пороговых значений и других необходимых данных. В алгоритме присутствуют еще два блока - блок формулировки требований точности реконструкции (ТР) и блок визуализации изображения морского дна (ВИЗ).

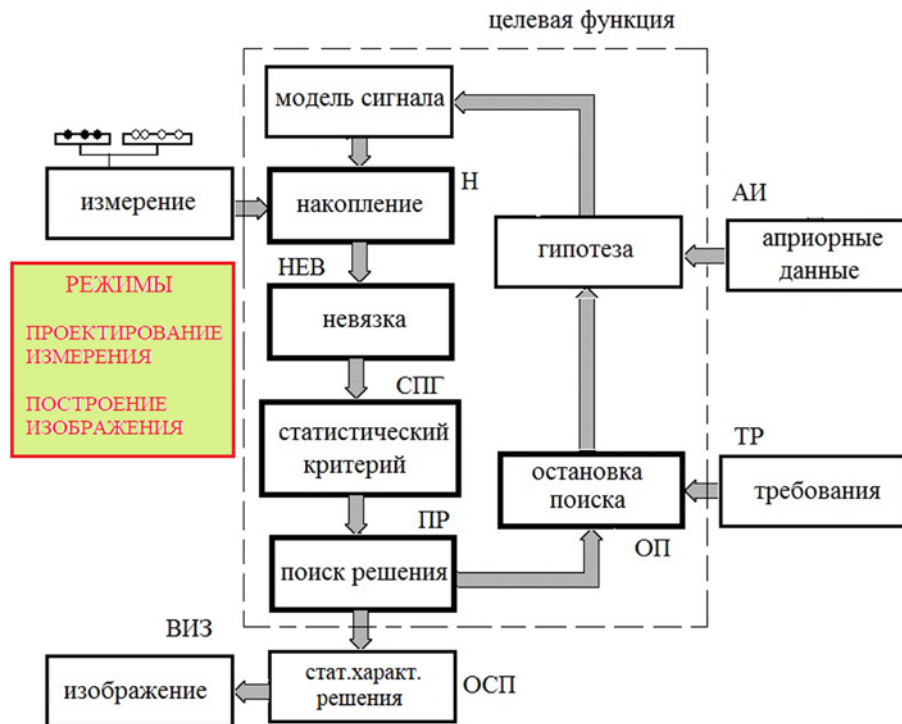


Рисунок 2.1 – Структура алгоритма когерентного акустического зондирования морского дна

Алгоритм послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании может функционировать в двух режимах. Первый режим – это прогноз возможностей реконструкции в зависимости от параметров задачи и проектирование измерений при условии удовлетворения заданных требований реконструкции. Достижение указанных целей осуществляется с использованием методов стохастического моделирования, что позволяет выбрать оптимальные параметры целевой функции в зависимости от задаваемых априорно статистических характеристик измеряемых данных, априорной информации и требований к статистическим характеристикам решений. Второй режим обеспечивает выполнение реконструкции при конкретной схеме и условиях измерений, осуществляя операции накопления, оценивания и определения характеристик по экспериментально измеренным данным.

Особенностями разработанного алгоритма являются:

- 1) возможность использования различных способов когерентного накопления сигналов - частотного (на выходе согласованного фильтра), пространственного (когерентное накопление на приемной антенне) и временного (алгоритм когерентного межимпульсного/траекторного накопления), поскольку имеется полная информация об излучаемых сигналах и имеет место полная повторяемость зондирующих сигналов при их непрерывном излучении;
- 2) статистическая проверка и отбрасывание ложных гипотез об искомых параметрах дна с использованием адаптивных порогов, получаемых с учетом внесенных в модель принимаемого сигнала шумов и реверберационных помех. При этом статистические характеристики полученных оценок параметров донных слоев должны удовлетворять исходно заданным требованиям (например, требованиям точности оценок параметров)

2.1.1. Описание алгоритма когерентного траекторного накопления (КТН)

Увеличение эффективности сейсмоакустического зондирования может быть достигнуто путем повышения мощности источников и понижения уровня помех. Но при использовании высококогерентных излучателей тех же целей можно достигнуть, во-первых, частотным накоплением при использовании согласованной фильтрации, а, во-вторых, адаптивным (траекторным) накоплением импульсов с использованием априорных данных о структуре дна и данных по позиционированию излучателя и приемной системы, а также эмпирических моделей локальных вариаций глубин наблюдаемых донных слоев.

В целях увеличения длительности импульсной последовательности при выполнении когерентного траекторного накопления, необходимо учитывать возможные изменения глубины

расположения отдельных донных слоев, используя для этого специальные алгоритмы коррекции временных задержек опорных сигналов реплики для сохранения высокой эффективности согласованной фильтрации принимаемых импульсов. Предложенный в работе алгоритм реконструкции структуры морского дна, включающий в себя такую коррекцию искажений, обусловленных горизонтальной неоднородностью отдельных слоев вдоль трассы измерений, сводится к следующей последовательности операций. Сначала выполняется излучение последовательности импульсов, их прием и фильтрация в заданной полосе частот. После этого выполняется согласованная фильтрация принятых импульсов с использованием реплики излучаемого (опорного) сигнала. Далее осуществляется грубый поиск положения донных слоев по оси временных задержек прихода импульсов для нескольких интервалов задержек и последовательная (для каждого слоя) более точная реконструкция его положения. Для каждого из выбранных в результате реконструкции N слоев выполняется накопление импульсов вдоль слоя (в пространстве время-задержка) в соответствии с гипотезой о линейной (как наиболее простой) форме предполагаемого искривления траектории временных задержек отраженных импульсов, оцениваются задержки τ_1 и τ_N и выполняется оценка наклона (траектории смещения импульсов по задержкам) (рис. 2.2). Значение интервала времени когерентности ($N_{\text{КОГ}}$) выбирается адаптивно, с учетом априорной информации о наклоне слоев. Далее осуществляется когерентное сложение импульсов с выхода согласованного фильтра с учетом их расположения по траектории в плоскости (τ, t) . Такая процедура может быть названа адаптивным траекторным накоплением зондирующих импульсов, эффективность которого зависит, очевидно, от качества выбранной (в данном случае, линейной) аппроксимации искривленного положения каждого отдельного слоя. При этом дополнительным к глубине параметром каждого из слоев, адаптивная оценка которого играет ключевую роль, является угол наклона (учет более сложного вида горизонтально-неоднородного “рассогласования” не представляет принципиальных сложностей).

Визуализация результирующего изображения структуры морского дна выполняется в виде соответствующих слоям линий с заданными значениями доверительных интервалов. В условиях плавного изменения глубин донных слоев, что обычно реализуется на практике, предложенный алгоритм адаптивного когерентного накопления способен обеспечить существенное повышение длительности накапливаемой импульсной последовательности и, следовательно, помехоустойчивости и разрешающей способности зондирования в целом. По мере увеличения глубины, возможности адаптивного накопления уменьшаются, прежде всего, за счет ослабления отраженных от границ слоев сигналов за счет затухания. При этом грубая оценка положение границы, которая необходима для дальнейшего траекторного накопления импульсов, затрудняется.

Одним из возможных способов, позволяющих частично преодолеть указанную трудность, заключается в накоплении всех откликов в ограниченном интервале задержек и времени (номера импульсов) по всем возможным линейным траекториям с выбором направления, которое соответствует максимальному увеличению результирующего отклика.

При выборе длины и частотного интервала зондирующих импульсов необходимо учитывать априорную информацию о характеристиках морского дна в районе предстоящих измерений. Такой алгоритм накопления обеспечивает адаптивную когерентную пространственно-частотную фокусировку сигналов на каждый из слоев, что позволяет повысить чувствительность зондирования.

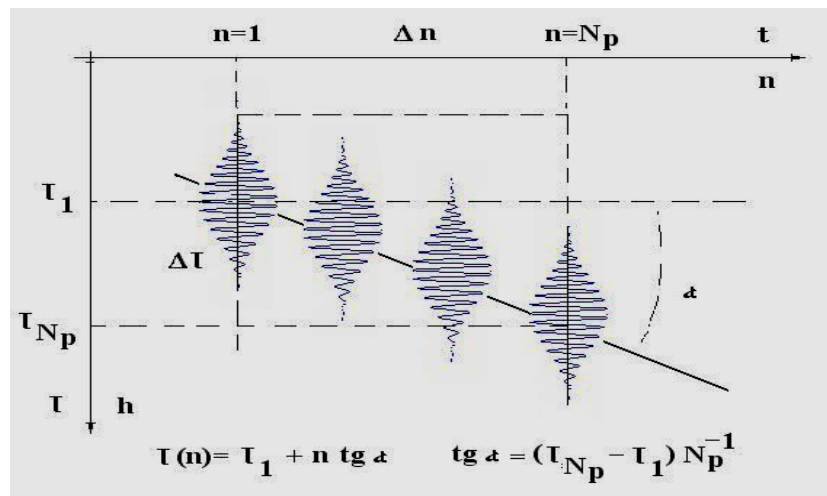


Рисунок 2.2 – Схема когерентного траекторного накопления импульсов

2.1.2. Описание функционалов невязки, используемых при реконструкции параметров слоистого дна

В научной литературе, в качестве критерия минимизации W (функционала невязки) (В.1) при решении обратных задач используются различные функции [79]. Например, в геофизике, в качестве W - функции критерия минимизации, чаще всего используется $W(x) = x^2$ - критерий наименьших квадратов, то есть критерий L_p - норма, в случае которого $p=2$. Поскольку в каждой из конкретных обратных задач шумы и помехи обычно формируются особым образом, оценить эффективность использования того или иного критерия минимизации можно, в основном, путем их апробирования, например, в условиях стохастического моделирования. Тем не менее, критерии минимизации W , которые исследуются в настоящей диссертации, отличаются от тех критериев минимизации (В.1), которые используются при сейсмической инверсии [6, 35, 39, 63], для случаев морской сейсморазведки с применением взрывных источников. Это связано с тем, что при зондировании морского дна с помощью

когерентных акустических излучателей, возбуждаемые зондирующие сложные импульсы когерентны и точно известны. Благодаря этому, измеренные данные можно, в отличие от (В.1), сначала когерентно накопить, и только потом выполнить вычисление критерия минимизации:

$$S_{cog}(\mathbf{M}_R) = W \left[\sum_{t,g,r=1}^{N_t^C, N_g^C, N_r^C} (p_{obs}(\mathbf{M}_0, g, r, t, w_g, N)) - \sum_{t,g,r=1}^{N_t^C, N_g^C, N_r^C} (p_{calc} = \Psi_{calc}(\mathbf{M}_R, g, r, t, w_g)) \right]. \quad (2.1)$$

Такая, когерентная, целевая функция, определяется при выполнении когерентного накопления измеренных данных для реальной модели морского дна \mathbf{M}_0 в масштабах когерентности сигналов $\{N_g^C, N_r^C, N_t^C\}$. Компонента p_{calc} , с помощью модели Ψ_{calc} , вычисляется с учетом такого же накопления. С учетом того, что измерение акустических данных осуществляются в присутствии шумов N и поле $p_{obs}(\mathbf{M}_0, g, r, t, w_g, N)$ является случайным, целевая функция $S_{cog}(\mathbf{M}_R)$ также является случайной. Ее статистические характеристики могут быть улучшены, путем некогерентного накопления (усреднения) по N_i^{NC} значениям, что позволяет, в частности, нормализовать получаемые данные:

$$S_{\Sigma}(\mathbf{M}_R) = \sum_l^{N_i^{NC}} W_l \left[\sum_{t,g,r=1}^{N_t^C, N_g^C, N_r^C} (p_{obs}(\mathbf{M}_0, g, r, t, w_g, N)) - \sum_{t,g,r=1}^{N_t^C, N_g^C, N_r^C} (p_{calc} = \Psi_{calc}(\mathbf{M}_R, g, r, t, w_g)) \right]. \quad (2.2)$$

Использование когерентного накопления и целевых функций (2.1, 2.2) делает алгоритм реконструкции морского дна более устойчивым к шумам и помехам, и, следовательно, при прочих равных условиях, позволит выполнить реконструкцию донных слоев с требуемой точностью на больших глубинах.

Функционалы невязки.

L_p-норма с когерентным пространственно-частотным накоплением. Наиболее часто используются критерия минимизации W в виде L_2 -нормы (среднеквадратической невязки), что, по-видимому, оптимально для случаев, когда шумы и помехи близки к гауссовым [87]. Однако в тех случаях, когда шумы и помехи являются не нормальными, лучшие результаты могут быть получены при использовании критерия минимизации в виде L_p -нормы, у которых p не равно двойке [69, 79, 81]. В частности, когда в качестве шумов выступали шумы судна буксировщика, оптимальным оказалось использовать L_p -норму, у которой $p=4$. Далее, в диссертации, для сравнительного анализа в качестве одного из критериев минимизации будем использовать L_p -норму:

$$W_{L_p} = \left(\sum_J \left| \sum_{\mathbf{r}_{KTN}} \sum_{x_{RN}} G_{obs}(\tau, x_R, T_j^{calc}(\tau_j, \mathbf{r}_{KTN})) - \sum_{\mathbf{r}_{KTN}} \sum_{x_{RN}} G_{calc}(\tau, x_R, T_j^{calc}(\tau_j, \mathbf{r}_{KTN})) \right|^p \right)^{1/p} \quad (2.3)$$

в которой выполняется когерентное накопление по антенне x_{R_N} (*пространственное накопление*) сжатых с помощью согласованного фильтра (*частотное накопление*) импульсов принятых G_{obs} и рассчитанных G_{calc} , а так же когерентное накопление вдоль траекторий $T_j^{calc}(\tau_j, \mathbf{r}_{KTN})$ в плоскости (τ, \mathbf{r}) каждой волновой компоненты сигнала j , $j=1..J$ (*когерентное траекторное накопление*) длиной когерентности \mathbf{r}_{KTN} . Накопление выполняется для всех J волновых компонент, отраженных от границ реконструируемого донного слоя.

Использование критерия минимизации в виде L_p -нормы предполагает наличие большого объема априорной информации о структуре полезных сигналов. Часто, в частности, когда полезные сигналы частично когерентны, используют менее чувствительные критерии, которые, однако, требуют для своего применения меньший объем априорной информации. Например, может быть достаточно лишь знания того, что в измеренных данных имеется когерентная (сигнальная) компонента. К таким критериям относятся проекционные методы MUSIC и AMUSIC [52], связанные со спектральными свойствами корреляционных матриц сигналов, принимаемых антенными решетками, в которых в качестве оценок параметров, выбираются те их значения, которые максимизируют мощность процессора, работающего с корреляционной матрицей.

Проекционные методы. Рассмотрим алгоритм формирования процессоров MUSIC и AMUSIC. Пусть в точке с координатой (\mathbf{r}_0, z_0) океанического волновода расположен источник, излучающий сигнал $g(t)$. Этот сигнал, пройдя трассу распространения, регистрируется (совместно с шумовой составляющей) антенной решеткой (АР), состоящей из N элементов одинаковой чувствительности.

Совокупности комплексных амплитуд полезного и помехового сигналов будем рассматривать как компоненты сигнального (\mathbf{s}) и помехового (\mathbf{n}) векторов размерности $N \times 1$. В узкополосном приближении результирующее поле на входе АР в моменты времени t_l ($l=1..L$) характеризуется N -мерным вектором наблюдения $\mathbf{x}(t_l)$: $\mathbf{x}(t_l) = \mathbf{s}(t_l) + \mathbf{n}(t_l)$, $\mathbf{s} = g(t_l) \mathbf{e}(\mathbf{r}_0, z_0)$, $\langle g(t_l) g^*(t_m) \rangle = \sigma_s^2 \delta_{lm}$, где σ_s^2 – уровень сигнала, $\mathbf{e}(\mathbf{r}_0, z_0)$ – направляющий (сигнальный) вектор, равный $\mathbf{e}(\mathbf{r}_0, z_0) = (G(\mathbf{r}_1, z_1 | \mathbf{r}_0, z_0), G(\mathbf{r}_2, z_2 | \mathbf{r}_0, z_0), \dots, G(\mathbf{r}_N, z_N | \mathbf{r}_0, z_0))^T$, а $G(\mathbf{r}_j, z_j | \mathbf{r}_0, z_0)$ — функция Грина исходного волнового уравнения (символ T и угловые скобки означают операцию транспонирования и статистического усреднения соответственно).

В случае помехи, некоррелированной с полезным сигналом, корреляционная матрица входного поля \mathbf{x} может быть записана в виде: $\Gamma_x = \Gamma_s + \Gamma_n$, $\Gamma_s = \langle \mathbf{ss}^+ \rangle \equiv \sigma_s^2 \langle \mathbf{ee}^+ \rangle$, $\Gamma_n = \langle \mathbf{nn}^+ \rangle$

(символ $+$ означает операцию эрмитового сопряжения.) и $\hat{\Gamma}_x = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{x}(t_l) \mathbf{x}^+(t_l)$, где $\mathbf{x}(t_l)$ - значение входной выборки в момент времени t_l ($l = 1..L$).

Описываемые здесь проекционные методы оценивания параметров гидроакустических сигналов основаны на следующем (SVD-) разложении этой матрицы:

$$\hat{\Gamma}_x = \sum_{j=1}^N \hat{\lambda}_j \hat{\psi}_j \hat{\psi}_j^+ \equiv \hat{\Psi}_s \hat{\Lambda}_s \hat{\Psi}_s + \hat{\Psi}_n \hat{\Lambda}_n \hat{\Psi}_n, \quad \hat{\lambda}_1 > \dots > \hat{\lambda}_J \geq \dots \geq \hat{\lambda}_N, \quad \|\hat{\psi}_j\| = 1. \quad (2.4)$$

Здесь $\hat{\Psi}_s = [\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2, \dots, \hat{\psi}_J]$, $\hat{\Psi}_n = [\hat{\psi}_{J+1}, \hat{\psi}_{J+2}, \dots, \hat{\psi}_N]$ — матрицы порядков $N \times J$ и $N \times (N - J)$, составленные из J и $N - J$ собственных векторов-столбцов, отвечающих соответствующим собственным числам,

$$\hat{\Lambda}_s = \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\lambda}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{\lambda}_J \end{pmatrix}, \quad \hat{\Lambda}_n = \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_{J+1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\lambda}_{J+2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{\lambda}_N \end{pmatrix}$$

— диагональные матрицы собственных значений. Данные, содержащиеся в векторах сигнального $\hat{\Psi}_s$ и помехового $\hat{\Psi}_n$ подпространства, используются для создания проекционных алгоритмов обработки.

Общая задача состоит в построении пространственного фильтра, позволяющего по принятой выборке $\{\mathbf{x}(t_l)\}_{l=1}^L$ наиболее каким-либо (оптимальным) способом выделить полезный сигнал из наблюдаемой смеси и оценить его параметры. Обычно оценке подлежит некоторый векторный параметр сигнала ϕ с несколькими скалярными составляющими.

Пусть входная реализация случайного процесса \mathbf{x} представляет собой смесь пространственно когерентного сигнала и шумовой составляющей. В рассматриваемой случае направляющий вектор \mathbf{e} является детерминированной функцией координат, а значит, сигнальная корреляционная матрица имеет диадную форму: $\Gamma_s(\phi) = \sigma_s^2 \mathbf{e}(\phi) \mathbf{e}^+(\phi)$. Тогда $\Gamma_x(\phi) = \sigma_s^2 \mathbf{e}(\phi) \mathbf{e}^+(\phi) + \Gamma_n$.

Оптимальная процедура обработки сигнала сводится к построению линейного пространственного фильтра (процессора), выходная мощность которого дается выражением:

$$W(\phi) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\mathbf{w}^+(\phi) \mathbf{x}(t_l)|^2 \equiv \mathbf{w}^+(\phi) \hat{\Gamma}_x \mathbf{w}(\phi), \quad (2.5)$$

где \mathbf{w} — весовой вектор размерности $N \times 1$, являющийся функцией искомого параметра сигнала.

Р. Шмидтом предложен алгоритм оценивания, получивший в литературе название метода MUSIC. Пространственный спектр на выходе традиционного процессора MUSIC дается соотношением

$$W_{MUSIC}(\phi) = \frac{1}{\sum_{j=J+1}^N |\hat{\psi}_j^+ \mathbf{e}_0(\phi)|^2} \equiv \frac{1}{\|\hat{\Psi}_n^+ \mathbf{e}_0(\phi)\|^2}, \quad (2.6)$$

где J — число старших собственных значений корреляционной матрицы $\hat{\Gamma}_x$, а $\hat{\Psi}_n = [\hat{\psi}_{J+1}, \dots, \hat{\psi}_N]$ — матрица, сформированная из собственных векторов шумового подпространства. В формуле (2.6) отсутствуют сигнальные компоненты, причем все слагаемые суммируются с равными весами. При совпадении $\mathbf{e}_0(\phi)$ с векторами «сигнального» подпространства знаменатель в (2.6) теоретически обращается в нуль, обеспечивая резкий максимум пространственного спектра в области локализации источника.

Отметим, что алгоритм MUSIC допускает простую интерпретацию: искомый параметр источника может быть найден из условия ортогональности ожидаемого направляющего вектора $\mathbf{e}_0(\phi)$ к векторам, принадлежащим к подпространству «шума»:

$$\hat{\phi} = \arg \max_{\phi} W_{MUSIC}(\phi) = \arg \min_{\phi} \|\hat{\Psi}_n^+ \mathbf{e}_0(\phi)\|^2, \quad (2.7)$$

где $\hat{\Pi}_n \equiv \hat{\Psi}_n \hat{\Psi}_n^+$ — проекционная матрица. В англоязычной литературе такая процедура оценивания носит название алгоритма «подпространственного соответствия» (subspace fitting).

При наличии контролируемого отклонения направляющего вектора \mathbf{e} от \mathbf{e}_0 необходимо построить адаптивный алгоритм AMUSIC [52], устойчивый по отношению к детерминированному рассогласованию. В этом случае робастный направляющий вектор $\hat{\mathbf{e}}(\phi, \varepsilon)$ находится из решения следующей задачи: $\hat{\mathbf{e}}(\phi, \varepsilon) = \arg \min_{\mathbf{e}} \{ \mathbf{e}^+ \hat{\Pi}_n \mathbf{e} : \|\mathbf{e} - \mathbf{e}_0(\phi)\|^2 \leq \varepsilon, \|\mathbf{e}\|^2 = 1 \}$.

Искомый вектор имеет вид: $\hat{\mathbf{e}}(\phi, \varepsilon) = (1 - \varepsilon/2) \frac{(\hat{\Pi}_n + \nu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e}_0(\phi)}{\mathbf{e}_0^+(\phi) (\hat{\Pi}_n + \nu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e}_0(\phi)}$, $0 < \varepsilon < 2$, где множитель ν

определяется из условия $g(\nu) \equiv \frac{\mathbf{e}_0^+(\phi) (\hat{\Pi}_n + \nu \mathbf{I})^{-2} \mathbf{e}_0(\phi)}{[\mathbf{e}_0^+(\phi) (\hat{\Pi}_n + \nu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e}_0(\phi)]^2} = \frac{1}{(1 - \varepsilon/2)^2}$.

Пространственный спектр на выходе адаптивного процессора AMUSIC дается формулой

$$W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi) = [\mathbf{e}^+(\phi, \varepsilon) \hat{\Pi}_n \mathbf{e}(\phi, \varepsilon)]^{-1}. \quad (2.8)$$

Для нахождения ν воспользуемся известной матричной леммой, согласно которой $(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{C})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{I} + \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}$. Полагая $\mathbf{A} = \nu\mathbf{I}$, $\mathbf{B} = \mathbf{\Psi}_n$, $\mathbf{C} = \mathbf{\Psi}_n^+$, и учитывая, что $\mathbf{\Psi}_n\mathbf{\Psi}_n^+ = \mathbf{I}$, получим: $(\hat{\Pi}_n + \nu\mathbf{I})^{-1} = \frac{1}{\nu}\left(\mathbf{I} - \frac{\hat{\Pi}_n}{1+\nu}\right) \equiv \nu^{-1}(1+\nu)^{-1}(\hat{\Pi}_s + \nu\mathbf{I})$, где $\hat{\Pi}_s$ — проекционная матрица размерности $N \times N$: $\hat{\Pi}_s = \mathbf{I} - \hat{\Pi}_n$, $\hat{\Pi}_n^2 = \hat{\Pi}_n$, $\hat{\Pi}_s\hat{\Pi}_n = 0$.

Далее, воспользуемся непосредственно проверяемым соотношением $g(\nu) = -\frac{\partial f^{-1}(\nu)}{\partial \nu}$,

где $f(\nu) = \mathbf{e}_0^+(\phi)(\hat{\Pi}_n + \nu\mathbf{I})^{-1}\mathbf{e}_0(\phi) \equiv \frac{1}{\nu}\left[1 - \frac{|\mathbf{\Psi}_n^+\mathbf{e}_0(\phi)|^2}{1+\nu}\right]$. При написании последнего равенства

учтено, что $\|\mathbf{e}_0(\phi)\| = 1$. Тогда $-\frac{\partial f(\nu)}{\partial \nu} = \frac{1}{\nu^2}\left[1 - \frac{(1+2\nu)|\mathbf{\Psi}_n^+\mathbf{e}_0(\phi)|^2}{(1+\nu)^2}\right]$ и для $g(\nu)$ имеем

$$g(\nu) = \frac{(1+\nu)^2 - (1+2\nu)\|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2}{\left[1+\nu - \|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2\right]^2}, \quad \|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2 = \sum_{j=J+1}^N |m_j(\phi)|^2, \quad \text{причем} \quad 0 < \|\mathbf{m}_n(\phi)\| < 1. \quad \text{В}$$

рассматриваемой ситуации определение ν при $0 < \varepsilon < 2$ сводится к поиску корня квадратного

уравнения $x^2 - 2\|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2 x + c = 0$, $c = \frac{\|\mathbf{m}_n(\phi)\|^4 - (1-\varepsilon/2)^2\|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2}{\varepsilon(1-\varepsilon/4)}$, в котором $x = 1 + \nu$. В

результате для ν получим

$$\nu(\varepsilon, \phi) = -1 + \|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2 + \frac{(1-\varepsilon/2)\sqrt{\|\mathbf{m}_n(\phi)\|^2 - \|\mathbf{m}_n(\phi)\|^4}}{\sqrt{\varepsilon - \varepsilon^2/4}}. \quad (2.9)$$

Процессор MUSIC можно считать вариантом адаптивного метода AMUSIC, соответственно, в котором положено $\varepsilon = 0$.

Меньшая чувствительность такого критерия обусловлена малой эффективностью накопления, вместе с тем, такой критерий удобен в случаях, когда когерентность измеряемых сигналов ограничена.

Нейроноподобная свертка сигналов. В работах [80, 98, 113] для обработки сложных сигналов в качестве функционала невязки для сравнения принимаемого сигнала с модельным, была предложен метод, основанный на работе нейроноподобных сетей. Как показано в [98, 113], такой критерий минимизации в виде нейроноподобной свертки обладает высокой чувствительностью к различию времен прихода сигналов. При этом эффективность нейроноподобной свертки относительно слабо зависит от статистического распределения шумов в отличие от случая использования L_p -нормы. В применении к оценке параметров

сигналов, в частности к оценке параметров донных слоев, функционал невязки типа нейроноподобной свертки будет иметь вид [113]:

$$W_{Neuro} = 1 - 2 \frac{\|Q(S(t), M(t))\|}{\|S(t)\| + \|M(t)\|} \quad (2.10)$$

где $S(t) = p_{obs}(t)$ - измеряемый сигнал, $M(t) = p_{calc}(t)$ - рассчитанный сигнал, а процедура сравнения сигналов описывается следующими соотношениями:

$$Q(S(t), M(t)) = \max \left[|S(t)| \cdot \gamma_1(t), |M(t)| \cdot \gamma_2(t) \right],$$

$$\gamma_1(t) = \begin{cases} 0, & -|S(t)| \leq (M(t) - S(t)) \cdot \text{sign}(S(t)) \\ 1, & -|S(t)| > (M(t) - S(t)) \cdot \text{sign}(S(t)) \end{cases}, \quad (2.11)$$

$$\gamma_2(t) = \begin{cases} 0, & -|M(t)| \leq (S(t) - M(t)) \cdot \text{sign}(M(t)) \\ 1, & -|M(t)| > (S(t) - M(t)) \cdot \text{sign}(M(t)) \end{cases}.$$

Функция $Q(S(t), M(t))$ является сигналом с выхода нейроноподобной сети и рассчитываемая по ней нейроноподобная свертка W_{Neuro} (2.10) подвергается минимизации при переборе параметров модели (рассчитанного сигнала). Такая свертка выполняет операцию, аналогичную той, что выполняет согласованный фильтр. При использовании W_{Neuro} , каждый из измеренных импульсов при зондировании морского дна свертывается с помощью критерия минимизации (2.10) с излучаемым сигналом. На рис. 2.3 приведен пример расчета сигнала с выхода нейроноподобной сети: синей линией показан принятый сигнал с шумом, красной линией – модельный рассчитанный сигнал, а черной линией – сигнал $Q(S(t), M(t))$, прошедший нейроноподобную свертку сигналов.

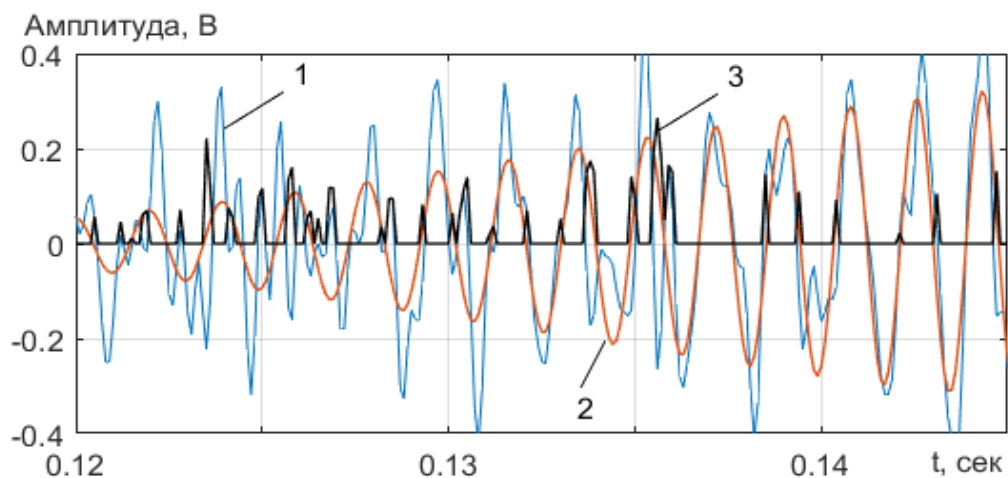


Рисунок 2.3 – Пример расчета сигнала с выхода нейроноподобной сети (1 – принимаемый сигнал с шумом, 2 – модельный сигнал, 3 – сигнал, прошедший нейроноподобную сеть)

Обобщенные параметрические процессоры. В тех случаях, когда выходная мощность процессора (функционала невязки) зависит также от некоторого дополнительного набора параметров p , можно это использовать для улучшения качества процессора. Фиксируя конечное множество таких наборов $\{p_k\}_{k=1}^K$ и вычисляя для каждого из них выходные мощности $W_{AMUSIC} = W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, p_k)$, мы можем построить обобщенные процессоры:

$$W_{AMUSICp_1}(\varepsilon, \phi, K) = \sum_{k=1}^K W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, p_k), \quad (2.12.1)$$

$$W_{AMUSICp_2}(\varepsilon, \phi, K) = \prod_{k=1}^K W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, p_k), \quad (2.12.2)$$

при этом искомые параметры сигнала оцениваются из условий: $\hat{\phi} = \arg \max \{W_{AMUSICp_{1,2}}(\varepsilon, \phi, K)\}$.

В качестве таких дополнительных наборов параметров могут выступать спектральные частоты зондирующего сигнала, координаты гидрофонов приемной антенны и пр.

Частотные обобщенные процессоры $W_{AMUSICf}$. Пусть в точке с координатой (r_0, z_0) океанического волновода расположен источник, излучающий широкополосный сигнал $s_0(t)$. Этот сигнал регистрируется антенной, состоящей из N элементов. Результирующее поле на входе антенной решетки на частоте ω_k (принадлежащей полосе сигнала) характеризуется вектором наблюдения $x(\omega_k)$ размерности N : $x(\omega_k) = s_0(\omega_k)\mathbf{e}(\phi, \omega_k) + \mathbf{n}(\omega_k)$, $k = 1 \dots K$. Здесь $s_0(\omega_k)$ — частный спектр полезного сигнала, $\mathbf{e}(\phi, \omega_k)$ — сигнальный вектор антенной решетки, зависящий от искомых параметров ϕ , $\mathbf{n}(\omega_k)$ — аддитивный вектор шума, K — полное число спектральных компонент, используемых при обработке. Для пространственно когерентного сигнала корреляционная матрица вектора наблюдения на частоте ω_k дается соотношением:

$$\Gamma_x(\omega_k) = \sigma_s^2(\omega_k)\mathbf{e}(\phi, \omega_k)\mathbf{e}^+(\phi, \omega_k) + \Gamma_n(\omega_k), \quad (2.13)$$

где $\sigma_s^2(\omega)$ — спектральная плотность мощности полезного сигнала, $\Gamma_n(\omega_k)$ — корреляционная матрица шума. В реальных условиях получение истинной матрицы $\Gamma_x(\omega_k)$ не представляется возможным, поэтому в качестве последней используется соответствующая выборочная матрица. Для этого входная реализация вектора наблюдения $x(t)$, регистрируемая в течение некоторого времени $t \in [T_1, T_2]$, разбивается на Q элементарных интервалов длительности T_0 (так что $Q = (T_2 - T_1)/T_0$) и на каждом из них производится дискретное

преобразования Фурье (ДПФ). Формируемый в результате вектор-столбец спектральных отсчетов $\{x_q(\omega_k)\}_{q=1}^Q$ служит для построения выборочной оценки корреляционной матрицы:

$$\hat{\Gamma}_x(\omega_k) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q x_q(\omega_k) x_q^+(\omega_k). \quad (2.14)$$

На практике экспериментатор имеет дело с совокупностью временных отсчетов $x(T_S)$, $x(2T_S), \dots, x(LT_S)$ на выходе антенной решетки, где $T_S = F_S^{-1}$, F_S — частота дискретизации, а L — полный объем выборки. В рассматриваемой ситуации весь интервал анализа $T = LT_S$ разбивается на Q одинаковых подинтервалов длительности $T_0 = T/Q$, содержащих по $K = T_0 F_S = L/Q$ временных отсчетов. Обозначим через $\{x_q(t_k)\}_{k=1}^K$ значения принятой выборки на q -ом подинтервале ($q = 1 \dots Q$) в моменты времени $t_k = kT_S$. Тогда искомым вектор-столбец спектральных отсчетов $\{x_q(\omega_k)\}_{q=1}^Q$, где $\omega_k = (2\pi(k-1)/K)F_S$, находится путем K -точечного дискретного преобразования Фурье от $x_q(t_k)$, а соответствующая выборочная матрица находится согласно (2.13).

При обнаружении и оценивании параметров широкополосного шумового источника традиционная процедура пространственной обработки сводится к нахождению оптимальных (адаптивных) весовых коэффициентов антенной решетки для отдельных спектральных компонент, принадлежащих полосе полезного сигнала, с последующим некогерентным суммированием выходных эффектов. Важно подчеркнуть, что использование широкополосного излучения заметно повышает качество восстановления. Последнее связано с тем, что пространственное положение боковых максимумов функции неопределенности частотно зависимо и дополнительное усреднение по частоте приводит к сглаживанию ложных пиков, устраняя тем самым проблему неоднозначности.

При использовании вышеописанных узкополосных алгоритмов выходная мощность процессора на данной частоте ω_k дается соотношением $W_{AMUSIC} = W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, \omega_k)$. Последующее усреднение по частотам (с использованием арифметического и/или геометрического среднего) приводит к обобщенным выходным мощностям:

$$W_{AMUSICf_1}(\varepsilon, \phi, K) = \sum_{k=1}^K W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, \omega_k), \quad (2.15.1)$$

$$W_{AMUSICf_2}(\varepsilon, \phi, K) = \prod_{k=1}^K W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, \omega_k), \quad (2.15.2)$$

Пространственные обобщенные процессоры. Изменяя координаты гидрофонов приемной антенны, можно построить обобщенные пространственные процессоры. В частности,

изменяя удаление антенны от источника при неизменной ее глубине погружения и ориентации, получаем обобщенный процессор $W_{AMUSICr}$, изменяя угол наклона антенны при неизменном положении верхнего гидрофона — процессор $W_{AMUSIC\alpha}$ и т.д.

Аналогичные обобщенные процессоры можно строить с использованием других функционалов невязки (L_p -нормы, Нейроподобной свертки и т. д.).

2.1.3. Описание релаксационно-итерационного метода поиска решений

Для отыскания экстремума целевой функции при решении обратной задачи реконструкции морского дна, используются различные методы и алгоритмы: метод релаксации, генетический алгоритм, метод отжига и другие [6]. Поскольку размерность пространства параметров модели \mathbf{M}_R велика, наиболее удобным методом поиска решения, может быть метод релаксации, согласно которому, на основе априорного анализа особенностей формирования полезных сигналов в модели \mathbf{M}_R , выявляются такие параметры, которые наиболее сильно влияют на целевую функцию. Остальные параметры фиксируются со значениями, выбранными на основе априорной информации. В исследуемой в задаче, как показывает анализ (см. главу 1), ряд импульсов, располагающихся вдоль оси задержек, быстро спадает по амплитуде (рис. 1.5б). Из этого можно сделать вывод, что и структура целевой функции, прежде всего, определяется энергонасыщенными сигналами от нескольких первых слоев. На рис. 2.4 показана структура целевой функции при использовании критерия минимизации W_{Lp} типа L_p -нормы с когерентным траекторным накоплением (2.3). Дно в этом случае представлялось в виде нескольких осадочных слоев. Целевая функция рассчитана в плоскости параметров первого слоя {плотность-скорость продольных волн в первом осадочном слое} при малых уровнях шумов и помех. Как показывает анализ, влияние сигналов от глубоко залегающих слоев проявлялось лишь в форме и глубине минимума в районе истинных решений.

Из представленных соображений и других расчетов следует, что в качестве первого этапа поиска решения следует осуществлять реконструкцию первого слоя, полагая нижележащие слои заданными со значениями параметров, определяемых из априорной информации. Полученные на первом шаге реконструкции оценки параметров первого слоя, тем не менее, зависят от выбранных из априорных данных параметров второго слоя. Для уточнения оценок необходимо использовать итерационный метод, используя, на втором шаге оценивания, полученные на первом шаге поиска оценки параметров первого слоя. Итерационный процесс должен остановиться тогда, когда будет достигнута требуемая точность, либо, если точность оценивания не повышается. В главе 1 было показано, что от продольной скорости и толщины

целевая функция имеет более резкую зависимость, чем от плотности и поперечной скорости в слое. Целевая функция при этом имеет овражную форму (рис. 2.4). Это объясняется малым влиянием последних параметров на коэффициенты отражения и преломления на границах сред. Эти особенности полезно учитывать для отыскания экстремума целевой функции, например, сначала отыскать овраг, а экстремум искать в овраге (такая траектория поиска показана стрелками на рис. 2.4).

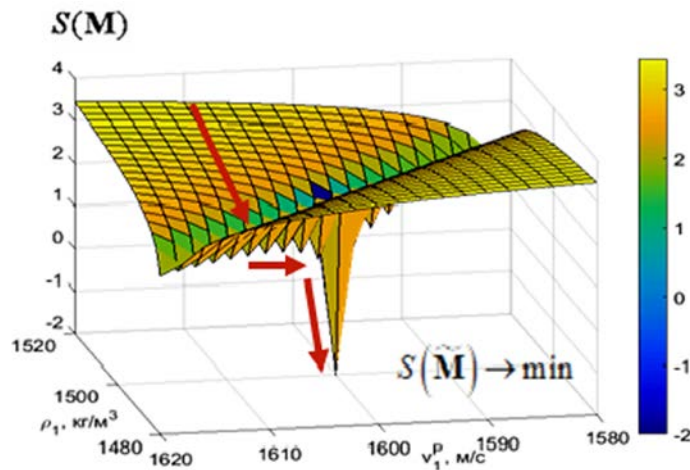


Рисунок 2.4 – Структура целевой функции при использовании критерия минимизации W_{Lp} для дна из нескольких осадочных слоев, в плоскости параметров первого слоя {плотность-скорость продольных волн в первом осадочном слое}

Далее, при оценивании параметров донных слоев с помощью алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании, будет использоваться релаксационно-итерационный (РИТ) метод, в котором поиск значений параметров происходит последовательно и послойно. При этом выполняются следующие операции:

- 1) выполняется оценка параметров первого слоя, при этом фиксируются все параметры слоев, начиная со второго;
- 2) выполняется перебор параметров и расчет целевой функции в пространстве параметров первого слоя;
- 3) найденный локальный экстремум принимается как оценка первого слоя;
- 4) оцениваются параметры второго слоя, фиксируя параметры первого слоя и всех слоев вглубь, начиная с третьего;
- 5) далее возвращаются к оценке параметров первого слоя для их уточнения, так же фиксируя параметры всех слоев, начиная со второго;
- 6) следующим шагом оцениваются параметры второго слоя, далее третьего и так далее;

7) итерации останавливаются после исследования сходимости оценок параметров к истинным значениям от номера итерации.

При решении задачи инверсии параметров морского дна для конкретных условий может проявиться ряд особенностей, которые могут и должны учитываться, В этой связи, будем рассматривать задачу реконструкции параметров морского дна сначала для более простой ситуации, связанной с реконструкцией верхних осадочных слоев.

2.2. Анализ решения обратной задачи по реконструкции параметров верхних осадочных слоев при когерентном импульсном зондировании морского дна

Рассмотрим задачу восстановления параметров осадочной толщи, которую часто можно аппроксимировать набором жидких слоев. Будем полагать, что имеется частичная априорная информация о числе слоев N , их толщинах h_i и акустических параметрах $\{\rho_i, c_i, \delta_i\}$. При этом числа элементов антенн и их расположение в волноводе, как и параметры самого волновода, будем считать известными. Рассмотрим сначала случай одноэлементных излучающей и приемной антенн. В качестве наблюдаемых данных рассмотрим известные, вообще говоря, со случайными ошибками, времена задержек импульсов и их спектральные амплитуды (для заданных частот $\omega_1, \dots, \omega_M$) $\tilde{T} = \{\tilde{T}^{(1)}, \dots, \tilde{T}^{(N+3)}\}$, $\tilde{g}(\omega_m) = \{\tilde{g}^{(1)}(\omega_m), \dots, \tilde{g}^{(N+3)}(\omega_m)\}$, $m = 1 \dots M$. Будем считать, что импульсы могут быть идентифицированы по их временам прихода. Покажем, что это возможно, по крайней мере, в отсутствие ошибок их измерения. Действительно, время прихода прямого импульса – определяется как $T_{SR} = r_{SR} / c_0 = \tilde{T}^{(k_1)}$, время прихода отраженного от поверхности импульса – $T_{SQR} = (r_{SQ} + r_{QR}) / c_0 = \tilde{T}^{(k_2)}$, время прихода импульса, отраженного от верхней границы первого донного слоя – $T^{(0)} = (r_{S0} + r_{R0}) / c_0 = \tilde{T}^{(k_3)}$. Все эти времена могут быть рассчитаны заранее, так как в рамках рассматриваемой схемы акустического наблюдения они определяются только известными параметрами. Оставшиеся компоненты вектора \tilde{T} , рассматриваемые в порядке возрастания $\tilde{T}^{(i_1)} < \tilde{T}^{(i_2)} < \dots < \tilde{T}^{(i_N)}$, являются временами прихода импульсов, отраженных от нижних границ донных слоев. Заметим, что в случае упругих слоев, указанное свойство монотонного возрастания задержек с нарастанием глубины границ слоев нарушается из-за перемешивания монотипных и обменных отраженных и преломленных границами слоев волн. Для импульса, отраженного от нижней границы слоя $n = 1 \dots N$, время его распространения от

источника до приемника $T^{(n)}$ является функционалом от неизвестных параметров слоев

$$T^{(n)} = T^{(n)}(h_1, \dots, h_n; c_1, \dots, c_n) = (r_{Sn} + r_{Rn}) / c_0 + 2 \sum_{k=1}^n r_{kn} / c_k = \tilde{T}^{(i_n)}.$$

Спектральные амплитуды прямого $g_{SR}(\omega)$ и отраженного от поверхности $g_{SQR}(\omega)$ импульсов также могут быть рассчитаны заранее по формулам, представленным в 1 главе. Амплитуда импульса, отраженного от верхней границы первого слоя $g^{(0)}(\omega)$, зависит от неизвестных параметров $\{c_1, \rho_1\}$, а амплитуды импульсов, отраженных от нижних границ слоев

$g^{(n)}(\omega) = g^{(n)}(h_1, \dots, h_n; \delta_1, \dots, \delta_n; c_1, \dots, c_{n+1}; \rho_1, \dots, \rho_{n+1}; \omega) = \tilde{g}^{(i_n)}(\omega)$, зависят от неизвестных (наблюдаемых) параметров h_1, \dots, h_n , $\delta_1, \dots, \delta_n$, c_1, \dots, c_{n+1} и $\rho_1, \dots, \rho_{n+1}$ (формулы в главе 1).

Обратная задача акустического зондирования морского дна состоит в определении неизвестных параметров донных слоев $\mathbf{P} = \{h_1, \dots, h_N; c_1, \dots, c_N; \rho_1, \dots, \rho_N; \delta_1, \dots, \delta_N\}$ по значениям времен прихода импульсов $\tilde{T}^{(i_n)}$ и их спектральных амплитуд $\tilde{g}^{(i_n)}(\omega)$, измеряемым решеткой гидрофонов, буксируемой в подводном положении на небольшой глубине. При этом будем считать, что априори известны (доверительные) интервалы, в которых с заданной вероятностью

находятся эти параметры: $c_k \in I_{c_k}^{(0)} = \left(c_k^{(0)}, \hat{c}_k^{(0)} \right)$, $h_k \in I_{h_k}^{(0)} = \left(h_k^{(0)}, \hat{h}_k^{(0)} \right)$,
 $\rho_k \in I_{\rho_k}^{(0)} = \left(\rho_k^{(0)}, \hat{\rho}_k^{(0)} \right)$, $\delta_k \in I_{\delta_k}^{(0)} = \left(\delta_k^{(0)}, \hat{\delta}_k^{(0)} \right)$, $k = 1 \dots N$.

Для нахождения параметров осадочных слоев имеем систему уравнений

$$\begin{cases} T^{(n)}(h_1, \dots, h_n; c_1, \dots, c_n) = \tilde{T}^{(i_n)}, \\ g^{(n)}(h_1, \dots, h_n; \delta_1, \dots, \delta_n; c_1, \dots, c_n; \rho_1, \dots, \rho_n; \omega_m) = \tilde{g}^{(i_n)}(\omega_m), \\ n = 1, \dots, N, m = 1 \dots M. \end{cases} \quad (2.16)$$

В зависимости от числа частот M система (2.12) имеет разную степень определенности и вследствие этого может, как не иметь решения, так и иметь множество решений. В отличие от этого обобщенное решение системы (2.12), то есть решение экстремальной задачи

$$\begin{aligned} W(\mathbf{P}) \equiv \sum_{k=1}^N \left(T^{(k)}(h_1, \dots, h_k; c_1, \dots, c_k) - \tilde{T}^{(i_k)} \right)^2 + \\ + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N \left| g^{(k)}(h_1, \dots, h_k; \delta_1, \dots, \delta_k; c_1, \dots, c_k; \rho_1, \dots, \rho_k; \omega_m) - \tilde{g}^{(i_k)}(\omega_m) \right|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{P} \in I}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

где минимум ищется по всем параметрам \mathbf{P} из произведения доверительных интервалов $I = I_h \times I_c \times I_\delta \times I_\rho$, всегда существует, хотя может быть и не единственным. Заметим, что при

формулировке экстремальной задачи в (2.17) в качестве функционала невязки $W(\mathbf{P})$ использована L_2 -норма, но также могут быть использованы и другие функционалы невязки. При заданных статистиках шумов выбор функционала невязки определяет распределения оценок параметров и потому влияет на эффективность оценивания. Поэтому при постановке задачи необходимо максимально учитывать априорную информацию о структуре наблюдаемых объектов, среде и шумах.

Задачу восстановления донных параметров можно решать также в рамках теории проверки статистических гипотез. При этом в качестве отдельных гипотез могут выступать предположения о принадлежности искомым параметрам заданным областям.

2.2.1. Уточнение интервалов поиска параметров осадочных слоев

Успех в решении экстремальной задачи (2.17) определяется, в частности, объемом множества I , то есть точностью априорной информации относительно искомым параметрам. Поэтому прежде чем приступить непосредственно к минимизации функционала $W(\mathbf{P})$ следует сузить это множество до минимально возможных размеров. Покажем, что это возможно из предварительного анализа системы (2.16). Пусть $H = 100$ м, $z_S = 30$ м, $z_R = 3$ м, $d_{SR} = 60$ м, $c_0 = 1465$ м/с, $\delta_0 = 0$, $I_{c_k}^{(0)} = (1465, 1565)$ м/с, $I_{h_k}^{(0)} = (0, 400)$ м. Рассмотрим функцию $T^{(1)}(h_1; c_1) = (r_{S1} + r_{1R}) / c_0 + 2r_{11} / c_1 = Z\sqrt{1 + \theta_{01}^2} / c_0 + 2h_1\sqrt{1 + \theta_{11}^2} / c_1$, где $\theta_{01} = d_{SR} / (Z + 2h_1c_1 / c_0)$, $Z = 2H - z_S - z_R$, которая определяет зависимость времени $T^{(1)}$ прихода отраженного от

Как показывают расчеты, линии уровней функции $T^{(1)}(h_1; c_1)$ для $h_1 \in I_{h_1}^{(0)}$, $c_1 \in I_{c_1}^{(0)}$ почти параллельны оси скоростей c_1 (рис. 2.5). Такое поведение этой функции объясняется следующим. Учитывая, что $\theta_{01} \leq d_{SR} / Z \approx 0.3$, имеем $T^{(1)}(h_1; c_1) \approx 0.12 + 2.1h_1 / c_1$, так, что при фиксированном c_1 зависимость $T^{(1)}(h_1; c_1)$ от h_1 близка к линейной с коэффициентом $k = 2.1 / c_1$. Так как относительные изменения скорости c_1 / c_0 в доверительном интервале $c_1 \in I_{c_1}^{(0)}$ невелики, то и коэффициент k изменяется в малом интервале, что приводит к близким к параллельным линиям уровней функции $T^{(1)}(h_1; c_1)$. Решая уравнение $T^{(1)}(h_1; c_1) = \bar{T}^{(1)}$ для граничных значений c_1 из $I_{c_1}^{(0)}$, сужаем доверительный интервал для глубины h_1 до $I_{h_1}^{(1)} = \left(h_1^{(1)}, \hat{h}_1^{(1)} \right)$: $\bar{T}^{(1)} = T^{(1)}\left(\hat{h}_1^{(1)}; \hat{c}_1^{(0)} \right) = T^{(1)}\left(h_1^{(1)}; c_1^{(0)} \right)$. Заменяя здесь точные значения $T^{(1)}(h_1; c_1)$ на найденные выше

приближенные значения, $0.12 + 2.1\hat{h}_1^{(1)}/\hat{c}_1^{(0)} \approx 0.12 + 2.1h_1^{(1)}/c_1^{(0)}$, получим оценку длины интервала $I_{h_1}^{(1)}$:

$$\left| I_{h_1}^{(1)} \right| = \hat{h}_1^{(1)} - h_1^{(1)} \approx \left(\hat{c}_1^{(0)} - c_1^{(0)} \right) h_1^{(1)} / c_1^{(0)} \approx \left(\hat{c}_1^{(0)} - c_1^{(0)} \right) \left(\bar{T}^{(1)} - 0.12 \right) / 2.1.$$

Эта формула показывает, что длина интервала $\left| I_{h_1}^{(1)} \right|$ пропорциональна длине доверительного интервала для скорости звука $\left| I_{c_1}^{(0)} \right|$ и времени пребывания волны в первом слое $\bar{T}^{(1)} - 0.12$.

первого слоя импульса от параметров этого слоя (h_1, c_1) .

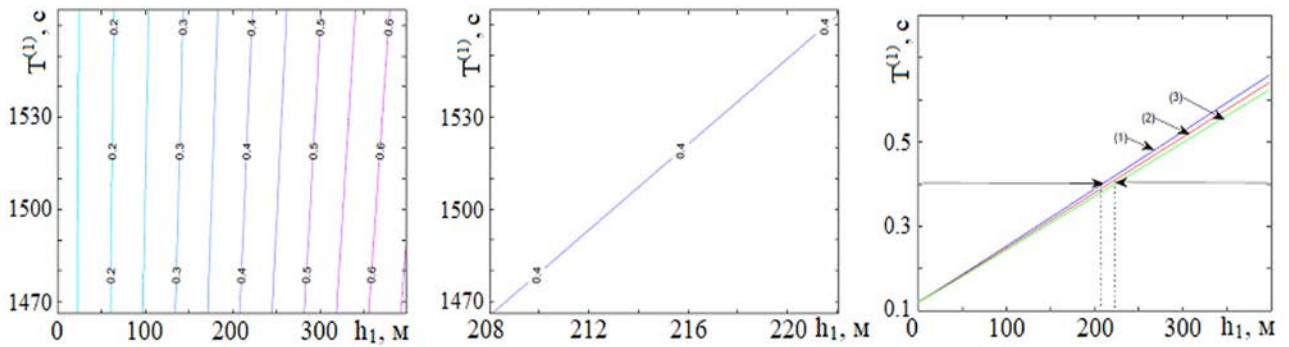


Рисунок 2.5 – Линии уровней функции $T^{(1)}(h_1; c_1)$ для двух интервалов изменения h_1 (слева и по центру) и зависимость $T^{(1)}(h_1; c_1)$ от глубины слоя h_1 для различных значений скорости c_1 : (1) $c_1 = 1465$ м/с, (2) $c_1 = 1515$ м/с, (3) $c_1 = 1565$ м/с (справа) (пунктиром обозначены границы доверительного интервала $I_{h_1}^{(1)} \approx (208, 222)$ м для $\bar{T}^{(1)} = 0.4$ с)

Пусть, например, время прихода первого импульса $\bar{T}^{(1)} = 0.4$ с. Тогда, как видно из расчетов, представленных на рис. 2.5, $I_{h_1}^{(1)} \approx (208, 222)$ м/с, $\left| I_{h_1}^{(1)} \right| \approx 14$ м/с, что хорошо согласуется с оценкой, которая получается из приближенной формулы: $\left| I_{h_1}^{(1)} \right| \approx 0.13 \cdot 100 = 13$ м/с. Таким образом, используя лишь априорные сведения о скорости распространения звука в первом слое, мы получаем значительное сужение доверительного интервала для оценки ширины первого слоя h_1 . Из рис. 2.5 видно, что дальнейшее сужение доверительных интервалов для параметров h_1, c_1 с использованием только той информации, что содержится в первом из уравнений (2.16), невозможно: $I_{c_1}^{(1)} = I_{c_1}^{(0)}$. Однако полученные выше результаты можно использовать далее для сужения доверительных интервалов для параметра h_2 . Рассмотрим функцию:

$$T^{(2)}(h_1, h_2; c_1, c_2) = (r_{S2} + r_{2R}) / c_0 + 2(r_{12} / c_1 + r_{22} / c_2) = Z \sqrt{1 + \theta_{02}^2} / c_0 + 2h_1 / c_1, \quad (2.18)$$

где $\theta_{02} = \rho_{RS} / (Z + 2(c_1 h_1 + c_2 h_2) / c_0)$. Аналогично оценке для $T^{(1)}(h_1; c_1)$, можно получить оценку $T^{(2)}(h_1, h_2; c_1, c_2) \approx 0.12 + 2.1(h_1 / c_1 + h_2 / c_2)$. Построим графики функции $T^{(2)}(h_1, h_2; c_1, c_2)$ на прямоугольнике $c_2 \in I_{c_2}^{(0)} = (1465, 1565)$ м/с, $h_2 \in I_{h_2}^{(0)} = (0, 400)$ м, выбирая для неизвестных параметров $\{h_1, c_1\}$ предельные их значения из интервалов неопределенности $I_{h_1}^{(1)}$ и $I_{c_1}^{(1)}$, соответственно. Из оценки $T^{(2)}(h_1, h_2; c_1, c_2)$ следует, что минимальное и максимальное значения этой функции по паре переменных h_1, c_1 достигаются, соответственно, при $\{h_1, \hat{c}_1\}$ и $\{\hat{h}_1, c_1\}$, указанные пары параметров и выбираем при построении графиков рис. 2.6. Решая уравнение $\bar{T}^{(2)} = T^{(2)}$ для граничных значений c_2 из $I_{c_2}^{(0)}$, можно сузить доверительный интервал для h_2 с $I_{h_2}^{(0)}$ до $I_{h_2}^{(1)} = (h_2^{(1)}, \hat{h}_2^{(1)})$. Рассмотрим, например, уровень $\bar{T}^{(2)} = 0.7$ с. Из графиков рис. 2.6 видно, что $I_{h_2}^{(1)} \approx (206.5, 250)$ м/с, $|I_{h_2}^{(1)}| \approx 43.5$ м/с. Получим численную оценку для $|I_{h_2}^{(1)}|$. Имеем $\bar{T}^{(2)} = T^{(2)}(\hat{h}_1^{(1)}, \hat{h}_2^{(1)}; \hat{c}_1^{(0)}, \hat{c}_2^{(0)}) = T^{(2)}(\hat{h}_1^{(1)}, h_2; c_1^{(0)}, c_2^{(0)})$. Подставляя оценку для $T^{(2)}(h_1, h_2; c_1, c_2)$ в $\bar{T}^{(2)}$, имеем $\hat{h}_1^{(1)} / c_1^{(0)} + h_2 / c_2^{(0)} \approx \hat{h}_1^{(1)} / \hat{c}_1^{(0)} + \hat{h}_2^{(1)} / \hat{c}_2^{(0)}$. С учетом принятых приближений, находим

$$\begin{aligned} |I_{h_2}^{(1)}| &= \hat{h}_2^{(1)} - h_2^{(1)} \approx \hat{c}_2^{(0)} \left(\hat{h}_1^{(1)} / c_1^{(0)} - h_1^{(1)} / \hat{c}_1^{(0)} \right) + \left(\hat{c}_2^{(0)} / c_2^{(0)} - 1 \right) h_2^{(1)} \approx \\ &\approx \hat{c}_2^{(0)} \left(\hat{h}_1^{(1)} / c_1^{(0)} - h_1^{(1)} / \hat{c}_1^{(0)} \right) + \left(\hat{c}_2^{(0)} - c_2^{(0)} \right) \left(\left(\bar{T}^{(2)} - 0.12 \right) / 2.1 - \hat{h}_1^{(1)} / \hat{c}_1^{(0)} \right), \end{aligned} \quad (2.19)$$

откуда получаем $|I_{h_2}^{(1)}| \approx 42.6$ м/с. Полученная оценка хорошо совпадает с той, что получена из расчетов, представленных на рис. 2.6.

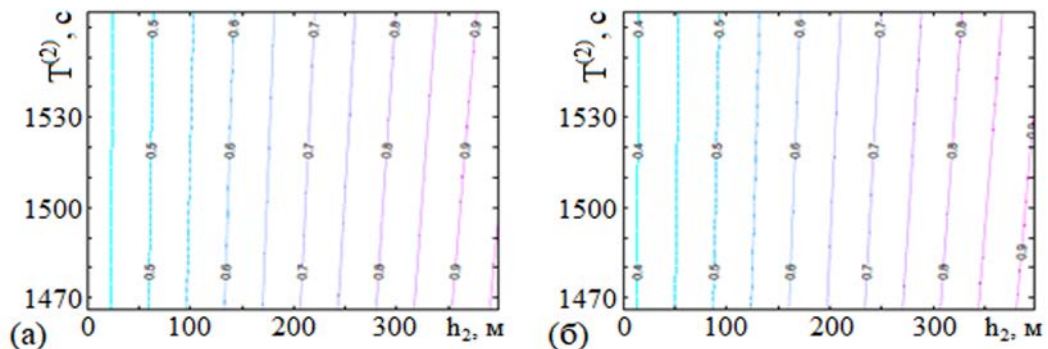


Рисунок 2.6 – Линии уровней функции $T^{(2)}(\hat{h}_1^{(1)}, h_2; \hat{c}_1^{(0)}, c_2)$ и $T^{(2)}(\hat{h}_1^{(1)}, h_2; c_1^{(0)}, c_2)$; (а) – $c_1 = 1465$ м/с, $h_1 = 222$ м; (б) – $c_1 = 1565$ м/с, $h_1 = 208$ м

Таким образом, используя априорные сведения о скорости распространения звука во втором слое и полученные ранее интервальные оценки параметров первого слоя, мы добились существенного сужения доверительного интервала для ширины второго слоя. Далее, используя полученные выше оценки, можно уточнить параметры третьего и других слоев. Размеры уточненных доверительных интервалов при этом нарастают с возрастанием номера слоя.

2.2.2. Исследования применения функционалов невязки, основанных на спектральных свойствах корреляционных матриц, на примере реконструкции параметров модели верхних осадочных слоев

Обширная группа методов решения обратных задач реконструкции параметров волновых объектов связана с согласованной частотной и пространственной обработкой сигналов [78]. Общая задача формулируется как построение частотно-пространственного фильтра, позволяющего по принятой выборке смеси сигнала и шумов $\{\mathbf{x}(t_l)\}_{l=1}^L$ оптимальным способом выделить полезный сигнал из наблюдаемой смеси и оценить его параметры. Обычно оцениванию подлежит неизвестный векторный параметр сигнала ϕ , что зачастую реализуется в форме поиска максимума выходной мощности некоторого функционала невязки в области, априори содержащей истинные значения параметров. Сложностью задачи часто оказываются высокая размерность пространства поиска и овражный характер функции процессора, когда зависимость ее от различных параметров существенно различается. При этом методы тотального перебора могут быть малоэффективными и следует использовать методы упорядоченного поиска, использующие специфику задачи. Примеры дают методы релаксации, состоящие в последовательной максимизации функционала по отдельным параметрам (группам параметров) при фиксированных значениях прочих [93]. Успех реализации подобных методов зависит, главным образом, от стратегии поиска: удачности выбора последовательности определяемых параметров, начальных значений прочих параметров и т.д. Эффективность восстановления параметров сигнала и его робастность определяются выбором функционала невязки, с трудом поддаются априорной теоретической оценке и требуют апробации.

Эффективность решения задачи акустического наблюдения зависит от построения оптимальных моделей сигналов и шумов, использования оптимальных методов поиска и принятия решений. Развитая в рамках приближения геометрической акустики физико-математическая модель (глава 1) позволила использовать взаимосвязь параметров отдельных донных слоев для сужения интервала поиска решения в многомерном пространстве параметров и их послойной реконструкции. При этом показано, что ошибки оценивания более мелких донных слоев понижают достоверность оценок более глубоких слоев.

В задаче восстановления параметров жидкого слоистого дна, вектор ϕ значений толщин донных слоев имеет компоненты: толщины $\{h_k\}$, плотностей их грунтов $\{\rho_k\}$ и скоростей звука $\{c_k\}$ в отдельных слоях, так что размерность пространства параметров равна $3N$, где N — число слоев. Отметим особенности данной задачи, связанные со структурой рассчитываемого с помощью модели для частоты ω направляющего вектора $\mathbf{e}(\omega) = (e(\omega, 1), \dots, e(\omega, N_a))$, описывающего полное поле на отдельных гидрофонах $\mathbf{r}_R(k)$ принимающей антенны, в котором проекции $e(\omega, k)$ определяются совокупностью спектральных компонент поля $e(\omega, k) = g(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(V)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_g(k)) + \dots + g^{(N)}(\omega, \mathbf{r}_g(k))$. Во-первых, прямое поле g от источника, а также отраженное только от поверхности океана поле $g^{(V)}$ не зависят от донных параметров ϕ . Во-вторых, поле $g^{(0)}$, отраженное от верхней границей первого донного слоя, зависит только от параметров этого верхнего слоя. В-третьих, поле $g^{(1)}$, отраженное верхней границей второго донного слоя, зависит только от параметров первых двух слоев и т.д. Наконец, поле $g^{(N)}$ зависит от всех параметров из вектора ϕ . При этом, для морского дна в виде жидкого слоистого полупространства, амплитуды компонент $g, g^{(V)}, g^{(0)}, g^{(1)}, \dots, g^{(N)}$ монотонно убывают, а времена прихода соответствующих компонент полей на антенну монотонно возрастают. Использование этих закономерностей позволяет оптимизировать поиск решений в многомерном пространстве параметров. Отметим, что при необходимости учета упругих свойств донных слоев, монотонность изменения амплитуд и времен прихода волновых компонент к приемной антенной нарушается из-за перемешивания при отражении и преломлении продольных поперечных волновых компонент различными донными слоями. Число волновых компонент, формируемых при отражении от дна, существенно возрастает и достигает $M = 1 + \sum_{i=1}^N 4^i$. Интервал задержек, в котором располагаются отраженные от дна волновые компоненты, возрастает. Кроме того, для модели морского дна в виде упругих слоев, размерность пространства параметров заметно возрастает. Однако для дна в виде жидких слоев структура измеряемых сигналов более проста. Перечисленные особенности задачи позволяют использовать две схемы восстановления донных параметров: 1 – зондирование дна может выполняться с помощью узкополосных импульсных сигналов, 2 – зондирования дна может основываться на использовании широкополосных импульсных сигналов. Отметим, что зондирование узкополосными акустическими импульсами важно с практической точки зрения, поскольку требуемые для этого узкополосные когерентные акустические излучатели имеют

более простую конструкцию и могут быть созданы с использованием технологий, развитых при создании гидроакустических излучателей.

Рассмотрим задачу восстановления параметров двухслойного дна, состоящего из жидкого слоя толщиной h_1 , лежащего на жидком полупространстве (рис. 2.7), что соответствует осадочным слоям в реальных природных условиях.

В данной задаче восстановлению подлежит вектор ϕ из шести параметров $\{h_1, c_1, \rho_1, \delta_1, c_2, \rho_2\}$. Рассмотрим однородный волновод глубины H с помещенным в него точечным источником $(x_s, y_s = 0, z_s)$ и приемной линейной антенной из N_a гидрофонов, расположенных в точках $\mathbf{r}_g(k) \equiv (x_g(k), y_g(k) = 0, z_g(k))$, $x_g(k) = x_g(1) + (k-1) l_g \cos \alpha_g$, $z_g(k) = z_g(1) + (k-1) l_g \sin \alpha_g$, $k = 1, \dots, N_a$. Здесь l_g — расстояние между отдельными гидрофонами, α_g — угол наклона антенны в плоскости xz . Скорость звука в заполняющий волновод воде c_0 , плотность воды ρ_0 , затухание δ_0 ; скорость звука и плотность воздуха c_v и ρ_v соответственно.

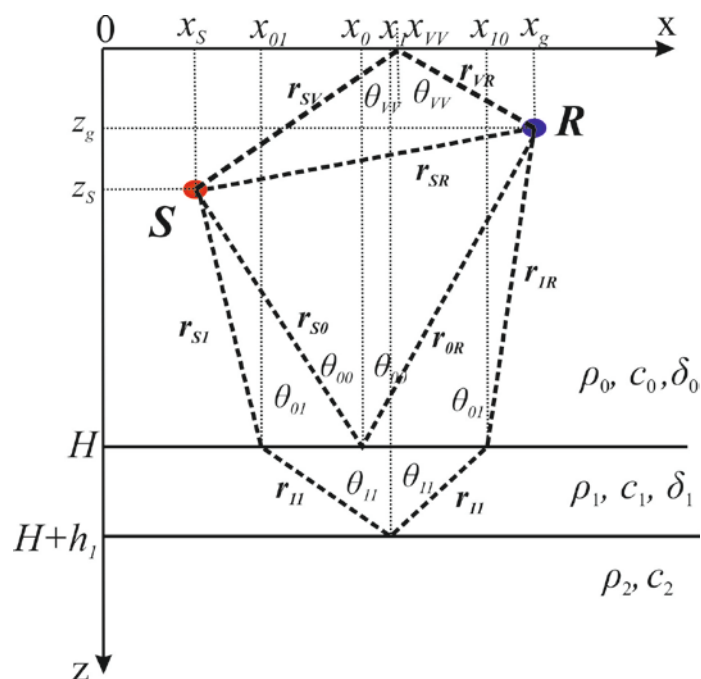


Рисунок 2.7 – Схема волновода с двухслойным дном

Спектральные амплитуды отраженных от поверхности и границ донных слоев сигналов на частоте ω в точке приема \mathbf{r}_R равны:

$$\begin{aligned}
g^{(V)}(\omega, \mathbf{r}_R) &= \hat{V}_V \frac{\exp[-(\delta_0(\omega) + ik_0(\omega))(r_{SV} + r_{VR})]}{r_{SV} + r_{VR}}, \\
g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_R) &= \hat{V}_{01} \frac{\exp[-(\delta_0(\omega) + ik_0(\omega))(r_{S0} + r_{R0})]}{r_{S0} + r_{R0}}, \\
g^{(1)}(\omega, \mathbf{r}_R) &= \hat{V}_{12} \hat{W}_{01}(\theta_{01}) \hat{W}_{10}(\theta_{11}) \frac{\exp[-\Delta_1(\omega) - i\varphi_1(\omega)]}{r_{S1} + r_{R1} + 2r_{11}},
\end{aligned} \tag{2.20}$$

где в приближении малых углов падения:

$$\begin{aligned}
\hat{V}_V &= \frac{\frac{\rho_V}{\rho_0} \cos \theta_{VV} - \sqrt{\left(\frac{c_0}{c_V}\right)^2 - \sin^2 \theta_{VV}}}{\frac{\rho_V}{\rho_0} \cos \theta_{VV} + \sqrt{\left(\frac{c_0}{c_V}\right)^2 - \sin^2 \theta_{VV}}}, \\
\hat{V}_{01} &= \frac{\frac{\rho_1}{\rho_0} \cos \theta_{00} - \sqrt{\left(\frac{c_0}{c_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_{00}}}{\frac{\rho_1}{\rho_0} \cos \theta_{00} + \sqrt{\left(\frac{c_0}{c_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_{00}}}, \\
\hat{W}_{01}(\theta_{01}) &= \frac{2\sqrt{\left(\frac{c_0}{c_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_{01}}}{\frac{\rho_1}{\rho_0} \cos \theta_{01} + \sqrt{\left(\frac{c_0}{c_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_{01}}}, \\
\hat{W}_{10}(\theta_{11}) &= \frac{2\sqrt{\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 - \sin^2 \theta_{11}}}{\frac{\rho_0}{\rho_1} \cos \theta_{11} + \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^2 - \sin^2 \theta_{11}}}, \\
\hat{V}_{12} &= \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \cos \theta_{11} - \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - \sin^2 \theta_{11}}}{\frac{\rho_2}{\rho_1} \cos \theta_{11} + \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2}\right)^2 - \sin^2 \theta_{11}}}, \\
\theta_{00} &= \arctg \frac{d_{SR}}{Z}, \quad \theta_{01} = \frac{d_{SR}}{Z + 2c_1 h_1 / c_0}, \quad \theta_{11} = \frac{c_1}{c_0} \theta_{01}, \\
d_{SR} &\equiv x_R - x_S, \quad Z \equiv 2H - z_S - z_R \\
r_{S1} &= (H - z_S) \sqrt{1 + \theta_{01}^2}, \quad r_{1R} = (H - z_R) \sqrt{1 + \theta_{01}^2}, \quad r_{11} = h_1 \sqrt{1 + \theta_{11}^2}, \\
\Delta_1(\omega) &= \delta_0(\omega)(r_{S1} + r_{1R}) + 2\delta_1(\omega)r_{11}, \\
\varphi_1(\omega) &= k_0(\omega)(r_{S1} + r_{1R}) + 2k_1(\omega)r_{11}.
\end{aligned}$$

Моделирование корреляционной матрицы $\hat{\Gamma}_x = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{x}(t_l) \mathbf{x}^+(t_l)$ (2.4) для каждой из

рассматриваемых частот источника производим по правилу:

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}(\omega) &= (e(\omega, 1), \dots, e(\omega, N_a)), \\
e(\omega, k) &= g^{(v)}(\omega, \mathbf{r}_R(k)) + g^{(0)}(\omega, \mathbf{r}_g(k)) + g^{(1)}(\omega, \mathbf{r}_g(k)), \\
\mathbf{n}_l &= (n_l(1), \dots, n_l(N_a)) / \sqrt{2} \\
\mathbf{x}_l(\omega) &= \sqrt{s} n_l^{(s)} \frac{\mathbf{e}(\omega)}{\|\mathbf{e}(\omega)\|} + \mathbf{n}_l, \\
\hat{F}_x(\omega) &= \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l \mathbf{x}_l'.
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Здесь $n_l^{(s)}, n_l(k)$, $k=1, \dots, N_a$, $l=1, \dots, L$ — независимые между собой реализации независимых комплексных гауссовых величин из $N(0,1)$ соответственно, s — отношение мощностей сигнал/шум на приемной антенне, $\mathbf{e}(\omega)$ — сигнальный вектор, вычисляемый для истинных значений параметров дна. Расчетные параметры для данной задачи приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетные параметры задачи

Волновод								
c_V (м/с)	ρ_V (кг/м ³)	H (м)	c_0 (м/с)	ρ_0 (кг/м ³)	δ_0			
330	1.29	100	1465	1030	0			
Дно								
h_1 (м)	h_2 (м)	c_1 (м/с)	c_2 (м/с)	ρ_1 (кг/м ³)	ρ_2 (кг/м ³)	δ_1	δ_2	
20	∞	1500	1510	1050	1060	0	0	
Система								
f (Гц)	r_S (м)	z_S (м)	N_a	α_g	l_g (м)	$r_g(1)$ (м)	$z_g(1)$ (м)	s
500 ÷ 1000	0	10	20	0	1	100 ÷ 300	45	$10^{-1} \div 10$

Для реализации алгоритма акустической реконструкции параметров морского дна при зондировании акустическими сигналами будем выполнять следующие операции. Сначала осуществим временную селекцию сигналов, отсекая мощный, но неинформативный прямой сигнал g . Все прочие сигналы, включая неинформативный поверхностный сигнал $g^{(v)}$ оставляем в сигнальном векторе, так как времена прихода соответствующих волн могут быть близки между собой, и импульсы могут перекрываться. После этого фиксируем значения параметров всех донных слоев, начиная со второго, исходя из априорных данных о них, и решаем задачу восстановления параметров первого слоя. Для решения указанной задачи в качестве функционала невязки используем процессор MUSIC W_{MUSIC} (2.6) и адаптивный метод обработки AMUSIC W_{AMUSIC} , подбирая соответствующие значения параметра регуляризации ε (2.8). Далее, используя найденные значения параметров первого слоя и фиксируя (из априорных данных) параметры всех слоев, начиная с третьего, решаем задачу восстановления параметров

второго слоя и т.д. Наконец, при необходимости этапы повторяем нужное число раз, используя в качестве информации апостериорную, полученную на предыдущих этапах.

Считая глубину первого слоя h_1 и параметры второго донного слоя (ρ_2, c_2) известными, построим распределение выходной мощности процессора MUSIC (2.6) в заданной окрестности истинных значений параметров (ρ_1, c_1) для различных частот источника при фиксированном положении приемной антенны. Из расчетов (рис. 2.8) видно, что распределение мощности имеет овражную форму и характеризуется набором локальных максимумов. Мощность процессора локализуется в узких, протяженных вдоль оси ρ_1 областях, периодически следующих вдоль оси c_1 с частотой следования пропорциональной частоте источника, а также на некоторой не зависящей от частоты сигнала кривой локализации. При этом все локальные максимумы мощности принадлежат указанной кривой; один из этих локальных максимумов (главный) накрывает истинные значения параметров. Для устранения проблем неоднозначности можно использовать дополнительные частотные или пространственные проекции наблюдения, то есть применять обобщенные процессоры с помощью набора частот и/или набора приемных решеток. Другим способом улучшения качества восстановления параметров дна является использование в качестве зондирующих акустических сигналов сложно когерентные модулированные импульсы. Это позволит эффективно выделять сигналы, от отдельных слоев, а также обеспечить большую глубину акустического наблюдения за счет когерентного согласованного накопления сигналов, как по частоте, так и по пространственной координате в пределах апертуры приемной решетки.

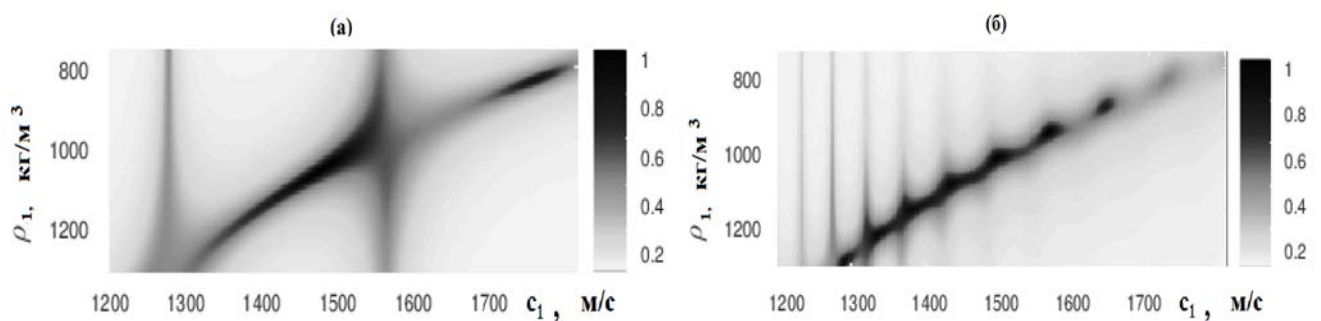


Рисунок 2.8 – Распределения мощностей процессора MUSIC в прямоугольнике, в центре которого находятся истинные значения параметров. Частоты источника (а) 100 Гц и (б) 500 Гц, антенна удалена на 100 м

Учитывая частотную зависимость мощности $W_{MUSIC}(\phi)$, построим обобщенные параметрические процессоры $W_{AMUSIC_{f,2}}(0, \phi, K)$ (2.15.1, 2.15.2), представляющий собою сумму

или произведение парциальных мощностей парциальных процессоров для различных частот зондирования. На рис. 2.9 приведены распределения обобщенных мощностей $W_{AMUSIC_{f_1}}(\varepsilon, \phi, K) = \sum_{k=1}^K W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, \omega_k)$ (левый столбец) и $W_{AMUSIC_{f_2}}(\varepsilon, \phi, K) = \prod_{k=1}^K W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi, \omega_k)$ (правый столбец) для $K = 3, 6, 10$ (при каждом K частоты выбирались эквидистантно из отрезка $[100, 1000]$ (Гц) ($f(1) = 100, \dots, f(K) = 1000$)). Видно, что с ростом K обобщенная мощность все плотнее локализуется на кривой локализации; при этом у мощности $W_{AMUSIC_{f_2}}(\varepsilon, \phi, K)$ при росте K все максимумы исчезают за исключением главного (правый столбец рисунка 2.9).

Построим далее распределения выходной мощности процессора $W_{MUSIC}(\phi)$ (MUSIC) при фиксированной частоте источника, но для различных удаленностей от источника, расположенных на одном горизонте приемных антенн (рис. 2.10). Видно, что период следования областей локализации вдоль оси c_1 убывает с ростом расстояния до антенны, в то время как наклон кривой локализации растет. Это означает, что при пересечении областей локализации для различных расстояний общая область локализации должна убывать в размерах. Расчеты подтверждают данное предположение.

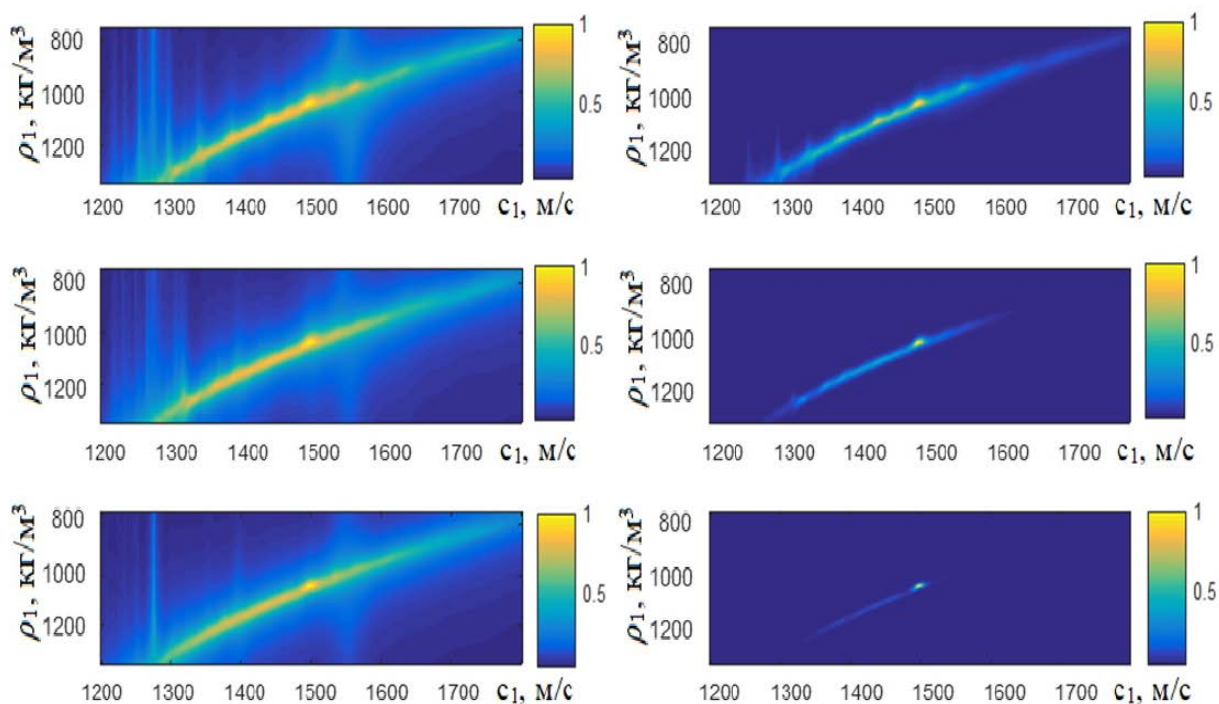


Рисунок 2.9 – Распределения мощностей обобщенных процессоров $W_{AMUSIC_{f_1}}(0, \phi, K)$ (левый столбец) и $W_{AMUSIC_{f_2}}(0, \phi, K)$ (правый столбец) для $K=3, 6, 10$ (сверху вниз) в случае, когда частоты источника распределены в диапазоне $[100, 1000]$ Гц при удалении антенны 100 м

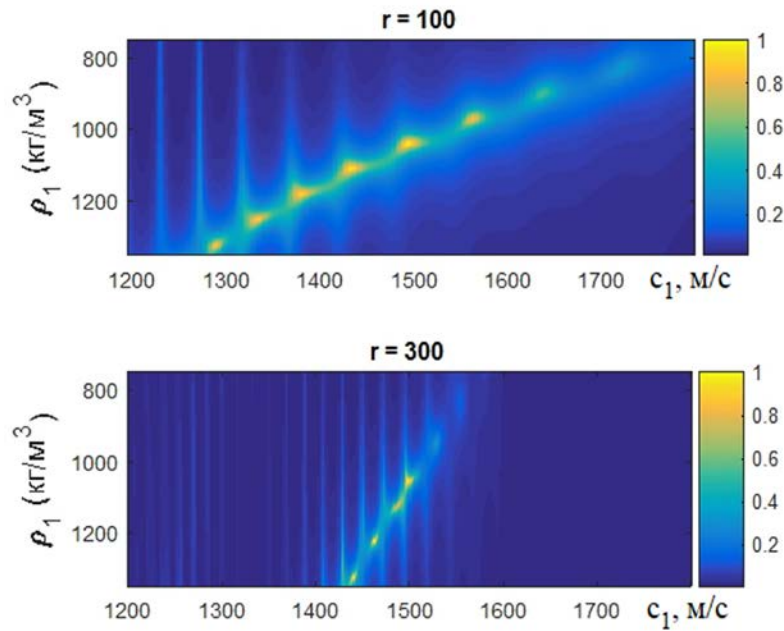


Рисунок 2.10 – Распределения мощностей обобщенных процессоров $W_{MUSIC}(\phi)$ для двух удалений антенны на 100 и 300 м при частоте источника 500 Гц

В левом столбце на рис. 2.11 представлены мощности обобщенного процессора $W_{AMUSICr_2}(0, \phi, K)$ для различных наборов из K дистанций до антенны из отрезка $[100, 300]$ (м) ($r_g(1) = 100, \dots, r_g(K) = 300$) на фиксированной частоте источника $f = 500$ Гц. Видно, что уже для $K = 5$ все локальные максимумы, кроме главного, исчезают.

Если значения параметров второго слоя (c_2, ρ_2) неизвестны, то формально использование процессора $W_{MUSIC}(\phi)$ (2.7) невозможно, так как он требует для своей реализации знания точных параметров волновода. Однако неизвестные параметры можно задать приближенно, исходя из имеющейся априорной информации. При этом качество восстановления параметров (c_1, ρ_1) процессором $W_{MUSIC}(\phi)$ и его обобщениями в общем случае ухудшается вследствие несовпадения расчетной модели волновода с исходной моделью: появляется регулярное смещение локальных экстремумов. Лучшее качество может в этом случае обеспечить адаптивные параметрические процессоры $W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi)$ (2.8) с соответствующим образом подобранными параметрами. Примеры расчетов мощностей процессоров $W_{AMUSICr_2}(\varepsilon, \phi, 2)$ приведены в правом столбце на рис. 2.11.

Для локализации параметров (ρ_1, c_1) здесь использовались вместо истинных значений параметров второго слоя $\rho_2 = 1060$ кг/м³, $c_2 = 1510$ м/с их приближенные значения $\rho_2^* = 1070$ кг/м³, $c_2^* = 1520$ м/с. Видно, что увеличением параметра регуляризации ε до некоторого

критического, можно добиться значительного сужения области локализации при неизменных частоте источника и расположениях антенн. Критическое значение ε определяется величиной отклонения расчетного волновода от истинного и может быть определено только экспериментально.

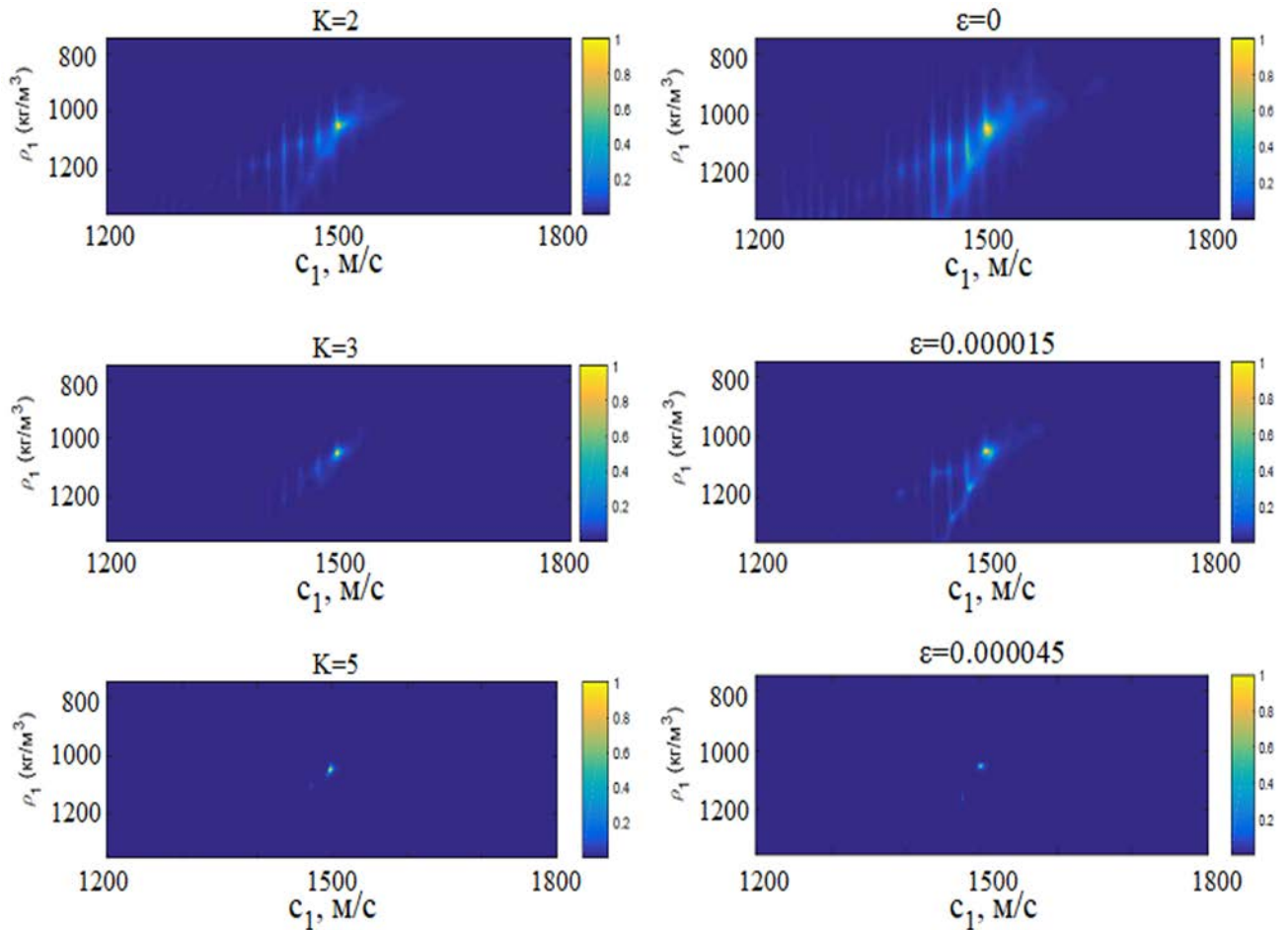


Рисунок 2.11 – Выходная мощность обобщенного процессора $W_{AMUSICr_2}(0, \phi, K)$ для $K = 2, 3, 5$ дистанций из отрезка $[100, 300]$ (м) при частоте источника 500 Гц (левый столбец), и распределения выходной мощности обобщенного процессора $W_{AMUSICr_2}(\varepsilon, \phi, 2)$ для различных значений параметра регуляризации $\varepsilon = 0; 1.5 \cdot 10^{-5}; 4.5 \cdot 10^{-5}$ при расстоянии до антенны 100 и 300 м и частоте источника 500 Гц (правый столбец)

После оценивания параметров первого слоя можно перейти ко второму этапу — оцениванию параметров второго слоя. При этом расчетная среда всегда будет отличаться от истинной вследствие неизбежных ошибок, допущенных на первом этапе. Поэтому для локализации параметров второго слоя следует использовать обобщенные адаптивные

процессоры $W_{AMUSICf}$, $W_{AMUSICr}$ и другие обобщенные процессоры. Примеры приведены на рис. 2.12. При этом вместо истинных значений параметров $\rho_1 = 1050$ кг/м³, $c_1 = 1500$ м/с, использовались приближенные ρ_1^* , c_1^* , значения которых указаны в подписях к рисункам. Из приведенных графиков следует, что в данной ситуации процессор $W_{AMUSICf}$ в отличие от процессора $W_{AMUSICr}$ не обеспечивает локализацию параметров ρ_2 , c_2 , что связано с тем, что наклон кривой локализации в плоскости ρ_2 , c_2 не зависит от частоты сигнала. Это означает, что для восстановления параметров двухслойного дна нельзя ограничиться только частотным процессором, а необходимо также использовать и пространственные процессоры.

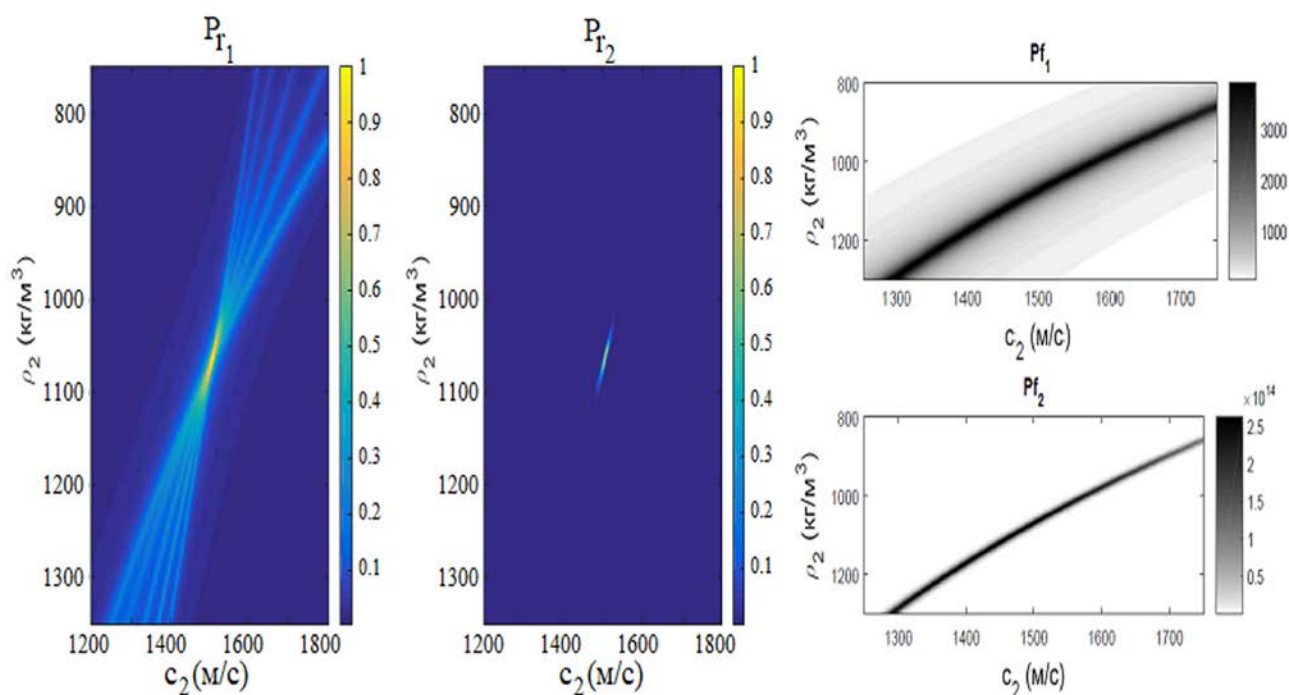


Рисунок 2.12 – Распределения выходной мощностей обобщенных процессоров AMUSIC $W_{AMUSICr_1}(\varepsilon, \phi, 5)$ (левый рисунок) и $W_{AMUSICr_2}(\varepsilon, \phi, 5)$ (рисунок в центре) в плоскости параметров (ρ_2, c_2) на частоте источника 500 Гц для пяти удалений до антенны из диапазона [100, 300] (м); параметр регуляризации $\varepsilon = 2.9 \cdot 10^{-5}$; $\rho_1^* = 1050$ кг/м³, $c_1^* = 1505$ м/с и справа распределения выходных мощностей обобщенных процессоров AMUSIC $W_{AMUSICf_1}(\varepsilon, \phi, 5)$ (верхний правый рисунок) и $W_{AMUSICf_2}(\varepsilon, \phi, 5)$ (нижний правый рисунок) в плоскости параметров (ρ_2, c_2) на пяти частотах из диапазона [100, 1000] (Гц) при удалении до антенны на 100 м; параметр регуляризации $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5}$; $\rho_1^* = 1055.5$ кг/м³, $c_1^* = 1048.5$ м/с

2.2.3. Релаксационно-итерационный метод оценки параметров слоев и исследование устойчивости решений к шумам при реконструкции донных осадочных слоев

Численные стохастические эксперименты по устойчивости решений при восстановлении параметров осадков морского дна в виде двух слоев проводились при параметрах задачи, представленных в Таблице 2.1. Все размерные величины указаны в системе СИ. В каждом из числовых экспериментов проводилось K_{sim} моделирований по формуле (2.21) независимых случайных матриц $\hat{\Gamma}_x(\omega)$, определяемых с помощью данных, измеренных с K горизонтальных приемных антенн, равноотстоящих друг от друга в диапазоне $[100, 300]$ (м) расстояний от источника; при этом использовалось $L = 1500$ временных отсчетов сигнала. Поиск максимума выходной мощности процессора осуществлялся путем шагового перебора точек в заданной области искомых параметров с уменьшением размера шагов в окрестности найденного решения. В каждом из экспериментов первоначально (исходя из априорных данных) задавались приближенные значения параметров второго слоя $(\rho_2^{(0)}, c_2^{(0)})$. Затем запускался обобщенный адаптивный процессор AMUSIC $W_{AMUSICr}(\varepsilon, \phi, K)$ с заданным значением ε для отыскания параметров первого слоя. Найденные приближенные значения $(\rho_1^{(1)}, c_1^{(1)})$ использовались далее для определения параметров второго слоя $(\rho_2^{(1)}, c_2^{(1)})$ при помощи того же процессора $W_{AMUSICr}(\varepsilon, \phi, N_r)$. Полученные значения параметров второго слоя использовались затем вместо изначальных $(\rho_2^{(0)}, c_2^{(0)})$ при поиске параметров первого слоя $(\rho_1^{(2)}, c_1^{(2)})$ и т.д. При каждом из K_{sim} моделирований производилось K_{it} вышеописанных итераций для определения параметров донных слоев. Полученные в отдельных итерациях значения параметров усреднялись по совокупности всех моделирований. Результаты численных экспериментов для одинакового отношения сигнал/шум ($s = 10$), но двух разных начальных приближениях для параметров второго донного слоя $(\rho_2^{(0)}, c_2^{(0)})$ приведены на рисунке 2.13.

Использовался процессор AMUSIC $W_{AMUSICr_2}(10^{-5}, \phi, 10)$. Звездочки на рисунках обозначают параметры, восстановленные в последовательных итерациях; каждая последовательность звездочек определенного цвета соответствует отдельному моделированию случайных матриц. Жирные линии соответствуют средним по всем K_{sim} моделированиям значениям параметров $\langle \rho_1^{(k)} \rangle$, $\langle c_1^{(k)} \rangle$, $\langle \rho_2^{(k)} \rangle$, $\langle c_2^{(k)} \rangle$ для итераций $k = 1, \dots, K_{\text{it}}$. В первой серии

вычислений в качестве начального приближения принимались значения $\rho_2^{(0)} = 1050 \text{ кг/м}^3$ и $c_2^{(0)} = 1500 \text{ м/с}$ (рис. 2.13 (а)). На рис. 2.13 (а), в качестве примера, приведены результаты оценки значений параметров, восстановленных в $K_{it} = 15$ последовательных итерациях для $K_{sim} = 20$ отдельных моделирований случайных матриц. Соответствующие средним по всем K_{sim} моделированиям значения параметров для итераций $k = 1, \dots, K_{it}$ составили при этом $\langle \rho_1^{(15)} \rangle = 1050.06 \text{ кг/м}^3$, $\langle c_1^{(15)} \rangle = 1499.99 \text{ м/с}$, и $\langle \rho_2^{(14)} \rangle = 1059.96 \text{ кг/м}^3$, $\langle c_2^{(14)} \rangle = 1510.24 \text{ м/с}$. Во второй серии вычислений в качестве начальных значений принимались $\rho_2^{(0)} = 1080 \text{ кг/м}^3$ и $c_2^{(0)} = 1530 \text{ м/с}$ (рис. 2.13 (б)). На рис. 2.13 (б), приведены результаты оценки значений параметров, восстановленных в $K_{it} = 9$ последовательных итерациях; для $K_{sim} = 9$ отдельных моделирований случайных матриц. Соответствующие средним по всем K_{sim} моделированиям значения параметров для итераций $k = 1, \dots, K_{it}$ составили при этом $\langle \rho_1^{(9)} \rangle = 1051.04 \text{ кг/м}^3$, $\langle c_1^{(9)} \rangle = 1500.02 \text{ м/с}$, и $\langle \rho_2^{(8)} \rangle = 1063.26 \text{ кг/м}^3$, $\langle c_2^{(8)} \rangle = 1509.46 \text{ м/с}$.

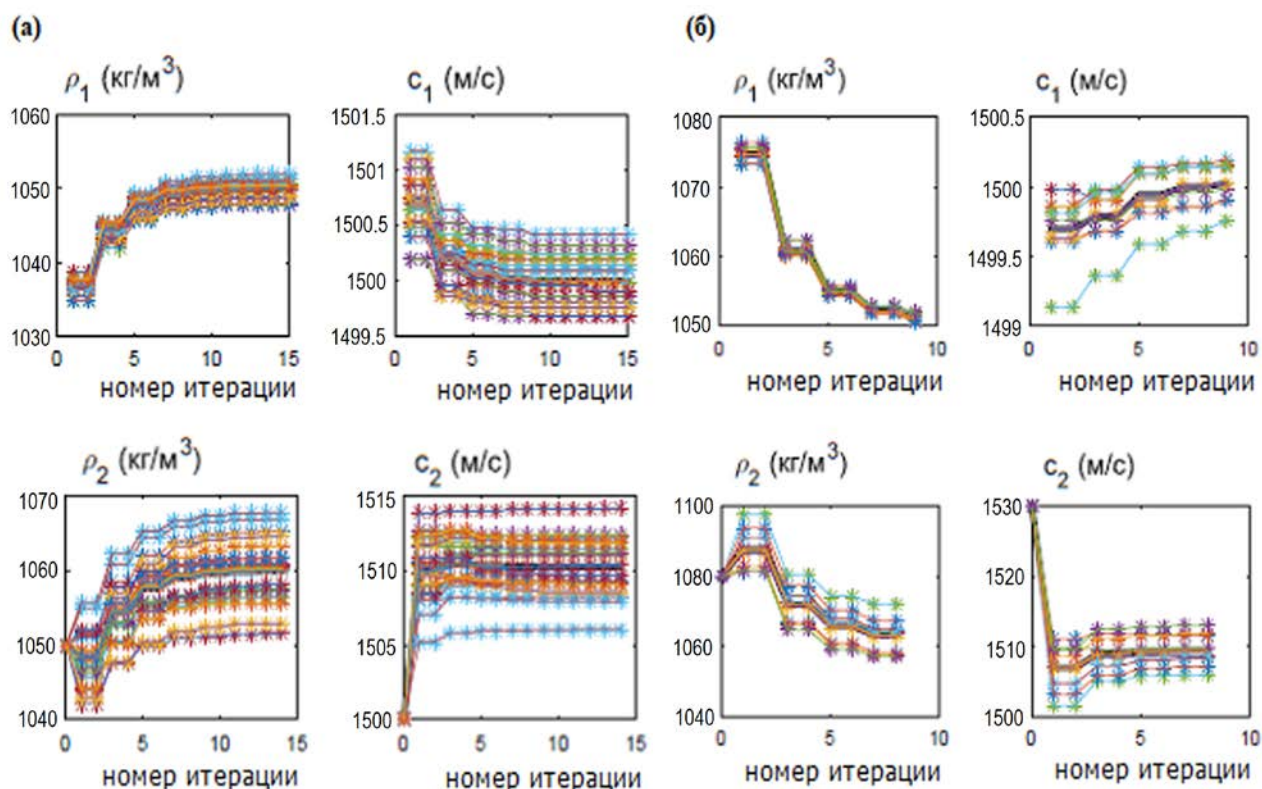


Рисунок 2.13 – Траектории поиска параметров модели дна (в виде жидкого слоя на жидком полупространстве) при послойно-итерационном методе для двух различных начальных приближений (а) и (б) при одинаковом отношении сигнал/шум $s = 10$

На рис. 2.14 приведены точности (величина отклонения от истинных значений) восстановления плотности и скорости в слое 1 и полупространстве $\delta\rho_{1,2} = \langle \rho^{(K_{it})}_{1,2} \rangle - \rho_{1,2}$, $\delta c_{1,2} = \langle c^{(K_{it})}_{1,2} \rangle - c_{1,2}$ для различных отношений сигнал/шум, полученные в результате 6 итераций усреднением по 9 симуляциям приемной случайной матрицы

Анализ траекторий поиска решений предложенными выше алгоритмами восстановления параметров двух донных слоев показывает, что итерационные последовательности для всех донных параметров сходятся с высокой вероятностью. При этом скорость сходимости различна для различных параметров и определяется, в основном, выбором начального приближения для параметров второго слоя. Предельные значения, к которым сходятся указанные итерационные процессы, случайны и зависят от реализаций экспериментальных матриц. Дисперсии значений восстановленных параметров слабо зависят от номера итераций при заданном отношении сигнал/шум. Средние значения параметров по совокупности реализаций случайных матриц сходятся по мере роста итераций к значениям, которые отклоняются от истинных. Отклонения зависят от отношения сигнал/шум, начального приближения и числа итераций.

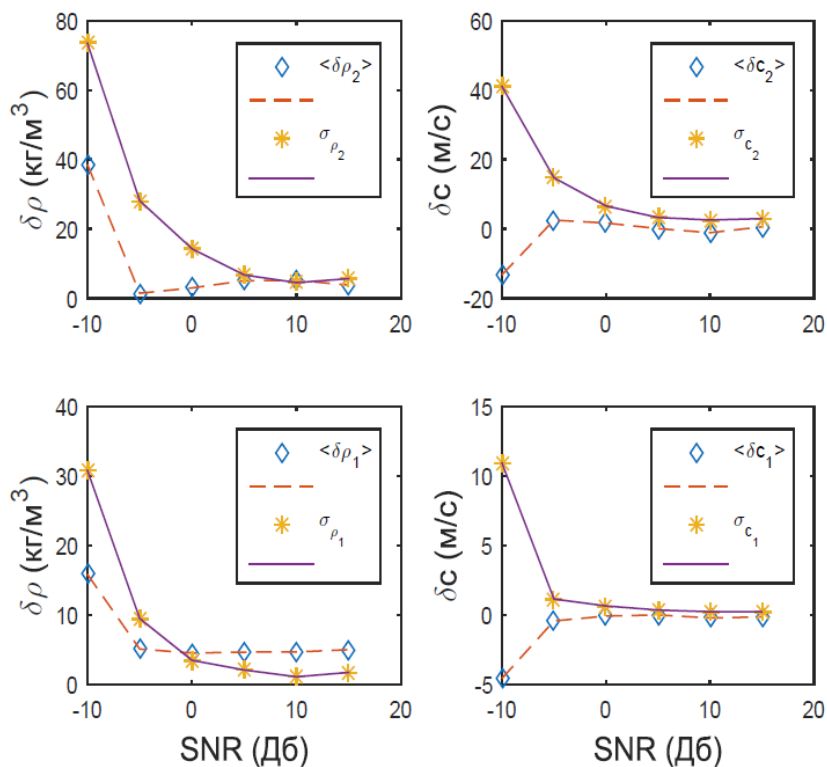


Рисунок 2.14 – Точности восстановления параметров дна для различных отношений сигнал/шум, $K_{sim} = 9$, $K_{it} = 6$

2.2.4. Примеры использования метода последовательной релаксации при реконструкции параметров дна, состоящего из 3 жидких слоев, лежащих на жидком полупространстве

Рассмотрим линейную антенну с N_g гидрофонами, размещенными в пространстве волновода в точках, описываемыми вектором $\mathbf{r}_g(k)$, $k = 1, \dots, N_g$. Излученный точечным источником S импульсный сигнал принимается (вместе с реверберациями и аддитивными шумами) после распространения в волноводе гидрофонами антенны и подвергается согласованной фильтрации на выходе каждого из гидрофонов. Полученный подобным образом

выборочный вектор $\mathbf{x}_l = s \frac{\mathbf{e}_0 + \mathbf{n}_l^{(r)}}{|\mathbf{e}_0 + \mathbf{n}_l^{(r)}|} + \mathbf{n}_l$, используется для составления выборочной

корреляционной матрицы $\hat{\Gamma}_x(\tau) = \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l \mathbf{x}_l' / L$. Здесь L — число реализаций (число излученных импульсов), $\mathbf{e}_0 = \mathbf{G}(\boldsymbol{\tau})$ — сигнальный вектор выходов согласованных фильтров,

обрабатывающих сигналы отдельных гидрофонов, $\mathbf{n}_l^{(r)} = \boldsymbol{\sigma}^{(r)} n_l$ — реверберационные шумы, n_l , $\mathbf{n}_l = (n_{1l}, \dots, n_{N_g l})$ — независимые между собой реализации стандартных гауссовых величин

и векторов, соответственно, $s_l = \sqrt{s N_g}$ — отношение сигнал/шум. Параметры согласованных фильтров в общем случае различны для различных гидрофонов, то есть $\boldsymbol{\tau}$ — вектор.

Для определения параметров дна используем далее проекционный процессор (MUSIC, а также другие процессоры и их обобщения), выбирая в качестве оценок параметров те их значения, которые максимизируют мощность процессора, работающего с корреляционной матрицей. Параметр согласованных фильтров τ выступает при этом как управляющий параметр метода. Он позволяет усилить значения сигналов, поступающих от заданного слоя при одновременном подавлении шумов и сигналов от других слоев. Для этого достаточно выбрать его равным, среднему времени прихода сигналов от соответствующей границы (которое, разумеется, неизвестно, но обычно имеются его априорные оценки).

Рассмотрим вариант решения обратной задачи восстановления параметров слоистого дна, когда все слои жидкие и, соответственно, все отраженные волны — продольные:

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g_R(t) g_S^*(t - \tau) dt = \sum_{n=1}^N A_n^{(0 \dots 00 \dots 0)_2} F_S \left(\tau - \tau_n^{(0 \dots 00 \dots 0)_2} \right).$$

В этом случае восстановлению подлежат скорости продольных волн в слоях, плотности и вертикальные размеры слоев. Реализация процесса восстановления связана с решением следующих задач:

- 1) выбор оптимальной траектории поиска в многомерном пространстве параметров;

2) выбор оптимальных значений управляющих параметров фильтров в цепях отдельных гидрофонов τ .

Рассмотрим последовательный алгоритм решения указанной задачи, который в случае широкополосных импульсов показывает хорошую устойчивость в условиях неполной априорной информации. Вначале восстанавливаем параметры первого слоя, затем — используя найденные параметры первого слоя — параметры второго и т.д. Параметр $\tau(k)$ на каждом этапе выбираем заново (с учетом уже полученной ранее информации) так, чтобы он был приближенно равен времени распространения импульсов от нижней границы соответствующего слоя до данного гидрофона k . Это позволяет отсечь в суммарном сигнальном векторе импульсы от всех других границ, что существенно повышает точность определения параметров данного слоя. А именно, пусть $T_l(z_s, r_R, z_R, H, c_0, h(1), \dots, h(l), c(1), \dots, c(l))$ — функция, вычисляющая время прихода в приемник (r_R, z_R) импульса, отраженного от нижней границы слоя l , зависящее исключительно от параметров, перечисленных в списке аргументов функции. Для того, чтобы выделить данный импульс на фоне всех прочих (а именно, прямого и отраженных от остальных границ) нужно выбрать управляющий параметр в линии k -го гидрофона $\tau(k) = T_l(H, z_s, r_g(k), z_g(k), c_0, h(1), \dots, h(l), c(1), \dots, c(l))$. Как при выборе управляющих параметров τ , так и при расчетах импульсов, приходящих в гидрофоны, требуется знать параметры донных слоев. Поскольку они неизвестны, то их следует заменить либо априорными, либо приближенно вычисленными на предыдущих этапах. Полагаем на первом этапе $\tau(k) = T_1(H, z_s, r_g(k), z_g(k), c_0, h_1, c_1)$, где (h_1, c_1) — априорные оценки параметров первого слоя. Параметры прочих слоев также заменяем их априорными оценками. На втором этапе используем полученные на первом этапе (апостериорные) оценки скорости звука \hat{c}_1 и высоты первого слоя \hat{h}_1 для выбора параметров фильтров. А именно, положим $\tau(k) = T_2(z_s, r_g(k), z_g(k), H, c_0, \hat{h}_1, h_2, \hat{c}_1, c_2)$, где h_2, c_2 — априорные оценки параметров второго слоя. Плотности первых двух слоев, а также все параметры нижележащих слоев также заменяем их априорными оценками. Продолжая по предложенной схеме, на этапе определения параметров слоя m ($m \geq 3$) используем полученные на предыдущих этапах оценки скоростей звука $\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_{m-1}$ и высот слоев $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_{m-1}$. Положим

$$\tau(k) = T_m(z_s, r_g(k), z_g(k), H, c_0, \hat{h}_1, \dots, \hat{h}_{m-1}, h_m, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_{m-1}, c_m), \quad (2.22)$$

где h_m, c_m — априорные оценки параметров слоя m . Плотности первых m слоев, а также все параметры нижележащих слоев также заменяем их априорными оценками. Результаты моделирования процесса восстановления параметров донных слоев по предложенной выше последовательным схемам приведены далее. Решались задачи восстановления параметров дна с 4-мя жидкими слоями, истинные значения которых приведены в таблице 2.2. Глубина волновода $H = 100$ м, скорость звука в воде $c_0 = 1465$ м/с, плотность воды 1030 кг/м³. Использовался ЛЧМ импульс с несущей частотой 5 кГц, длительностью 1 с и полосой в 1 кГц. Источник располагался на глубине 10 м, горизонтально расположенная антенна из 20 гидрофонов — на глубине 45 м, расстояния между гидрофонами 1 м.

Таблица 2.2 – Расчетные параметры задачи

№ слоя	Высота h_{ist} , м	Скорость c_{ist} , м/с	Плотность ρ_{ist} , кг/м ³	Декремент δ_{ist}
1	10	1500	1050	0
2	12	1510	1060	0
3	14	1520	1070	0
4	∞	1530	1080	0

Совместные оценки скоростей звука и плотностей донных осадочных слоев

На рисунке 2.15 приведены расчеты мощности процессоров $W_{AMUSIC}(10^{-4}, \phi)$ (2.8), отношение сигнал/шум $s=1$, для оценок в пространствах трех пар параметров: (ρ_1, c_1) , (ρ_2, c_2) , (ρ_3, c_3) . Видно, что мощность локализуется в узких вертикальных областях, что позволяет с высокой точностью восстановить значение скорости звука в отличие от плотности слоя. При этом дисперсия оценки скорости звука медленно нарастает с ростом номера слоя, что связано как с убыванием амплитуды соответствующего сигнала, так и с ростом ошибок, связанных с неточно известными параметрами верхних слоев. Данный метод позволяет сделать совместные оценки скорости звука и плотности слоев.

Как видно из расчетов, он дает хорошие оценки скоростей звука, но не позволяет оценить плотности, так как выходная мощность процессора практически не зависит от плотности. Кроме того, метод требует знания вертикальных размеров слоев, сильно теряя точность при их изменении.

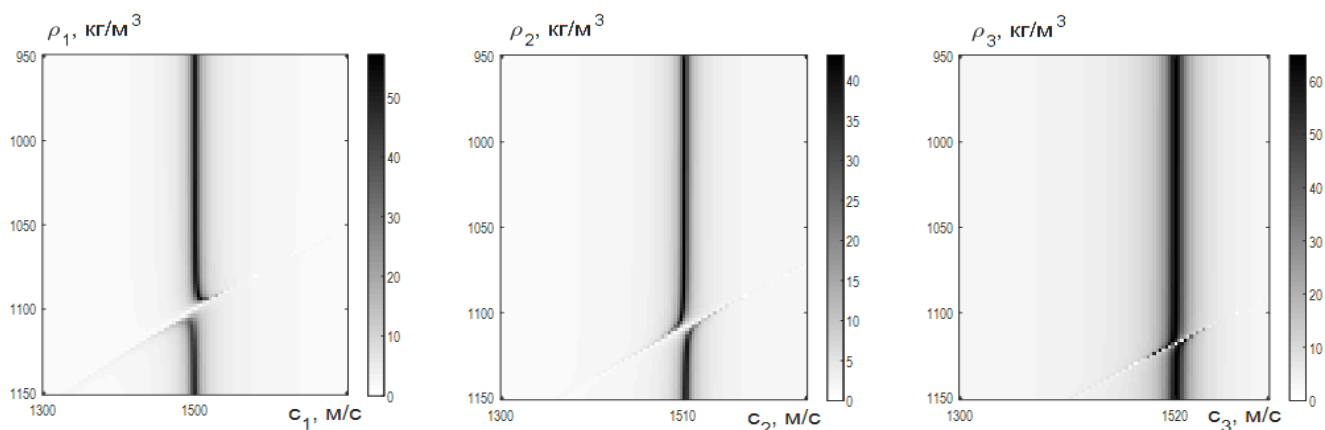


Рисунок 2.15 – Мощности процессоров AMUSIC (2.8) в задачах восстановления параметров трех верхних слоев дна.

Совместные оценки скоростей звука и толщин донных осадочных слоев

Следующий метод позволяет делать совместные оценки размеров слоев и скоростей звука в них. Эффективность его работы зависит от номера слоя и точности априорных оценок параметров слоев, выбираемых согласно таблице 2.3. Оценки параметров, получаемые в конкретном расчете, зависят от выбранных априорных оценок. Комбинируя эти оценки, то есть, используя обобщенные процессоры, можно повышать качество оценок. Расчет мощностей $W_{AMUSIC,1,2}(10^{-4}, \phi)$ адаптивного процессора AMUSIC для двух априорных наборов параметров и обобщенного процессора, мощность которого $W_{AMUSIC} = W_{AMUSIC_1} \cdot W_{AMUSIC_2}$ использованы для результирующей оценки параметров слоя, которая производится по максимуму значений обобщенного процессора.

Таблица 2.3 – Выбор априорных оценок параметров

Высота	Скорость	Плотность	Декремент
$h(k) = h_{ist}(k) + \Delta h(k)$	$c(k) = c_{ist}(k) + \Delta c(k)$	$\rho(k) = \rho_{ist}(k) + \Delta \rho(k)$	$\delta = \delta_{ist} = 0$

При этом были получены следующие результаты, приведенные в таблице 2.4 ($k = 1 \div 4$ - номер слоя).

Таблица 2.4 – Результаты оценок параметров, $k = 1 \div 4$

№ слоя, № расчета	Начальные приближения для двух процессоров:	Результат оценки при нахождении максимума выхода обобщенного процессора $W_{AMUSIC} = W_{AMUSIC_1} \cdot W_{AMUSIC_2}$
----------------------	---	---

Первый слой, 1-й расчет	$W_{AMUSIC_1} : \Delta\rho(k) = +10, c(k) = c_0, \Delta h(k) = +2$ $W_{AMUSIC_2} : \Delta\rho(k) = +10, c(k) = c_0, \Delta h(k) = +3$	$\hat{c}_1 \approx 1500, \hat{h}_1 \approx 10$
Первый слой, 2-й расчет	$W_{AMUSIC_1} : \Delta\rho(k) = -20, c(k) = c_0, \Delta h(k) = +3$ $W_{AMUSIC_2} : \Delta\rho(k) = -20, c(k) = c_0, \Delta h(k) = -2$	$\hat{c}_1 \approx 1507, \hat{h}_1 \approx 10$
Второй слой, 1-й расчет	$W_{AMUSIC_1} :$ $\Delta\rho(k) = +15, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) - 1, h(3) = h_{ist}(3) - 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) - 2, c(3) = c_{ist}(3) - 4, c(4) = c_{ist}(4) - 6$ $W_{AMUSIC_2} :$ $\Delta\rho(k) = +15, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2), h(3) = h_{ist}(3) - 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2), c(3) = c_{ist}(3), c(4) = c_{ist}(4)$	$\hat{c}_2 \approx c_{ist}(2) = 1510,$ $\hat{h}_1 \approx h_{ist}(2) - 0.3 = 11.7$
Второй слой, 2-й расчет	$W_{AMUSIC_1} :$ $\Delta\rho(k) = -5, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) - 2, h(3) = h_{ist}(3) - 3,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) - 3, c(3) = c_{ist}(3) - 4, c(4) = c_{ist}(4) - 5$ $W_{AMUSIC_2} :$ $\Delta\rho(k) = -5, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) + 2, h(3) = h_{ist}(3) + 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) + 3, c(3) = c_{ist}(3) + 4, c(4) = c_{ist}(4) + 5$	$\hat{c}_2 \approx c_{ist}(2) - 3 = 1507,$ $\hat{h}_1 \approx h_{ist}(2) - 0.2 = 11.8$
Третий слой, 1-й расчет	$W_{AMUSIC_1} :$ $\Delta\rho(k) = -5, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2), h(3) = h_{ist}(3) - 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2), c(3) = c_{ist}(3) - 3, c(4) = c_{ist}(4) - 3$ $W_{AMUSIC_2} :$ $\Delta\rho(k) = -5, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2), h(3) = h_{ist}(3) + 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2), c(3) = c_{ist}(3) + 4, c(4) = c_{ist}(4) + 5$	$\hat{c}_3 \approx c_{ist}(3) - 34 = 1486,$ $\hat{h}_3 \approx h_{ist}(3) = 14$
Третий слой, 2-й расчет	$W_{AMUSIC_1} :$ $\Delta\rho(k) = +5, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) - 2, h(3) = h_{ist}(3) - 3,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) - 3, c(3) = c_{ist}(3) - 4, c(4) = c_{ist}(4) - 5$ $W_{AMUSIC_2} :$ $\Delta\rho(k) = +5, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) + 2, h(3) = h_{ist}(3) + 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) + 3, c(3) = c_{ist}(3) + 4, c(4) = c_{ist}(4) + 5$	$\hat{c}_2 \approx c_{ist}(3) + 5 = 1525,$ $\hat{h}_1 \approx h_{ist}(3) = 14$
Третий слой, 3-й расчет	$W_{AMUSIC_1} :$ $\Delta\rho(k) = +25, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) - 2, h(3) = h_{ist}(3) - 3,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) - 3, c(3) = c_{ist}(3) - 4, c(4) = c_{ist}(4) - 5$ $W_{AMUSIC_2} :$ $\Delta\rho(k) = +25, h(1) = h_{ist}(1), h(2) = h_{ist}(2) + 2, h(3) = h_{ist}(3) + 2,$ $c(1) = c_{ist}(1), c(2) = c_{ist}(2) + 3, c(3) = c_{ist}(3) + 4, c(4) = c_{ist}(4) + 5$	$\hat{c}_2 \approx c_{ist}(3) + 5 = 1525,$ $\hat{h}_1 \approx h_{ist}(3) = 14$

Видно, что во всех случаях с высокой точностью определяется высота слоя, а оценка скорости зависит от точности априорной оценки плотности. После этого выполняются тем же методом дальнейшие расчеты (рис. 2.16 и 2.17), из которых видно, что результаты восстановления существенно зависят от качества априорной информации.

Интересно, что труднее всего восстановить второй слой, а третий слой восстанавливается уже легче, чем второй и даже первый. Это объясняется, тем, что нарастает объем апостериорной информации - ведь первые два слоя уже восстановлены.

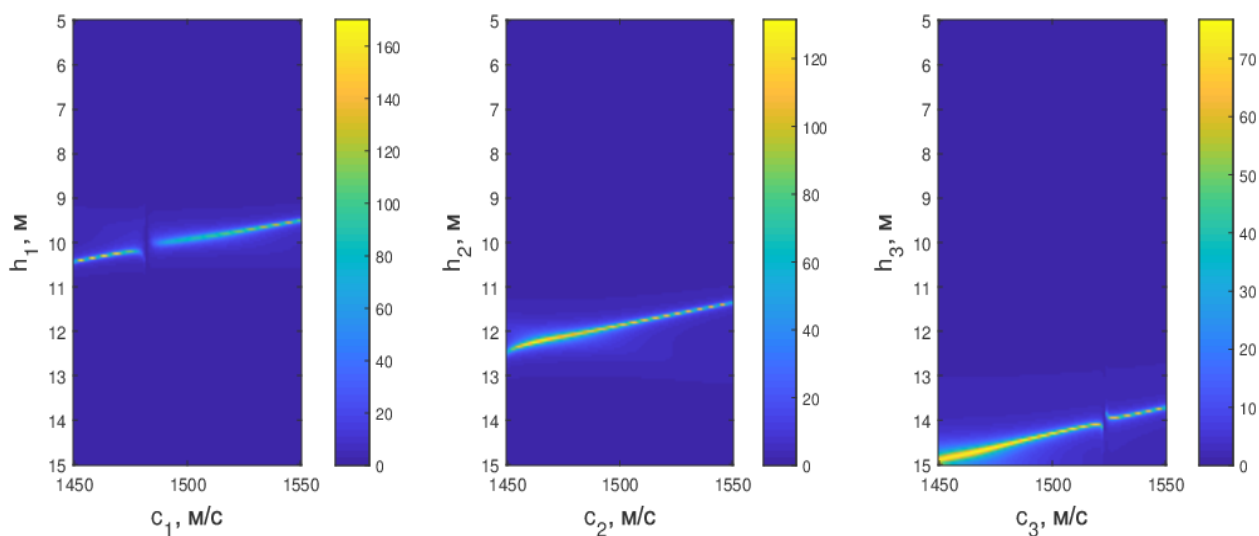


Рисунок 2.16 – Результаты оценок параметров слоев

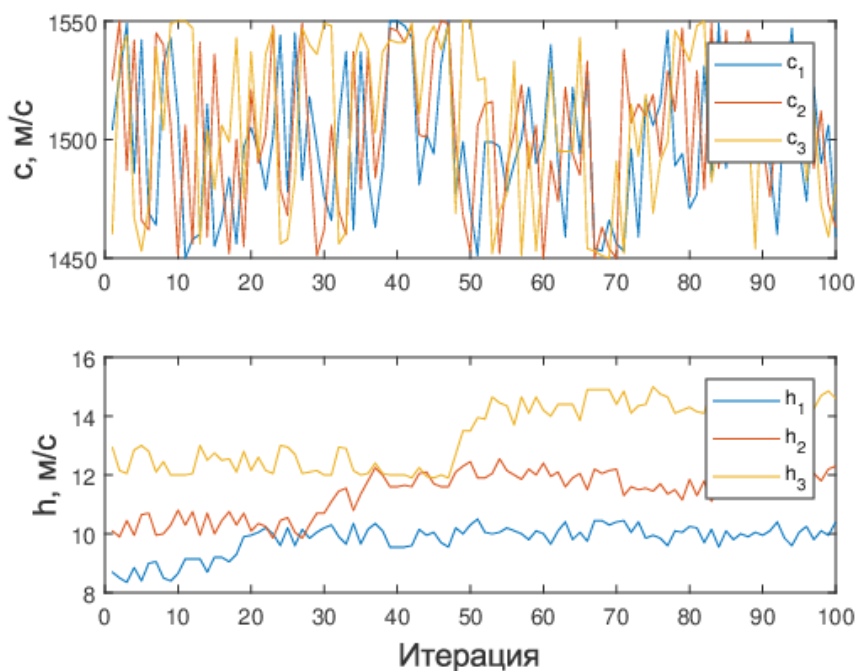


Рисунок 2.17 – Результаты оценок параметров слоев итерационным методом

2.3. Сравнительный анализ робастности реконструкции параметров упругих донных слоев при использовании различных критериев минимизации

Простейшим методом реконструкции параметров морского дна является сравнение измеренных в пределах входной апертуры (t, \mathbf{r}_R) данных с аналогичными данными, рассчитанными с помощью модели. Однако в этом случае уровень шумов будет максимальным и глубина и точность реконструкции параметров дна будут невелики. Максимизация точности и глубины реконструкции дна с учетом упомянутых ограничений может быть обеспечена оптимизацией решающих правил, реализующихся на основе накопления полезных сигналов и подавления шумов и помех. Выполнение указанных операций возможно лишь с использованием априорной информации. Рассмотрим особенности такого рода алгоритмов для случая, когда прием акустических сигналов осуществляется горизонтальной антенной с гидрофонами, размещенными в точках \mathbf{r}_R . Зондирующие ЛЧМ импульсы возбуждаются точечным акустическим излучателем. При выполнении реконструкции геоакустических параметров дна, измеряемые данные подвергаются инверсии, выполняемой алгоритмом поиска и принятия решений.

На *первом этапе инверсии* отраженные от дна импульсы вместе с помехами и шумами подвергаются согласованной фильтрации. При этом используются априорные данные о структуре зондирующих импульсов. Такая операция обеспечивает частотное накопление сигналов в полосе работы излучателя, в частности, отношение сигнала к гауссовскому шуму вырастет в $\sqrt{\Delta f \Delta T}$, где ΔT - длина импульса.

На *втором этапе инверсии* выполняется операция пространственного накопления импульсов в пределах пространственной апертуры решетки гидрофонов. Такое накопление осуществляется вдоль годографа, определяющего траекторию времен прихода импульсов на гидрофоны решетки. Положение годографа находится с помощью алгоритма, основывающегося на использовании гипотез о значениях геофизических параметров. Полученный подобным образом выборочный вектор измеряемых данных после накопления \mathbf{x}_l используется для составления выборочной корреляционной матрицы $\hat{\Gamma}_x(\tau) = \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l \mathbf{x}_l' / L$, где L — число реализаций (число излученных импульсов).

Следующим, третьим, этапом инверсии является определение параметров дна, при котором используются различные функционалы невязки (L_p -норма, процессоры MUSIC, AMUSIC, так же их обобщения, Нейроподобная свертка). В качестве оценок параметров, выбираются те их значения, которые максимизируют или минимизируют, в зависимости от выбора функционала, значение функционала невязки.

Накопление полезных сигналов при использовании такого рода процессоров, как отмечалось выше, повышает статистическую устойчивость алгоритмов инверсии. Рассмотрим этот эффект на примере часто встречающейся в практике ситуации, когда морское дно, состоит из упругого слоя, лежащего на упругом полупространстве.

Параметры модели, описывающей дно указанной формы, приведены в Таблице 2.5. На рис. 2.18 показана структура отраженных от слоистого дна в виде упругого слоя на упругом полупространстве ЛЧМ импульсов с выхода согласованного фильтра. Суммарный сигнал состоит из импульса, отраженного от донной поверхности, а также из группы импульсов, которые отразились от нижней границы верхнего упругого слоя (рис.2.18). На рис.2.18 (а) показан результат интерференции всех отраженных от дна импульсных компонент. В общем случае, когда донные слои имеют относительно малую толщину, отраженные от донных границ импульсы могут пересекаться и маскировать друг друга.

Таблица 2.5 – Расчетные параметры

S - излучатель	$F_s(0)$, Вт	Δf , Гц	T_s , сек	$x_1^{(S)}$, м	$z_1^{(S)}$, м	$x_i^{(S)} - x_{i+1}^{(S)}$, м
	300	150-250	0.125	0	120	-
R – приемник из n=20 гидрофонов	-	Δf , Гц	-	$x_1^{(R)}$, м	$z_1^{(R)}$, м	$x_j^{(R)} - x_{j+1}^{(R)}$, м
	-	150-250	-	10	36,875	3,6875

Истинные значения параметров волновода

Слой, k	ρ_k , кг/м ³	$c_k^{(0)}$, м/с	$c_k^{(1)}$, м/с	$\delta_k^{(0)}$, дБ/м	$\delta_k^{(1)}$, дБ/м	h_k , м
0	1040	1450	-	0	-	300
1	1500	1600	400	0	0	100
2	1800	1900	700	0	0	∞

Диапазон поиска, определяемый из априорных данных

Слой, k	ρ_k , кг/м ³	$c_k^{(0)}$, м/с	$c_k^{(1)}$, м/с	$\delta_k^{(0)}$, дБ/м	$\delta_k^{(1)}$, дБ/м	h_k , м
0	1040	1450	-	0	-	300
1	1480-1520	1580-1600	380-420	0	0	80-120
2	1780-1820	1880-1920	680-720	0	0	∞

В рассматриваемом случае, когда верхний упругий слой имеет достаточно большую толщину, импульсы не пересекаются. С выхода приемной решетки формируется годограф –

совокупность отраженных от дна импульсов, выстраивающихся в плоскости $\{x_1^{(R)} - \tau\}$ набора траекторий (рис. 2.18). Как видно из расчетов, уровни поперечных и обменных компонент существенно меньше продольных компонент. В случае относительно маломощных источников и высоких уровней шумов, измерения параметров поперечных и обменных компонент не могут быть осуществлены с необходимой точностью. С учетом указанных обстоятельств, ограничимся при реконструкции использованием лишь данных, соответствующих продольным компонентам, в частности, волне, отраженной от донной поверхности. При рассматриваемой модели расчетов, эта волновая компонента локализуется в области задержек 0.3 секунды (рис.2.18). Один из часто используемых вариантов инверсии заключается в применении в качестве решающего правила L_2 -нормы - квадрат невязки между измеряемыми данными и результатами модельных расчетов [17, 35, 66, 87]. Однако, как уже отмечалось, учет параметрической зависимости характеристик модели, позволяет реализовать алгоритмы накопления, что делает метод инверсии более устойчивым (робастным). В рассматриваемом случае, в качестве алгоритма накопления сигналов, используем когерентное накопление отраженных от донных границ сигналов, расположенных вдоль траекторий, формирующихся на годографе с выхода приемной антенны. В частности, такой траекторией является криволинейная траектория в плоскости $\{x^{(R)} - \tau\}$, соответствующая продольной компоненте, отраженной от донной поверхности (импульс (1), на рис.2.18). При согласованной фильтрации и таком пространственном накоплении антенной длиной $\Delta L_n = x_n^{(R)} - x_1^{(R)}$, когда модельные сигналы полностью совпадают с наблюдаемыми (измеряемыми) сигналами, отношение сигнала с выхода антенны к гауссовскому шуму вырастет в $\sqrt{\Delta f \Delta T \Delta L}$ раз. Поскольку, при инверсии, значения параметров донных слоев считаются неизвестными, необходимо осуществлять поиск решения, который соответствует минимуму величины L_2 -нормы. Поиск следует осуществлять в интервале значений параметров донного слоя, который определяется априорной информацией. Воспользуемся проекционным методом и рассмотрим структур с выхода L_2 - процессора в плоскости параметров $\{c_1^{(0)}, \rho_1\}$. полагая остальные параметры задачи заданными приближенно из априорных данных (Таблица 1). На рис.4 показана структура сигналов с выхода процессора в виде L_2 -нормы, в области расположения истинных значений параметров $\{c_1^{(0)}, \rho_1\}$, размер которой также выбирается из априорных данных.

При расчетах выходных сигналов процессора, полагалось, что шумы полностью отсутствуют. Из анализа структуры сигнала L_2 - процессора в плоскости $\{c_1^{(0)}, \rho_1\}$ после когерентного накопления в плоскости $\{x^{(R)} - \tau\}$ отраженной от донной поверхности

продольной компоненты (рис. 2.18 (б)) видно, что относительный экстремум находится в овраге, что связано с тем, что сигнал процессора относительно слабо зависит от ρ_1 . Экстремум локализован в малой области, что обеспечивает большую точность и устойчивость при оценке параметров $\{c_1^{(0)}, \rho_1\}$. На рис. 2.18 (в) показан сигнал с такого же процессора для случая, когда накопление не используется. В этом случае экстремум менее выражен и тем так глубок, что снижает точность и устойчивость оценивания. Можно полагать, что указанный эффект обуславливается тем, что в отсутствие накопления рассматриваемый локальный экстремум зависит от сразу всех параметров морского дна, когда как в первом случае, зависимость сигнала процессора от других параметров дна слабее.

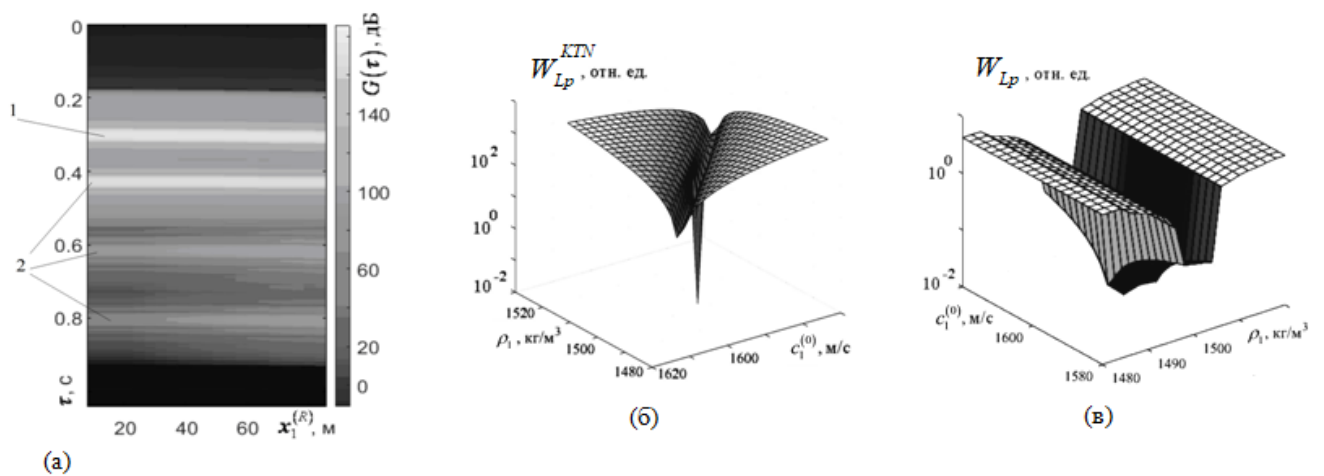


Рисунок 2.18 – (а) – Структура отраженных от слоистого дна в виде упругого слоя на упругом полупространстве ЛЧМ импульсов с выхода согласованного фильтра в пределах апертуры приемной решетки из 20 гидрофонов, где 1 – импульс, отраженный от донной поверхности, 2 – группа импульсов, отраженных от нижней границы верхнего слоя; (б) – мощность в логарифмическом масштабе L_2 - процессора в плоскости $\{c_1^{(0)}, \rho_1\}$ в отсутствие шумов, при когерентном накоплении в плоскости $\{x^{(R)} - \tau\}$ отраженной от донной поверхности продольной компоненты; (в) - мощность в логарифмическом масштабе L_2 - процессора в плоскости $\{c_1^{(0)}, \rho_1\}$ в отсутствие шумов для случая, когда накопление не используется

При наличии шумов точность оценивания падает. Однако очевидно, что накоплении сигналов и подавлении шумов, скорость спадания точности оценивания много меньше. На рис. 2.19 показаны реализации зависимостей выходных сигналов L_2 – процессора в присутствии гауссовского шума, при котором отношение сигнала к шуму (С/Ш) на входе приемных гидрофонов приблизительно составлял 10 дБ. При этом, для случая, рассмотренного при

численных экспериментах, выходное отношение С/Ш оценивается как 30 дБ. Из представленных результатов видно, что при таком уровне шумов положение экстремума (рис.2.19 (а)) смещено от истинных значений параметров, несмотря на использование алгоритма накопления. В то же время, в случае, когда накопление не использовалось, глубина экстремума существенно уменьшилась (рис. 2.19 (б)) а область расположения оценочных значений для различных реализаций шума стали располагаться в более широком интервале значений.

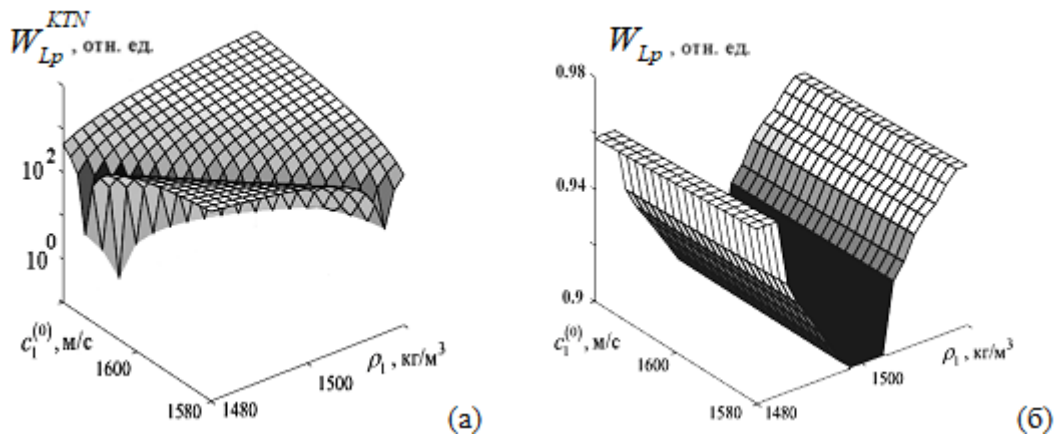


Рисунок 2.19 – Структура мощности в логарифмическом масштабе L_2 - процессора в плоскости $(\rho_1, c_1^{(0)})$ при заданных из априорных данных $c_1^{(1)} = 400$ м/с, $h_1 = 100$ м, уровне излучения УИ = 76 дБ, уровне аддитивного шума УШ = 68 дБ и отношения сигнала к шуму на входе приемной решетки С/Ш=10 дБ, при использовании накопления (а) и для случая его отсутствия (б).

Для более устойчивой оценки ошибок при оценивании решений в присутствии шума рассмотрим усредненные характеристики ошибок по большому интервалу реализаций шума. На рис. 2.20 показаны зависимости средних оценок $\langle \delta c_1^{(0)} \rangle$ (рис.2.20а), $\langle \delta \rho_1 \rangle$ (рис.2.20б) и дисперсий $\sigma(\delta c_1^{(0)})$ (рис.2.20в), $\sigma(\delta \rho_1)$ (рис.2.20г) смещений параметров $\delta c_1^{(0)} = |\tilde{c}_1^{(0)} - c_1^{(0)}|$ и $\delta \rho_1 = |\tilde{\rho}_1 - \rho_1|$ в зависимости от входного отношения сигнала к шуму (ОСШ) для случая использования накопления (кривые с номером 1) и для случая ее отсутствия (кривые с номером 2). Представленные зависимости получены при усреднении по 10^3 реализациям шума. Из представленных зависимостей видно, что присутствие шума приводит к среднему смещению оценок и их разбросу, которые нарастают по мере увеличения уровня шума. Видно, также, что точность оценивания плотности верхнего упругого слоя заметно меньше, чем точность восстановления значения скорости продольной волны. Это обусловлено тем, что параметры отраженного сигнала от упругого слоя относительно слабо зависят от плотности слоя, по

сравнению с зависимости от скорости продольно волны, что, в частности, проявляется в овражной форме структуры мощности процессора в исследуемой плоскости параметров. Как видно из графиков, показанных на рис.6, использование алгоритм накопления сигналов позволило существенно повысить устойчивость оценки параметров донного слоя, что следует из сравнения кривых (1) и (2). Как уже упоминалось ранее, повышение устойчивости решений в рассматриваемом случае обуславливается накоплением сигналов и ослаблением шумов. Дальнейшие этапы реконструкции параметров упругого слоя должны основываться на измерениях волновых компонент, отраженных от нижней границы верхнего упругого слоя, в том числе и поперечную волну. Это позволяет оценить скорость такой волны и толщину верхнего упругого слоя. При этом полученные на предыдущих этапах оценки плотности слоя и скорости продольной волны будут использоваться как уточненные, по сравнению с априорными данными, значения. После оценки скорости поперечной волны и толщины слоя, можно вернуться к оценке продольной волны и плотности. Итерационный процесс уточнения чаще всего сходится. Полученные оценки параметров верхнего упругого слоя используются при оценке нижнего упругого слоя. Такая реконструкция является послойной. Поскольку оценки параметров верхнего слоя могут быть получены лишь с ограниченной точностью, которая зависит от отношения сигнала к шуму, а также ширины полосы частот зондирующих импульсов и размеров приемной антенны, точность оценивания параметров нижних слоев будет меньше. По мере реконструкции более глубоких слоев, ошибки будут накапливаться, так, что, начиная с некоторой глубины, реконструкция параметров донных слоев перестанет удовлетворять заданным требованиям.

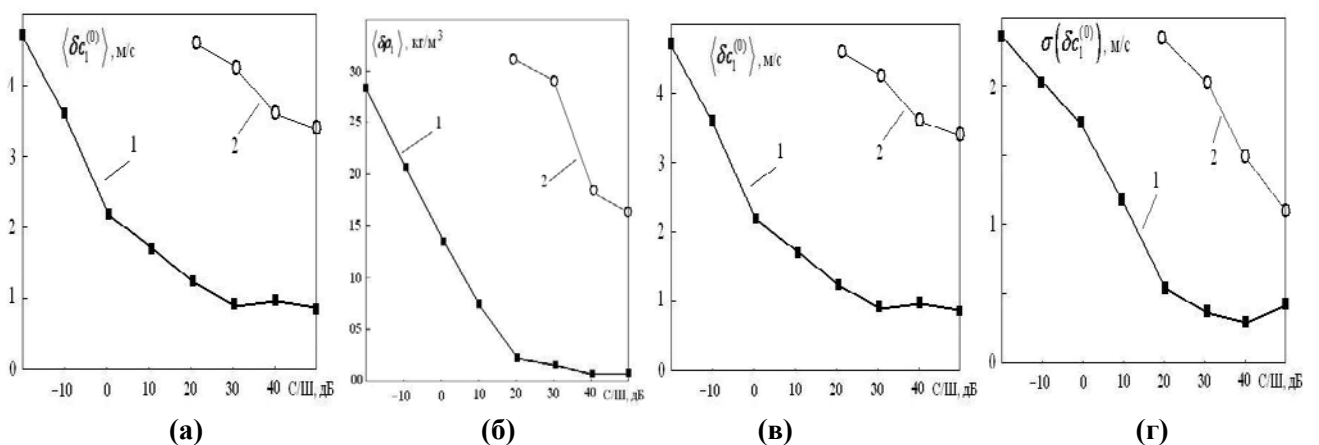


Рисунок 2.20 – Зависимость средних оценок $\langle \delta c_1^{(0)} \rangle$ (а), $\langle \delta \rho_1 \rangle$ (б) и дисперсий $\sigma(\delta c_1^{(0)})$ (в), $\sigma(\delta \rho_1)$ (г) смещений параметров $\delta c_1^{(0)} = |\tilde{c}_1^{(0)} - c_1^{(0)}|$ и $\delta \rho_1 = |\tilde{\rho}_1 - \rho_1|$ в зависимости от входного отношения сигнала к шуму (С/Ш) для случая использования накопления сигналов и (1) и для случая ее отсутствия (2), усредненных по 10^3 реализациям шума

В данной работе в обратной статистической задаче определения (оценивания) параметров морского дна в качестве решения принимаются оценки параметров, соответствующие глобальному экстремуму целевой функции. Статистические характеристики полученных оценок параметров (точность решения), а также интервал возможных значений оцениваемых параметров (качество оценивания), должны удовлетворять наперед заданным требованиям. Алгоритм оценивания, заключается в поиске и принятии решения. Поиск осуществляется в интервале значений параметров, который определяется априорной информацией. Целевая функция строится с учетом всех конкретных особенностей формирования полезных сигналов, шумов и помех, так, что бы обеспечивались требования оценивания параметров морского дна, что определяет необходимые характеристики зондирующих и приемных элементов. Поскольку зондирующие сигналы затухают, а оценивание осуществляется в присутствии шумов и помех, повышение необходимого качества оценивания, ведет за собой рост требований к элементам системы наблюдения параметров морского дна. Как уже отмечалось в предыдущих разделах, при когерентном СА наблюдении параметров дна возможно использование относительно маломощных зондирующих сигналов. Это является следствием возможностей реализации эффективного, когерентного, либо частично-когерентного накопления полезных сигналов.

Различные целевые функции, обеспечивающие требуемое качество оценивания при минимизации затрат, исследовались в ряде работ [35, 39, 63]. Однако проблема оптимального выбора целевой функции остается до-конца не решенной. В настоящей диссертационной работе исследовались статистическая устойчивость некоторых целевые функции методом стохастического моделирования.

Рассмотрим алгоритм оценивания параметров морского дна для случая, когда прием сигналов осуществляется горизонтальной антенной с гидрофонами, размещенными в точках \mathbf{r}_R , а зондирующие ЛЧМ импульсы возбуждались точечным акустическим излучателем. При выполнении реконструкции геофизических параметров дна, использовался алгоритм, в котором осуществлялась временная селекция сигналов, выделяя параметры всех донных слоев, начиная со второго, исходя из априорных данных о них, и решение задачи оценивания параметров первого слоя. Расчетные данные к задаче приведены в таблице 2.6. Приемная антенна расположена горизонтально и состоит из 15 гидрофонов с расстоянием 2 метра между соседними гидрофонами.

В качестве функционалов невязки используются: 1 – L_2 -норма; 2 – L_2 -норма с описанным ранее алгоритмом когерентного траекторного накопления (L_2 -норма с КТН) $W_{L_p}(2.3)$; 3 – обобщенный процессор Π_r AMUSIC_f, получаемый перемножением двух отдельных процессоров AMUSIC_f, взятых при двух положениях приемной решетки от

излучателя, каждый из процессоров получается из спектральных амплитуд сжатого сигнала и модели на центральной частоте ЛЧМ-сигнала $W_{AMUSICr_2}(\varepsilon, \phi)$ (2.8, 2.15.2); 4 – процессор $AMUSIC_\tau$, в котором корреляционные матрицы получаются из амплитуд после согласованной фильтрации сигнала и модели, и концентрации на определенной задержке τ , выбираемой исходя из того, параметры какого слоя хотим оценить $W_{AMUSIC\varepsilon}(\varepsilon, \phi)$; 5 – обобщенный процессор $\Pi_f AMUSIC_f$, получаемый перемножением на разных частотах сигнала отдельных процессоров $AMUSIC_f$, в которых корреляционные матрицы получаются из спектральных амплитуд сжатого сигнала и модели $W_{AMUSICr_2}(\varepsilon, \phi)$ (2.8, 2.15.2); 6 – Нейроподобная свертка сигнала и модели W_{Neuro} (2.10).

Таблица 2.6 – Геофизическая модель слоистого дна (слева) и параметры системы наблюдения (справа)

						Источник S		Приемник R	
	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$v^p, \text{м}/\text{с}$	$v^{sv}, \text{м}/\text{с}$	$h, \text{м}$	$\delta, \text{дБ}/\text{м}$	Wp, Вт	0,7515	xR0, м	10
						pa, Па	300	dxR, м	2
						f1, Гц	200	nx	14
						f2, Гц	1000	xRn, м	38
						T, сек	1	zR0, м	10
						Fd, Гц	5000	dzR, м	
						xS, м	0	nz	
						zS, м	15	zRn, м	10
вода	1040	1475	0	50	0				
1 слой	1400	1900	200	10	0				
п/п	1600	2400	300	-	0				

Были рассчитаны зависимости средних оценок $\langle \Delta \rho_1 \rangle$ $\langle \Delta v_1^p \rangle$ $\langle \Delta v_1^{sv} \rangle$ $\langle \Delta h_1 \rangle$ и дисперсий $\sigma \langle \Delta \rho_1 \rangle$ $\sigma \langle \Delta v_1^p \rangle$ $\sigma \langle \Delta v_1^{sv} \rangle$ $\sigma \langle \Delta h_1 \rangle$ смещений параметров ($\Delta \rho_1 = |\tilde{\rho}_1 - \rho_1|$, $\Delta v_1^p = |\tilde{v}_1^p - v_1^p|$, $\Delta v_1^{sv} = |\tilde{v}_1^{sv} - v_1^{sv}|$, $\Delta h_1 = |\tilde{h}_1 - h_1|$) от входного отношения сигнала к шуму (С/Ш) для случая использования 6 различных функционалов невязки, усредненных по 10^3 реализациям шума.

Из приведенных (рис. 2.21 - 2.22), и других, расчетов видно, что наилучшие результаты по устойчивости оценок скорости и толщины получаются при использовании Нейроподобной свертки сигналов. Однако при оценке плотностей, такой критерий практически не работает. Можно также заметить, что хорошие результаты достигаются при использовании критерия в виде Lp-норма с когерентным траекторным накоплением (КТН) (линия 2 на рис. 2.21 - 2.22). Его устойчивость заметно превосходит устойчивость критериев MUSIC и AMUSIC. В целом видно, что различные критерии в различных ситуациях имеют различную устойчивость, что позволяет построить оптимальный алгоритм их последовательного использования. Например, для оценки плотностей нужно использовать

критерий в виде L_p -нормы с КТН, а при оценке скорости и толщины – Нейроподобную свертку. Хорошие результаты по устойчивости достигаются при использовании критерия в виде L_p -нормы с КТН, что обуславливается большим накоплением полезных сигналов.

Функционал невязки в виде процессора AMUSIC $W_{AMUSIC}(\varepsilon, \phi)$ является параметрическим (2.8), его параметром является величина ε - наличие контролируемого отклонения направляющего вектора \mathbf{e} от \mathbf{e}_0 ($\|\mathbf{e} - \mathbf{e}_0\| \leq \varepsilon$). Как показали расчеты, поведение функции устойчивости оценок параметров и ее сходимость к нулю зависит от выбора значения параметра ε . Различное поведение кривых 3 и 4 на рисунках 2.21 и 2.22 обусловлено различными значениями параметра ε . Как показывают расчеты, при некоторых значениях ε зависимости средних значений и дисперсий с увеличением отношения сигнал/шум не сходятся.

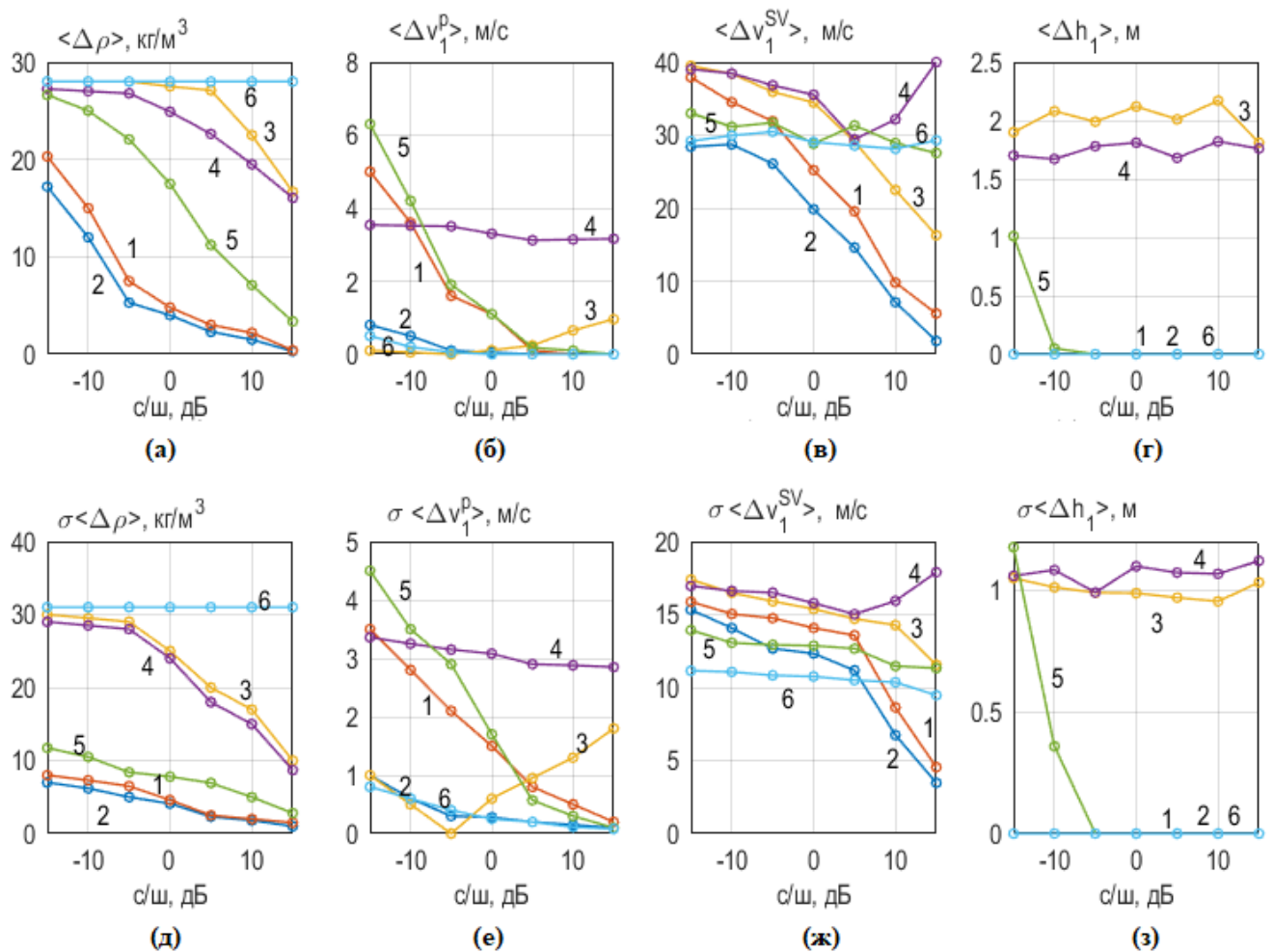


Рисунок 2.21 – Зависимость средних оценок $\langle \Delta \rho_1 \rangle$ (а), $\langle \Delta v_1^p \rangle$ (б), $\langle \Delta v_1^{SV} \rangle$ (в), $\langle \Delta h_1 \rangle$ (г) и дисперсий $\sigma \langle \Delta \rho_1 \rangle$ (д), $\sigma \langle \Delta v_1^p \rangle$ (е), $\sigma \langle \Delta v_1^{SV} \rangle$ (ж), $\sigma \langle \Delta h_1 \rangle$ (з) смещений параметров от входного отношения сигнала к шуму (С/Ш) для случая использования 6 различных функционалов невязки, усредненных по 10^3 реализациям шума

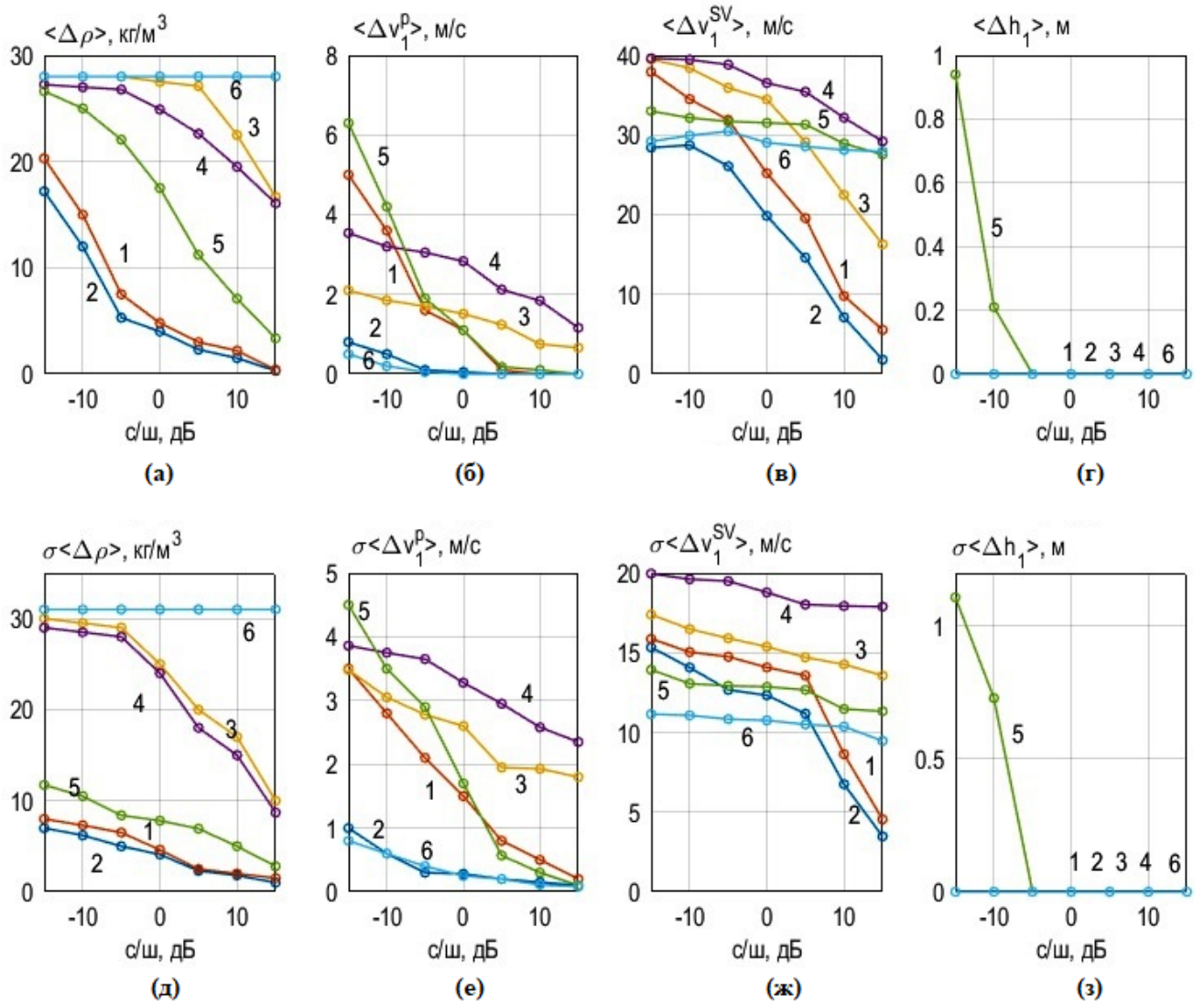


Рисунок 2.22 – Зависимость средних оценок $\langle \Delta \rho_1 \rangle$ (а), $\langle \Delta v_1^P \rangle$ (б), $\langle \Delta v_1^{SV} \rangle$ (в), $\langle \Delta h_1 \rangle$ (г) и дисперсий $\sigma \langle \Delta \rho_1 \rangle$ (д), $\sigma \langle \Delta v_1^P \rangle$ (е), $\sigma \langle \Delta v_1^{SV} \rangle$ (ж), $\sigma \langle \Delta h_1 \rangle$ (з) смещений параметров от входного отношения сигнала к шуму (С/Ш) для случая использования 6 различных функционалов невязки, усредненных по 10^3 реализациям шума

2.4. Выводы

Предложен послойный итерационный алгоритм поиска решения обратной задачи по оцениванию параметров донных слоев при когерентном зондировании. Показано, что использование взаимосвязи параметров отдельных донных слоев позволило сузить интервалы поиска решения в многомерном пространстве параметров.

На примере алгоритма восстановления параметров двух донных слоев установлено, что итерационные последовательности для всех донных параметров сходятся с высокой вероятностью. Скорость сходимости различна для различных параметров и определяется, в

основном, выбором начального приближения для параметров второго слоя, которое определяется априорной информацией. Оценки, к которым сходятся указанные итерационные процессы, случайны и зависят от реализаций экспериментальных матриц. Точность определения параметров второго (последующего) слоя зависит от точности определения параметров первого (предыдущего) слоя и в общем случае понижается с ростом номера слоя и ошибки оценивания при восстановлении более глубоких слоев накапливаются. То есть, начиная с некоторых глубин, при заданной мощности акустического источника наблюдение станет невозможным.

Показано, что дисперсии значений восстановленных параметров слабо зависят от номера итераций при заданном отношении сигнал/шум. Средние значения параметров по совокупности реализаций случайных матриц сходятся по мере роста итераций к значениям, которые отклоняются от истинных. Отклонения зависят от отношения сигнал/шум, начального приближения и числа итераций.

Методами численного стохастического моделирования исследованы возможности накопления сигналов и подавления шумов, позволяющие повысить точность и робастность реконструкции геоакустических параметров.

Предложен итерационный метод получения оценок параметров слоистого дна с использованием целевой функции в виде процессора MUSIC и его адаптивных обобщений. В численных экспериментах установлено, что распределение мощности процессора имеет овражную форму и характеризуется набором локальных максимумов, включающих истинные значения параметров верхнего слоя.

Проанализирована зависимость статистических характеристик оценок параметров донных слоев морского дна в зависимости от отношения сигнала к шуму на приемных гидрофонах. При этом использовались различные целевые функции, в частности, L_p -норма, L_p -норма с КТН, AMUSIC, Нейроподобная свертка и модель формирования когерентных сложных импульсов, шумов и реверберационных помех, развитых в разделе 1.

Методом стохастического моделирования исследована робастность используемых целевых функций. Показано, что наилучшую устойчивость к шумам и помехам при оценке геоакустических параметров морского дна имеет функционал невязки типа L_2 – нормы с когерентным пространственно-частотным накоплением. Функционал невязки типа AMUSIC так же показывает хорошую сходимость, однако дисперсия оценки при малых отношениях сигнал/шум больше, чем в аналогичных условиях при использовании невязки типа L_2 – нормы. Функционал невязки типа нейроподобной свертки демонстрирует меньшую дисперсию оценки значений скоростей продольных волн в слоях при малых отношениях сигнал/шум по сравнению с другими рассматриваемыми функционалами.

Глава 3. Экспериментальная проверка метода когерентной реконструкции структуры морского дна

В настоящей главе обсуждаются результаты экспериментальной апробации метода когерентной реконструкции структуры морского дна. Эксперименты проводились в условиях физического моделирования в бассейне и в морских условиях в Каспийском и Черном морях.

3.1 Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании в лабораторном бассейне

Измерения в бассейне используются для апробации методов акустического зондирования в условиях, когда большую часть параметров, характеризующих условия измерений можно с достаточной точностью контролировать. Вместе с тем, точность реконструкции при экспериментах в бассейне может ограничиваться высоким уровнем реверберации.

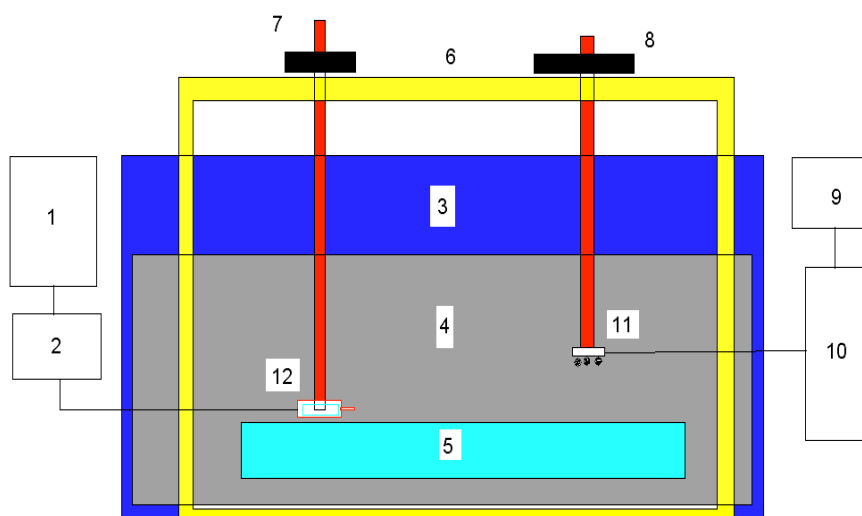


Рисунок 3.1 – Блок-схема комплекса лабораторных измерений отраженных от слоистого дна сигналов

Разработанный для решения рассматриваемой задачи комплекс масштабного физического моделирования позволяет осуществить измерения при контролируемых условиях проведения эксперимента, что, как уже отмечалось, трудно обеспечить при проведении измерений морских условиях. Общие характеристики разработанного комплекса физического

моделирования оценивались на основе расчетов с помощью численных моделей распространения и рассеяния акустических сигналов в океанических волноводах. Параметры бассейна, модели дна, приемных и излучающих элементов подбирались с учетом требований масштабного моделирования условий натурального эксперимента по когерентному акустическому зондированию морского дна. Решаемой комплексом физического моделирования задачей являлось исследование возможностей методов реконструкции акустических характеристик (плотности, продольной и поперечной скорости звука) донных слоев с использованием метода проверки статистических гипотез. Измерительный комплекс (рис. 3.1) включал в себя следующие элементы: 1 – регистратор принятых сигналов, 2 – усилитель, 3 – ванна из нержавеющей стали с размерами 2.97 x 0.8 x 0.71 м, 4 – водный слой толщиной 33 см, 5 – пластина из оргстекла, 6 – координатное устройство, 7 – каретка гидрофона, 8 – каретка излучателя, 9 – генератор сигналов, 10 – усилитель мощности, 11 – излучатель, 12 – гидрофон. Подсистемой излучения формировались акустические ЛЧМ импульсы в полосе частот от 25 кГц до 3 МГц, длительностью от 10^{-3} до 0.1 сек. Источник акустических сигналов и приемная система располагались на глубинах от 30 до 2 см. Расстояния между ними менялись с помощью сканирующего устройства от 20 мм до 660 мм. Точность определения положения измерительных элементов в бассейне обеспечивалась лазерным дальномером. Она составляла 0.1 мм.

В условиях физического моделирования в ограниченном стенками бассейне измерения осуществляются в присутствии реверберационных помех, формируемых за счет переотражений и рассеяния акустических сигналов стенками бассейна, а также поверхностью жидкости. Для проведения измерений с приемлемой точностью необходимо обеспечить подавление таких помех. В рамках настоящего моделирования решение такой задачи основывается на ослаблении уровней отраженных от стенок акустических сигналов за счет покрытия стенок бассейна поглощающим слоем резины, фильтрации помех за счет импульсного стробирования, а также путем использования излучателей с узкой диаграммой направленности. На рис. 3.2 показана диаграмма направленности излучателя, определенная при излучении импульсов с полосой от 150 до 250 кГц, в случае, когда излучатель и приемник находились на одной глубине 15 см, а расстояние между ними составляло 10 мм. Как показали оценки и предварительные измерения, использование такого излучателя позволило ослабить уровень формируемых при отражении от боковых стенок реверберационных помех в рабочем интервале задержек на 15-20 дБ.

На рис. 3.3 представлены результаты анализа структуры акустического поля в экспериментальном комплексе в условиях физического моделирования для случая, когда морское дно моделировалось в виде слоя плексигласа толщиной 0.037 м, с плотностью 1190 кг/м^3 , скоростью продольных волн 2670 м/с, скоростью поперечных волн 1121 м/с и затуханием

0.01 дБ/м, расположенного в воде на глубине 0.33 м. Ниже плексигласа располагался слой воды, моделирующий слой газонасыщенного слоя осадков, который покоился на плите из нержавеющей стали.

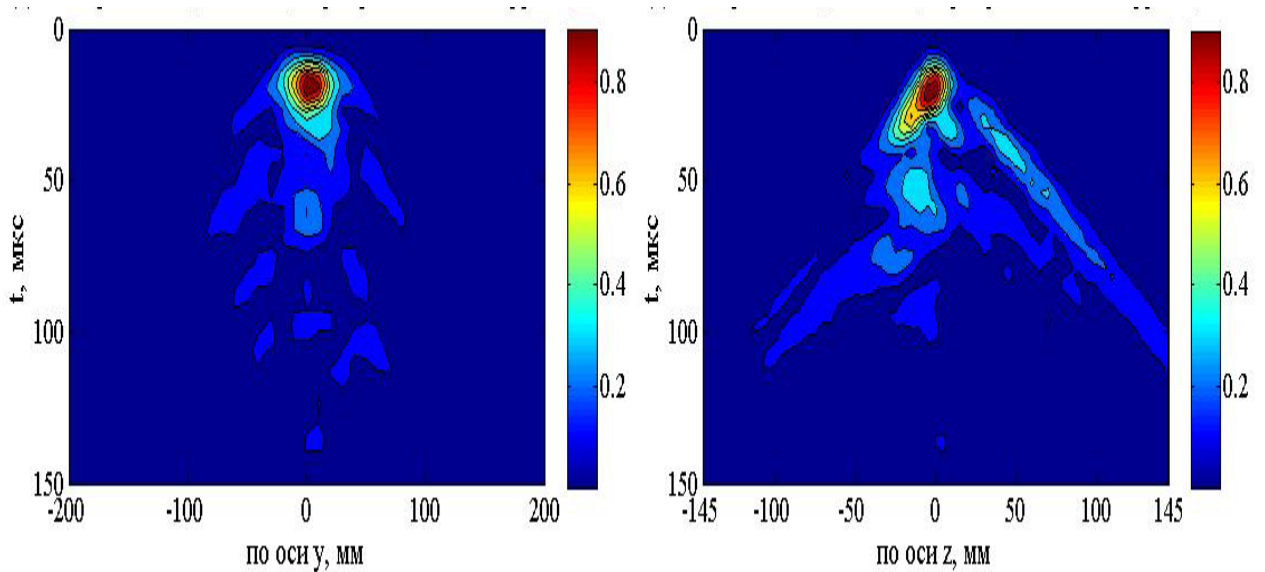


Рисунок 3.2 – Диаграмма направленности излучателя при возбуждении импульсов в полосе от 150 до 250 кГц в поперечном (по оси y), и вертикальном (по оси z) направлении

На рис. 3.3 (а) сверху показано распределение сигналов, полученное путем расчетов (по указанным данным на основе разработанной в **Главе 1** модели) для измерительной системы с указанной выше моделью слоистого дна, в случае, когда излучались импульсы длительностью 1 мс в полосе частот от 25 кГц до 250 кГц. Источник располагался на глубине 16.5 см. Приемник был расположен на расстоянии 30 см от источника на глубине 25 см. Согласно расчетам, наибольшим по величине являлся импульс, распространяющийся по водной траектории (прямой импульс), обозначенный на рисунке цифрой (1). В интервале задержек порядка 720 мкс располагался импульс, отраженный от поверхности водного слоя (он обозначен цифрой (2)). Импульсы, отраженные от верхней и нижней границы плексигласа (3, 4) наблюдаются в интервале задержек вблизи 800 мкс. Далее в интервале больших задержек располагаются импульсы, отраженные от границ стали. На том же рисунке, ниже, показаны результаты измерений поля в бассейне, при условиях, которые были выбраны при расчетах. Сравнение результатов измерений и расчетов показывает, что структура сигналов удовлетворительно совпадает с расчетами. По мере удаления приемника от источника задержки различных компонент импульсных сигналов меняются по-разному, в соответствие с отличиями траекторий их распространения, так, что в плоскости дистанция-задержка их отличия четко проявляются. Для иллюстрации указанного явления на рис.3.3б, показаны результаты измерений импульсных

сигналов в случае, когда приемник, расположенный на удалении 10 см от источника, менял свою глубину в интервале от 16 см до 10 см, источник располагался на глубине 13 см, а его диаграмма была направлена в сторону дна. На представленных распределениях измеренных сигналов наиболее интенсивными является водная компонента («прямой луч») и компонента, отраженная от поверхности воды. В интервале задержек 300 до 700 мкс наблюдаются отраженные от слоистого дна акустические импульсы, а также реверберационные помехи (рис. 3.3 б). Из представленных измерений видно, что, необходимая для апробации метода реконструкции параметров дна точность измерения в существенной степени ограничена реверберационными помехами, так, что отношение сигналов к шуму колеблется в интервале значений от 0 до 5 дБ. Для повышения точности измерений были использованы дополнительные усилия по накоплению полезных сигналов и подавлению шумов и помех.

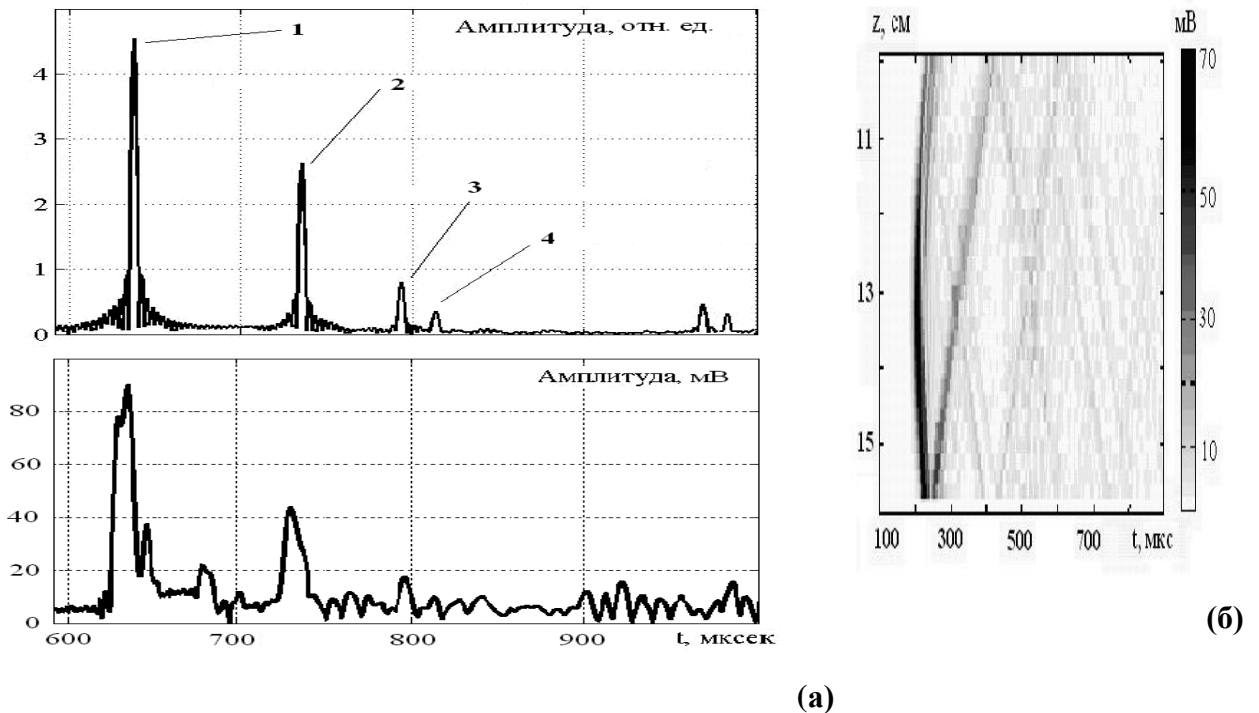


Рисунок 3.3 – Структура импульсных сигналов при измерениях в условиях физического моделирования: (а) – расчеты с помощью модели (верхний график) и результаты измерений (нижний график); (б) – структура измеренных импульсов в плоскости (z, t)

3.1.1. Методы накопления акустических сигналов и подавления реверберационных помех и шумов

Как показал предварительный анализ структуры акустических импульсов в бассейне, в интервале задержек в котором располагаются отраженные от слоистого дна акустические импульсы, наблюдается относительно высокий уровень шумов. Наблюдаемые шумы

обусловлены реверберацией на стенках бассейна, рассеянием на неоднородностях границ и водной среды, шумами, связанными с работой механизмов, обеспечивающих прецизионное перемещение приемного элемента, а также с электрическими наводками. Для повышения точности измерений были осуществлены меры по ослаблению шумов и накоплению полезных отраженных от слоистого дна сигналов.

Ослабление помех и шумов. В комплексе физического моделирования для динамического позиционирования использовалась высокоточная механическая система с лазерным измерителем положения излучающих и приемных элементов. Указанный механизм обеспечивал высокую точность определения положения элементов, которая составляла 0.1 мм, то есть, порядка одной десятой длины волны, а также пространственной длины свернутого с помощью согласованного фильтра импульса, для наиболее часто используемых при измерениях частотных интервалов. Однако, как показали измерения, в режиме динамического перемещения приемного элемента при измерении пространственной структуры сигналов, наблюдался значительный шум, связанный с работой механизмов, который в существенной степени маскировал полезные сигналы. Результаты ослабления такого рода шумов, достигаемые при измерениях стационарного положения приемника, когда механизм перемещения отключен, представлены на рис. 3.4 (слева). Измерения осуществлялись в случае, когда излучались ЛЧМ импульсы длительностью 1 мс в полосе частот 25-250 кГц, источник располагался на глубине 16.5 см, а приемник располагался на расстоянии 6 см при глубине 25 см. Выполнялось сжатие сигналов с помощью согласованного фильтра. Цифрой 1 на рис. 3.4 слева показана структура усредненного по 50 реализациям сигнала в бассейне, в случае, когда механизм высокоточного перемещения был включен. Цифрой 2 на том же рисунке показан сигнал в случае, когда механизм перемещения был отключен. На основании этих и других измерений можно полагать, что усреднение шумов не привело к существенному ослаблению шумов, тогда как отключение механизма перемещения позволило в диапазоне задержек в которых наблюдаются импульсы, отраженные от слоистого дна, существенно, на 20-25 дБ, ослабить шум при измерениях. Аддитивные шумы при измерениях обуславливались вибрациями бассейна из-за помех ударного типа и шумов и вибраций в здании. Измерения проводились в подвальном помещении, а измерительный комплекс располагался на бетонной плите, расположенной на полу и фундаменте здания. Наилучшие результаты измерений на используемом комплексе моделирования были достигнуты при измерениях в ночных условиях, когда движение, а, вследствие этого, и уровень местных (акустически больших) шумовых помех в здании ослабевал. Необходимо отметить, что используемая при измерениях аппаратура позволяла излучать достаточно мощные зондирующие акустические сигналы так, что, в большинстве случаев, основным ограничением в точности измерений были мультипликативные

реверберационные помехи. Одним из источников помех при измерениях являлись и всевозможные электрические наводки и помехи от электронных блоков, в частности, входных усилителей и аналогово-цифровых преобразователей. При дальнейших измерениях уровень помех, связанных с электрическими наводками был подавлен на 45-50 дБ. Ослабление шумов электрических блоков осуществлялось путем усреднения последовательности измеряемых импульсов, что в реальных условиях позволяло добиться ослабления шумов на 3-5 дБ. Частота квантования сигналов при измерениях составляла 2 МГц. При этом точность измерений задержек не превышала величину, порядка 10^{-6} сек. Это ограничение, и некоторые другие технические причины, вызывали возникновение ошибок при измерениях задержек и амплитуд порядка 1-3 %. Такие неточности, вызванные ограничениями характеристиками используемой аппаратуры, могут быть устранены лишь использованием более высококачественной аппаратуры.

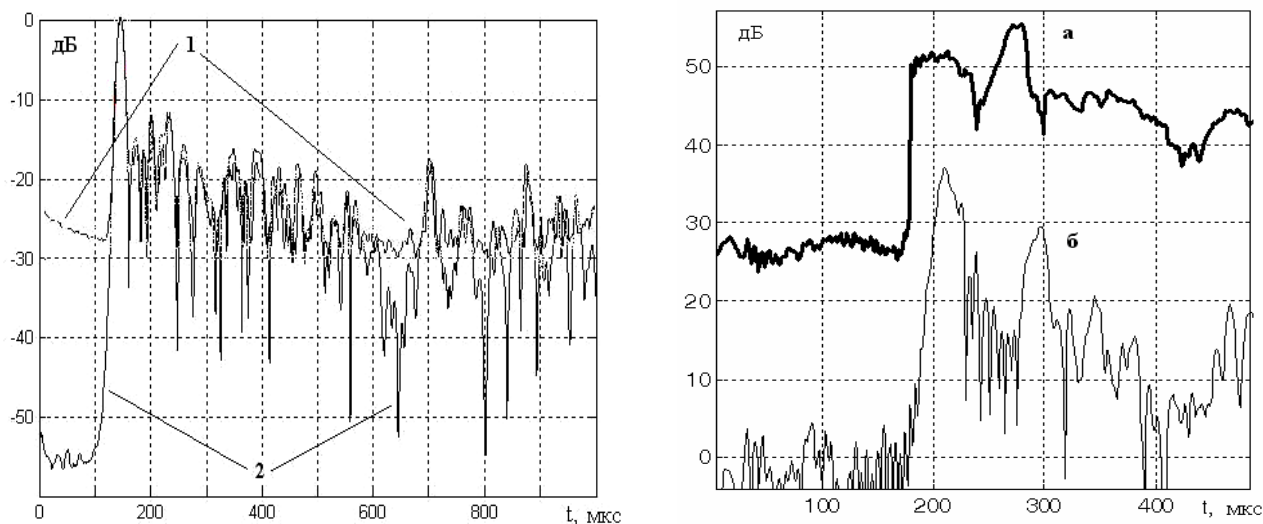


Рисунок 3.4 – Ослабление шума, возникающего в режиме динамического перемещения приемного элемента при измерении пространственной структуры сигналов (слева) и результаты повышения уровня поверхностной акустической компоненты по отношению к водному лучу за счет траекторного суммирования (справа): (б) – структура сигнала без накопления в точке $z=12.5$ см, (а) – распределение сигналов после накопления поверхностной компоненты

Накопление полезных сигналов. В настоящем исследовании основные усилия при измерениях были направлены на увеличение отношения уровней полезных сигналов к уровням мультипликативных реверберационных помех. Средством достижения такой цели является максимальное накопление полезных сигналов. Это может быть достигнуто путем использования всех отличий сигналов от реверберационной помехи. Такие отличия

проявляются в пространственной, временной и частотной областях. Как уже указывалось, наиболее эффективным методом ослабления мультипликативных реверберационных помех является временное стробирование, которое выполняется при использовании сложно-модулированных зондирующих импульсов. При физическом моделировании в бассейне и заданной геометрии расположения излучателя и приемника, а также для рассматриваемой модели слоистого дна, реверберационные помехи от боковых стенок, были достаточно ослаблены. В частности, это было достигнуто в интервале задержек, где располагаются полезные, отраженные от дна сигналы (для случая, показанного на рис. 3.3 – это диапазон задержек в интервале значений 750-950 мкс). Как следует из предварительных измерений, основными реверберационными помехами при измерении отраженных от слоистого дна сигналов являются водный сигнал и сигнал, отраженный от поверхности жидкости (рис. 3.3, 3.4). Как следует из анализа пространственно-временных распределений, указанные компоненты акустического поля, как и компоненты, отраженные от слоистого дна, располагаются вдоль отличающихся друг от друга траекторий (например, рис. 3.3 справа). При этом области задержек и координат расположения приемников, в которых наблюдаются и мешающие, например, водные волноводные компоненты, и полезные сигналы, локализованы. В большинстве же пространственно-временных областей такие сигналы не пересекаются. Это позволяет, суммируя различные акустически компоненты, изменять отношение их взаимных уровней. Иллюстрацией является результат выделения отраженной от водной поверхности компоненты относительно водного луча при ее суммировании вдоль соответствующей ей траектории в $(z-\tau)$ плоскости (рис.3.4 справа). Как видно из результатов такого рода суммирования, уровень поверхностной компоненты вырос на 12 дБ по сравнению с мешающей водной компонентой. Аналогичным образом можно просуммировать и полезные, отраженные от слоистого дна сигналы. Траектории, вдоль которых необходимо осуществлять суммирование в плоскости (r, τ) можно определить с помощью модели формирования акустического поля для структуры слоистого дна. Большая часть плоскости (r, τ) при измерениях заполнена шумами и реверберационными помехами, которые формируются, в том числе, и пространственно распределенными случайными неоднородностями поверхности воды, дна, границ слоев и толщи водного слоя. Масштабы когерентности таких помех, чаще всего, не превышает пространственные размеры отдельных элементов разрешения измерительного комплекса. При этом траекторное накопление сигналов от каждой из границ донных слоев в плоскости $(r-\tau)$ позволило ослабить реверберационные помехи на 10-15 дБ. В целом, за счет подавления электромагнитных помех, усреднения шумов, а также частотного накопления при согласованной фильтрации и пространственном накоплении вдоль траекторий, отношение сигналов к шумам и помехам (С/Ш) удалось повысить на 35-40 дБ. Разброс эффективности

улучшения отношения С/Ш определяется изменчивостью структуры сигналов, помех и шумов. Так, в областях, где полезные сигналы пересекаются с водным и поверхностным реверберационными лучами, отношение С/Ш заметно уменьшается. Учитывая это, при дальнейших измерениях были предприняты меры по уменьшению зон пресечения сигналов и помех путем использования зондирующих ЛЧМ импульсов с огибающей специальной сглаженной формы. Это существенно ослабило уровень боковых лепестков и сузило размеры областей с повышенным уровнем помех.

3.1.2. Оценка параметров модели морского дна в условиях физического моделирования

Реконструкция параметров слоистого дна (инверсия) с использованием дистанционных измерений является в общем случае некорректной обратной задачей. Решение таких задач может осуществляться только при использовании большого объема априорной информации, в частности, о геометрии системы наблюдения, среде, шумах и помехах, а также об объектах, параметры которых необходимо оценить. Из представленных выше результатов измерений акустических сигналов, выполненных в условиях физического моделирования, следует, что уровень полезных сигналов по отношению к шумам, и особенно, к реверберационным помехам, находится в интервале от -5 до 10 дБ, что недостаточно для исследования особенностей сейсмоакустической инверсии слоистого дна, при моделировании методов морской сейсморазведки. Для повышения достоверности при реконструкции параметров модели морского дна была выполнена подготовка измеренных данных, заключающаяся в подавлении помех и усилении сигналов. Накопление измеренных в модельных условиях сейсмоакустических сигналов выполнялось в частотной, временной и пространственной областях. В результате, уровень полезных сигналов стал превышать шумы и помехи в среднем на 40 дБ. Однако для достижения такого усиления сигнала необходимо знать траекторию расположения отраженных от границ реконструируемых слоев сигналов в плоскости «задержка-координата», вдоль которой следует осуществлять когерентное накопление полезных сигналов. С использованием разработанной в Главе 1 модели при поиске истинных параметров донных слоев, характеристики соответствующих траекторий могут быть найдены расчетным методом. При этом принимаются гипотезы, для которых отличие измеренных значений поля от расчетных значений, минимально. Поиск решения при этом сводится к оптимизационной задаче поиска глобального экстремума целевой функции (невязки) в состав которой, в нашем случае, входит и операция накопления сигналов вдоль траектории в плоскости (r, τ) . На рис. 3.5 показаны параметры физической модели и параметры излучаемых

ЛЧМ импульсных сигналов. При измерениях прием в пределах горизонтально ориентированной апертуры (рис. 3.5 а) осуществлялся последовательно при остановке приемника в каждой точке измерения. На рис. 3.6 (а) представлено распределение измеренных сигналов после частотного накопления принимаемых импульсов с помощью согласованного фильтра, параметры которого задавались с использованием априорной информации об излучаемых зондирующих импульсах (рис. 3.5 в,г). При этом для каждой из точек положения приемника вдоль оси задержек формируется распределение отраженных от слоистого дна импульсов, каждый из которых соответствует одной из границ в рассматриваемой физической модели слоистого дна. Весь массив измеренных данных в плоскости (r, τ) формируется в виде годографа, содержащего волновые компоненты, отраженные как от границ, так и от всех типов неоднородностей. При интерпретации наблюдаемого распределения, с учетом предварительного анализа, результаты которого представлены выше, можно отметить, что верхний фронт измеренных импульсов, в котором задержки импульсов нарастают по мере удаления практически линейно, соответствует водной компоненте (прямому лучу). В интервале малых удалений такая компонента приходит первой, поскольку дистанция до приемника заметно меньше расстояния до нижней границы оргстекла. В этом интервале располагаются и волновые компоненты, отраженные от поверхности слоя плексигласа, которые, в силу геометрии измерений, при увеличении дистанции практически совпадают с водной компонентой. Однако по мере удаления от излучателя, начиная с дистанций порядка 400 мм, водный луч приходит позже компоненты, отраженной от второй границы слоя плексигласа, поскольку скорость волны в плексигласе существенно больше скорости звука в воде. На измеренном годографе такая компонента относительно слабо видна, но она может быть выделена после пространственного накопления. В интервале задержек порядка 400-450 мкс, при малых удалениях формируется фронт импульсов, соответствующий поперечной волне, отраженной от второй границы слоя оргстекла. Ниже формируются фронты волн, отраженных от дальних стенок и от дна бассейна. Как следует из представленных в виде годографа экспериментальных данных, в области расположенной по оси задержек за быстро распространяющимися компонентами наблюдаются реверберационные помехи. Такие помехи возникают за счет рассеяния зондирующих импульсов на случайных неоднородностях водного слоя и слоистого дна. При этом отношение полезных сигналов к шумам и помехам, по мере нарастания задержек (увеличения глубины зондирования дна), падает, что связано с затуханием сигналов.

Показанный на рис.3.6, расчетный годограф имеет структуру, соответствующую модели, параметры которой близки к физической модели слоистого дна, используемой при измерениях. Отметим, что истинные импедансные характеристики оргстекла и стали, при измерениях, не

были точно известны, и при вычислениях, в качестве плотностей и скоростей использовались значения, взятые из справочника.

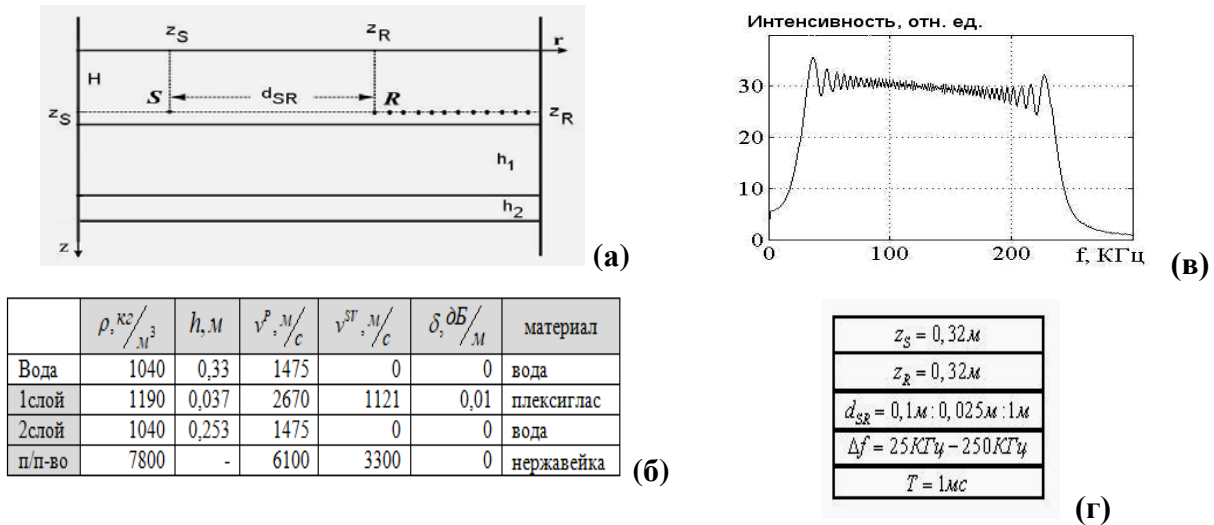


Рисунок 3.5 – Структура модели (а-г) для реконструкции параметров донных слоев в условиях физического моделирования (а – геометрия системы измерения, б – параметры слоистой среды, в – спектр излучаемых ЛЧМ импульсов, г – параметры положения элементов измерительной системы и излучаемых импульсов)

С учетом указанных обстоятельств, при реконструкции параметров донных слоев интервал выдвигаемых для проверки в качестве гипотез параметров донных слоев выбирался в пределах ограниченного интервала, в центре которого располагались справочные значения. При выполнении операции реконструкции параметров донных слоев в качестве решающей статистики (функционала невязки), определяющей отличия между измеренными данными и расчетными сигналами (гипотезами) использовалась L_2 – норма, что было сделано исходя из предположения о нормальном распределении шумов и помех при измерениях [87]. Как видно из представленных (рис.3.6 а), и других результатов измерений и оценок, после фильтрации шумов и помех и сжатия ЛЧМ импульсов отношение сигнала к шуму в плоскости (r, τ) имеет различные значения, что связано с наличием неоднородно распределенных сигналов, шумов и помех. Однако, для большинства сценариев расположения источника и приемника, а также моделей слоистого дна, волновые фронты сигналов, отраженных от различных границ слоистого дна хорошо разделяются и могут наблюдаться отдельно от других компонент. Это позволяет выполнить операцию регуляризации, заключающуюся в селекции сигнальных компонент, соответствующих отдельным границам донных слоев при оценке их параметров. При этом в расчетных гипотезах для использования в решающих статистиках также

выполняется такая селекция. При этом обеспечивается подавление шумов и помех и накопление полезных сигналов, что, при заданных входных отношениях сигналов к шуму повысит достоверность при оценке параметров донных слоев.

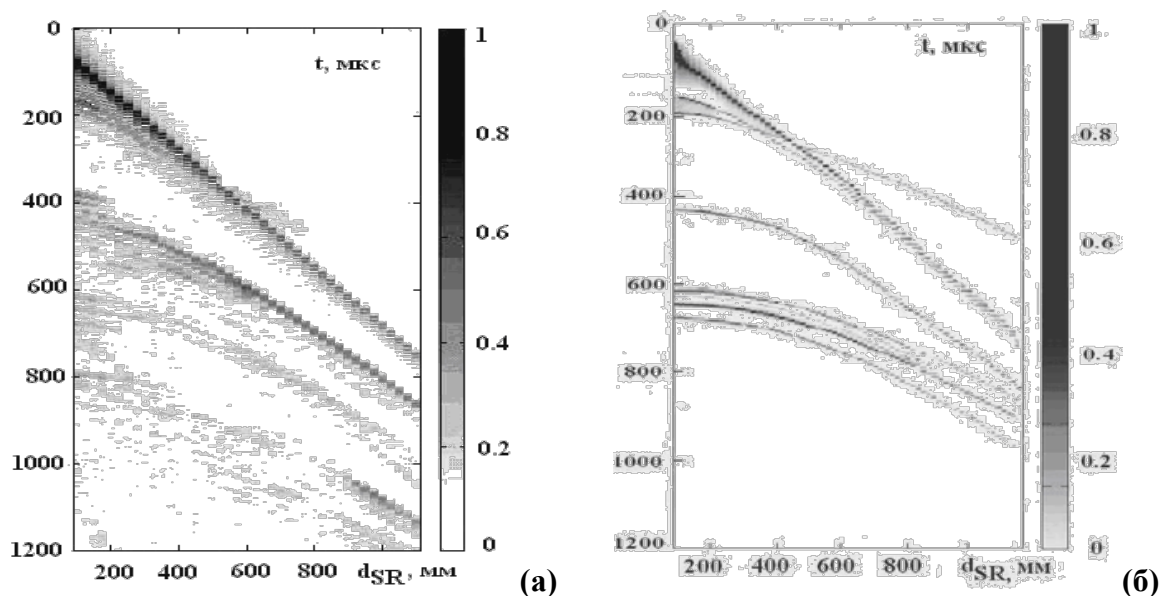


Рисунок 3.6 – Структура измеренных отраженных от слоистого дна сигналов после согласованной фильтрации (а) и результаты расчета одной из гипотез, используемых при поиске решений (б)

В частности, для оценки параметров слоя из оргстекла, можно, прежде всего, выделить волновую компоненту, соответствующую отражению от поверхности оргстекла, которая на годографе располагается непосредственно под водной компонентой (рис. 3.6), что позволяет оценить плотность и скорость продольных волн в оргстекле. При обеспечении идентификации такой волновой компоненты и ее селекции можно осуществить когерентное пространственное накопление вдоль данной траектории N импульсов, что при достаточной пространственной когерентности позволит заметно повысить отношение сигналов к шуму и помехам. Однако поскольку истинные значения параметров используемого в эксперименте плексигласа не известны, структура и положение траектории отраженной от поверхности оргстекла волновой компоненты в виде траектории импульсов в плоскости (r, τ) также остаются неизвестными. Единственной возможностью оценки параметров оргстекла является статистическая проверка гипотез, которые формируются с помощью численной модели. При этом и характеристики траектории, вдоль которой будут накапливаться импульсы, в гипотезе также будет задаваться моделью. Поскольку измерения при модельных экспериментах осуществлялись в присутствии шумов и помех, целевая функция будет в общем случае случайной. В точке минимума, после удаления из решающей статистики сигнальных компонент, оставшаяся шумовая часть

определил достоверность решения. При этом порог принятия решения определяется шумами в области решения и требуемыми характеристиками достоверности.

На рис.3.7 – 3.8 показана зависимость полученной при реализации описанного алгоритма решающей статистики (D), в качестве которой использовалась L_2 норма, от значений проверяемых параметров, выбираемых в интервале, вблизи начальных значений, взятых из справочника. Как и следовало ожидать, полученные значения целевой функции являются случайными, и их зависимости от параметров следует интерпретировать в статистическом смысле, то есть, их необходимо усреднять по ансамблю независимых измерений. Как уже отмечалось, основным источником шумов и помех при анализируемых измерениях была реверберация, формируемая различными случайными неоднородностями физической модели. Из-за сложности конструкции физической модели, мультипликативные реверберационные помехи распределялись по пространственным, частотным и временным координатам неравномерно. Разброс уровней помех достигал для области измерений при выбранных параметрах физической модели величин порядка 10-15 дБ. Как видно из результатов измерений, акустически большой по уровню помехой, при измерении сигналов, отраженных от слоистого дна, является водная волна, которая маскирует достаточно большими боковыми откликами по оси задержек полезные сигналы, которые располагаются вблизи этой компоненты. В рассматриваемом варианте расположения источника и приемных элементов, отраженная от поверхности дна волновая компонента располагается вблизи водной волны. Это снизило отношение полезных сигналов к шуму и помехе при измерениях отраженной от поверхности плексигласа волны до величины порядка 10 дБ. Из показанных на рис. 3.7 – 3.8 зависимостей следует, что вблизи минимума зависимости решающей статистики от оцениваемых параметров, ее значения, которые можно оценочно считать пороговыми, достаточно большие. Это связано с большим уровнем реверберационных помех, формируемых близко расположенной водной компонентой. Поскольку измеряемые зависимости целевых функций являются случайными, для определения достоверности оценок параметров необходимо исследовать статистические характеристики шумов и существенно более интенсивных реверберационных помех. В рамках используемой физической модели все неоднородности не меняются во времени. В этой связи, единственной возможностью анализа статистической структуры шумов и реверберационных помех является измерение их реализаций в разных точках вблизи решения в пространстве, в частотной области и в области временных задержек. На рис. 3.7 – 3.8 для иллюстрации показаны темными и светлыми треугольниками две кривые целевых функций, измеренные при смещении приемной апертуры вдоль поперечной координаты на один сантиметр. Из этих измерений видно, что разброс

реализаций решающих статистик не однороден, что связано с существенными вариациями уровней помех по указанным координатам.

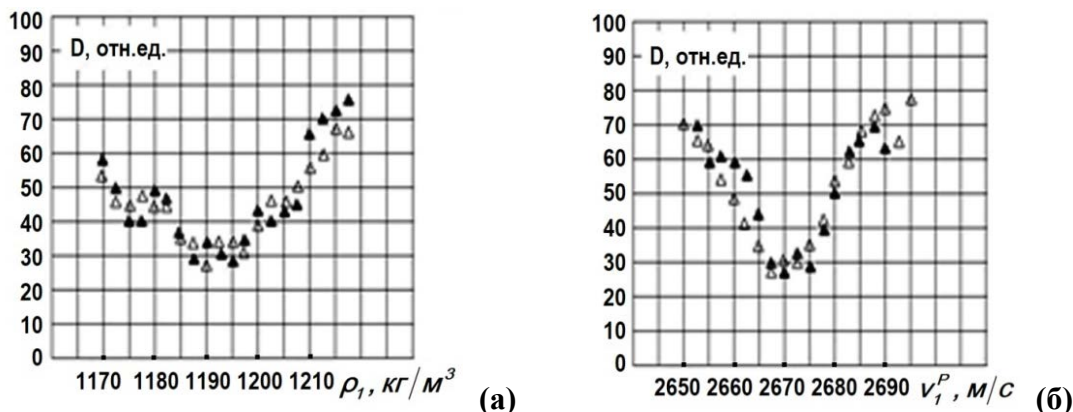


Рисунок 3.7 – Результаты реконструкции параметров донного слоя в условиях физического моделирования: (а) – зависимость величины целевой функции для выдвигаемых в качестве гипотезы значений плотности слоя плексигласа, (б) – зависимость величины целевой функции для проверяемых значений скорости продольной волны в слое плексигласа

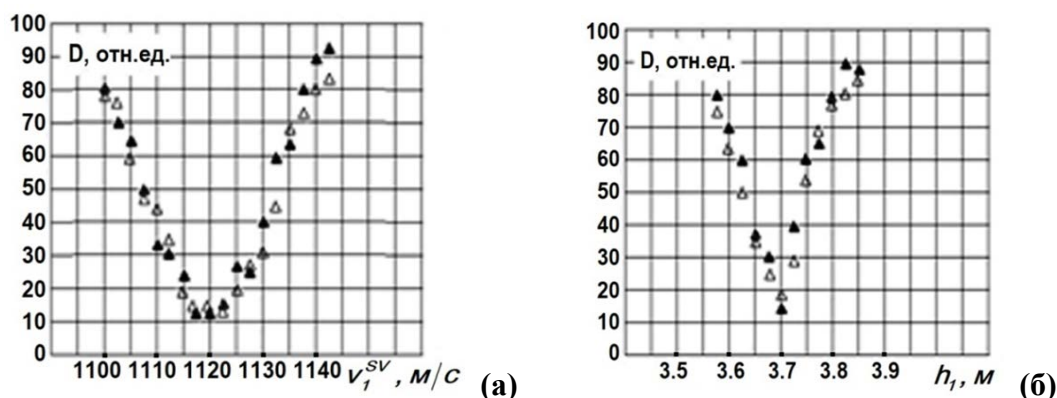


Рисунок 3.8 – Результаты реконструкции параметров донного слоя в условиях физического моделирования: (а) – зависимость величины целевой функции от скорости поперечной волны, (б) – зависимость величины целевой функции от толщины слоя плексигласа

На рис. 3.8 показаны результаты реконструкции скорости поперечной волны в слое оргстекла и его толщины. При этом полезный сигнал накапливался когерентно вдоль волновой компоненты, отраженной от нижней границы слоя оргстекла и наблюдаемой в интервале задержек несколько ниже 400 мкс. Как видно из структуры зависящей решающей статистики от проверяемых значений параметров, формируется более крутой минимум, а также значения D в экстремуме существенно меньше значений, которые наблюдались при оценке параметров по волне, отраженной от верхней границы оргстекла. Это объясняется более низким уровнем

реверберационных шумов, При оценках скорости поперечной волны в оргстекле и его и толщины, использовались значения плотности, которые были оценены с использованием измерений параметров продольной волны, отраженной от верхней границы оргстекла. Кроме того, отметим, что в качестве второго слоя в измерениях выступал слой воды, параметры которого были известны. Это позволило уточнить используемую при реконструкции модель слоистого дна.

Как указывалось выше, при рассмотренной геометрии измерений отраженная от верхней границы акустическая волна располагалась в плоскости {дистанция, задержка} вблизи водной волны, которая ее маскировала. Заметим, что при другой геометрии эксперимента, например, при измерениях на меньшей глубине, водная волна не будет создавать больших помех при измерениях. Полученные на первом этапе реконструкции, оценки плотности и скорости в плексигласе, а также толщины плексигласа, могут быть использованы для уточнения их значений при использовании результатов измерений характеристик продольной волны, отраженной от нижней границы плексигласа. При этом учитываются и априорные данные о водном слое. После оценок параметров слоя плексигласа, можно преступить к следующему этапу реконструкции, в рассматриваемом случае, реконструкции параметров нержавеющей стали. После получения оценок параметров нижнего слоя, можно вернуться к оценке параметров верхнего слоя с полученных значений параметров нижнего слоя. При этом оценки могут быть уточнены. Таким образом, осуществляется итерационный процесс оценивания параметров слоев (описанный в Главе 2). При реконструкции параметров донных слоев, используются оценки параметров вышележащих слоев. За счет этого, точность реконструкции с ростом глубины падает. Если исходно задать требуемую достоверность оценок, можно оценить предельную глубину, ограничивающую интервал, в пределах которого наблюдение, возможно. Этот интервал можно называть полем зрения системы наблюдения. При этом поле зрения будет зависеть от входного отношения сигналов к шуму, то есть, от мощности источника сейсмоакустической подсветки, неоднородности донного рельефа и свободной поверхности, поглощения в среде, а также аддитивных шумов.

Таким образом, в условиях физического моделирования исследовались возможности когерентного акустического зондирования морского дна. Было показано, что точность измерения сейсмоакустических сигналов в созданной экспериментальной установке в виде излучателя зондирующих импульсов и системы для измерения сигналов отраженных от набора упругих слоев в бассейне с водой, ограничивается в основном неоднородно распределенными реверберационными помехами, разброс которых по уровню достигал 10-15 дБ. Разработанные методы и средства для подавления шумов и помех, основанные на пространственно-частотном накоплении и временном стробировании, позволили достичь отношения полезных сигналов к

шумам и помехам на выходе системы обработки сигналов до 20-35 дБ. Разброс полученных значений обусловлен неоднородностью уровней сигналов от различных донных слоев, которые существенно ослабляются из-за затухания в донной структуре. Апробирован разработанный алгоритм реконструкции параметров донного слоя плексигласа, основанный на использовании параметрической модели формирования сигналов, отраженных от слоистого полупространства при когерентном зондировании морского дна.

Показано, что в конкретной установке для физического моделирования и при используемых алгоритмах точность реконструкции донного слоя плексигласа составила для плотности и скорости поперечной волны величину порядка 3-4%, а для скорости продольной волны и толщины плексигласа - порядка 2-3% (относительно значений параметров, взятых из справочника).

Показано, результатами измерений, что точность реконструкции может быть повышена, если дополнительно ослабить уровень реверберационных помех. Для этой цели следует покрыть стенки бассейна более толстым слоем поглощающей резины. Кроме того, необходимо ослабить уровень случайных неоднородностей границ донных слоев, например, путем шлифовки поверхностей плексигласа и стали. Для ослабления помех, связанных с отражениями от нижней стенки бассейна, необходимо модель донных слоев расположить на поглощающей резине. Кроме того, глубину положения излучателя и приемника необходимо выбрать так, чтобы отраженные от слоистого дна сигналы не маскировались водными компонентами и волнами, отраженными от поверхности водного слоя. Для более детального анализа точности реконструкции параметров донных слоев, следует исследовать статистическую структуру реверберационных помех в бассейне и, прежде всего, в интервале значений положений и задержек, в которых осуществляются измерения отраженных от дна сигналов.

3.2. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном сейсмопрофилировании в акватории Каспийского моря

Апробация метода когерентного акустического зондирования морского дна выполнялась совместно с ИО РАН в Каспийском море в пределах полигона в районе точки 43°27.1 N, 49°52.3 E. На рис. 3.9 (а) показаны место расположения измерительного полигона в Каспийском море со средними глубинами около 400 м и схемы построения измерительных галсов. Измерения проводились помощью НИС «Рифт». Измерения структуры сейсмоакустических сигналов осуществлялись с борта НИС с помощью буксируемой в горизонтальном положении на глубине 3.5 метра и расстоянии 100 метров от НИС сейсмокося из 25 гидрофонов, расположенных с шагом 1 метр. Отражаемые от дна и поверхности акустические сигналы записывались бортовой

приемной аппаратурой в цифровом виде. Измерения осуществлялись в режиме подводной буксировки излучателя и приемной решетки со скоростью 2.5 узла вдоль траекторий (галсов), показанных на рис. 3.9 (а). На каждом галсе менялись частотные интервалы излучаемых ЛЧМ импульсов в интервале от 150 до 750 Гц. В районе измерений при экспериментах имел место летний тип придонной гидрологии (рис. 3.9 б).

Буксируемый подводный излучающий комплекс состоял из закрепленного на гидроакустического самолете, работающего в частотном диапазоне 150-750 Гц когерентного гидроакустического излучателя. Излучатель буксировался на глубине 30 м так, чтобы его расстояние от поверхности морского дна составляло несколько длин волн на средней частоте излучения. Длина импульсов составляла величину от 0.1 до 0.5 сек. Мощность излучения была порядка 100÷300 Вт. При этом в условиях эксперимента, отношение полезного, отраженного от дна сигнала к шумам и помехам при измерениях составляло от 5 до -15 дБ. Период повторения излучаемых импульсов составлял 2 секунды. При измерениях наблюдаемых импульсных сигналов осуществлялась согласованная фильтрация и накопление импульсов. Скорость ветра при измерениях составляла 12.9 м/с, направление волнения и ветра 40° по отношению к направлению на север. Волнение составляло 3 балла. Облачность 60%, атмосферное давление 756 мм. ртут. ст. Температура воздуха 29.6° С и воды у поверхности была 26° С.

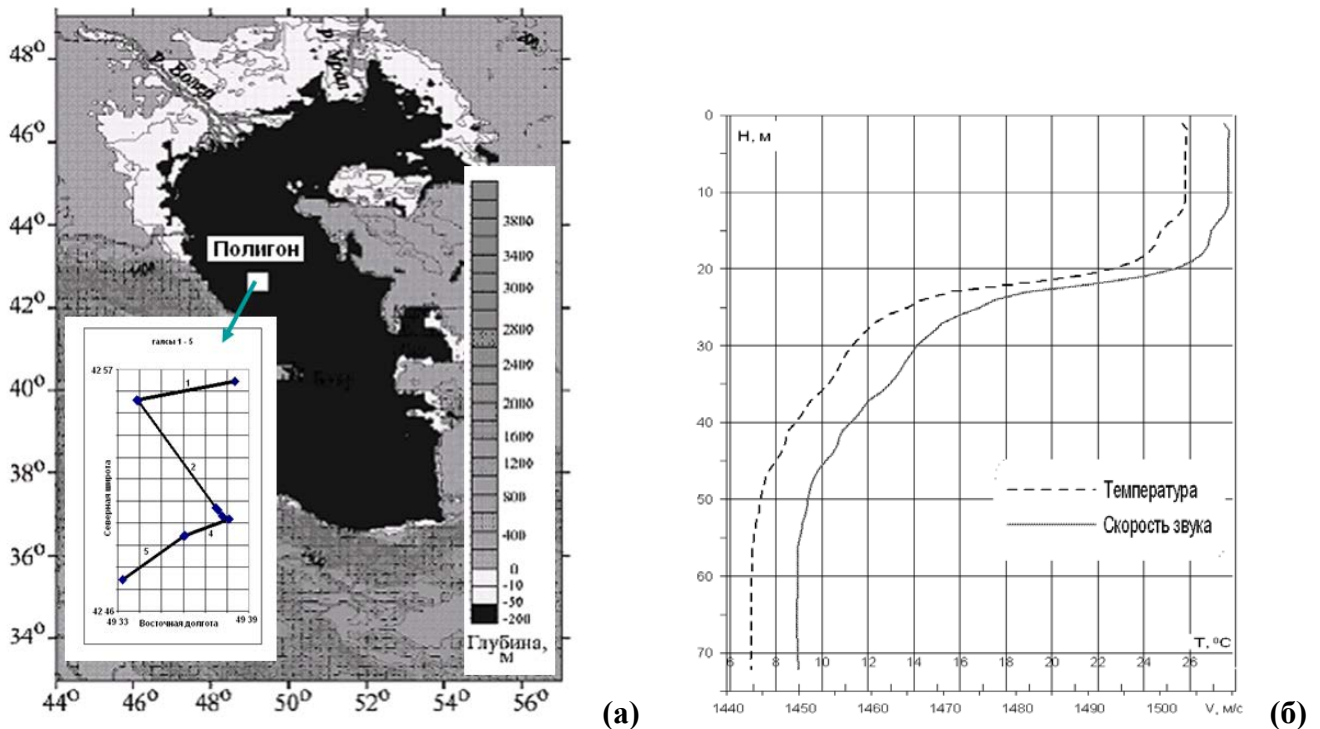


Рисунок 3.9 – Полигон измерений и структура галсов движения (а) и зависимость скорости звука и температуры от глубины (б) в районе проведения измерений (точка 41°59,3 N; 48°47,4 E) в Каспийском море

Буксируемый аппарат представлял собой подводный гидроакустический самолет, обеспечивающий устойчивое перемещение в набегающих потоках жидкости при его буксировке с помощью укрепленного на П-раме НИС кабель-троса. Условия буксировки определялись весом подводного аппарата, глубиной и скоростью его буксировки. Исходя из расчетов устойчивости движения тел в ламинарных потоках жидкости, оптимальная скорость буксировки составляла 2.5 – 3 узла, что и реализовалось при буксировке. При этом длина кабель-троса определялась весом излучающей системы, и глубиной и скоростью буксировки. При общем весе гидроакустического самолета с буксируемой аппаратурой до 400 кг и глубине буксировки порядка 50 – 150 м, при оптимальных значениях скорости буксировки длина используемого кабель-троса составляла 150-450 м. Конструкция носителя буксируемой подводной аппаратуры была снабжена системой стабилизации движения в ламинарных потоках жидкости. Кабель-трос закрепляется в различных точках несущей рамы гидроакустического самолета, что позволяет подобрать оптимальные условия подвеса для обеспечения минимальных колебаний источника при буксировке. Носитель (подводный гидроакустического самолет) был снабжен тремя стабилизаторами: вертикальным стабилизатором и цилиндрическим стабилизатором, обеспечивающим ламинарность потоков жидкости и рулем заглубления. Рабочие глубины при буксировке (50-150 м) обеспечивали стабильную работу излучателя без дополнительной компенсации гидростатического давления. Система питания излучателя и возбуждения акустических импульсов располагалась на борту НИС и включала в себя повышающий трансформатор и усилитель мощности CROWN CTs-2000 (поз.5 и 6 на рис. 3.10). Формирование сигналов управления обеспечивалось генератором сигналов ГЗ-110, (поз. 4). Сигналы с приемной решетки регистрировались, обрабатывались и архивировались в цифровом виде (поз. 8, 9, 10 на рис. 3.10).

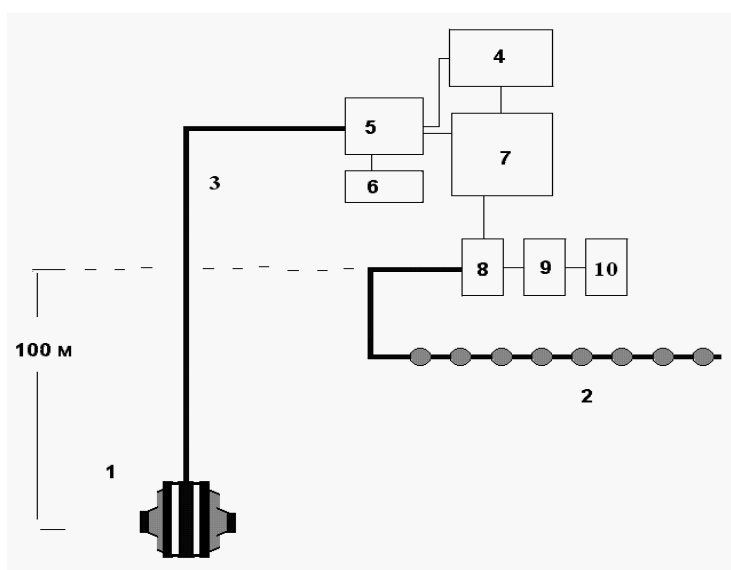


Рисунок 3.10 – Электронная система возбуждения и приема акустических импульсов (1- акустический излучатель, 2 - приемная решетка, 3 – кабель-трос, 4 генератор ГЗ-110; 5 - трансформатор повышающий, 6 - усилитель мощности CROWN CTs-2000; 7 – блок синхронизации; 8 - АЦП; 9 – система обработки, 10 - система архивации)

3.2.1 Структура сигналов, шумов и реверберационных помех при зондировании дна когерентным источником

Сейсмоакустические сигналы, отраженные дном принимались горизонтально буксируемой решеткой гидрофонов. Все сигналы гидрофонов суммировались без дополнительных задержек, так, что обеспечивалась направленность диаграммы решетки вертикально вниз. При регистрации акустических сигналов тактовая частота составляла 4 кГц. Подводный гидроакустический самолет с когерентным гидроакустическим излучателем буксировался на глубине 30 м в полигоне с глубинами места, меняющимися в интервале 200÷600 м. При зондировании возбуждались ЛЧМ импульсы в различных частотных интервалах. Длина импульсов равнялась 0.12 секунд. Синхронизация запуска регистратора сейсмокоды осуществлялась от импульса, излучаемого источником акустических сигналов.

Структура сигналов и шумов при зондировании дна. Используемый в экспериментах акустический излучатель, позволял эффективно возбуждать зондирующие акустические импульсы в интервале частот от 100 до 900 Гц. В частности, в интервале частот вблизи 295 Гц, при глубине погружения 10 метров акустический излучатель позволял возбуждать сигналы с акустической мощностью до 300 Вт при напряжении возбуждения до 1500 Вольт. Кроме того, используемый акустический излучатель имел несколько частотных интервалов, в которых излучаемые акустические импульсы имели достаточно высокий уровень, в частности, в интервале частот 400-600 Гц, а также 650-750 Гц (рис. 3.11 а). Оценки длины когерентности излучаемых колебаний на заданной частоте осуществлялась в стационарных условиях, когда излучатель и приемный гидрофон были неподвижны. Как показали измерения, добротность излучаемого сигнала оказалась равной величине порядка 10^{-5} .

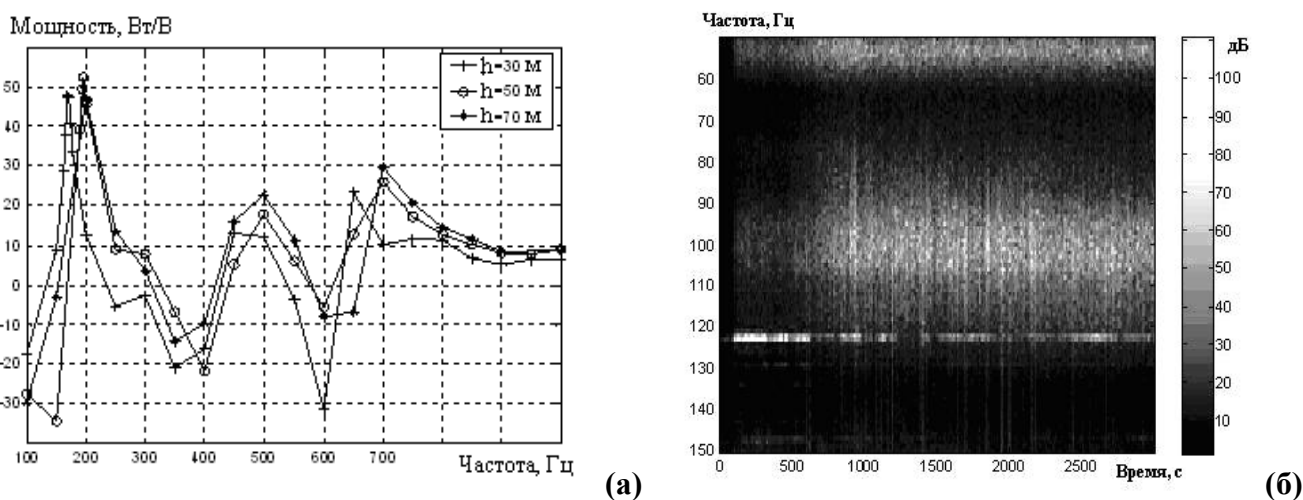


Рисунок 3.11 – Частотная зависимость мощности акустического излучателя (а), динамический спектр шумов НИС (б)

Структура шумов и помех судна-буксировщика. Подводный гидроакустический самолет с когерентным ГА излучателем буксировался на глубине 30 м в полигоне с глубинами места, меняющимися в интервале 200÷600 м. При зондировании возбуждались ЛЧМ импульсы в различных частотных интервалах. Длина импульсов равнялась 0.12 секунд. Как уже упоминалось, при мощности излучения порядка 100÷300 Вт в различных частотных диапазонах, отношение полезных, отраженных от дна сигналов к шуму составляло от 5 до -15 дБ. Поскольку приемная решетка буксировалась достаточно близко от НИС, основными помехами при измерениях оказались шумы НИС - буксировщика. Другим источником шумов являлись шумы обтекания. На рис. 3.11 (б) показан динамический спектр наблюдавшегося при буксировке шума, в диапазоне 50÷150 Гц и усредненные на интервале стационарности спектры в том же диапазоне. Уровень таких помех может на два ÷ три порядка (в зависимости от частотного диапазона) превышать шумы океана. При проведении сейсмоакустического зондирования дна для ослабления такого рода помех принимаются специальные меры, в частности, используются НИС - буксировщики с пониженными уровнями шумов. Кроме этого, приемные решетки располагаются на большом удалении от буксировщика.

В рассматриваемом эксперименте также оказалось возможным понизить уровни акустических помех (кривая 2 на рис. 3.12 а) оптимизацией режимов работы механизмов НИС при буксировке. Шумы представляют собою набор компонент, имеющих различную природу. Каждая из шумовых компонент локализуется в своем частотном интервале и имеет присущие ей временные закономерности. Различными для каждой шумовой компоненты оказываются и их когерентность и статистическая структура. На рис. 3.12 (б) показаны статистические распределения шумовых компонент, локализованных в различных спектральных интервалах (такие интервалы обозначены на рис. 3.12 (а) буквами А, Б, В, Г). Распределения получены при одинаковых размерах статистических ансамблей, равных $3 \cdot 10^5$ независимых отсчетов, при нормировке на стандарт.

Из представленных данных видно, что статистическое распределение некоторых из шумовых компонент (например, компонента Б, в частотном интервале от 80 до 120 Гц) близко к нормальному (гауссовское распределение на рис. 3.7.2 показано сплошной линией). Вместе с тем, распределение шумовой компоненты В, в частотном интервале от 40 до 60 Гц имеет двухмодальную структуру, одна из которых, более энергонасыщенная узкополосная компонента, имеет распределение, близкое к распределению χ^2 . Такого рода помеха имеет распределение с «тяжелыми крыльями» (рис. 3.12 б), что ведет к ужесточению требований при оценке глубины слоя с заданной достоверностью. Из приведенных данных следует, что при использовании зондирующих сейсмоакустических сигналов в различных частотных диапазонах оценка положения слоев может быть более достоверной, при использовании решающих

статистик, оптимизированных к статистическим распределениям соответствующих шумовых компонент. В частности, в качестве таких статистик могут быть использованы L_p -нормы со значениями параметра p равным двойке для шумов типа А, и равным единице для шумовых помех в интервале частот, обозначенных буквой В. При реконструкции мало контрастных слоев, а также слоев, расположенных на достаточно больших глубинах, сигнал от которых слаб, эффективным методом оценки глубины слоя является использование решающих статистик на основе нейроноподобной свертки. Использование такого рода решающих статистик позволяет обеспечить заданную достоверность оценок глубины слоя, при наблюдении сигналов, уровень которых на 5-10 дБ меньше уровня, который требуется при той же достоверности, но при использовании классической согласованной фильтрации (корреляционного метода).

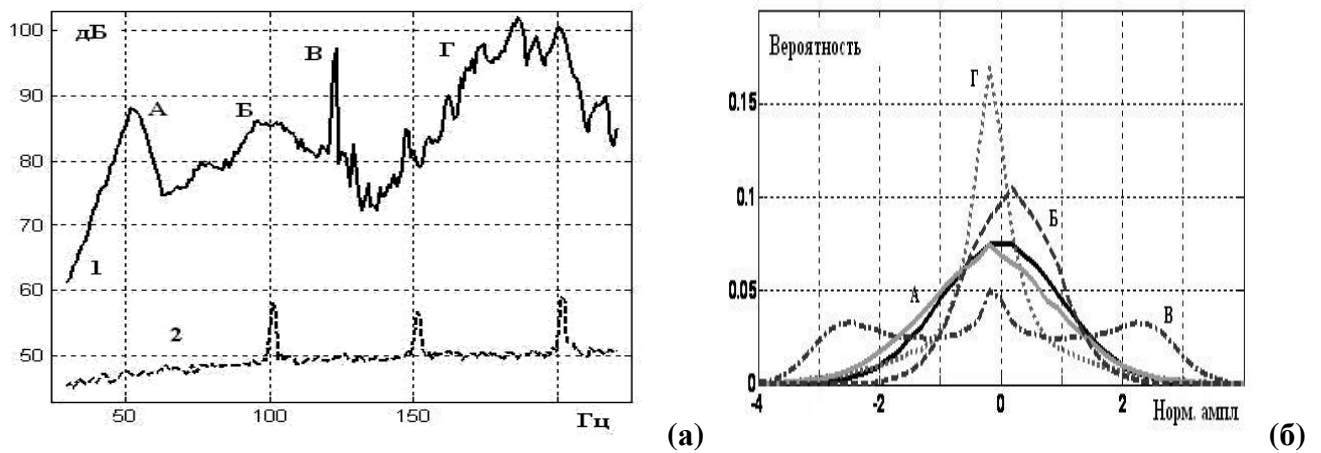
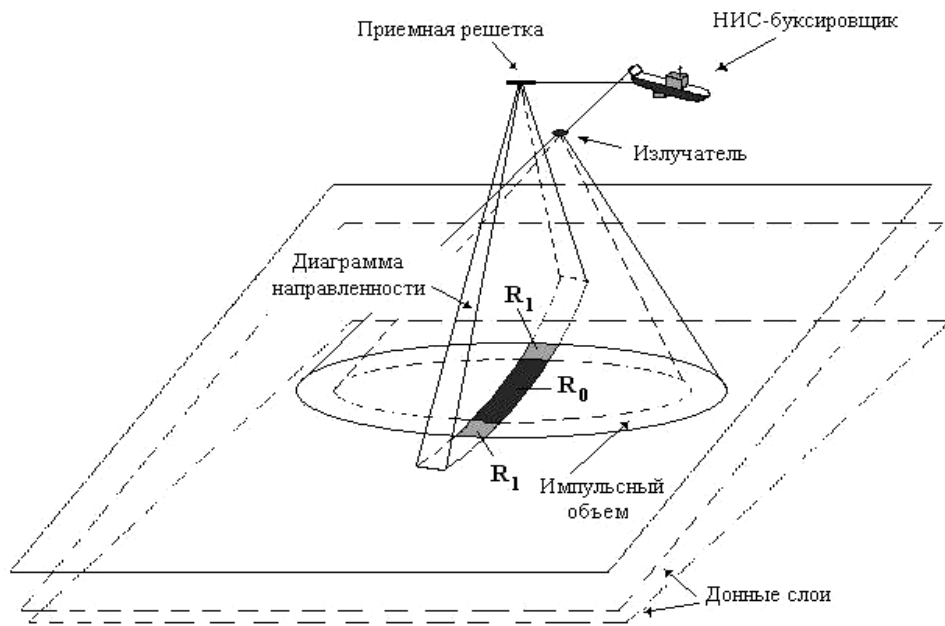


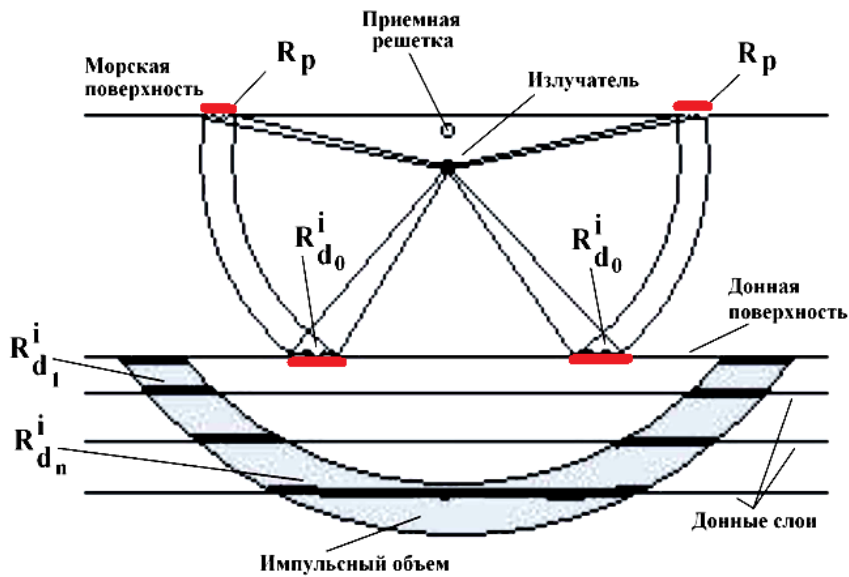
Рисунок 3.12 – Частотная характеристика (а) и статистическое распределение (б) шумов НИС – буксировщика.

Структура реверберационных помех при акустическом профилировании. Кроме шумов буксировщика, существенной помехой при акустическом зондировании дна является реверберация, формирующаяся при рассеянии зондирующих импульсов на случайных неоднородностях среды, и, в первую очередь, донной поверхности. Реверберационные помехи формируются в широком интервале задержек в областях донной поверхности, представляющих собою площадки пересечения импульсных объемов и диаграммы направленности приемной решетки (области R_0 , R_1 и т.д. на рис. 3.13 а). В области малых задержек (0.1 - 0.2 с) реверберация формируется за счет ветрового волнения при отражении акустических импульсов от поверхности океана. Уровень таких реверберационных помех существенно меньше корреляционных помех прямого сигнала, что является следствием, в том числе, того, что приемная решетка располагается вблизи поверхности и рассеяние от поверхностных неоднородностей происходит под малыми углами. В интервале больших значений задержек

реверберационные помехи формируются, в основном, за счет рассеяния на случайных неоднородностях дна. Начиная с интервала задержек 0.5 секунд, формируются интенсивная донная реверберация, которая, спадая по уровню, перекрывает широкий интервал задержек, вплоть до полутора и более секунд. Суммарный сигнал донной реверберации содержит в себе сигналы, рассеянные как случайными неоднородностями донной поверхностью (области R_p на рис. 3.13 б), так и совокупностью объемных случайно распределенных неоднородностей донных слоев (области, закрашенные серым цветом) и случайными неоднородностями границ донных слоев (области R_d на границах донных слоев рис. 3.13 б).



(a)



(б)

Рисунок 3.13 – Формирование донной реверберации при акустическом зондировании морского дна (а) и структура импульсного объема с номером i в плоскости диаграммы направленности приемной решетки и области формирования реверберации (б)

Объектом акустического зондирования при профилировании являются горизонтальные вариации глубин, на которых располагаются границы донных слоев в интервале задержек от 0.5 секунд и далее. Уровень «полезных» сигналов, соответствующих отражению от таких границ, спадает за счет затухания и, начиная со значений задержек $0.5 \div 1$ секунд, становится слабым и практически полностью маскируется шумами НИС-буксировщика. Эффективность реконструкции глубин расположения донных слоев определяется оптимизацией решающих статистик и критериев принятия решений в зависимости от характеристик аддитивных шумов и реверберационных помех. В этой связи актуальной научной задачей является исследование источников и характеристик таких шумов и помех, а также построение моделей формирования полезных сигналов, основанных на исследовании структуры донных слоев.

Как показывает анализ результатов экспериментов, отраженные как от донной поверхности, так и от границ донных слоев сигналы имеют сложную неоднородную структуру. Данные наблюдений демонстрирует то обстоятельство, что такого рода границы являются, в общем случае, для каждого акта зондирования (одного импульса) объектами, однозначно локализованными по глубине. Однако они часто имеют протяженность по глубине, а также существенную изрезанность и изменчивость по трассе наблюдения. Иллюстрацией является изображение донной поверхности, соответствующее отраженному сигналу с выхода согласованного фильтра для интервала задержек $0.25 \div 0.3$ сек (рис. 3.7.4).

Структура отраженного от донной поверхности сигнала получена при усреднении по 10 (рис. 3.14 б) и 100 (рис. 3.14 в) зондирующим импульсам. Область больших задержек соответствует откликам от границ донных слоев, расположенных на небольшой глубине под донной поверхностью. Для интерпретации структуры откликов, наблюдаемых в интервале малых значений задержек на рис. 3.14, необходимо учитывать то обстоятельство, что излучаемые импульсы возбуждались с периодом, равным 1.4 секунды. Для обеспечения оптимального квантования измеряемых сигналов при акустическом зондировании осуществлялось временное стробирование, при котором включение приемной системы осуществлялось с момента, соответствующего значению задержек равному 0.4 секунд. При этом большие по величине сигналы прямой засветки и сигнал, отраженный от морской поверхности, не регистрировались. Интервал задержек, в котором осуществлялось наблюдение полезных сигналов, рассеянных от границ донных слоев, в условиях эксперимента, был равен 1 секунде. Таким образом, после включения регистрации рассеянных компонент очередного импульса, в интервал задержек протяженностью 0.1 секунды, попадали сигналы, рассеянные границами лежащими на глубинах порядка 0.8-1.2 км. Кроме того, туда же попадали импульсы, рассеянные совокупностью случайных неоднородностей в соответствующем импульсном объеме (объем, закрашенный серым цветом, на рис. 3.13 а), а также рассеянные на случайных

неоднородностях верхней границы дна, в пределах проекции импульсного объема, удаленного на дистанциях порядка 400-500 м от источника (Rd_i). Оценки показывают, что с учетом сложности многослойного строения дна и затухания в нем, реверберация от донной поверхности в указанном интервале задержек на 1-2 порядка превосходит по величине остальные компоненты регистрируемого сигнала. Таким образом, практически их можно считать сигналами поверхностной донной реверберации.

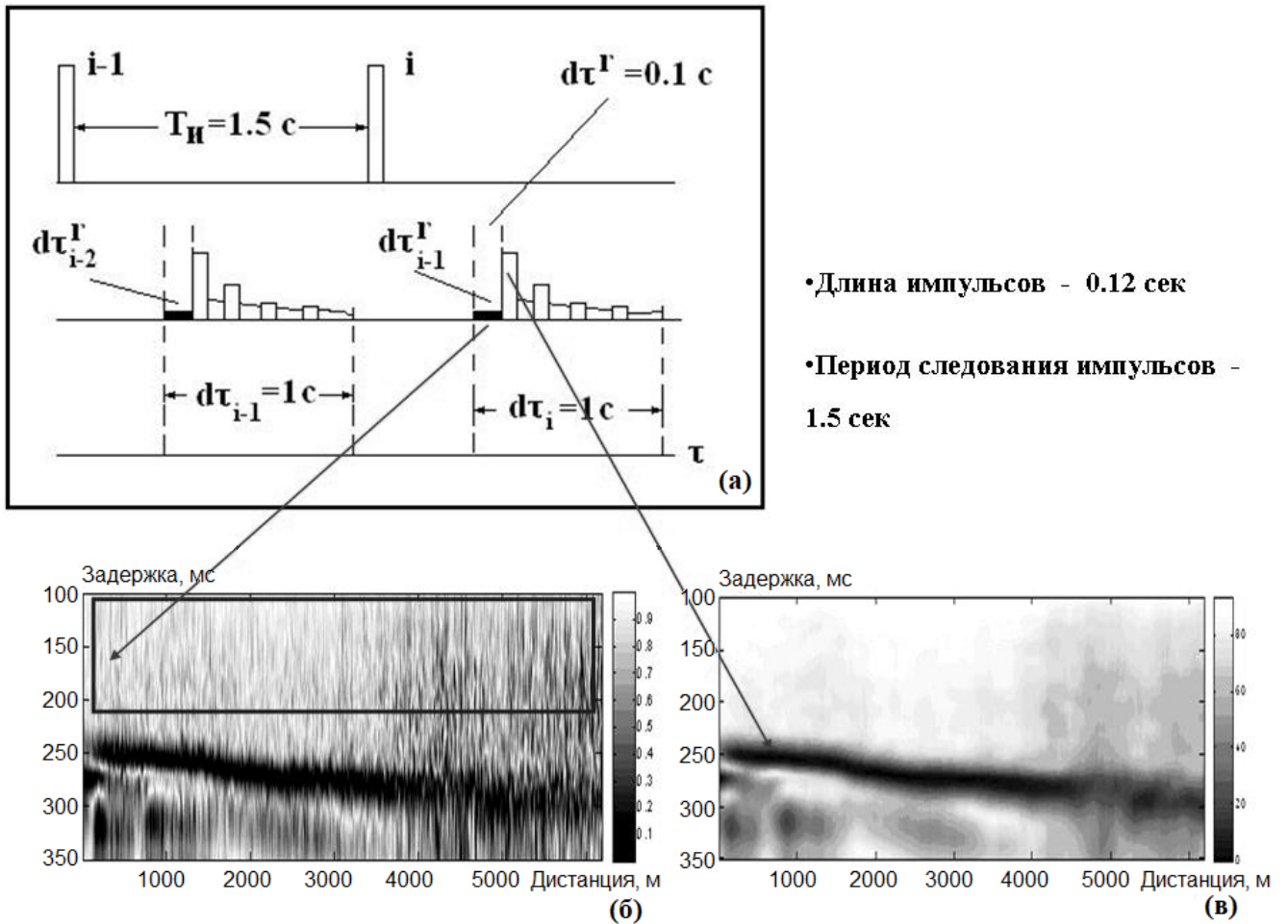


Рисунок 3.14 – Структура реверберационных помех и сигнала, отраженного от донной поверхности с выхода согласованного фильтра при усреднении по 10 (б) и 100 (в) импульсам

Как видно из результатов обработки экспериментальных данных (рис. 3.14), вдоль трассы буксировки (галс №2) длиной 6 км, глубина донной поверхности увеличилась на величину порядка 70-80 м. Кроме того, начиная с дистанций от 3.5 до 6 км, поверхность дна выглядела существенно размытой, а уровень поверхностной реверберации значительно возрос. На рассматриваемом участке трассы (рис. 3.14) наблюдались вертикальные структуры, которые можно рассматривать как каналы вертикальной миграции углеводородных газов и флюидов. Эти каналы иногда называемые «газовыми трубами», создают акустические неоднородности

дна и толщи осадков как за счет их деформации, так и за счет газонасыщенности. Это, в частности, проявилось и в заметном возрастании уровня поверхностной донной реверберации, поскольку в районе формирования газовых труб часть наблюдается существенная изрезанность поверхности морского дна.

Отмеченное в экспериментах разделение за счет пространственной и частотной фильтрации и временного стробирования различных волновых компонент позволило провести сравнительный анализ статистических характеристик полезных, отраженных от донных границ откликов, откликов поверхностной реверберации, а также аддитивных шумов. На рис. 3.15, в частности, представлены коэффициенты корреляции в плоскости {задержка-дистанция} для компонент отклика согласованного фильтра, анализ которых показывает, что в начале трассы акустического профилирования, пространственный радиус когерентности превышает 3 км, в то время, как когерентность сигнала в конце трассы уменьшилась. Это, по-видимому, связано с нестационарностью (наклоном) донной поверхности.

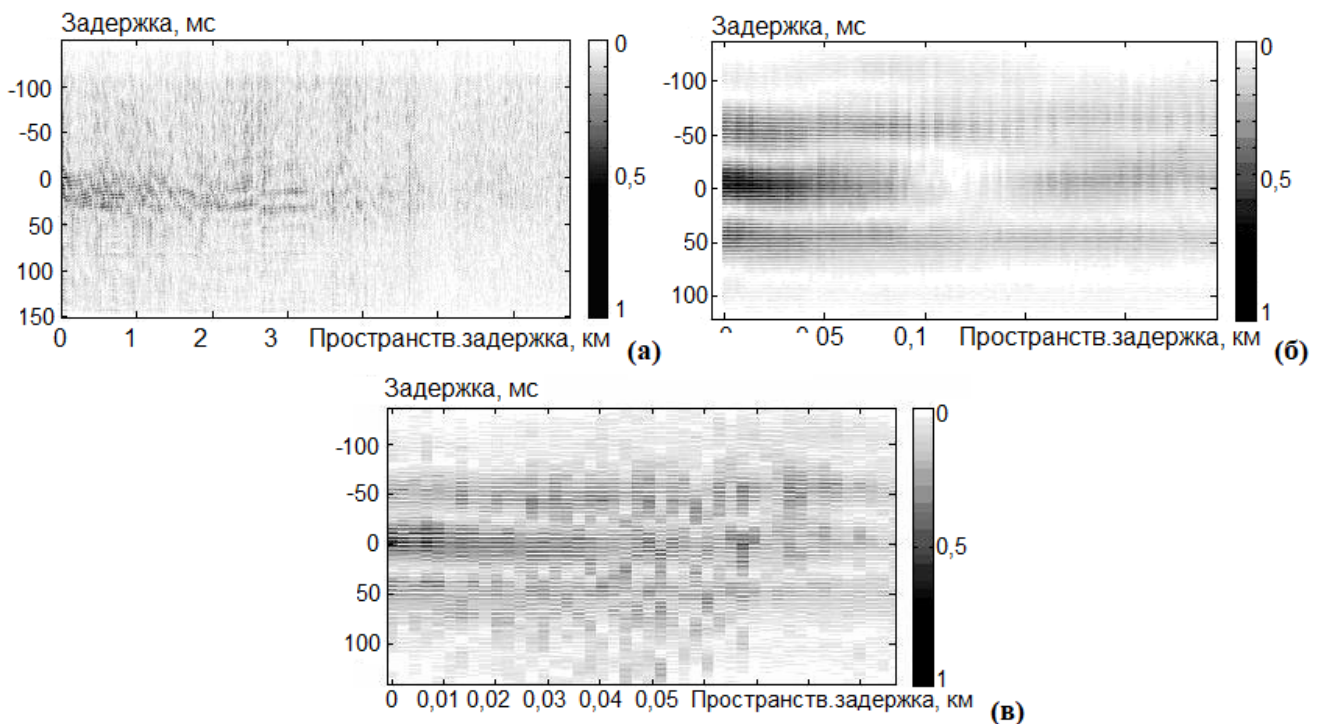


Рисунок 3.15 – Корреляционные функции реверберационной помехи (а), отраженного от донной поверхности сигнала (б) и аддитивного шума (в) в полосе частот от 150 до 250 Гц

Если измерять когерентность с учетом наклона донной поверхности, когерентность составляет 300-400 м. Вместе с тем, масштаб когерентности зависит от точки измерения, что связано с горизонтальной изменчивости донной поверхности. Так, в области газовой трубы, радиус когерентности заметно падает. Пространственный радиус корреляция шумов НИС

«Рифт», измеренный в тех же условиях оказался равным величине порядка 10 метров. Когерентность отраженных от донных слоев акустических импульсов определяется суммарным эффектом рассеяния, как от объемных неоднородностей донных слоев, так и от неровностей всех пересекаемых зондирующим акустическим сигналом границ. Как показывают оценки, когерентность таких акустических компонент ориентировочно составляет 100-150 метров.

3.2.2. Сейсмическое профилирование донных слоев при использовании когерентного межимпульсного накопления

Структура принимаемых сигналов без корреляционной обработки (рис. 3.8.2) определяется изменчивостью рельефа и строения дна вдоль трассы протяжки (прямые сигналы и сигналы, отраженные от свободной поверхности были отфильтрованы при записи путем отключения приемной системы на малых интервалах задержек сигнала). В рабочем интервале частот сигнал превышал уровень помех на 15-20 дБ. Корреляционная обработка принятых сейсмоакустических импульсов, заключающаяся в выполнении функции свертки принятых импульсов с репликой, позволило локализовать форму рельефа дна, а также положение и конфигурацию донных слоев. На рис. 3.16 показана динамическая сейсмограмма, полученная после фильтрации сигнала в полосе 150-250 Гц для первого галса. Сплошной линией на рисунке выделено первое вступление отраженных импульсов, соответствующих отражению от поверхности дна. Полученные данные сравнивались с батиметрией вдоль трассы протяжки, что позволило устранить искажения, связанные с вариациями положения излучателя при буксировке, а также искажения связанные с системой регистрации.

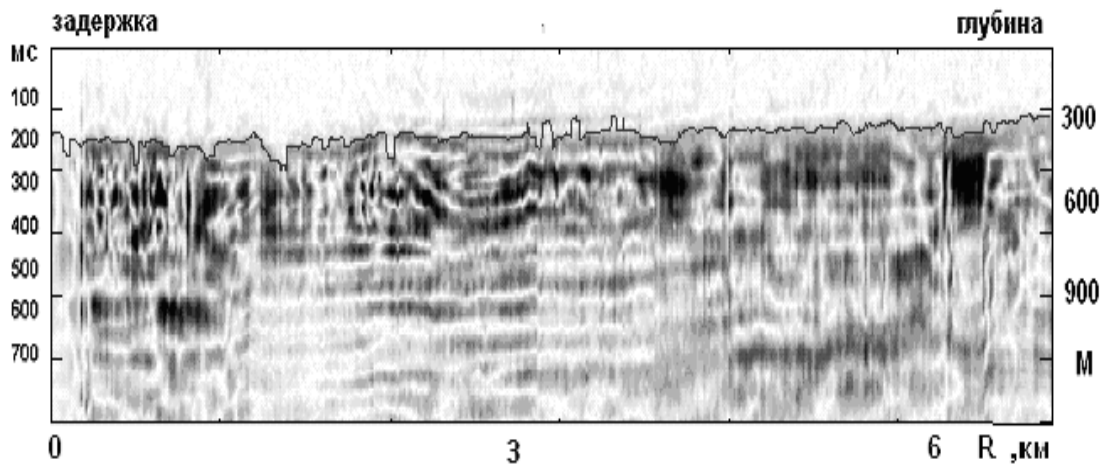


Рисунок 3.16 – Динамическая сейсмограмма в полосе частот 150 – 250 Гц для первого галса

Замеры сигналов на втором галсе (рис. 3.17) производились при большей скорости буксировки излучателя и решетки приемной гидрофонов. Из данных полученных при измерениях во время второго галса видно, что помехи увеличились на 6 дБ по сравнению с первым галсом, что может объясняться увеличением шума НИС, а также шумом обтекания, возникающих при буксировке приемной решетки. Аналогичные измерения, осуществлялись в полосе частот 450 – 550 и 700 – 800 Гц для галса 3. При измерениях на высоких частотах 450-550 Гц и выше, можно отметить, что в силу относительно малых уровней излучения, помехи НИС при буксировке, оказались сравнимыми с уровнем полезного сигнала, что затруднило интерпретацию наблюдаемых результатов. При экспериментах, были, также выполнены измерения и построение корреляционных зависимостей принимаемых сигналов в полосе частот 450 – 550 Гц, а также, на четвертом галсе, при частотах излучения в полосе 700-800 Гц. На рис. 3.17 показаны структуры донных слоев в районе измерений при движении вдоль галсов №1 - №5 (рис.3.9 а). Сейсмограммы получены при условии изменения частотных интервалов зондирующих акустических импульсов. Как видно из полученных распределений более высокие частоты проникают в дно на меньшую глубину, однако разрешение слоев на них несколько лучше.

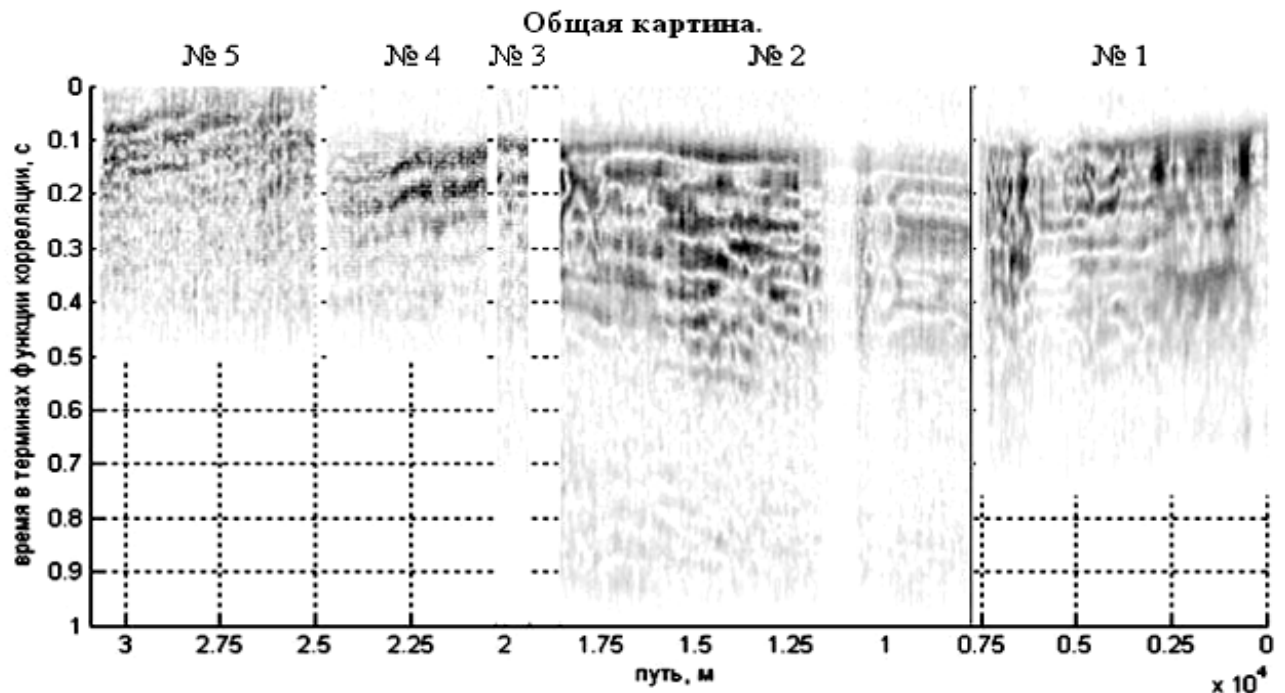


Рисунок 3.17 – Изображение структуры донных слоев в районе измерений при движении вдоль галсов №1 - №5 (рис.3.9 а) при условии изменения частотных интервалов зондирующих акустических импульсов (№1 и №2 – 150-250 Гц, №3 и №4 – 450-550 Гц и №5 – 700-800 Гц)

Как следует из анализа сейсмограмм, полученных при акустическом зондировании импульсами с различными частотами, полезные сигналы, отраженные от донных слоев и

несущие информацию о глубинных слоях в изображении структуры морского дна, быстро ослабевают. Такое затухание нарастает и с увеличением частоты. В частности, исходя из экспериментальных данных, в низкочастотном диапазоне (150-250 Гц) приемлемый уровень наблюдаемых акустических сигналов формируется вплоть до значений задержек 0.5-0.7 мсек. С ростом частоты зондирующих акустических импульсов этот диапазон уменьшается, и например, для частотного интервала 700-800 Гц, составляет уже 10-150 мсек.

Исходя из априорной информации о строении морского дна, будем полагать, что для верхних слоев морского дна средняя, в пределах полигона, скорость объемных акустических волн равна ориентировочно 2000 м/сек. При этом можно получить оценку глубин для которых, в условиях эксперимента, наблюдение донных слоев возможно. При таких допущениях, для частотного интервала 150-260 Гц, возможно наблюдение донных слоев вплоть до глубин 500 метров. При зондировании акустическими импульсами в частотном диапазоне 700-800 Гц такой интервал глубин составляет уже только 100-200 метров. Как показывают теоретические расчеты, акустические сигналы достаточно быстро ослабляются из-за потерь при преломлении и отражении на границах донных слоев, а также из-за затухания. Для реконструкции структуры морского дна на достаточно больших глубинах необходимо, чтобы измерения были достоверными, то есть, сигналы должны в достаточной мере превосходить по уровню шумы. Обычно для отраженных от относительно неглубоко залегающих границ слоев это условие выполняется. Однако по мере заглубления наблюдаемых донных слоев, это условие нарушается. Граница возможного наблюдения (поле зрения при построении изображения морского дна) зависит, прежде всего, от двух факторов: от мощности используемого акустического источника и от уровня шумов. В существующих и используемых в практике системах акустического профилирования с использованием источников взрывного типа обычно применяют различные приемы, позволяющие увеличить глубину реконструкции донных слоев. Для этого, во-первых, наращивают мощность акустических источников, и, во-вторых, используют малозумные НИС - буксировщики и буксируют приемные решетки на большом (до километра и более) расстоянии от буксира. Оба метода достаточно сложны в технической реализации и приводят к усложнению и утяжелению системы. Кроме того, при решении ряда задач, например, при проведении инженерных морских работ повышение мощности акустических источников не желательно. Кроме того, существуют и экологические ограничения. Как уже отмечалось, одним из перспективных методов, позволяющих преодолеть указанные трудности акустического зондирования морского дна, является использование относительно маломощных высококогерентных сложно модулированных зондирующих акустических источников. В пределах масштабов когерентности, такие сигналы могут достаточно эффективно накапливаться, что позволяет удовлетворить требованиям

экологической чистоты метода. Такой метод основан на усложнении алгоритмов обработки акустических сигналов. Его чувствительность и точность определяются когерентностью отраженных от морского дна акустических импульсов.

Когерентность акустических сигналов зависит от многих факторов. Прежде всего, к таким факторам относится когерентность акустического самого акустического излучателя. Используемый в экспериментах акустический излучатель имел высокую когерентность, определяющуюся при гармоническом возбуждении излучателя лишь флуктуациями напряжения питания, а также тепловыми флуктуациями в пьезокерамическом двигателе. Другим источником случайных изменений параметров акустических сигналов является пространственные вариации акустического источника при буксировке, возникающие за счет ветрового волнения и изменчивости скорости буксировки. Наконец, когерентность акустических сигналов разрушается и за счет рассеяния на случайных неровностях границ и толщи донных слоев. Одним из проявлений такого рассеяния является реверберационная помеха. В рамках настоящего исследования оценим когерентность акустических сигналов на основе анализа экспериментальных данных.

Оценка когерентности сейсмоакустических сигналов отраженных от морского дна в различных интервалах частот. Один из способов оценки когерентности отраженных от морского дна акустических сигналов заключается в измерении масштабов когерентного частотного, временного и пространственного накопления. При когерентном накоплении уровень акустического сигнала растет линейно с увеличением масштаба накопления. После разрушения когерентности накопление сигнала становится некогерентным. При этом отношение сигнала к шуму уже не растет, что является критерием при оценке масштабов когерентности акустических сигналов. Указанный метод был использован для оценки масштабов когерентности акустических импульсов при сейсмоакустическом зондировании дна в акватории Каспийского моря. Как показывают измерения, когерентность излучения акустического источника в морских условиях при его постановке с НИС в дрейфе составляет значения $\sim 10^4 - 10^5$ сек в зависимости от рабочей частоты. При работе излучателя в режиме буксировки его когерентность оценивается величиной $\sim 10^2 - 10^3$ сек, что связано с флуктуациями излучателя и случайными вариациями формы и глубины погружения приемной решетки. Величина наблюдаемой в экспериментах когерентности достаточна для реализации потенциальных преимуществ когерентного подхода к решению задач донной сейсморазведки.

Когерентность в частотной области. Для экспериментальной оценки когерентности зондирующих ЛЧМ импульсов, отраженных от морского дна, осуществлялась их согласованная фильтрация в различных частотных интервалах, а также когерентное накопление последовательности таких импульсов в режиме совместной буксировки излучателя и приемной

решетки в пределах измерительного полигона. Как показали проведенные измерения, когерентное сжатие зондирующих сейсмоакустических ЛЧМ импульсов могло быть реализовано во всех частотных диапазонах в пределах полной рабочей полосы 100 – 1000 Гц. В результате когерентное частотное накопление зондирующих импульсов (при свертке с опорным сигналом) позволило увеличить отношение сигнал/помеха на 15 – 20 дБ.

Пространственная когерентность акустических импульсов. Как уже указывалось, прием акустических импульсов осуществлялся с помощью горизонтально ориентированной решетки приемников 25 гидрофонов длиной 25 метров. Все сигналы с отдельных гидрофонов складывались когерентно. Время прихода импульсов определяется ($\tau - r$) диаграммой, учитывающей задержки, возникающие при распространении акустических импульсов в донных слоях. В рассматриваемом случае длина решетки не велика и она расположена достаточно далеко от дна (порядка 300-400 метров), так, что наклон и изгиб фронтов прихода импульсов слабо проявляется в пределах приемной решетки. В таких условиях можно полагать, что все импульсы приходят с направления, нормального приемной решетки отличаясь лишь временами прихода. При этом оправдано реализованное при экспериментах накопление в виде синфазного сложения всех сигналов. Расстояния между соседними гидрофонами в решетке составляло 1 метр, что для низкочастотного диапазона зондирования (порядка 200 Гц) составляет одну треть длины волны. Для частоты 600 Гц, волновое расстояние между гидрофонами составляет величину порядка длины волны. Если предположить, что радиус пространственной когерентности шума составляет половину длины волны, можно ожидать накопление полезных акустических сигналов на 3-5 дБ.

Эффективность когерентного накопления серии зондирующих импульсов. Поскольку наблюдаемые при акустических профилировании донные слои, чаще всего характеризуются горизонтальной однородностью, эффективным методом может быть накопление большого числа отраженных от донных границ импульсов во времени, которое может быть выполнено с учетом априорной информации о масштабах горизонтальной изменчивости. При скоростях буксировки порядка (1.5 – 2) м/сек и, периодах зондирования в пределах (3-5) сек, смещение системы акустического наблюдения достигает значений (5-10) метров. Поскольку, масштабы горизонтальной изменчивости донных слоев может составлять несколько сотен метров, можно когерентно накопить, по крайней мере, несколько десятков импульсов, не искажая изображение донных структур. Это может заметно увеличить отношение сигнала к шуму, что важно при необходимости наблюдения глубоко залегающих донных слоев. Эффективность такого рода межимпульсного накопления акустических сигналов определяется когерентностью импульсов между собой, и зависит от многих факторов, в частности, случайных вариаций положения элементов акустической системы при буксировке, случайных неоднородностей водной толщи,

случайных неоднородностей границ донных слоев и т.д. В рамках рассматриваемых экспериментов в Каспийском море, были выполнены измерения когерентности последовательности акустических импульсов. На рис. 3.18 представлен пример формирования изображения донных слоев при когерентном накоплении пяти ЛЧМ импульсов в полосе модуляции 700 – 800 Гц после их согласованной фильтрации для галса 1 с координатами: начало 42° 50' N; 49° 38' E; конец 42° 49' N; 49° 36' E. Отношение уровней полезных сигналов к суммарному уровню помех (определяемое уровнем акустической мощности источника и уровнем шумоизлучения НИС в указанном диапазоне), составляло –5 – 0 дБ. Построение подобного рода сейсмограмм было проведено и в других частотных диапазонах. В частности, на рис. 3.19 показано изображение донных слоев при излучении последовательности ЛЧМ импульсов в частотном диапазоне 150 – 250 Гц при условии когерентного накопления такого же числа импульсов.

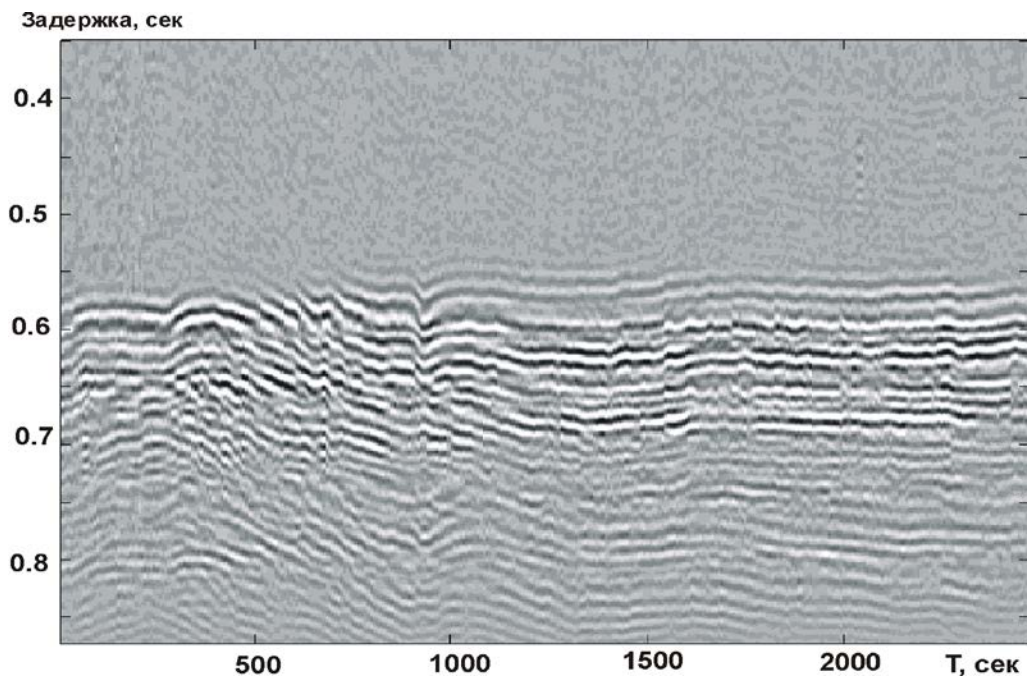


Рисунок 3.18 – Формирование изображения донных слоев при когерентном накоплении 5-ти ЛЧМ-импульсов в полосе модуляции 700 – 800 Гц после их согласованной фильтрации для галса 1

Из сравнения приведенных изображений видно, что использование относительно высокочастотных импульсов позволило получить более высокое (~20 – 30 м) разрешение. Однако даже с учетом межимпульсного накопления реконструкция донных слоев становятся возможными лишь до глубин не более ~200 м. При использовании более низких частот, наблюдалось уменьшение разрешающей способности до ~30 – 50 м, однако глубина зондирования, в том числе и за счет накопления нескольких десятков импульсов, достигала ~ 1

км. Как показывают измерения, при увеличении числа накапливаемых акустических импульсов от 5 до 32, уровень полезного сигнала растет пропорционально числу суммируемых импульсов, что указывает на высокую когерентность импульсов между собой. Однако дальнейшее накопление становится не эффективным из-за того, что импульсы смещаются по оси задержек. Это, по-видимому, связано с горизонтальными вариациями границ донных слоев.

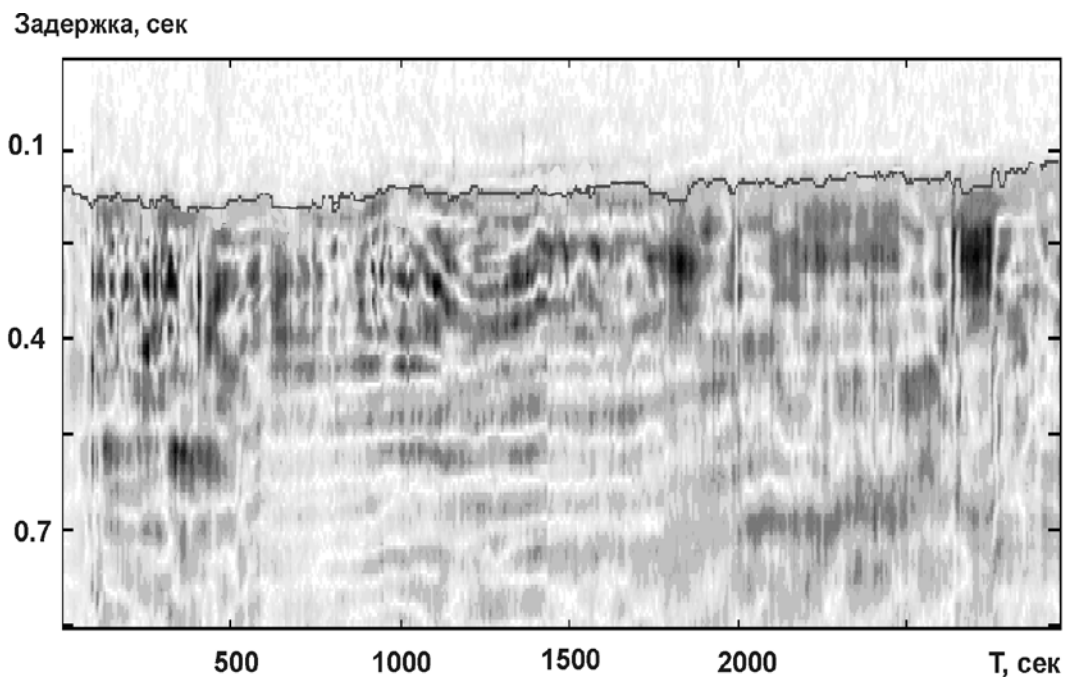


Рисунок 3.19 – Формирование изображения донных слоев при излучении последовательности ЛЧМ-импульсов в частотном диапазоне 150 – 250 Гц при условии когерентного накопления 32 импульсов

Можно предположить, что если каким-либо образом скомпенсировать медленные вариации положений импульсов, то будет возможно дальнейшее когерентное накопление акустических импульсов, и, соответственно, дальнейшее увеличение уровней полезных сигналов, то есть, наблюдение более контрастных границ, а также наблюдение донных слоев, расположенных на больших глубинах. Реализация такого метода когерентного траекторного накопления (КТН) акустических импульсов была осуществлена с помощью алгоритма, описанного в параграфе 2.1.1 данной работы, включающего в себя адаптивную коррекцию искажений, обусловленных горизонтальной неоднородностью отдельных слоев вдоль трассы измерений. Такой алгоритм накопления обеспечил адаптивную когерентную пространственно-частотную фокусировку сигналов на каждый из слоев, что позволило существенно повысить длительность когерентного накопления импульсов и помехоустойчивость зондирования. Поскольку донные слои могут иметь наклон, а также искривления, повышение качества сейсмопрофилирования может заключаться в когерентном накоплении импульсных откликов

вдоль, в общем случае криволинейной траектории, соответствующей границе отдельного выделенного слоя, с повторением такой операции для всех (или выбранной группы) наблюдаемых слоев.

При условии высокой когерентности зондирующих импульсов можно ожидать существенного повышения результирующего отношения сигнал/шум и чувствительности зондирования к изменению геоакустических характеристик отдельных слоев, т.е. повышения контраста вертикального разреза в целом. Эффект заметного повышения разрешающей способности зондирования в результате применения такой процедуры когерентного траекторного накопления сейсмоакустических ЛЧМ импульсов в диапазоне 150 – 250 Гц иллюстрируется на рис. 3.20. Как видно из сравнения этих двух фрагментов сейсмограмм, до накопления сигналов (рис. 3.20 а) имела место низкая достоверность оценок глубины выделенного звуко рассеивающего слоя из-за низкого отношения сигнал/шум, которое было близко к 0 дБ. После согласованной фильтрации и накопления серии 16 импульсов (рис. 3.20 б), отраженных от данного слоя, помехоустойчивость возросла до 20 дБ, что привело к надежной локализации слоя по оси временных задержек (по глубине).

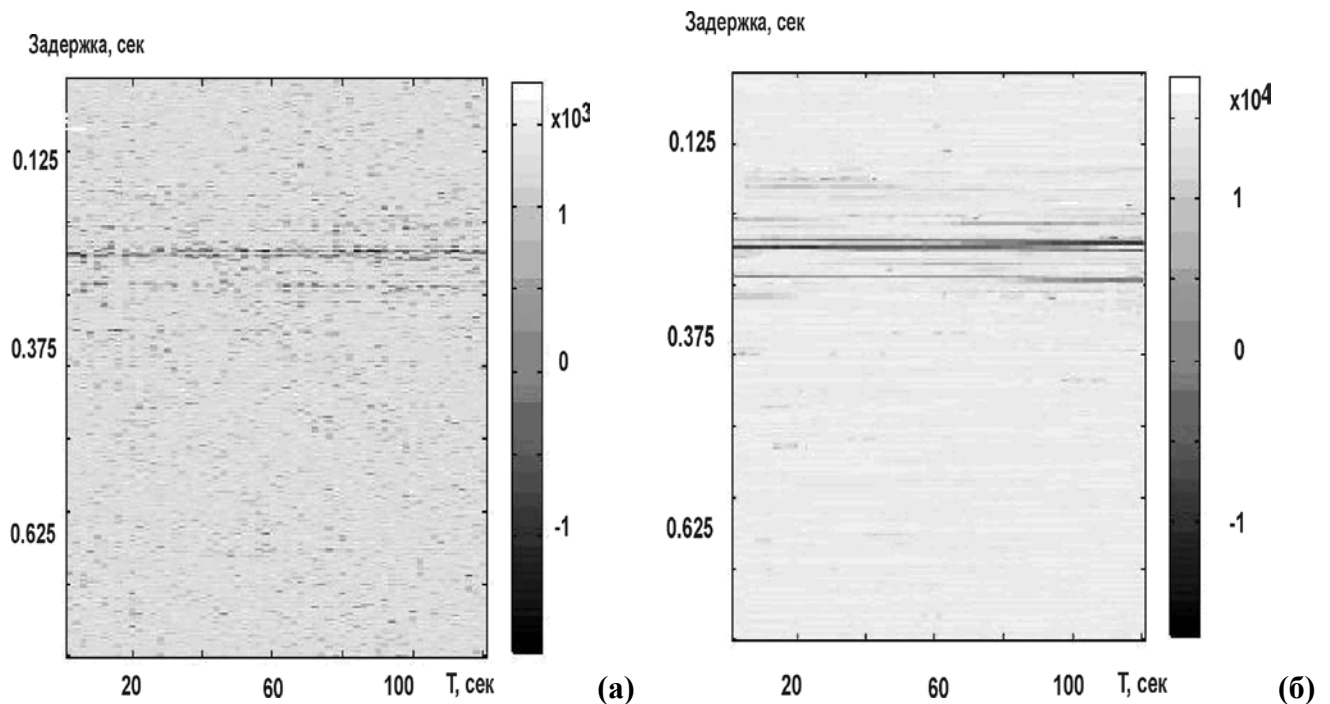


Рисунок 3.20 – (а) – сейсмограмма до накопления сигналов; (б) – повышение разрешающей способности зондирования в результате применения процедуры КТН 16-ти импульсов

Результат апробации метода КТН для трассы галса №2 представлен на рис. 3.21. Излучаемые в полосе 180-230 Гц с периодом 1.5 секунд импульсы подвергались согласованной фильтрации. Отношение уровней полезных сигналов к шумам и помехам в указанных

измерениях, которое обуславливалось мощностью источника в указанном частотном диапазоне и уровнем шумоизлучения НИС-буксировщика без траекторного накопления зондирующих импульсов, составляло 0 ± 5 дБ (рис. 3.21 слева сверху). Формирование изображения донных слоев для трассы для галса № 2, осуществлялось при использовании одиночных импульсов (без межимпульсного накопления) (рис. 3.21 слева сверху), и при когерентном траекторном накоплении ста ЛЧМ импульсов (рис. 3.21 слева снизу). Осуществление когерентной фильтрации и траекторного накопления позволило повысить отношение полезных сигналов к шумам и помехам до 15 дБ. Достигнутая эффективность акустического зондирования дна Каспийского моря за счет когерентного накопления сейсмоакустических импульсов в описываемых экспериментах соответствовала использованию акустических излучателей мощностью более десятка киловатт.

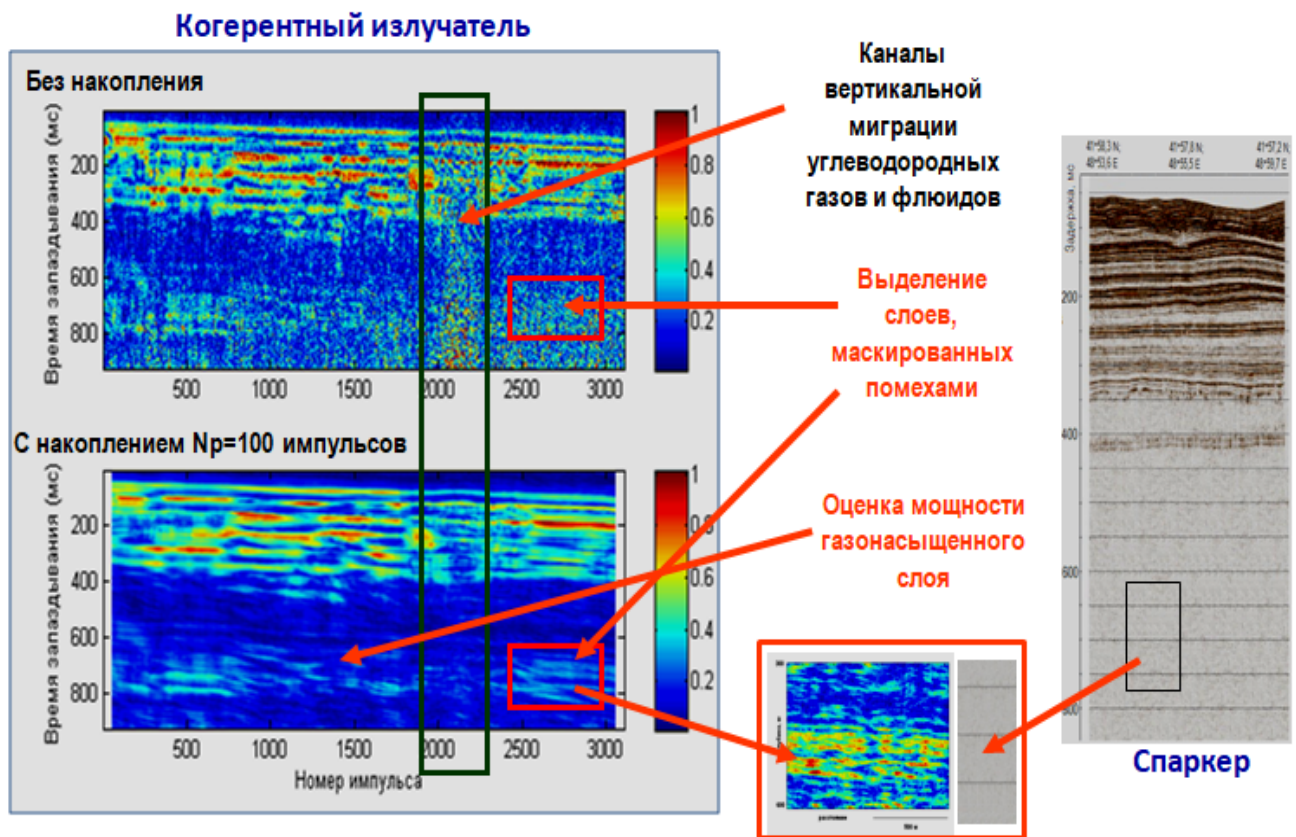


Рисунок 3.21 – Изображения донных слоев для трассы галса № 2 в Каспийском море при зондировании одиночным акустическим импульсом (слева, сверху) и при накоплении 100 импульсов (слева, снизу). Изображение, полученное с использованием спаркера мощностью 1 КВт приведено справа

3.3. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном сейсмопрофилировании в мелководном районе Черного моря

В морских испытаниях метода когерентного зондирования морского дна в мелководном районе Черного моря использовался малогабаритный излучатель сложных акустических импульсов в интервале частот 200-8000 Гц. Мощность излучения составляла от 50 до 100 Вт. Как и в экспериментах в Каспийском море, акустический излучатель имел конструкцию, в которой в качестве движителя, использовался столб из набора пьезокерамических колец. Пьезокерамический столб стягивался упругим металлическим корпусом. Акустический источник состоял из излучателя, работающего в морской среде и бортового блока питания и управления. Излучатель имел массу на воздухе 20 кг и габариты, в дополнительном легком корпусе, $0,5 \times 0,18$ метра. Такой излучатель является прототипом излучателя сложных сигналов для инженерной сейморазведки 2Д/3Д, которая может проводиться с борта НИС малых размеров. Акустический излучатель может быть предназначен для проведения экологически безопасного высокоразрешающего двухмерного сейсмоакустического профилирования при инженерных изысканиях в морских и речных акваториях, в том числе, в Арктике.

Измерения проводились в акватории Черного моря, на базе южного отделения института океанологии РАН им. П.П. Ширшова (галс профилирования $44^{\circ}32.36$ N, $37^{\circ}59.09$ E, $44^{\circ}31.58$ N, $37^{\circ}58.44$ E) (рис. 3.22). Профилирование осуществлялось галсами протяженностью порядка 1 км. Эксперименты осуществлялись с использованием НИС «Аквамарин». Для снижения влияния волнения моря, более стабильного движения излучателя и большей безопасности оборудования при буксировке излучателя использовался гидросамолет. Излучатель крепился к гидросамолету в вертикальном положении. При проведении постановки излучающего комплекса в подводное положение использовался корабельный шпиль с выносом излучателя за борт с помощью П-рамы. Работоспособность излучающего комплекса измерялась при излучении с его помощью ЛЧМ акустических импульсов, при этом оценивалась акустическая мощность и полоса излучения. В качестве контрольных, использовались гидрофоны в составе решетки акустического профилирования, которая располагалась вертикально, в непосредственной близости от излучателя. На измеряемый излучатель подавался гармонический сигнал в частотном интервале от 100 до 2000 Гц. Напряжение гармонического сигнала выбиралось таким, что бы мощность излучения составляла 0.1 от предельной мощности в интервале резонансных частот излучателя. Сейсмокоса состояла из 16 гидрофонов, расположенных с шагом 1.5 метра, на глубине 17.5 метров и расстоянии 5 метров от НИС. Тактовая частота приемных трактов гидрофонов составляла 16 кГц.

Перед началом испытаний были выполнены работы по оптимальному согласованию излучателя и всех каналов сейсмокосы. В результате работ в качестве оптимального было

выбрано заглубление излучателя и приемников на глубинах 20 и 17.5 м, соответственно при глубине места порядка 44 - 52 м. Балансировка приемных устройств происходила с использованием свинцовых грузов и плавучих буйев обтекаемой формы. Сейсмокоса заглублялась с помощью груза в виде торпеды, весом 75 кг. Сейсмоакустическое профилирование осуществлялось при движении НИС по заранее запланированном прямолинейном профиле с рабочей скоростью от 2 до 3 узлов. За счет движения НИС «Аквамарин», сейсмокоса растягивается в горизонтальном направлении за НИС. Заглубление приемных и возбуждающих устройств определялось заранее исходя из принципа равномерности сил натяжения и трения элементов о водную среду. Расстояние между излучателем и приемным устройством составляет 4 метра. Излучаемые зондирующие акустические ЛЧМ импульсы возбуждались с помощью бортового прибора управления и электропитания. Особенностью используемого в экспериментах акустического излучателя является его высокая когерентность, что обеспечивает эффективное частотное, пространственное и временное накопление отраженных от морского дна акустических сигналов. Благодаря такому накоплению, для акустического зондирования морского дна можно использовать акустические источники относительно малой мощности, что дает возможность удовлетворить экологическим требованиям, выполнение которых особенно важно при работах в Арктике, а также в мелководных поймах рек.

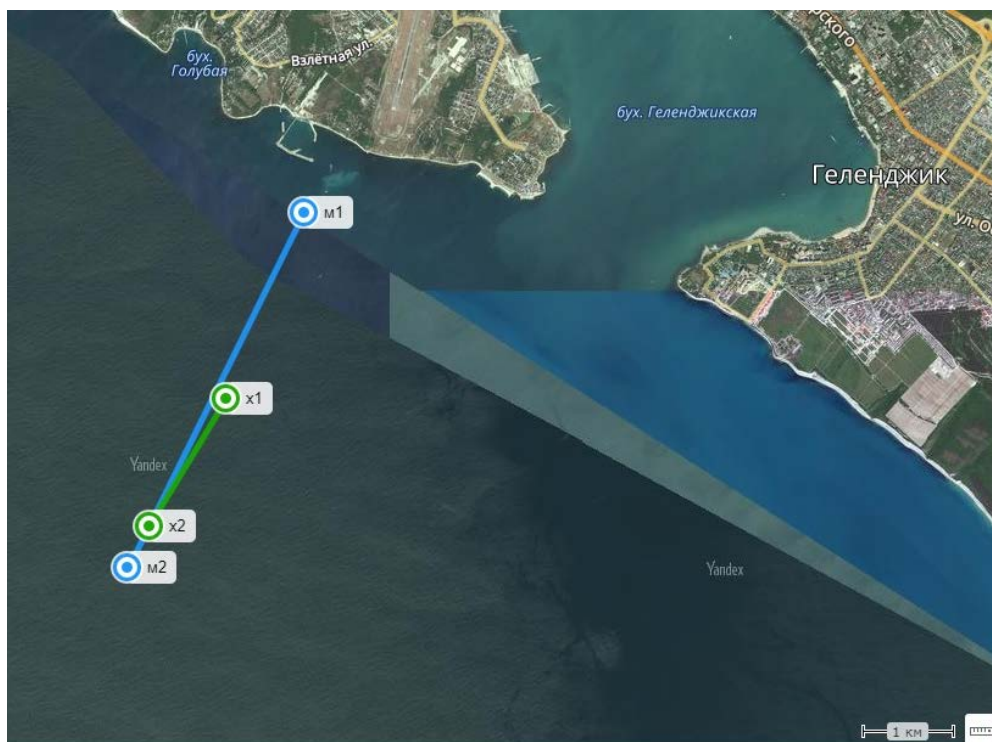


Рисунок 3.22 – Галс при когерентном сеймопрофилировании в Черном море (зеленая линия)

Как показывают измерения в морских условиях, при буксировке излучатель и приемная коса испытывают достаточно большие вариации в пространстве. Меняются их глубина и положение в горизонтальной плоскости относительно НИС-буксировщика. Кроме того, скорость буксировки также случайным образом меняется из-за влияния волнения, ветра, а также особенностей работы двигателя НИС при движении на малых скоростях. Возникающие при такой буксировке помехи устраняются путем использования высокоточных измерений положения элементов системы. Как показали измерения в морских условиях с помощью ИСС «Аквамарин», пространственные вариации элементов системы акустического зондирования достигали нескольких длин волн поля излучения так, что для высококогерентных акустических сигналов возникали интерференционные помехи. Такие помехи необходимо устранять, иначе будет невозможным выполнение когерентного накопления акустических сигналов. В проведенных в Черном море испытаниях метода когерентного зондирования морского дна все указанные выше флуктуации имели место. Таким образом, при обработке данных измерений потребовалось выполнять корректировку задержек акустических импульсов для устранения интерференционных помех.

3.3.1. Измерение АЧХ излучателя в морских условиях

Измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) излучателя проводились, когда НИС «Аквамарин» находилось в дрейфе. Излучатель был спущен с кормы на глубину порядка 15-20 м. Сейсмокоса спущена в размотанном состоянии по правому борту. На конец косы был установлен свинцовый груз 70 кг. Из-за сноса судна во время дрейфа, коса уходила в воду не вертикально, а под углом 15-20 градусов, и дугой уходила к заглубителю. Для измерений решетка гидрофонов устанавливалась около излучателя. Выполнялись следующие операции:

1. На измеряемый излучатель подавался гармонический сигнал в частотном интервале от 100 до 2000 Гц. Напряжение гармонического сигнала выбиралось таким, чтобы мощность излучения составляла 0.1 от предельной мощности в интервале резонансных частот излучателя. Тактовая частота приемных трактов гидрофонов составляла 16 кГц.
2. Осуществлялось излучение ЛЧМ импульсов в интервале от 200 до 2000 Гц.
3. Рассчитывались коэффициенты неравномерности излучателей по интервалу рабочих частот.

При измерениях АЧХ излучателя структура сигналов характеризовалась интерференцией различных волноводных компонент - водной (прямой) волны, волны, отраженной от поверхности моря, а также волн, отраженных от морского дна. Длительность излучаемых ЛЧМ импульсов составляла 1 сек, когда как задержки между различными

волноводными компонентами составляли менее 10 мсек, так, что все волноводные компоненты приходили на гидрофоны практически одновременно, что вызывало формирование ярко выраженной интерференции. На рис. 3.23 (а) показана структура сигнала, измеряемого гидрофоном, который находился на минимальном расстоянии от излучателя.

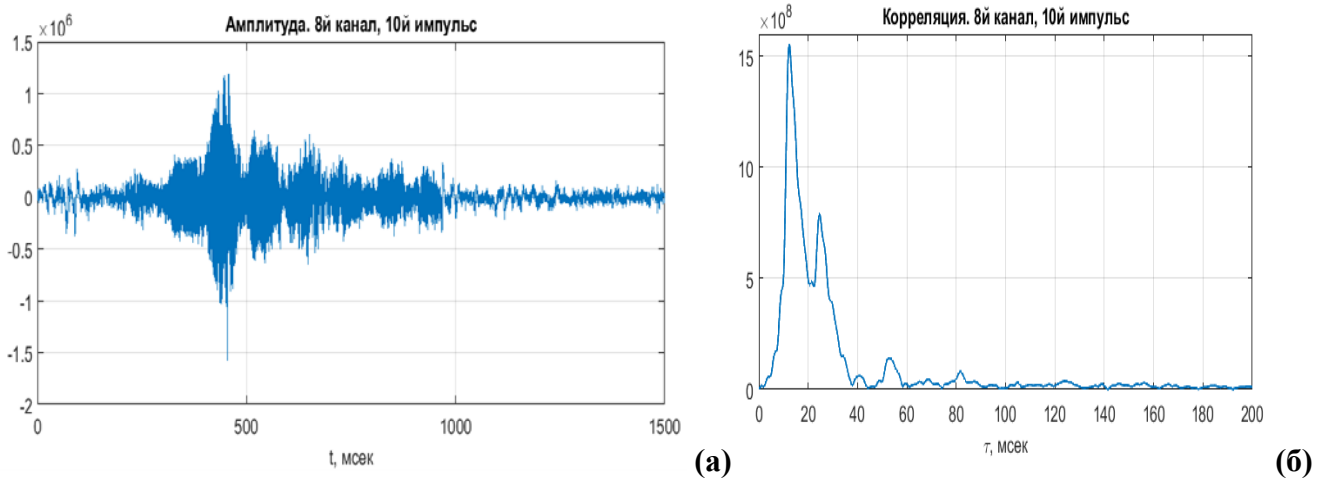


Рисунок 3.23 – Структура сигнала, измеряемого гидрофоном в морских условиях при измерении АЧХ излучателя (а) и автокорреляционная функция наблюдаемого сигнала (б)

Для интерпретации наблюдаемых сигналов была построена модель, параметры которой были близки условиям измерений. Из полученных такой моделью оценок видно, что основной причиной возникновения существенной изрезанности является интерференция водной и поверхностной волноводной компоненты поля. Основной пик автокорреляционной функции (рис. 3.23 б) соответствует прямой водной волне. Второй пик, соответствует волне, отраженной от поверхности. Пик, же, наблюдаемый в интервале задержек порядка 55 мсек, соответствует волне, отраженной от поверхности дна. Оценки с помощью модели, подтверждают представленную интерпретацию.

Кроме проверки работоспособности излучателя, экспериментальная оценка АЧХ излучателя в условиях морских испытаний необходима, в том числе, и для формирования тестового сигнала, с которым необходимо осуществлять свертку данных, измеренных при сейсмопрофилировании. Для решения такой задачи необходимо в измеренных сигналах подавить шумы и устранить интерференционные помехи. Как показывают измерения, основные энергонасыщенные спектральные компоненты наблюдаемого при морских испытаниях акустического шума располагаются в интервале до 200 Гц. По-видимому, они связаны с шумами НИС-буксировщика. По мере роста частоты уровень шума существенно падает и на частотах порядка 1000 Гц уменьшается на порядок. Для ослабления шумов была выполнена частотная фильтрация сигналов. Для повышения достоверности оценок была выполнена

процедура усреднения, что позволило в определенной степени сгладить спектр сигналов (рис. 3.24).

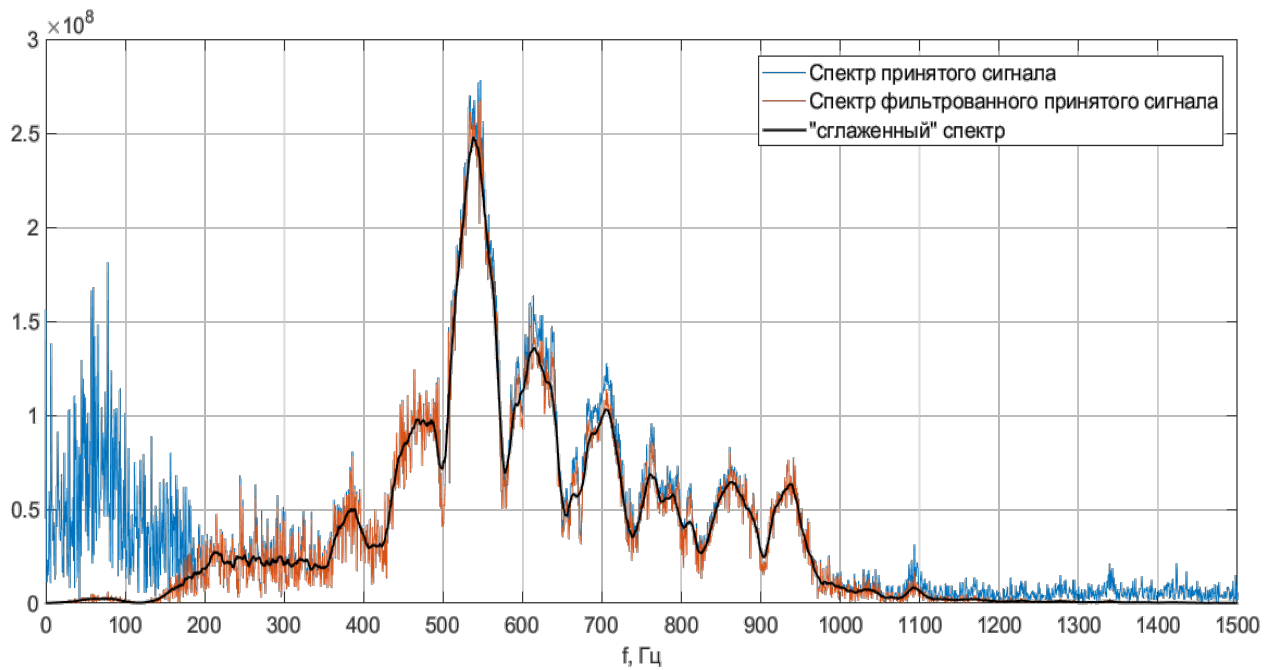


Рисунок 3.24 – Сглаженный и отфильтрованный спектр измеряемых ЛЧМ импульсов

Следующим этапом обработки являлось устранение интерференционных помех. Для этого была использована фильтрация спектра (сглаживание) по масштабам интерференции. На рис. 3.25 показаны полученная таким образом АЧХ излучателя. На предыдущих этапах были выполнены измерения АЧХ излучателя в условиях бассейна и в Горьковском

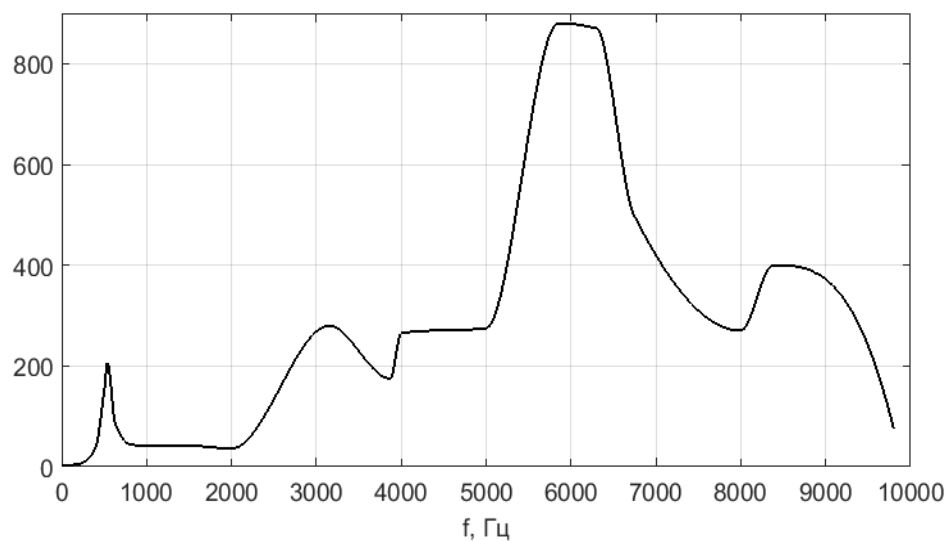


Рисунок 3.25 – Амплитудно-частотная характеристика акустического излучателя, полученная при морских испытаниях в широком частотном диапазоне

Сравнение измерений в морских условиях и в условиях бассейна показывает, что уровень излучения акустического источника в высокочастотном диапазоне (от 600 до 1000 Гц) выше, соответствующего уровня, который наблюдался при измерениях в бассейне и в Горьковском море. Это объясняется особенностями работы излучателя. В частности, при морских испытаниях в корпусе излучателя было создано дополнительное давление порядка 4-5 атмосфер. Это было сделано для повышения надежности работы в подводном положении, поскольку избыточное давление в корпусе излучателя повышало надежность его гидроизоляции. Вместе с тем, избыточное давление в корпусе излучателя сделало его более упругим. Из-за этого, уровень излучения на высоких частотах несколько вырос. Из полученных измерений видно, что уровень излучения, например, на частоте 6 кГц, в пять раз выше уровня излучения в интервале частот порядка 500 Гц. Такие характеристики акустического излучателя позволяют излучать широкополосные импульсы, для которых при акустическом профилировании морского дна, разрешение по глубине может быть порядка метров. При этом следует заметить, что глубина профилирования будет определяться затуханием сигналов в донных слоях.

На рис. 3.26 (а) показан полученный с учетом измеренной АЧХ излучателя тестовый ЛЧМ сигнал, который в дальнейшем использовался для акустического профилирования в условиях испытаний в Черном море. Из полученных данных можно рассчитать соответствующий импульсный отклик согласованного фильтра (рис. 3.26 б), который определит достижимое в рассматриваемом режиме работы излучателя ИСС разрешение при акустическом профилировании морского дна. При использовании оценки ширины отклика по уровню 0.7, в 2 мсек, длина импульсного объема может достигать нескольких метров.

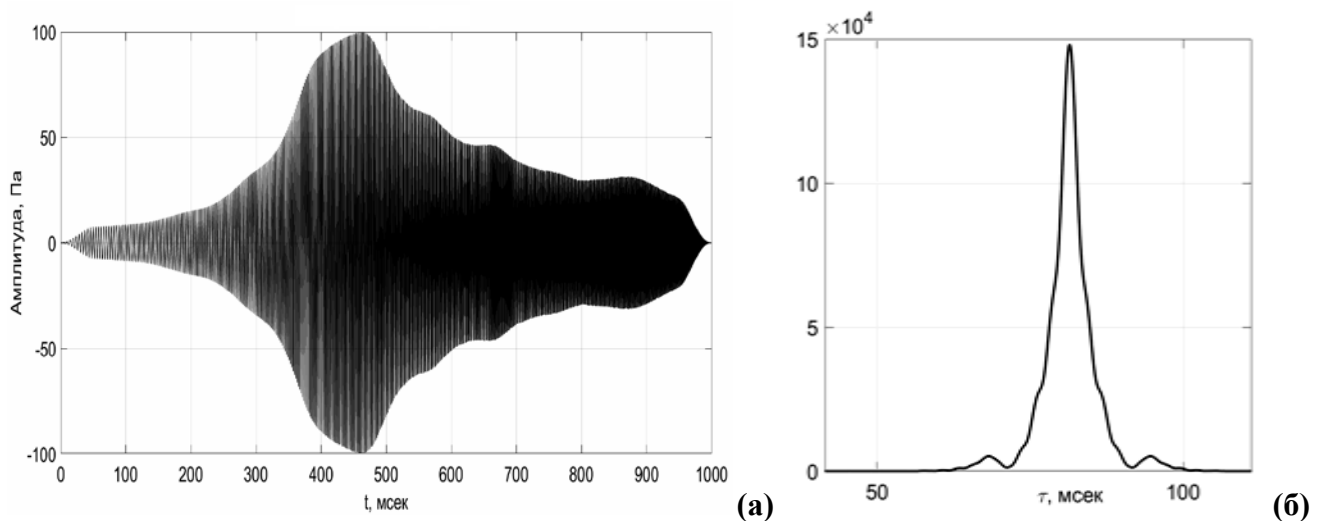


Рисунок 3.26 – Тестовый сигнал, полученный с учетом измеренной АЧХ излучателя в полосе от 200 до 1000 Гц (а), и соответствующий ему импульсный отклик согласованного фильтра (б)

3.3.2. Сейсмическое профилирование при использовании когерентного межимпульсного накопления и оценка параметров донных слоев

При проведении морских испытаний с помощью НИС "Акварин" буксировка акустического излучателя и сейсмокося осуществлялась в несколько галсов с изменением режимов излучения. Проведение испытаний характеризовалось следующими условиями:

1. Профилирование осуществлялось галсами протяженностью около 1 км.
2. При проведении испытаний дул ветер со скоростью порядка 3 м/с. На поверхности моря, наблюдалось волнение 2-3 балла. Судно двигалось по прямолинейной траектории (профилю) с рабочей скоростью порядка 3 узлов.

3. Буксировка акустического излучателя осуществлялась за кормой по правому борту с помощью страховочного металлического троса. Длина троса от кромки кормы до излучателя составляла величину порядка 30 м. Угол падения (к вертикали) составлял ориентировочно 30 градусов.

4. Коса буксировалась заглубленной. Для этого, на оголовье косы был прицеплен заглубитель (70 кг). Заглубление косы составляло величину порядка 15 м. За счет движения НИС «Акварин» сейсмокося растягивалась. При буксировке конец сейсмокося всплывал ближе к поверхности и колебался по глубине. Коса меняла свою форму.

5. За счет нестабильности движения НИС "Акварин" на малых скоростях, влияния ветрового волнения, а также из-за регулировки курса НИС при компенсации сноса, возникающего за счет влияния ветра и течения, акустический излучатель и сейсмокося колебались как по глубине, так и по курсу.

6. Расстояния между излучателем и приемными элементами колебалось в интервале значений 1-4 метров (в среднем, от 0.5 до 2 длин волн).

7. Как показал предварительный анализ записей, в решетке гидрофонов каналы 3 и 4 оказались не рабочими. Таким образом, из 16 гидрофонов действующими были 14 шт.

8. На первом этапе обработки измеренных данных была выполнена фильтрация шумов, заключающаяся в устранении низкочастотных и высокочастотных шумов, расположенных вне частотной полосы зондирующих ЛЧМ сигналов, то есть ниже 200 Гц, и выше 1000 Гц.

9. Как следует из геометрии расположения элементов в схеме измерений излучатель располагался вблизи 8-го или 9-го гидрофонов решетки. В результате такого расположения импульсный фронт на раскрыве решетки имеет параболическую форму (рис. 3.27 а).

Из полученных данных видно, что кривизна фронта (кривая времен прихода импульсов) достигает 5-8 мсек, то есть, 2-3 элементов разрешения. На рис. 3.27 (б) показана структура времен прихода водного сигнала на раскрыве приемной решетки для двадцати импульсов по трассе, из которой видно, что по мере буксировки задержки увеличиваются на 1-2 мсек, что

соответствует увеличению расстояния между источником и решеткой гидрофонов в целом. Отметим также, что вариации такого расстояния для первого гидрофона примерно в два раза меньше, чем вариации, наблюдаемые для самого близкого (девятого) гидрофона. На левой врезке на рис. 3.27 (б) показаны вариации первого гидрофона для двадцати импульсов, из которой видно, что гидрофон периодически колеблется по глубине на 0.5 м (1/3 длины волны), с периодом порядка 4 сек. На врезке по центру на рис. 3.27 (б) показаны квазипериодические колебания девятого гидрофона, из которых видно, что их амплитуда и квазипериод остаются теми же, но появляется плавное увеличение дистанции между гидрофоном и излучателем на 2-3 м (1-2 длины волны). Указанные явления могут быть объяснены, во-первых, колебаниями сейсмоакустической косы, которые малы у первого гидрофона, поскольку он более крепко соединен с заглубителем, во-вторых, можно полагать, что свободный конец сейсмокосы по мере буксировки всплывает на 2-3 метра за время 45 м буксировки. Возможна и другая интерпретация наблюдаемых зависимостей. Сейсмокоса может по мере буксировки отклоняться к курсу, в частности, вправо по движению НИС-буксировщика, при этом, поскольку первый гидрофон более стабилизирован по положению заглубителем, отклонение по курсу нарастает с ростом номера гидрофона.

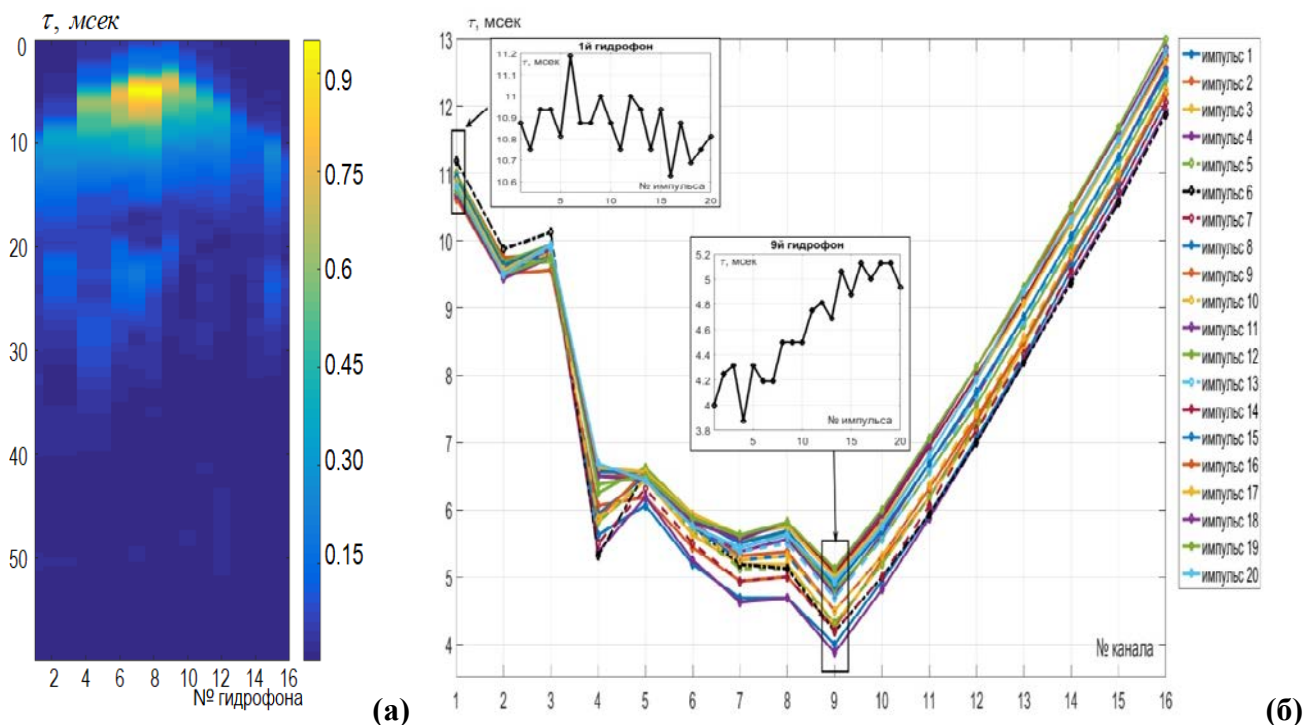


Рисунок 3.27 – Профилирование ЛЧМ-импульсами в диапазоне 200-1000 Гц, длительность сигнала 1 сек. (а) – структура волновых фронтов (после согласованной обработки) времен прихода сигналов, начиная с прямого сигнала, на раскрытие приемной решетки при приеме одного из импульсов; (б) – положение задержек прихода прямого сигнала на 16 гидрофонов антенны с 20 принятых импульсов

Для интерпретации структуры наблюдаемых при морских испытаниях сигналов была использована модель системы акустического профилирования, учитывающая отмеченные явления, связанные с вариациями движения элементов наблюдения. На рис. 3.28 показана структура времен приходов волноводных компонент при измерениях, рассчитанных с помощью модели при расположении излучателя и элементов сейсмокосы, реализованном при измерениях.

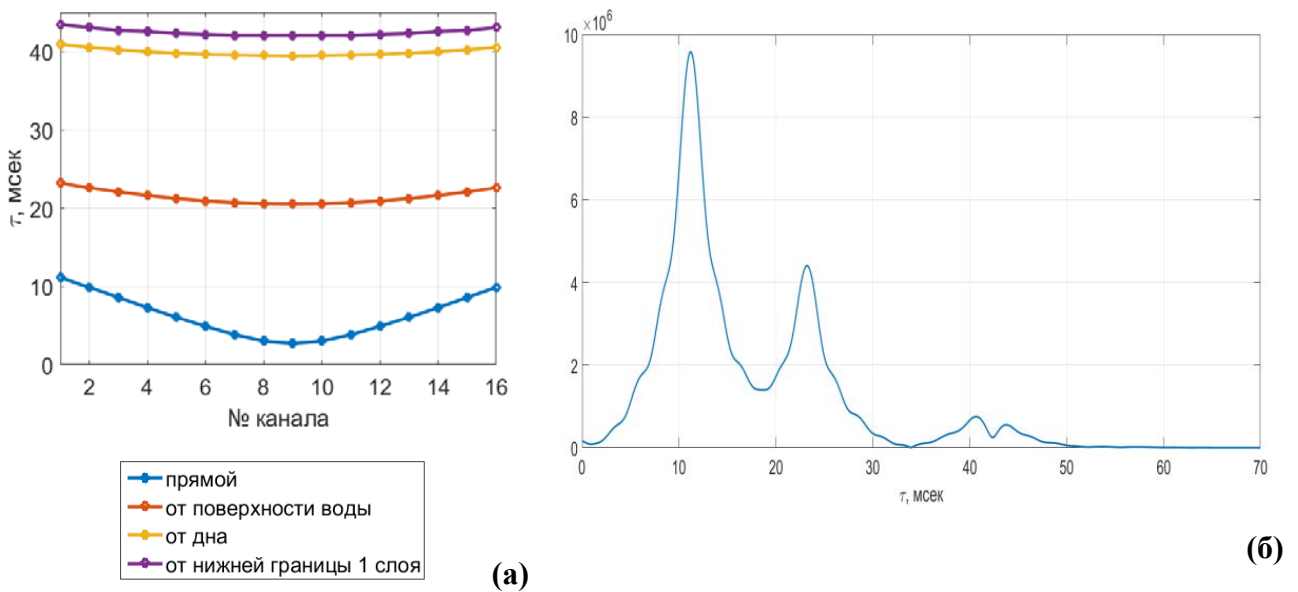


Рисунок 3.28 – Времена приходов волноводных компонент при измерениях, рассчитанные с помощью модели: (а) – положения времен приходов разных сигналов на 16 гидрофонов антенны, (б) – 1 суммарная реализация с выхода согласованного фильтра на гидрофоне №1

Из расчетов видно, что первым на гидрофоны по времени придет водная волна, фронт которой будет максимально искривлен (до 8 мсек) по параболическому закону (нижняя линия на рис. 3.28 а). Далее придут волноводные компоненты, отраженные от поверхности и дна, которые имеют меньшее искривление, поскольку проходят больший путь, что вызывает выпрямление фронта в пределах апертуры конечных размеров. С учетом того, что ширина отклика согласованного фильтра составляет величину, порядка 3-4 мсек (рис. 3.26 б), можно сделать вывод, что возможно разрешить по глубине слои, толщиной от 2-3 м, и более.

Как уже отмечалось, «хвост» сейсмокосы отклонялся по курсу вправо на величину до 5-6 метров, что подтверждает анализ полученных данных (рис. 3.29), а также испытывал колебания по курсу и глубине во время буксировки. На рис. 3.29 показана структура приходов импульсов водной волны при несимметричном расположении решетки относительно излучателя, с учетом всплытия хвостовой части косы на 3-4 метра (рис. 3.29 а), и восстановленная по результатам анализа измерений геометрия положений решетки и излучателя (рис. 3.29 б). Видно, что волновые размеры пространственных задержек взаимного расположения гидрофонов решетки и

излучателя достигают 1-2 длин волн и варьируются по мере буксирования по профилю. Можно сделать вывод, что для эффективного когерентного сложения (накопления) полезных сигналов необходимо учитывать пространственные вариации, то есть, компенсировать фазовые набегии сигналов различных импульсов на различных гидрофонах.

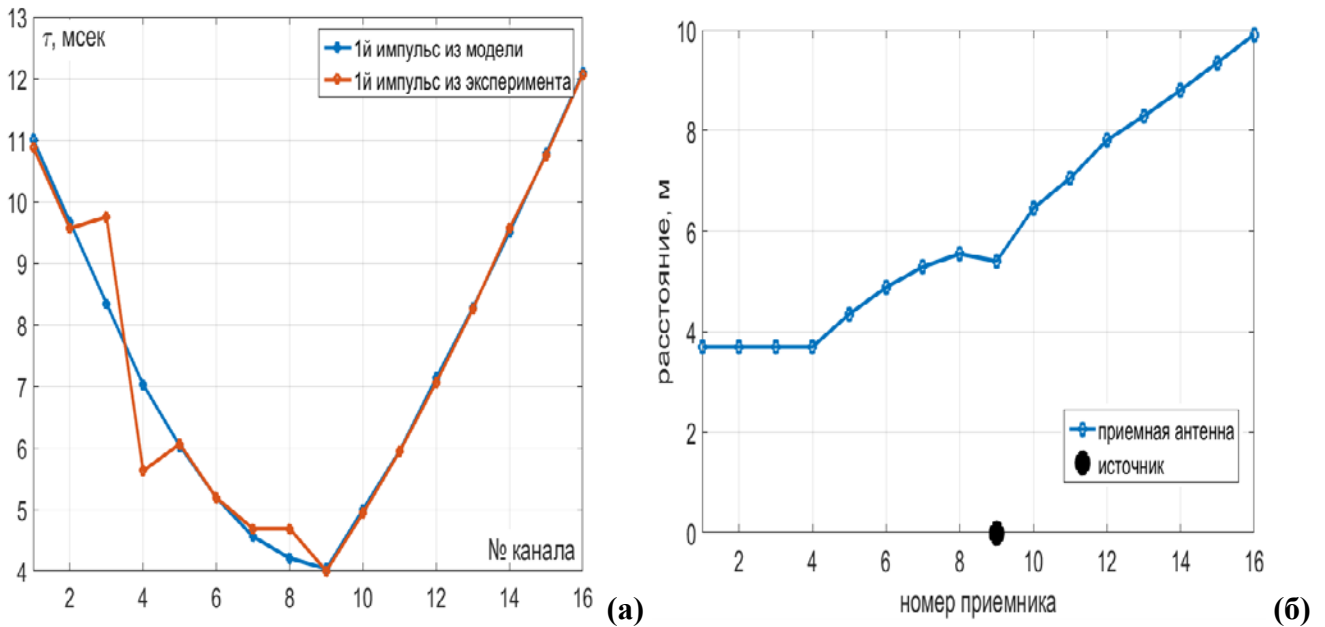


Рисунок 3.29 – Структура приходов импульсов водной волны при несимметричном расположении решетки относительно излучателя (а), и восстановленная по результатам анализа измерений геометрия положений решетки и излучателя при буксировке, вид сверху (б)

Отметим, что при увеличении глубины места, то есть, в ситуациях, когда дно расположено на глубинах 50 и более метров, а излучатель и приемная решетка будут разнесены на достаточно большое расстояние по горизонтали, волноводные фронты будут практически плоскими, что упрощает реализацию когерентного накопления полезных сигналов.

Как уже указывалось, в процессе буксировки взаимное расположение излучателя и гидрофоном в решетке меняются. Но рис. 3.30 показаны наблюдаемые при измерениях вариации приходов импульсов во время буксировки. Анализ таких распределений показывает, что водные компоненты (прямой сигнал), характеризуются относительной стабильностью. Можно предположить, что монотонное ослабление амплитуд откликов с ростом номеров импульсов связано с увеличением расстоянием между излучателем и гидрофоном, которое меньше для первого, закрепленного заглубителем, гидрофона, и больше для девятого, и еще больше для шестнадцатого, гидрофонов. Как видно из измерений, вариации прихода импульсов, связанных с волной, отраженной от свободной поверхности воды, имеют большую величину. Это может быть обусловлено вариациями глубины излучателя и приемной решетки.

Отметим, что вариации сигналов, связанных с отраженной от поверхности воды волной для первого гидрофона значительно больше, чем для девятого гидрофона. Это связано с тем, что этот гидрофон удален на большее расстояние от излучателя. Для импульсов, отраженных от донной поверхности, а также от донных слоев аналогичные пространственные вариации имеют близкие значения, но находятся в противофазе поверхностным вариациям.

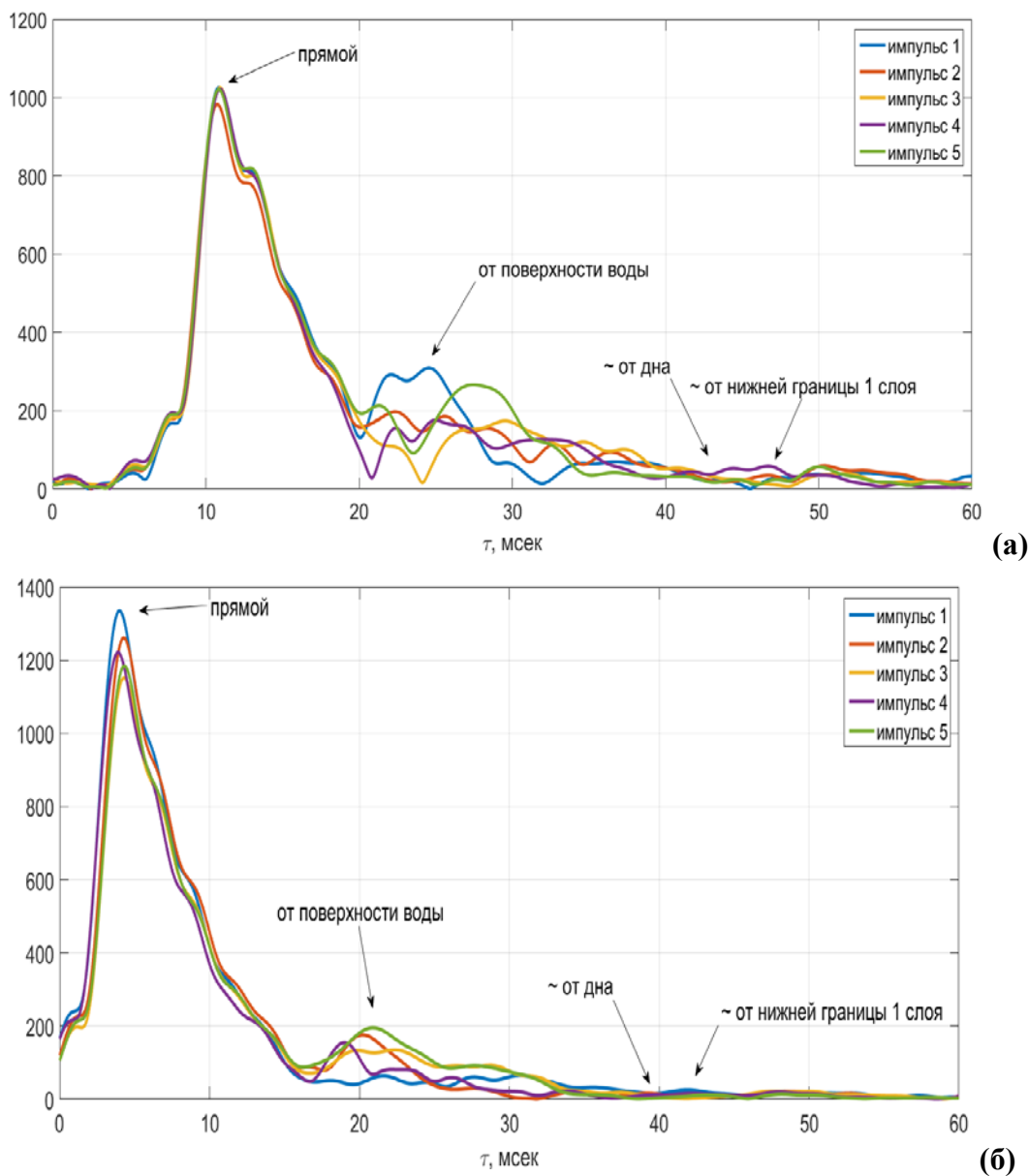


Рисунок 3.30 – Вариации приходов импульсов с согласованного фильтра, наблюдаемые при измерениях во время буксировки: (а) – гидрофон №1, (б) – гидрофон №9

Для накопления полезных сигналов необходимо когерентно сложить сигналы на гидрофонах, что можно сделать лишь устранив паразитные задержки времен прихода импульсов, связанных с неконтролируемыми колебаниями элементов системы профилирования при буксировке. При такой обработке возможно увеличение отношения сигнал/шум на 7 - 8 дБ.

В противном случае, такого накопления не получится, и, кроме этого, пространственное разрешение при профилировании окажется несколько меньше.

На рис. 3.31 показан профиль, полученный при использовании лишь одного (первого) гидрофона. Из полученных данных видно, что дно в районе измерений состоит из относительно толстого слоя влажных глинистых осадков, который лежит на еще более толстом слое более консолидированных осадков в виде твердого ила, песка с мелким галечником. Амплитуды и задержки импульсов, отраженных от донной поверхности варьируются, что, по-видимому, является следствием пространственных вариаций элементов системы акустического профилирования из-за неравномерности буксировки, а также из-за изменчивости (изрезанности) рельефа дна и его отражательных характеристик. Каждый из гидрофонов характеризуется флуктуациям, присущими лишь этому гидрофону.

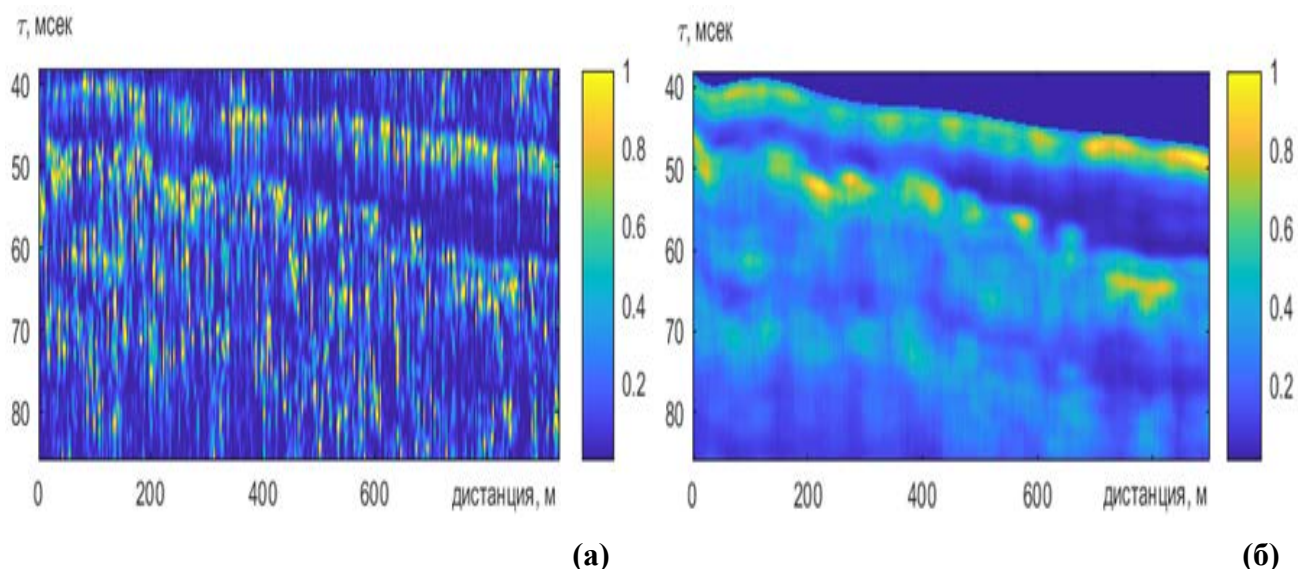


Рисунок 3.31 – Профиль, полученный при использовании одного гидрофона (а) и с накоплением по антенне и когерентно траекторно по 10 импульсов (б)

Дополнительным методом накопления сигналов, является когерентное траекторное накопление (КТН) импульсов, методология которого описана в параграфе 2.1.1 данной работы. При правильном определении наклона границы можно когерентно сложить и несколько десятков (до сотни) импульсов. На рис. 3.31 (б) показан профиль, после компенсации вариаций положения излучателя и приемной системы, когерентного накопления на приемной антенне и с применением КТН по 10 импульсов. В результате такого сглаживания уровень шумов был ослаблен на 10 дБ, и, кроме того, ослабли помехи, связанные с вариациями пространственного расположения элементов акустического профилирования.

Эффективным методом реконструкции донных осадочных слоев является расширение спектра зондирующих ЛЧМ импульсов, что приводит к увеличению отношения сигнала к шуму, а также к увеличению пространственного разрешения при реконструкции параметров дна. При проведении испытаний в Черном море, используемый излучатель позволял возбуждать зондирующие ЛЧМ импульсы в полосе от 100 Гц до 5 кГц (рис. 3.32). Однако частотная характеристика излучателя была неравномерной, так, что максимальный уровень излучения располагался в диапазоне частот от 5 до 7 кГц. Излучение импульсов в такой широкой полосе позволило сформировать отклик согласованного фильтра шириной порядка 0.5-1 мсек, что позволило обеспечить пространственное разрешение по глубине порядка нескольких метров.

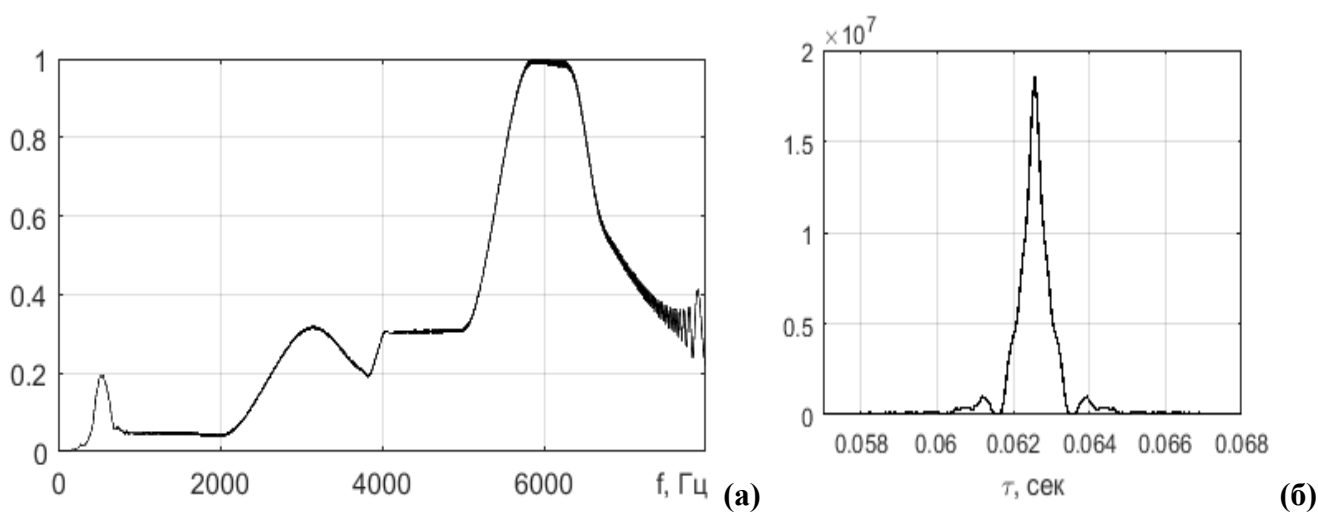


Рисунок 3.32 – Частотная характеристика ЛЧМ импульса (а) и его импульсный отклик с выхода согласованного фильтра (б).

Аналогично предыдущему частотному диапазону, в серии измерений, где излучался ЛЧМ-сигнал в диапазоне от 200 до 8000 Гц, длительность 0.5 сек, была применена процедура когерентного накопления сигналов на антенне и процедура когерентного траекторного накопления вдоль трассы, что позволило увеличить отношение сигнал/шум на 10 дБ. Результаты совокупности таких накоплений представлены на рис. 3.33.

Сравнение результатов реконструкции морского дна, полученных методом когерентного зондирования широкополосными ЛЧМ импульсами, с результатами, полученными при использовании спаркера, мощностью 1 кВт, показаны на рис. 3.34. Акустические трассы указанных измерений не совпадали (рис. 3.22), что обусловило отличия в конфигурации донных осадков. Однако в целом, видно, что структура дна восстановлена точно.

Осуществление согласованной фильтрации, когерентного накопления на приемной антенне и когерентного траекторного накопления позволило повысить отношение полезных сигналов к шумам и помехам до 30 дБ. Достигнутая эффективность акустического

зондирования дна Черного моря за счет когерентного накопления сейсмоакустических импульсов в описываемых экспериментах соответствовала использованию акустических излучателей мощностью более двух десятков киловатт.

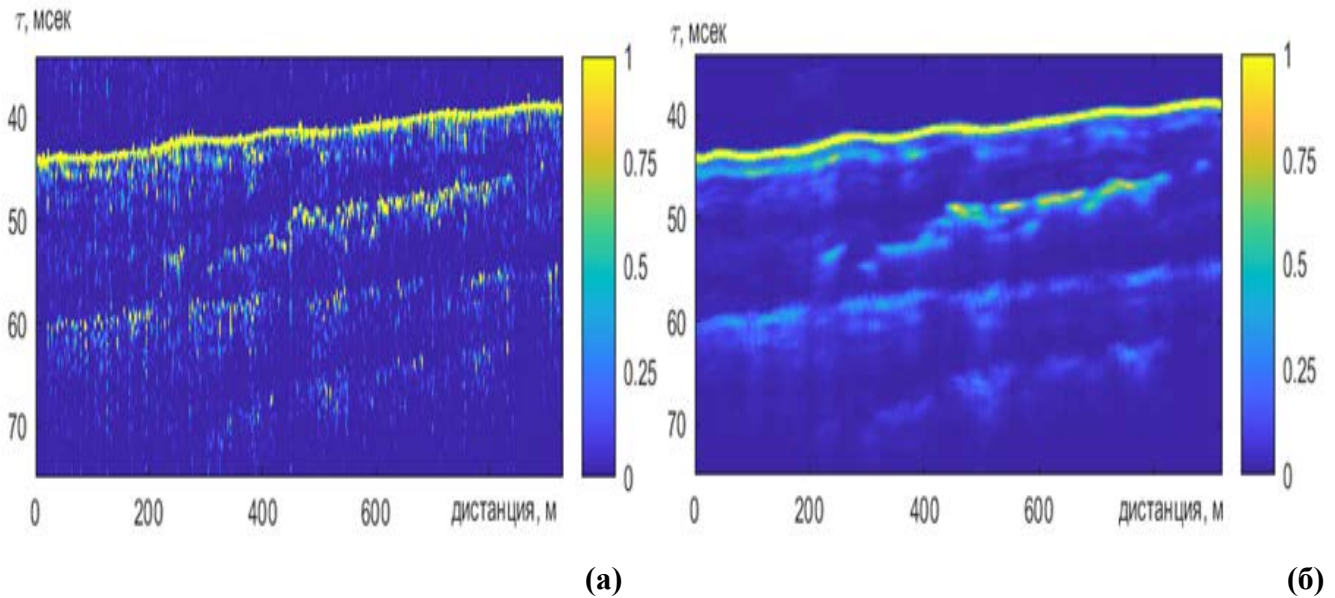


Рисунок 3.33 – Реконструкция морского дна в районе полигона в Черном море при использовании широкополосных зондирующих ЛЧМ импульсов (рис. 3.32). Профиль, полученный при использовании одного гидрофона (а) и с накоплением по антенне и КТН по 10 импульсов (б)

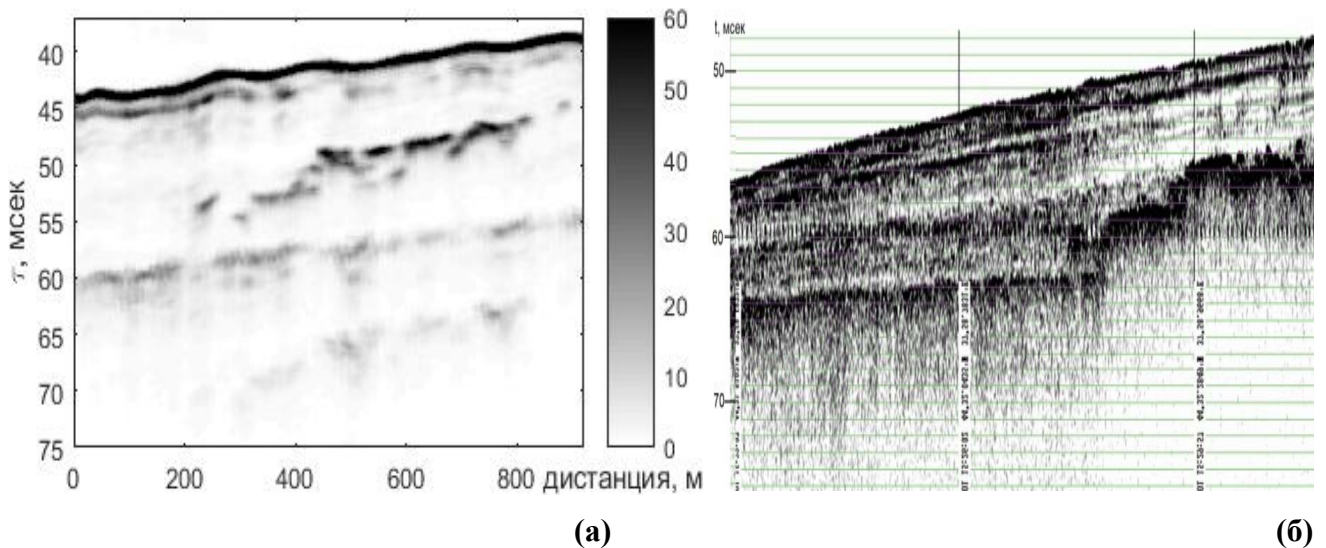


Рисунок 3.34 – Сравнение результатов реконструкции морского дна в районе полигона в Черном море, полученных когерентным акустическим излучателем мощностью 100 Вт с широкополосными ЛЧМ импульсами и частотно-пространственно-временным накоплением (а) со спаркером мощностью 1 кВт (б)

Для реконструкции акустических параметров донных осадков в районе измерений был использован критерий минимизации – L_p -норма с КТН, $p=2$, как показавший удовлетворительную устойчивость к шумам и помехам (раздел 2.3). Априорные данные о строении морского дна были взяты из результатов измерений, выполненных Отделением ИО РАН и из справочной литературы [3, 54]. Подборка априорных данных о характеристиках морского дна в районе Геленджикского полигона показана в таблице 3.1 (а). Для оценки параметров донных слоев были использованы экспериментальные данные, полученные путем усреднения измеренных значений амплитуд принятого сигнала в интервале от 600 до 700 м (рис. 3.34 б). Оценка параметров осуществлялась с использованием описанного в параграфе 2.1.3 релаксационно-итерационного метода поиска решений. В таблице 3.1 (б) приведены результаты реконструкции параметров донных осадков в Геленджикском полигоне, удовлетворяющие априорно заданным интервалам типичных значений искомым параметров.

Таблица 3.1 – Априорные данные по характеристикам морского дна в районе Геленджикского полигона (а) и результаты реконструкции параметров осадков при реконструкции с использованием когерентных широкополосных импульсов (б)

	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$v^p, \text{м}/\text{с}$	$v^{sv}, \text{м}/\text{с}$	$h, \text{м}$
вода	1040	1475	0	50
1 слой	1800-2200	1600-1800	50-200	5-15
2 слой	2000-2300	1800-2200	100-300	5-20
3 слой	2200-2500	2200-2500	200-500	10-30
п/п	2500-2800	2300-3000	500-900	0

(а)

	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$v^p, \text{м}/\text{с}$	$v^{sv}, \text{м}/\text{с}$	$h, \text{м}$
вода	1040	1475	0	50
1 слой	1800	1565	110	10
2 слой	1835	1820	170	12
3 слой	1930	2120	280	16
п/п	1990	2305	510	0

(б)

3.4. Выводы к главе 3

В настоящей главе представлены результаты экспериментальной апробации реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании. Апробация осуществлялась в условиях физического моделирования в бассейне, а также в морских условиях Каспийского и Черного морей.

Исследованы возможности когерентного акустического зондирования морского дна в условиях физического моделирования. Показано, что точность измерения сейсмоакустических сигналов в созданной экспериментальной установке в виде излучателя зондирующих импульсов и системы для измерения сигналов отраженных от набора упругих слоев в бассейне с водой, ограничивается в основном неоднородно распределенными реверберационными помехами, разброс которых по уровню достигал 10-15 дБ. Показано, что в конкретной

установке для физического моделирования и при используемых алгоритмах точность реконструкции донного слоя плексигласа составила для плотности и скорости поперечной волны величину порядка 3-4%, а для скорости продольной волны и толщины плексигласа порядка 2-3% (относительно значений параметров, взятых из справочника).

Показано результатами измерений, что точность реконструкции может быть повышена, если дополнительно ослабить уровень реверберационных помех. Для этой цели следует покрыть стенки бассейна более толстым слоем поглощающей резины. Кроме того, необходимо ослабить уровень случайных неоднородностей границ донных слоев, например, путем шлифовки поверхностей плексигласа и нержавеющей стали. Для ослабления помех, связанных с отражениями от нижней стенки бассейна, необходимо модель донных слоев расположить на поглощающей резине. Кроме того, глубину положения излучателя и приемника необходимо выбрать так, чтобы отраженные от слоистого дна сигналы не маскировались водными компонентами и волнами, отраженными от поверхности водного слоя. Для более детального анализа точности реконструкции параметров донных слоев, следует исследовать статистическую структуру реверберационных помех в бассейне и, прежде всего, в интервале значений положений и задержек, в которых осуществляются измерения отраженных от дна сигналов.

Проведена обработка данных, полученных при когерентном зондировании морского дна в Каспийском море. Показано, что при траекторном накоплении акустических импульсных сигналов, от границ донных слоев было достигнуто увеличение отношения сигнала к шуму до 15 дБ, что позволило на глубине порядка 500 м надежно выявить ранее не наблюдаемую нижнюю кромку газонасыщенных слоев;

Выполнены эксперименты по когерентному зондированию морского дна в морских условиях в шельфовой акватории Черного моря. Показано, что в условиях морского шельфа в Черном море согласованная фильтрация принятого сигнала с излучаемым помогла повысить отношение сигнала к шуму на величину до 30 дБ, а когерентное накопление сигналов на антенне и когерентное траекторное накопление позволило повысить уровень полезных сигналов на фоне шумов судна-буксировщика дополнительно на 10-15 дБ.

Исследованы возможности зондирования морского дна когерентными сложными акустическими импульсами. Показано, что необходимые при этом текущие амплитуды зондирующих сигналов когерентных источников меньше в 10^2 - 10^3 раз амплитуд зондирующих сигналов от источников взрывного типа.

Заключение

Сформулируем основные результаты, полученные в рамках данной диссертации:

1. Для решения задачи реконструкции параметров морского дна при зондировании когерентными сложными акустическими импульсами разработана геометроакустическая модель формирования рассеянных в слоистом дне акустических сигналов, учитывающая случайные неоднородности донного рельефа и наличие ветрового волнения. Показано, что разработанная модель позволяет рассчитывать относительные уровни сигналов, шумов и реверберационных помех для обнаружения рассеянных сигналов и повысить точность оценок геоакустических параметров донных слоев. Получены количественные оценки глубины реконструкции этих параметров в зависимости от уровня реверберационных помех.

2. Разработан послойный итерационный алгоритм оценивания геоакустических параметров морского дна при излучении когерентных сложных акустических импульсов и проведено его стохастическое моделирование с использованием различных целевых функций. Показано, что наилучшую устойчивость к шумам и помехам при оценке геоакустических параметров имеет функционал невязки типа L_2 -нормы с когерентным пространственно-частотным накоплением. Функционал невязки типа AMUSIC также показывает хорошую сходимость, однако дисперсия оценки при малых отношениях сигнал/шум больше, чем в аналогичных условиях при использовании невязки типа L_2 -нормы. Функционал невязки типа нейроноподобной свертки демонстрирует наименьшую дисперсию оценки значений скоростей продольных волн в слоях и толщин слоев при малых отношениях сигнал/шум по сравнению с другими рассматриваемыми функционалами.

3. При проведении физического моделирования в лабораторных условиях установлено, что когерентное накопление акустических сигналов позволило повысить отношение сигнала к реверберационному шуму на 40 дБ, при этом точности оценки скорости продольной волны, скорости поперечной волны, плотности и толщины первого донного слоя были повышены и составили от 2 % до 5 %.

4. В результате обработки данных по когерентному зондированию морского дна в акватории Каспийского моря, показано, что предложенный в диссертации метод когерентного траекторного накопления акустических импульсов в условиях наклонных отражающих донных слоев позволил в анализируемом частотном диапазоне зондирования от 150 до 250 Гц дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму от 10 до 15 дБ. Это дало возможность на глубинах залегания донных слоев порядка 500 м выявить ранее не наблюдаемую нижнюю кромку газонасыщенных слоев. Результирующий суммарный выигрыш с учетом процедур когерентного траекторного накопления и накопления по антенне составил до 30 дБ, что дает

возможность эквивалентного снижения уровня излучения зондирующих сигналов до 10^3 раз в сравнении с источниками взрывного типа (в данном случае, со спаркером).

5. Проведены эксперименты по когерентному зондированию морского дна в мелководной акватории Черного моря. Показано, что совместное применение процедуры частотного сжатия широкополосных зондирующих сигналов (в полосе от 200 Гц до 8 кГц), когерентного траекторного накопления в условиях наклонных границ и когерентного накопления по антенне позволили дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму до 15 дБ. Оценки скоростей, плотностей и толщин донных слоев соответствует интервалу типичных значений этих параметров для данной акватории Черного моря.

Список литературы

1. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н., Вировлянский А.Л., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Марышев А.П., Таланов В.И. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // *Фундаментальные исследования океанов и морей*. Т.2. М.: Наука. 2006. С. 491-511.
2. Авербах В.С., Коньков А.И., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И. Методы когерентной инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН // *Технологии сейсморазведки*. 2015. № 2. С. 119–123.
3. Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. - М.: Недра, 1982. 232 с.
4. Алексеев А.С. Обратные динамические задачи сейсмологии / В кн. «Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных». М.: Наука, 1967. С. 9–84.
5. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. Т.1. М.: Мир. 1983. 520 с.
6. Ампилов Ю. П., Барков А. Ю., Яковлев И. В., Филиппова К. Е., Приезжев И. И. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 // *Технологии сейсморазведки*. 2009. № 4. С. 3–16.
7. Беллюстин Н.С. О динамике структур в искусственных нейронных сетях с латеральной конкуренцией элементов: Препринт № 234 НИРФИ. Нижний Новгород, 1993. 25 с.
8. Белов А.И. О влиянии поперечных волн в осадочном слое на звуковом поле в мелком море // *Труды XI Всесоюзной Акустической конференции. Секция D*. М.: АКИН, 1991. С. 79.
9. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. Оценка акустических параметров модели дна в мелком море с использованием априорной геолого-геофизической информации и преобразования Вигнера // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60. № 2. С. 190-195
10. Бородина Е.Л., Малеханов А.И., Хилько А.И. Пространственно-временная структура широкополосных акустических импульсов в мелком море // *Известия вузов. Радиофизика*. 2011. Т. 54. № 4. С. 260.
11. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит., 1989. 416 с.
12. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
13. Бункин Ф.В., Кацнельсон Б.Г., Кравцов Ю.А. и др. Усредненные характеристики поглощения звука в океанических волноводах малой глубины // *Акустический журнал*. 1989. Т. 35. № 1. С. 1–16.

14. Буров В.А., Сергеев О.Н., Сергиевская Н.П. Акустическая томография океана по данным с вертикальной модовой антенны, произвольно искривленной подводными течениями // Акустический журнал. 1992. Т. 38, № 2. С. 350-353.
15. Бяков Ю.А., Глумов И.Ф., Коган Л.И., Маловицкий Я.П., Мурзин Р.Р. Широкоугольное глубинное сейсмическое профилирование дна акваторий. М.: Наука, 2001. 546 с.
16. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
17. Веденеев А.И., Гончаров В.В., Курьянов Б.Ф. Оценка акустических параметров морского дна по интерференции широкополосного звука // Акустические волны в океане / Под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. М.: Наука. 1987. С. 162-173.
18. Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. Учебное пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа, 2001, 68 с.
19. Гайнанов В.Г. Сейсморазведка. Учебное пособие. М.: МГУ, 2006. 149 с.
20. Гайнанов В. Г., Зверев А. С. Сейсмоакустический комплекс для двухчастотного профилирования на акваториях // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С.649-653.
21. Гельгор А.Л. Общая теория связи. Проверка статистических гипотез. Оценивание параметров. Оптимальный приём сигналов: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Горлов А.И., Попов Е.А. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 227 с.
22. Гончар А.И., Донченко С.И., Шлычек Л.И. Современные технические средства профилирования дна // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана. Сб. научн. тр. НТЦ ПАС НАН Украины.-Запорожье, 2006, №3, С.120-128.
23. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М. и др. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. 254 с.
24. Гурбатов С.Н., Егорычев С.А., Захаров Д.А., Курин В.В., Кустов Л.М., Прончатов-Рубцов Н.В. Исследование возможностей использования параметрического излучателя для определения акустических параметров дна // Методы акустической диагностики неоднородных сред. Сб. научных трудов ИПФ РАН. Н.Новгород. 2002. С. 85-95.
25. Денисов М.С. Сейсмическая миграция: анализ постановки задачи, способов ее решения и ограничений метода // Технологии сейсморазведки. 2013, № 4 С. 56–61.
26. Доценко В.С., Иоффе Л. Б., Фейгельман М. В., Цодыкс М. В. Итоги науки и техники. Физические и математические модели нейронных сетей. Т. 1. Часть 1. Спиновые стёкла и нейронные сети. М.: ВИНТИ, 1990. С. 124.

27. Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В. Вертикальное сейсмическое профилирование на морском шельфе // *Акустический журнал*. 2008. Т. 54, №3. С. 483–490.
28. Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В. Моделирование излучения и приема волн фазированными антеннами в морском дне на шельфе // *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 2. С. 264–273.
29. Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В. Численное моделирование волнового поля при сейсмическом профилировании морского дна // *Акустический журнал*. 2005. Т. 51, № 5. С. 645–651.
30. Захарова Е.М., Минашина И.К. Обзор методов многомерной оптимизации // *Информационные процессы*. Т. 14, № 3. 2014. С. 256-274.
31. Зверев В.А., Стромков А.А. Численные методы обработки сигналов. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2001. 182 с.
32. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
33. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
34. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.
35. Кребс Джером Р., Хинкли Дэвид Л. Эффективный способ инверсии геофизических данных / Патент РСТ/US2009/032010, WO 2009/117174 2009.09.24.
36. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р. и др. Экспериментальные исследования возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными низкочастотными импульсами // В кн. *Фундаментальные исследования океанов и морей*. – М.: Наука. – 2009 – С. 126-138.
37. Лебедев А.В., Малеханов А.И. Когерентная сейсмоакустика // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003. Т. 46, №7. С. 579-597
38. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
39. Ли Цян. Разработка помехоустойчивых алгоритмов динамической инверсии сейсмических данных / Диссертация / РГУ НЕФТИ И ГАЗА. Москва, 2018
40. Лучинин А.Г., Хилько А.И. Маломодовая акустика мелкого моря // *УФН*. 2011. Т. 181. № 11. С. 22–28.
41. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. М.: Мир, 1983.
42. Машошин А.И. Помехоустойчивость выделения максимумов корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением // *Акустический журнал*. 2001. Т. 47. № 6. С. 823–829.

43. Мерклин Л.Р. Основные технологические тенденции в морской сейсморазведке // Труды IX научной школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» и XII сессии РАО. М.: ГЕОС. 2002. С. 351-358.
44. Мерклин Л.Р., Левченко О.В. Сейсмоакустические исследования с параметрическим профилографом (1988-2001 гг.) // Акустические океанологические исследования и экспедиции / Ред. В.П. Кузнецова, Б.Г. Мордвинова, В.И. Тимошенко. Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2002. С. 396-413.
45. Мерклин Л.Р., Путанс В.А. Сейсмоакустические аномалии в донных осадках Каспийского моря / Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. М.: ГЕОС, 2011. С. 250–258.
46. Михнюк А.Н. Определение координат источника звука с помощью согласованных с морским волноводом алгоритмов обработки сигналов // Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 3. С. 401–406.
47. Морская сейсморазведка / Под ред. Телегина А.Н. М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. 237 с.
48. Никитин А.А. Комплексование геофизических методов. Учебник для вузов. Тверь: ООО "Издательство ГЕРС", 2004. 294 с.
49. Нур А. Использование сейсмических свойств горных пород для изучения и мониторинга пластов-коллекторов // В кн.: Сейсмическая томография / под ред. Г.Нолета. – М.: Мир, 1990. С. 213-250
50. Патин С.А. Антропогенное воздействие на морские экосистемы и биоресурсы: источники, последствия, проблемы. Труды ВНИРО, Контроль и охрана состояния водной среды и биоресурсов. Москва. 2015. Т. 154. С. 85-104.
51. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
52. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Матвеев А.Л. Локализация источника в мелководном канале с взволнованной поверхностью // Акустический журнал. 2015. Т. 61, № 1. С. 114-122.
53. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Чашин А.С. Локализация когерентного звукового источника в мелководном канале с использованием частично калиброванной адаптивной антенной решетки // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 2. С. 99–107.
54. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: «Недра», 1981. 464 с.
55. Сердобольский Л.А. Конспект лекций в 3-х частях курса «Геофизические методы (сейсморазведка)». М., РГУ нефти и газа, 1999.

56. Сидоровская Н. А., Аюп Дж. Е., Аюп Д. В., Ташмухамедов А.М., Екимов А.Э. Использование пассивных акустических методов для изучения влияния индустриальной деятельности человека на морскую мегафауну // Труды XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского акустического общества. М.:ГЕОС. 2011. С. 205-211.
57. Скучик Е. Основы акустики. М: Мир, 1976, том 1 и 2.
58. Теория обнаружения сигналов / Под ред. Бакута П.А. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
59. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана. М.: Мир, 1969. 300 с.
60. Чупров С.Д. Селекция мод и лучей в подводном звуковом канале // Акустика океанской среды. М.: Наука, 1982. С. 132–141.
61. Шматков А.А., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических исследований на акваториях // Технологии сейсморазведки. 2015. № 2. С. 86–98.
62. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка: В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 448с.
63. Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е. Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 2 // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15.
64. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1980. 448 с.
65. Широков Ф. В. Итоги науки и техники. Физические и математические модели нейронных сетей. Т. 1. Часть 1. Спиновые стёкла и нейронные сети. М.: ВИНТИ, 1990. С. 229.
66. Aleksandar Jeremic. Constrained Non-Linear Seismic Inversion / A Thesis Presented to the Faculty of the Department of Earth and Atmospheric Sciences University of Houston. December 2008. 75 P.
67. Arslan M. Tashmukhambetov., George E. Ioup, Juliette W. Ioup, Natalia A. Sidorovskaia, Joal J. Newcomb // Three-dimension seismic array characterization study: Experiment and modeling // J. Acoustic. Soc. Am. V. 123, N 6. June 2008. P. 4094-4108.
68. Artel'ny V.V., Bogolyubov B.N., Farfel V.A., Richards R.T., Virovlyansky A.L. Results of development, numerical modeling and field tests of new low-frequency piezoceramic sources / Proc. Inst. of Acoustics Conf. "Sonar Transducers and Numerical Modeling in Underwater Acoustics". Teddington, UK. 2005. P. 344–348.
69. Askeland B., Ruud B.O., Hobak H., Mjelde R. A seismic field test with a low-level acoustic combustion source and pseudo-noise codes // J. Applied Geophysics. 2008. V. 22. № 9. P. 1224-1236.
70. Borodina E.L., Petukhov Yu.V. Restoration of the bottom characteristics by the interference structure of the wide-band sound // Acoust. Lett. 1996. V. 19. № 8. P. 159.

71. Claerbout J. F., Muir F. Robust modeling of erratic data // *Geophysics*. 1973. V.38. P.826–844.
72. Frederick A.B. Observations on attenuation and shear-wave velocity in fine-grained, marine sediments // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. V. 101. № 6. P. 3385–3397.
73. G. Nadu. Classification Algorithms in Pattern Recognition // *IEEE Trans. On Audio and Speech Processing*. D.F. Gingras and P. Gerstoft. Inversion for geometric and geoacoustic parameters in shallow water: Experimental results. SAACLANT Undersea Research Centre, Report, December 1994. 34 P.
74. Gordon J., Gillespie D., Potter J., Frantzis A., Simmonds M.P., Swift R., Thompson D. A review of the effects of seismic surveys on marine mammals // *Marine Tech. Soc. J.* 2003. V. 37, N. 4. P. 16-34.
75. Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Ontario: McMaster University Hat Shop, 1982. 346 p.
76. Ivakin A.N. // *Boundary Influences in High Frequency Shallow Water Acoustics*. N.G. Pace and P. Blondel (Eds), University of Bath, UK, 2008. pp.185-192.
77. Jackson D.R., Odom R.I., Boyd M.L., Ivakin A.N. A geoacoustic bottom interaction model (GABIM) // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2010. V. 35, N 3. P. 603-617.
78. Jiang Y., Chapman N.R., De Ferrari H.A. Geoacoustic inversion of broadband data by matched beam processing // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119. № 6. P. 3707-3716.
79. Jianyong Bai, David Yingst. Synchronous inversion of speed and density in time area using an inversion method taking into account the full form of an impulse // *84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. 2014. pp. 962–966.
80. Khobotov A., Khilko A., Yakhno V. Analysis of advantages of neuron-like systems in the procedure of signal comparisonmeasure calculation // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. 2008. N. 5. P. 892–898.
81. Koch R.A., Knobles D.P. Geoacoustic inversion with ships as sources // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. V. 117. №2. P. 626.
82. Madsen P.T., Johnson M., Miller P.J.O. Soto N.A., Lynch J., Tyack P. Quantitative measures of air-gun pulses recorded on sperm whales (*Physeter macrocephalus*) using acoustic tags during controlled exposure experiments // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 120. P. 2366.
83. Munk W., Worcester P., and Wunsch C. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge University Press. 1995. 433p.
84. Munk W., Wunsch C. *Ocean Acoustic Tomography a Scheme for Large Scale Monitoring*. // *Deep Sea Research*. 1979. V. 26A. P. 123 – 161.
85. Nadu G. Classification algorithms in pattern recognition // *IEEE Trans. Audio Electroac.* 1968. V. AO-16. № 2. P. 345.

86. Oldenburg D.W., Sheuer T., Levy S. Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms // *Geophysics*. 1983. V. 48. P. 1318—1337.
87. Rice J.K., White J.S. Norms for smoothing and estimation // *SIAM Rev.* 1964. № 6. P. 243-256.
88. Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. V. 134. P. 21–44.
89. Siderius M., Nielsen P.L., Gerstoft P. Performance comparison between vertical and horizontal arrays for geoacoustic inversion // *IEEE J. Ocean. Eng.* 2003. V. 28. P. 424–431.
90. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // *IEEE Trans. Antenn. Prop.* 1986. V. 34. № 3. P. 276–280.
91. Tashmukhambetov A.M., Ioup G.E., Ioup J.W. et al. Three-dimension seismic array characterization study: Experiment and modeling // *J. Acoustic. Soc. Am.* V. 123. № 6. June 2008. P. 4094–4108.
92. Yang, C., Yates T. Geo-acoustic inversion of bottom reflection coefficients and sound speed profiles in shallow water // *IEEE J. Ocean. Eng.* 1996. V. 21. P. 367–376.
93. Yung T.C., Yoo K., Fialkovski L.T. Subbottom profiling using a ship towed line array and geoacoustic inversion // *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. V. 122. № 6. P. 3338–3352.
94. Zhou J.X., Zhang X.Z., Knobles D.P. Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 125. № 5. P. 2847.
95. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Хилько А.И. Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. №2. С.227-236.
96. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна с использованием широкополосных сигналов // *Океанология*. 2013. Т. 53. №6. С.843-850.
97. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Лазарев В.А., Малеханов А.И., Петухов Ю.В., Романова В.И., Хилько А.И. Реконструкция параметров осадочных слоев морского дна мелкого моря с использованием широкополосных сейсмоакустических источников моря // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59. №3. С.354-362.
98. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Романова В.И. Использование нейросетевых структур свободной динамики с контекстно-зависимыми параметрами для наблюдения в неоднородных нестационарных средах // *Известия вузов. Радиофизика*. 2013. Т. LVI. №2. С. 104-124.

99. Калинина В.И., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентные методы сейсмоакустического зондирования морского дна // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 81-88

100. Калинина В.И., Смирнов И.П., Малеханов А.И., Хилько А.И. Когерентная морская сейсмоакустика: новые подходы к реконструкции структуры донных слоев в шельфовых акваториях // Известия РАН. Серия Физическая. 2017. Т. 81, № 8, С. 1020–1027.

101. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И. Оптимизация алгоритмов решения обратной задачи при реконструкции геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами // Ученые записки Физического факультета Московского университета. 2017. №5. С. 1750131

102. Уваров В.В., Калинина В.И., Хилько А.А., Курин В.В., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое зондирование модели слоистого морского дна в лабораторных условиях // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. LX, №. 10 С. 922-934

103. Смирнов И.П., Калинина В.И., Хилько А.И. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. I Решающие правила // Акустический журнал. 2018. Том 64. № 1. С. 46–55

104. Смирнов И.П., Калинина В.И., Хилько А.И. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. II. Анализ робастности // Акустический журнал. 2018. Том 64. №. 2. С. 207–216

105. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И., Курин В.В., Хилько А.А. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. III. Накопление сигналов и подавление шумов // Акустический журнал. 2019. Том 65. №. 1. С. 10-21

106. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И. Экспериментальные исследования возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными низкочастотными импульсами // В кн. Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей. – М.: Научный мир. 2010. С. 300-314.

107. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И. Исследование особенностей акустического зондирования морского дна когерентными низкочастотными импульсами // Труды XII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» совмещенные с XXI сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2009. С.288-292.

108. Романова В.И., Мерклин Л.Р., Хилько А.И., Малеханов А.И., Лазарев В.А., Стромков А.А. Экспериментальное исследование эффективности сейсмоакустического зондирования морского дна в зависимости от спектральных и статистических характеристик

шумов и помех // Труды XXII сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. М.: РАО. 2010. С. 301-305.

109. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Коваленко В.В., Хилько А.И. Анализ особенностей формирования и экспериментальная оценка когерентности отраженных от морского дна сейсмоакустических сигналов // Труды XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2011. С. 358-361.

110. Коваленко В.В., Хилько А.И., Романова В.И. Описание данных, получаемых от пространственно распределенных акустических сенсоров, моделью тренда с ошибкой // Труды XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2011. С. 346–249.

111. Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Лазарев В.А., Романова В.И., Хилько А.И. Особенности формирования сигналов, реверберационных помех и шумов при когерентном сейсмоакустическом зондировании морского дна // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М.: ГЕОС. 2011. С. 350-354.

112. Коваленко В.В., Хилько А.И., Романова В.И. Адаптивное оценивание параметров движущегося источника звука по данным от акустических сенсоров // Труды Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных системах». Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. С. 93–97.

113. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Яхно В.Г., Романова В.И. Обработка сложных сигналов нейроноподобными структурами // Труды Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных системах». Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. С. 214-218.

114. Лазарев В.А., Петухов Ю.В., Романова В.И., Хилько А.И. Восстановление интегральных вдоль акустической трассы характеристик донных слоёв по тонкой структуре спектра звукового импульса // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т.2. М.: ГЕОС. 2011. С. 343-446.

115. Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Лазарев В.А., Романова В.И., Хилько А.И. Особенности формирования сигналов, реверберационных помех и шумов при когерентном сейсмоакустическом зондировании морского дна // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М.: ГЕОС. 2011. С. 350-354.

116. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Малеханов А.И., Хилько А.И., Лазарев В.А., Романова В.И. Реконструкция донных слоёв мелкого моря по частотно-временным

распределениям интенсивности сигналов пневмоакустического источника // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т.2. М.: ГЕОС. 2011. С. 334-337

117. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое зондирование морского дна // Труды XII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2011). М. 2011. Т.1. С. 113-123

118. Романова В.И., Хилько А.И. Реконструкция параметров упругого слоистого дна морского шельфа с помощью буксируемого когерентного акустического излучателя сенсоров // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2012. С. 262-265.

119. Романова В.И., Хилько А.И., Смирнов И.П. Использование модели отражения импульсов от упругого слоистого дна для реконструкции параметров слоев при буксировке когерентного акустического излучателя в мелком море // Сборник трудов XXV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т.2. М.: ГЕОС. 2012. С. 280-285.

120. Романова В.И., Хилько А.А., Хилько А.И. Регуляризация реконструкции параметров морского дна с помощью модели отражения сейсмоакустических импульсов от упругого слоистого полупространства // Труды XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXVI сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2013. С. 219-223.

121. Калинина В.И., Лазарев В.А., Уваров В.В., Хилько А.И. Исследование метода когерентного сейсмоакустического зондирования морского дна в условиях физического моделирования // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2014. СПб: Нестор-История. С. 477-480.

122. Хилько А.И., Калинина В.И. Минимизация экологического урона при сейсмоакустическом профилировании дна морского шельфа и пойм больших рек на основе использования когерентных излучателей // Сборник Трудов XIV международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» // Москва: РУДН Москва. 2015. № 4. С. 81-88

123. Калинина В.И., Хилько А.И., Мерклин Л.Р., Малеханов А.И., Лазарев В.Н. Экспериментальная оценка параметров морского дна в мелководной прибрежной акватории // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» 2016. СПб: Нестор-История. С. 74-76

124. Калинина В.И., Мерклин Л.Р., Плешаков А.Ю., Лазарев В.А., Уваров В.В., Хилько А.И. Экспериментальное измерение геоакустических характеристик дна морского шельфа // Труды XV научной школы-семинара академика Л. М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2016. С. 36-39

125. Калинина В.И., Малеханов А.И., Хилько А.И. Мерклин Л.Р. Сейсмопрофилирование и оценивание параметров дна морского шельфа при когерентном и некогерентном сейсмоакустическом зондировании // Труды V Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)». М.: Феория. 2016. С. 157-161

126. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И. Оценивание геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами // Труды V Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)». М.: Феория. 2016. С. 200-205.

127. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И. Оптимизация алгоритмов решения обратной задачи при реконструкции геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами // Труды II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества. 2017 г. Нижний Новгород: ИПФ РАН. С. 1011-1016.

128. Калинина В.И., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Смирнов И.П., Хилько А.И. Реконструкция геоакустических параметров донных слоев в морском шельфе и поймах больших рек с помощью когерентной сейсмоакустики // Сейсмические Технологии-2017. Материалы научно-практической конференции. ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова». 2017 Издательство: ООО «Издательство Полипресс». С. 167-170.

129. Уваров В.В., Калинина В.И., Хилько А.А., Курин В.В., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое зондирование модели слоистого морского дна в лабораторных условиях // Труды XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXXI сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2018. С. 158-161.

130. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И. Исследование возможностей регуляризации при когерентном сейсмоакустическом зондировании морского дна // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург. 2018. С. 365-368.