Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи

Au

Токарев Михаил Юрьевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ НА МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель – доктор технических наук Гайнанов Валерий Гарифьянович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ПРИДОННЫХ	
ОСАДКОВ	.11
§1. Геологические задачи, решаемые с использованием сейсмоакустических	
НАБЛЮДЕНИЙ НА АКВАТОРИЯХ	.11
§2. Физические предпосылки идентификации опасных геологических процессов	
И ЯВЛЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ	20
§3. Современные сейсмические методы изучения верхней части разреза	
НА АКВАТОРИЯХ	27
§4. Методы кинематического и динамического анализа сейсмических данных	
для определения упругих свойств пород	39
§5. Требования к сейсмоакустическим данным для кинематического и	
ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	48
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО	
КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ	
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	54
§1. Аппаратно-программный комплекс «Нильма»	54
§2. Усовершенствованный аппаратно-программный комплекс «Нильма-2010»	60
ГЛАВА З. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛЕВЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ	
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	64
§1. Методика многоканальных сейсмоакустических наблюдений	
С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМИ СИСТЕМАМИ	68
§2. Методика многоканальных сейсмоакустических наблюдений	
С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ	82
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ГРАФА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ	
МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	
С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ	98
§1. Контроль качества и обработка сигналов 1	02
§2. Кинематический анализ и построение сейсмических изображений1	112
§3. Подготовка данных для динамического анализа и инверсии 1	21

ГЛАВА 5. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ	
МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИ	Й
С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ	126
§1. Типизация и картирование донных осадков в проливе Великая Салма	
(Кандалакшский залив, Белое море).	126
§2. Определение упругих свойств газонасыщенных осадков в проливе	
Великая Салма (Кандалакшский залив, Белое море)	131
§3. Сейсмическое микрорайонирование. Шельф Японского моря	137
§4. Выделение зон газонасыщенных и мерзлых грунтов. Арктический шельф	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	153
СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ	154
СПИСОК ТАБЛИЦ	162
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	163

введение

Актуальность темы

сейсмоакустическое 3a более полувековую историю развития чем профилирование на акваториях показало себя как высокоинформативный и широко востребованный метод. Он находит применение как в региональных геологических исследованиях, геологическом картировании, так и в детальных инженерногеологических изысканиях. В последние годы из-за возросшего объема бурения и строительства инженерных объектов на акваториях особенно актуальным на стадии проектирования морских сооружений стало применение сейсмоакустических исследований для идентификации опасных геологических процессов и явлений в верхней части геологического разреза. Причем проектировщики требуют от геофизических исследований все более точных и детальных сведений о строении грунта, данных о структуре отложений и об их физико-механических свойствах. Анализ времен прихода отраженных волн (кинематический анализ) при возбуждении и регистрации в водной толще не позволяет судить о скоростях поперечных волн Vs в осадках, в то время как сдвиговая компонента является важной характеристикой при оценке несущей способности грунтов, предсказании развития оползневых процессов и микросейсмическом районировании. Основные виды геологических опасностей при бурении связаны с зонами аномально высокого пластового давления (АВПД), участками газонасыщенных или мерзлых пород. Качественными признаками таких зон принято считать «яркие пятна», «области осветления», участки «видимого понижения частотного состава» и т. д. Количественная оценка, или хотя бы ранжирование, может быть дана только с дополнением результатов кинематического анализа динамическим анализом данных, наиболее важным результатом которого является оценка отношения скорости распространения продольной волны к скорости поперечной (Vp/Vs). Достоверная оценка динамических атрибутов в широком диапазоне частот от первых десятков герц до первых килогерц требует совершенствования методики и техники сейсмоакустических исследований.

Естественным ограничением точности определения формы и амплитуды отражения при сейсмоакустических наблюдениях с приповерхностной системой является влияние поверхности моря на формирование зондирующего сигнала. Форма волны-спутника определяется не только заглублением источника или приемника, но и волнением моря и практически не может быть достоверно предсказана или учтена

в широком диапазоне частот. При этом амплитуда полезного зарегистрированного сигнала может увеличиваться или уменьшаться в разы, а форма изменяться от выстрела к выстрелу вследствие интерференции с частотно-зависимым отражением от поверхности воды.

Для получения более детальной и точной информации о строении придонных отложений и определения упругих характеристик грунта автор предлагает использовать многоканальные сейсмоакустические наблюдения с заглубленными приемно-излучающими системами. При буксировке источника и приемной системы на глубине, превышающей интервал исследований придонных осадков, обеспечивается отсутствие интерференции волн-спутников с целевыми отражениями, что дает возможность корректно оценить амплитуду и форму отраженных волн.

Однако при заглубленной буксировке приемно-излучающей системы, по сравнению с приповерхностной, за счет наклона косы или ее изгиба может существенно искажаться геометрия расстановки. Поэтому применение стандартных способов обработки многоканальных данных и построения временных разрезов становится затруднительным: требуется разработка специальных методов восстановления реальной геометрии лучей, определения поправок и построения разрезов. Предложенная автором методика полевых многоканальных сейсмоакустических наблюдений и обработки данных позволяет повысить разрешающую способность и детальность исследований, но что особенно важно, обеспечивает точность определения динамических параметров принимаемых отраженных волн и, как следствие, возможность использования AVO-анализа или сейсмической инверсии для определения упругих свойств отложений.

Целью данной работы является разработка технологии многоканальных сейсмоакустических исследований на мелководных (до 100 м) акваториях с заглубленной приемно-излучающей системой для определения строения и упругих свойств придонных осадков при проведении инженерно-геологических изысканий и геологических исследований верхней части геологического разреза.

Задачи, решаемые в диссертационной работе

Рассмотрение геологических и инженерных задач, решаемых с использованием сейсмоакустических методов исследований на акваториях.

Обзор и анализ существующих систем сейсмоакустических исследований с заглубленными системами, оценка их преимуществ и недостатков для решения

инженерно-геологических задач.

Проектирование и создание аппаратно-программных комплексов для многоканальных сейсмоакустических исследований на акваториях.

Разработка методики полевых наблюдений с многоканальными заглубленными приемно-излучающими системами.

Разработка методов кинематического и динамического анализа результатов исследований с заглубленными приемно-излучающими системами и выбор соответствующих приемов обработки.

Опробование и применение разработанной автором технологии многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленными системами для решения задач изучения верхней части геологического разреза и инженерногеологических изысканий в различных сейсмогеологических условиях.

Основные защищаемые положения

Для решения современных инженерно-геологических задач на мелководных акваториях, требующих не только качественных, но и достоверных количественных оценок упругих свойств придонных осадков, недостаточно проводить сейсмоакустические наблюдения только с приповерхностными системами.

Разработанный аппаратно-программный комплекс и методика полевых многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной приемноизлучающей системой позволяет регистрировать отраженные волны с качеством, достаточным для проведения кинематического и динамического анализа волнового поля, необходимого для определения структуры и упругих свойств осадков при инженерно-геологических изысканиях.

Разработанные алгоритмы и методы обработки результатов многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленными системами позволяют применять кинематический и динамический АVO-анализ для определения упругих свойств отложений.

Предлагаемая технология сейсмоакустических исследований может быть эффективно применена для решения ряда задач инженерно-геологических изысканий, таких как типизация осадков, сейсмическое микрорайонирование и выявление зон газонасыщенных грунтов, подводной мерзлоты и иных геологических опасностей в различных сейсмогеологических, технических и гидрометеорологических условиях.

Научная новизна работы

Спроектированы и созданы новые мобильные аппаратно-программные комплексы для многоканальных сейсмоакустических наблюдений с приповерхностной, заглубленной и комбинированной приемно-излучающей системой для проведения работ в частотном диапазоне 50–5000 Гц.

Впервые предложена и опробована методика многоканальных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях с заглубленными системами, позволяющая повысить вертикальную и латеральную разрешающую способность в несколько раз по сравнению с обычными приповерхностными системами и обеспечивающая необходимое качество данных для проведения динамического анализа и AVO-инверсии.

Разработаны способы обработки и анализа данных многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами, обеспечивающие решение задач картирования придонных отложений и оценку свойств придонных осадков в целях предсказания геологических опасностей.

Практическая значимость

Создание аппаратно-программных комплексов для многоканальных сейсмоакустических наблюдений позволило провести научно-исследовательские экспедиции по изучению геологического строения крупнейших озер и шельфов морей Российской Федерации.

Внедрение методики многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленными системами в практику инженерно-геологических исследований на мелководье позволило повысить детальность исследований в плане и по глубине, достоверность оценки упругих свойств осадков.

Автором показано, что дополнение сейсмостратиграфических методов интерпретации сейсмоакустических данных анализом динамических особенностей волнового поля и AVO-инверсией повышает качество определения опасных геологических процессов и явлений для морских сооружений.

Разработанные технологии многоканальных сейсмоакустических исследований строения и свойств придонных осадков успешно апробированы при проведении инженерных и геологических исследований в Черном, Балтийском, Белом, Баренцевом, Карском, Лаптевых и Охотском морях.

Разработанные методы и средства сейсмоакустических исследований

обеспечивают учебно-научную практику по морской геофизике на Белом море. По материалам данной практики были подготовлены более 30 бакалаврских и магистерских работ, многочисленные доклады на научных российских и зарубежных конференциях, публикации в журналах.

Степень достоверности результатов

Научные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные автором в предлагаемой работе, теоретически обоснованы, а также подтверждены на практике в рамках многочисленных исследований, в том числе научных экспедиций, на различных акваториях Российской Федерации.

Публикации

По теме диссертации автором опубликована 21 работа, в том числе десять статей в профессиональных журналах, входящих в список рекомендованных ВАК, две статьи в иностранных научных изданиях, 13 тезисов докладов на российских и международных конференциях, три отчета по НИР и НИОКР, четыре отчета по геолого-геофизическим изысканиям, два патента и один программный продукт.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях: XI научно-практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», Санкт-Петербург, Россия, 9–11 декабря 2015 г.; Society of Exploration Geophysicists 85th Annual Meeting, Новый Орлеан, США, 18-23 октября 2015 г.; международная конференция «Сейсмические технологии», ИФЗ РАН, Москва, Россия. 13 - 15апреля 2015 г.; научно-практическая конференция «Инженерная геофизика-2014», Геленджик, Россия, 21–25 апреля 2014 г.; III Международная молодежная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование», МГУ, Москва, Россия, 22–24 октября 2014 г.; II Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование», Москва, Россия, 28–30 октября 2013 г.; Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, Москва, Россия, 16–18 октября 2012 г.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 172 страницы текста, включая 107 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 128 наименований.

Благодарности

Автор приносит искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н. В.Г. Гайнанову, к.г.-м.н. Н.В. Шалаевой, к.г.-м.н. Л.А. Золотой и А.С. Пироговой, принимавшим участие в обсуждении, проведении расчетов и подготовке данной диссертационной работы.

Автор с глубокой благодарностью вспоминает замечательных ученых А.В. Калинина, В.В. Калинина, М.К. Иванова, В.М. Глоговского, в общении с которыми сформировались научные взгляды автора, своего коллегу и близкого друга Н.А. Кузуба, заложившего основы разрабатываемой автором технологии морских сейсмоакустических исследований с заглубленными системами, Б.Л. Пивоварова, А.Ф. Лимонова, Г.Е. Яковлева, Г.В. Маслова и других сотрудников геологического факультета МГУ, разделивших с автором интерес к морской геологии и геофизике.

Автор благодарен бывшим и настоящим преподавателям, научным сотрудникам, аспирантам и студентам отделения геофизики во главе с В.К. Хмелевским, М.Л. Владовым и А.А. Булычевым за многолетнее сотрудничество и замечательное общение.

Особую признательность автор хотел бы выразить преподавателям, научным сотрудникам и студентам, принимавшим активное участие в организации и проведении морской научно-исследовательской геолого-геофизической практики на Беломорской биостанции МГУ: А.Б. Цетлину, А.В. Старовойтову, В.А. Ефремову, Д.В. Коросту, А.Л. Марченко, Е.Н. Полудеткиной, А.Г. Рослякову, А.Е. Рыбалко, В.А. Стручкову, С.А. Тихоцкому, Я.Е. Терехиной (Губановой), А.Н. Головко, В.В. Ивановой, Р.И. Исаенкову, Д.Г. Калмыкову, А.А. Колюбакину, Г.А. Лебедевой, Д.Д. Тетюхиной, А.А. Шматкову

Автор искренне благодарен своим ближайшим коллегам П.А. Гофману, И.П. Короткову, О.А. Альмендингер, Р.Л. Певзнеру, А.Е. Харитонову, С.В. Буряку, М.А. Полубояринову, А.И. Понимаскину, сотрудникам ООО «Деко-Геофизика» за совместную деятельность по развитию методов обработки данных сейсмических наблюдений и разработку программного обеспечения RadExPro. Автор признателен сотрудникам компании «СПЛИТ» Е.А. Бирюкову, А.К. Потемка, А.М. Токареву и А.С. Звереву за сотрудничество в создании и тестовых испытаниях аппаратно-программных комплексов и методики полевых наблюдений.

Особые слова благодарности автор выражает своему учителю Л.М. Кульницкому, советы которого определили направление исследований автора, а неизменная помощь и участие в проектах помогли добиться положительных результатов.

Автор выражает глубочайшую признательность жене Наталье Шатиловой, забота и поддержка которой позволила автору реализовать свои научные интересы в сложных условиях постсоветской России.

§1. Геологические задачи, решаемые с использованием сейсмоакустических наблюдений на акваториях

К основным целям геологоразведочных работ на акваториях, включающих сейсмоакустические исследования, относят поиск и разведку полезных ископаемых, картирование донных осадков и изучение состояния дна акватории, исследование инженерно-геологических условий массива грунтов дна и выявление опасных геологических процессов и явлений (СП 11-114, 2004).

Поиск и разведка полезных ископаемых на акваториях

Если говорить о верхней части разреза (ВЧР) поддонных отложений акваторий, к полезным ископаемым можно в первую очередь отнести песок и гравий как основное природное сырье для строительства, а также сапропели, ракуши, россыпи золота, олова и прочие полезные ископаемые, распространенные в погребенных речных долинах. С точки зрения сейсморазведки основными специфическими свойствами залегания таких приповерхностных отложений являются малая мощность (редко десятки метров), сложная форма границ геологических объектов, зачастую неоднородное строение вмещающих пород, незначительный контраст свойств по скоростям продольных волн.

Для обнаружения таких объектов по данным сейсмоакустики необходимо тщательное планирование съемки и выбор методики наблюдений в соответствии с конкретной геологической задачей, а также использование на последующих этапах работы с данными специальных методик обработки и комплексных методик интерпретации. Информативным инструментом для дифференциации, например песчаных и гравийных пластов, в комплексе с сейсмостратиграфическим анализом является анализ динамических характеристик отраженных волн на ближних и дальних выносах, а также оценка поглощения акустической энергии.

В этом случае основными требованиями к сейсмоакустическим данным являются высокое отношение сигнала к помехе, стабильное возбуждение упругих колебаний при профилировании, сохранение истинных амплитуд в процессе обработки сигнала.

Исследование инженерно-геологических условий массива грунтов дна

Верхний слой осадочной толщи, непосредственно залегающий под дном акваторий, обычно представлен неконсолидированными терригенными осадками различного гранулометрического состава: от тонкозернистых илов до песчаногравийных смесей. Эти осадки в отличие от других геологических отложений часто бывают подвижными, что необходимо учитывать при строительстве и эксплуатации инженерных объектов на таких участках. Так, например, после укладки трубопроводов под дно на 1-2 м в толщу разуплотненного и обводненного массива грунта происходит вымывание засыпок, и труба оказывается фактически подвешенной в воде, что может привести к аварийной ситуации.

Для контроля состояния во время эксплуатации таких подземных инженерных сооружений, как трубопроводы, системы коммуникаций и т. п., необходимо проводить сейсмоакустические 4D-наблюдения (в качестве четвертого измерения имеется в виду время), или, другими словами, мониторинг. Во время проведения мониторинга принципиальной становится сейсмическая пространственная разрешающая способность, зависящая от частотного состава сигнала, расстояния до объекта, качества привязки точек наблюдения и их плотности.

Выявление опасных геологических процессов при бурении и строительстве инженерных объектов на шельфе

Одним из приоритетных направлений сейсмических работ на шельфе является идентификация и характеристика геологических объектов, опасных для проведения работ по обустройству месторождения и собственно при бурении скважин. Своевременное выявление опасных геологических процессов и, соответственно, предупреждение экологических рисков позволяет сохранить рентабельность проекта разработки.

Опасные геологические явления можно определить как результат деятельности геологических процессов, возникающих в земной коре под действием различных природных или антропогенных факторов, которые имеют потенциальную возможность стать опасными и причинить вред человеку, окружающей среде или сооружениям [Kvalstad, 2007; OGP № 373-18-1, 2011]. Существует более короткое определение потенциальной геологической опасности. И по мнению ряда авторов [Миронюк, 2014], это – «угроза повреждения или разрушения экосистем, инженерных и нефтегазопромысловых сооружений вследствие воздействия на них

компонентов геологической среды».

На рисунке 1.1 схематически показаны различные виды опасных геологических явлений на акваториях [Vanneste, 2010].



Рис. 1.1. Опасные геологические явления при бурении на дне акваторий [Vanneste, 2010]

Подробная классификация геологических опасностей для условий Арктического шельфа приведена в работе Сергея Александровича Козлова [Козлов, 2005] (таблица 1.1).

Таблица 1.1.	Инженерно-геологическая	классификация	опасных і	сеологических	процессов
и явлений За	падно-Арктического шельд	ра России [Козло	в, 2005].		

Группа	Вид	Разновидность	Характер воздействия на инженерные сооружения
1. ЭНДОГЕННЫЕ,	Землетрясения	Выделяется по балль-	Повреждения нефтега-
связанные с глубин-	(быстрые пере-	ности	зопромысловых соору-
ными перемешениями	мещения горных	Выделяется по абсо-	жений, разрывы трубоп-
	пород)	лютным значениям	роводов, деформации
горных пород	Субвертикальные	перемещений	скважин
	движения земной		
	коры (медленные		Определяет интенсив-
	перемещения гор-		ность абразии берегов
	ных пород)		

Продолжение таблицы 1.1

			Характер возлействия
Группа	Вил	Разновилность	на инженерные
i py miu		T ushobildinoci b	сооружения
2 ЛИТОЛИНАМИЧЕС-	Гилролинамичес-	Размыв аккумуля-	Разрушение грунтовых
KNE	кие (связанные с	шия обвалы оползни	оснований занос заиле-
KIIL,	лвижениями морс-	мутьевые потоки	ние
связанные с придон-	ких вол)	обломочные потоки	
ными перемещениями	Гравитационные	крип – мелленное	Механические поврежле-
грунтовых масс	(связанные со	сползание неконсоли-	ния сооружений, разру-
	склоновыми про-	дированных осадков	шение оснований
	цессами)		
3. ГЕОКРИОЛОГИЧЕС-	Мерзлотные (свя-	Образование много-	Разрушение инженерных
КИЕ	занные с промерза-	летнемерзлых пород,	сооружений и грунтовых
	нием геосреды)	сезонной мерзлоты,	оснований
связанные с промерза-	Мерзлотные (свя-	термокарст	
нием или оттаиванием	занные с оттаива-	Потеря устойчивости	Разрушение инженерных
горных пород и воздейс-	нием геосреды)	грунта, растекание,	сооружений и грунтовых
твием плавучих льдов	Экзарационные	оползание	оснований
	(воздействие пла-		
	вучих льдов)	Торошение, выпахи-	Разрушение линейных
		вание	инженерных сооружений
			и их оснований
4. ФИЗИКО-ХИМИ-	Выделение и миг-	Деградация газогид-	Повреждение нефтега-
ЧЕСКИЕ и БИОХИМИ-	рация свободного	ратов, просачивание	зопромысловых сооруже-
ЧЕСКИЕ связанные с	газа	из газоносных толщ,	ний, скважин, разупроч-
		газовые фонтаны, свя-	нение оснований
содержанием газов и		занные с подводными	
биогенных веществ		вулканами, включая	
		грязевые вулканы.	
		Возникновение зон	
		аномально высокого	
		порового (пластового)	
		давления – АВПД	

Сейсмические методы применяются для идентификации всех перечисленных в таблице 1.1 типов опасностей: при сейсмическом микрорайонировании, изучении литодинамических процессов, выделении зон распространения «слабых» и мерзлых грунтов. Ниже в работе будут приведены сейсмофациальные признаки указанных геологических процессов на сейсмических записях (см. таблицу 1.2).

Особое место занимают потенциальные геологические опасности на шельфе, связанные с газонасыщенными придонными отложениями и часто приуроченными к ним зонами аномально высокого пластового (порового) давления (АВПД). Наличие свободного газа в неглубоких частях разреза может приводить к наиболее тяжелым последствиям при бурении и строительстве инженерных сооружений. Если гравитационные и литодинамические опасности достаточно успешно выявляются на сейсмических разрезах и картах по ряду сейсмофациальных признаков, то определение зон АВПД в осадках является гораздо более сложной задачей при сейсмической интерпретации.

Комплексные исследования шельфа показали, что в придонных отложениях широко распространены газонасыщенные (газоносные) осадки, а также естественные газопроявления в основном в форме газовых факелов (сипов). В обзорной работе [Миронюк, 2014] предлагается рассматривать газопроявления на акваториях как некоторую систему из следующих составляющих:

1. Газ (биогенный, термогенный и биогенно-термогенный). В осадках (породах) он находится в виде пузырьков, окруженных водой (кристаллами льда соли), в растворенном (в поровом пространстве) или в свободном виде, а также в твердом состоянии (газогидраты).

2. Газогенерирующие осадки (породы): газонасыщенные (талые и многолетнемерзлые), гидратосодержащие, угле- или соленосные.

3. Газовыделяющие структуры (часто с повышенным пластовым давлением): газовые, газоконденсатные ловушки, газогидратные толщи, газовые карманы, обширные скопления свободного газа в приповерхностных осадках под региональными флюидоупорами, в том числе под подводными реликтовыми многолетнемерзлыми породами (так называемые газовые фронты), домы (невысокие придонные купольные структуры), купола газового вспучивания.

4. Флюидоупоры: карбонатные, глинистые, галогенные, сульфатные, карбонатно-глинистые, многолетнемерзлые, гидратоносные породы.

5. Флюидопроводящие структуры (на поверхности дна):

• фокусированные: грязевые вулканы и грифоны, глиняные и солевые диапиры, покмарки, гидротермальные источники, сквозные талики в мерзлых породах;

• линейные: зоны тектонических разломов, трещины, борозды выпахивания айсбергов (плугмарки).

6. Газовые потоки:

• в осадочной толще: газовые трубы;

• в водной толще: гидроакустические аномалии – струйно-пузырьковые

(газовые факелы и их поля) и диффузные (подводные дымы).

Газонасыщенные осадки обнаружены практически во всех геоморфологических зонах морей и океанов. На шельфе наиболее часто скопления газа фиксируются в прослоях ракуши и песчаных грунтов в палеодолинах и палеоложбинах, перекрытых глинистыми грунтами. Содержится газ также в глубоководных илах абиссальных равнин. В морских осадках газовая компонента представлена в основном метаном, углекислым газом, сероводородом, кислородом, азотом.

Важнейшей особенностью газосодержащих осадков являются их сейсмические характеристики (высокое поглощение сейсмических волн, пониженные скорости продольных волн), а также пониженная плотность и неустойчивость к внешним динамическим воздействиям.

Несмотря на то что инженерно-геологические свойства морских грунтов изучены достаточно хорошо [Миронюк, 2014; Мельников, Спесивцев, 1995; Яшин и др., 1985; Тихоцкий, 2016], вопросы влияния наличия свободного газа на инженерно-геологические свойства морских отложений исследованы недостаточно, этой проблеме посвящено сравнительно небольшое число отечественных работ. В целом насыщенность грунтов газом (как в свободной и растворенной формах, так и в виде газогидратов) является фактором, ухудшающим инженерно-геологические условия [Рокос, 2009].

Исследования донных грунтов (суглинки, глины) в восточной части Печорского моря показали, что в осадках, содержащих газ, довольно резко снижается скорость продольных волн (Vp = 800-1200 м/с, в то время как в таких же осадках без признаков наличия газа Vp = 1400-1800 м/с), уменьшается степень влажности, плотность и удельное сопротивление грунта под конусом при одновременном повышении пористости, показателя текучести и сжимаемости в интервалах осадочной толщи, содержащей свободный газ. Отмечается, что на свойства осадков влияет также давление, которое создает газ в поровом пространстве [Миронюк, 2013].

По данным [Безродных и др., 2002] даже при небольшом содержании свободного газа в приповерхностных отложениях на ряде участков Северного Каспия (десятые доли процента от объема грунта) наблюдается снижение интервальной скорости *Vp* до 200–300 м/с.

Газонасыщенные, особенно песчаные, осадки крайне опасны для тяжелых морских сооружений (буровые платформы, причалы и др.). Наличие естественного избыточного порового давления определяет неустойчивость осадочных толщ

к внешним динамическим воздействиям. Возрастание порового давления в газонасыщенных песчаных линзах в период эксплуатации буровых платформ может вызвать разжижение грунтов, снижение несущей способности грунтового основания, прорыв газа к поверхности дна (по направлению градиента давления). Последнее сопровождается образованием воронок или участков проседания морского дна, что в конечном счете приводит к потере устойчивости и разрушению сооружений [Миронюк, 2012].

Изыскания на шельфе и континентальном склоне Черного моря показали [Ионов и др., 2012], что глинистые илы характеризуются следующими средними показателями: влажность – 56,9%, плотность (р) – 1,63 г/см³, коэффициент пористости – 1,59. Эти же грунты, но газонасыщенные, характеризуются аномально высокими значениями влажности – 108,2%, низкими значениями плотности – 1,41 г/см³, высоким коэффициентом пористости – 2,97 и низким сопротивлением недренированному сдвигу – 4,5 кПа (по результатам определения лабораторной крыльчаткой).

Пузырьки газа, содержащиеся в относительно крупных порах грунтов, а также растворенный в поровой воде газ влияют на реологические свойства грунтов [Калинин и др., 1964]. Высокое содержание газа в осадках может способствовать развитию подводных оползней, сообщает песчаным грунтам плывунные свойства, усиливает их склонность к разжижению. Наличие газов в грунтах повышает их химическую агрессивность.

На участках морского дна, сложенных с поверхности газонасыщенными грунтами, повышается сейсмическая балльность [Миронюк, 2014].

В работе [Миронюк, 2012] показано, что наличие газа в осадках Охотского моря сопровождается уменьшением пластовых скоростей *Vp* (около 4%). Имеются данные, что в газонасыщенных зонах происходит еще большее уменьшение скорости продольных волн *Vp* (до 14-30%) и увеличение поглощения энергии сейсмических волн в 10 и более раз [Хведчук и др., 1988].

В таблице 1.2 в самом общем виде представлены проявления вышеприведенных опасностей на сейсмических записях.

Таблица 1.2. Проявление геологических опасностей на сейсмических записях и их степень опасности [Миронюк, 2012].

Геологическое явление	Проявление в сейсмических и	Степень опасности
или процесс	акустических волновых полях	
	(основные признаки)	
Аномально	Амплитудные аномалии типа	Высокая.
газонасыщенные	«яркое пятно», смена полярности	Могут являться областями с
интервалы разреза	сигнала	повышенным поровым
Газовые скопления типа	экранирование нижележащего	давлением. Возможны
«залежь»	разреза, запаздывание прихода	аварийные ситуации при
	отражений от нижележащих	разгерметизации скважиной.
	границ, дифракционные эффекты	Могут служить триггерами
		оползневых процессов
Рассеянный газ (dessimi-	По данным профилографа	Средняя.
nated gas)	повышенные амплитуды	Может указывать на наличие
	отражений вдоль поверхности	источника газа в более
	газового фронта и ослабление	глубоких горизонтах и его
	интенсивности вплоть до	вертикальную миграцию
	исчезновения отражений ниже	
	этой поверхности. Затруднение	
	корреляции отражений и общее	
	нарушение структуры записи	
	(acousticturbidity, acousticdistur-	
	bance)	
Газовые гидраты	Наличие BSR (Bottom Simu-	Высокая – для бурения
	lated Reflector). Ослабление	скважины (в случае
	контрастности (осветление)	значительного процентного
	записи выше BSR. Признаки	содержания гидратов в
	наличия свободного газа ниже	поровом пространстве)
	BSR.	
	Данные особенности волновой	
	картины могут наблюдаться и без	
	гидратов, поэтому желательна	
	заверка специальным бурением	
Покмарки	Образуют кратерообразные	Средняя. Необходимо
-	понижения в рельефе дна,	учитывать при выборе мест
	фиксируются также по данным	установкия корей.
	гидролокации и эхолотирования.	Могут маркировать наличие
	Дифракционные эффекты	газа в более глубоких частях
		разреза. Могут содержать
		жесткие карбонатные корки
Разрывные нарушения	Смещение или резкие изгибы	Высокая, особенно в случае
	рефлекторов, вертикальные	выхода на дно или близко к
	зоны потери корреляции.	поверхности дна. Возможны
	Дифракционные эффекты.	выходы флюидов, а также
		активизация тектонической
		активности

Геологическое явление	Проявление в сейсмических и	Степень опасности
или процесс	акустических волновых полях	
	(основные признаки)	
Грязевые вулканы,	Характерная куполовидная	Высокая. Могут
глиняные диапиры	форма, несогласие с вмещающими	сопровождаться выходами
	горизонтами. Отсутствие	газа и распространением
	внутренних отражений.	газовых гидратов. Необходимо
		учитывать потоки сопочной
		брекчии.
Погребенные эрозионные	Рисунок отражений,	От низкой до высокой.
каналы	соответствующий заполнению	Опасность может быть связана
	врезов. Эрозия в подошве и часто	с наличием свободного
	выпуклая вверх кровля.	газа и жидкого флюида под
		повышенным давлением
		в песчано-алевритовом
		материале, заполняющем врезы.

Таблица 1.2 дает представление, как геологические процессы проявляются в сейсмических и акустических волновых полях, что позволяет проводить качественную сейсмофациальную интерпретацию результатов наблюдений с помощью метода одноканального непрерывного сейсмоакустического профилирования, рекомендованного сводом правил по инженерным изысканиям для строительства (СП-11 114, 2004). Результаты исследований, проведенных автором, показывают, что можно выйти за рамки качественной интерпретации и с помощью специального аппаратно-программного комплекса перейти к количественным оценкам свойств данных геологических объектов.

На основании перспективных планов Министерства природных ресурсов и экологии РФ ведется активное освоение шельфа, в том числе Арктического. В связи с этим существует возрастающая потребность в решении геологических и инженерногеологических задач по изучению строения и свойств придонных морских осадков. При использовании инженерного бурения (прямого метода) исследователь получает информацию о свойствах верхней части разреза локально (точечно), поэтому очень важно развивать методику количественной оценки свойств осадков по данным дистанционных геофизических наблюдений, которые обеспечивают изучение верхней части разреза по площади. Среди таких методов самым многообещающим возможностей количественной С точки зрения интерпретации являются многоканальные сейсмоакустические наблюдения, в теории позволяющие получать

информацию об эффективных скоростях Р- и S-волн, плотности и поглощении в среде, связанных с инженерно-геологическими свойствами грунтов, такими как пористость, проницаемость, модуль сдвига и др. [Rechtien, 1996].

Таким образом, автор считает, что для перехода от качественного анализа высоко- и сверхвысокоразрешающих сейсмоакустических данных к количественному необходимо обеспечить новое качество натурных наблюдений, а именно повысить временную и пространственную разрешающую способность метода МОВ ОГТ, улучшить соотношение сигнал/шум, перейти к двумерным или, что более предпочтительно, к трехмерным сейсмоакустическим наблюдениям [Шматков, Токарев, 2014; Шматков и др., 2015].

§2. Физические предпосылки идентификации опасных геологических процессов и явлений в верхней части геологического разреза по сейсмическим данным

Как уже было указано в предыдущем параграфе, наиболее важной и сложной задачей при интерпретации сейсмических данных с целью выявления опасных геологических процессов является идентификация зон распространения газонасыщенных осадков и зон аномально высокого порового (пластового) давления.

Газ может присутствовать в осадках в двух формах: растворенным в воде или в свободном виде. При моделировании упругих свойств флюидонасыщенных осадков применяются различные петрофизические модели, при этом наличие газа можно задавать двумя способами [Dvorkin et al., 1999]. В первом случае предполагается, что в каждой поре (пустоте) присутствуют и газ, и вода в некоторой пропорции. Такое распределение газа принято называть однородным. Во втором случае – неоднородного, или лоскутного, насыщения – газ и вода находятся в разных порах или полостях, в идеальном варианте – они на 100% насыщены либо одним флюидом, либо другим. На практике остаточная вода присутствует и в так называемых сухих полостях с газом. Влияние формы газонасыщения на упругие свойства осадков было рассмотрено во многих работах и обобщено [Lee, 2004]. Обобщение некоторых экспериментальных и расчетных данных для неконсолидированных и слабоконсолидированных газонасыщенных осадков, типичных для верхней части разреза, при различных формах газонасыщения приведено на рисунках ниже (рис. 1.2, рис. 1.3). Теоретические графики скорости были рассчитаны с использованием модифицированной теории Био–Гассмана, рассмотренной в работах Ли [Lee, 2002], Дворкина [Dvorkin et al., 1999].



Рис. 1.2. Рассчитанные значения скоростей Р-и S-волн (А) и их отношения (В) в зависимости от газонасыщения (пунктир – однородного, сплошные линии – неоднородного «пятнами») в разных приближениях для неконсолидированных осадков при пористости 50% и дифференциальном давлении 1 МПа [Lee, 2004]



Рис. 1.3. Теоретические графики зависимости отношения скоростей и наблюденные значения для неконсолидированных осадков (А) с пористостью 38% при давлениях 10 и 31 МПа; для консолидированных осадков (В) с пористостью 26% при давлениях 7, 35 и 69 МПа [Lee, 2004]

Как следует из представленных рисунков, даже небольшое количество газа в порах существенно влияет на скорость продольных волн как в консолидированных, так и в неконсолидированных осадках. Скорость продольных волн особенно резко падает при равномерном насыщении даже при крайне низком содержании газа. Скорость же поперечных волн изменяется крайне незначительно и даже слабо растет с ростом содержания газа. Форма присутствия газа имеет существенное значение, что указывает на невозможность установить по значениям скорости точное содержание газа, так как вид газонасыщения обычно неизвестен. Наличие газа существенно сказывается на отношении скоростей, и, соответственно, на значениях коэффициента Пуассона, который уменьшается в газонасыщенных осадках по сравнению с водонасыщенными.

Кроме того, многочисленные лабораторные и полевые эксперименты [Best et al., 2004; Hamilton, 1972; Breitzke, 2006; Robb et al., 2006], а также теоретические оценки [Anderson, Hampton, 1980; Stoll, Batista, 1998] свидетельствуют об аномально высоком поглощении энергии упругих волн в газонасыщенных отложениях. Таким образом, основанием для прогноза газонасыщенных отложений по сейсмическим данным служит следующее:

• модуль сжатия меньше, чем у водонасыщенных осадков;

• скорость распространения продольных волн ниже, чем у водонасыщенных;

• коэффициент Пуассона (отношение скоростей Р- и S-волн) ниже;

• плотность ниже, следовательно, ниже акустическая жесткость (произведение скорости продольных волн на плотность);

• коэффициент поглощения выше.

Сочетание этих свойств дает основания полагать, что применение комплексной динамической и кинематической интерпретации сейсмических данных позволяет, как будет показано в главе 5, выделять пласты с аномальными скоростями, коэффициентом Пуассона и неупругим поглощением, что, в свою очередь, позволяет успешно решать задачу прогнозирования газонасыщенных осадков.

При гидростатическом давлении вода внутри порового пространства связана с водой в осадках. При малых скоростях осадконакопления вода будет вытесняться с такой скоростью, что будет поддерживаться гидростатическое равновесие. Однако при больших скоростях в случае относительно непроницаемых глин это равновесие не сохраняется: движение флюида приостанавливается, и поровый флюид начинает

поддерживать вышележащую толщу, что приводит к увеличению давления. Более полувека назад Терцаги [Terzaghi, 1943] описал ситуацию очень ясно: вертикальное геостатическое давление является суммой двух составляющих – порового давления и вертикального эффективного давления, действующего на скелет породы. Эффективное давление растет линейно с глубиной со скоростью примерно как 0.54 psi/ft (давление в фунтах на кв. дюйм на фут), пока поровое давление остается повышенным. Понижение эффективного давления вызывает уменьшение скорости упругих волн и плотности пород.

Если поровое давление сравняется с геостатическим, тогда эффективное давление станет равным нулю, произойдет потеря свойств покрышки за счет образования открытых трещин (трещин растяжения). Это явление называют гидроразрывом.

Аномально высоким давлением (overpressure) флюида принято считать такое давление, которое превышает более чем на 20% нормальное (гидростатическое). Основным признаком месторождения с аномально высоким пластовым давлением (АВПД) является значительное изменение градиента пластового (порового) давления *η* по разрезу скважины.

Методы прогнозирования давления по сейсмическим скоростям базируются на том факте, что пласты, находящиеся под высоким поровым давлением, обладают следующими свойствами при сравнении их с пластами, находящимися под нормальным давлением на той же глубине [Dutta, 2002]:

- их пористость больше;
- упругие модули меньше;
- эффективное (разностное) давление меньше;
- скорости меньше;
- коэффициент Пуассона выше.

Каждый из этих признаков влияет на интервальные скорости и динамические характеристики отраженных волн, которые являются ключом к определению давления с помощью сейсморазведки.

Связь скорости и эффективного давления

Все сейсмические методы прогноза давления явно или косвенно используют корреляционные связи между эффективным давлением и скоростью в породе, зависимости эффективного давления от пористости. С развитием многокомпонентных

сейсмических наблюдений интерес вызывает и связь коэффициента Пуассона с эффективным давлением.

В работе [Dvorkin, 2001] исследуется характер изменения коэффициента Пуассона за счет различных эффектов: изменения газонасыщения и изменения порового давления. В работе показано, что в газонасыщенных породах коэффициент Пуассона уменьшается с увеличением порового давления, а в водонасыщенных либо слабо меняется, либо даже возрастает. На рисунке 1.4 приведены зависимости скорости



Рис. 1.4. Зависимость скорости продольных волн от дифференциального давления (а). Те же данные изображены относительно порового давления (b) [Dvorkin, 2001] продольных волн от дифференциального давления, полученные при ультразвуковых измерениях в лаборатории на образцах сухих песчаников без глины с пористостью 18%, при геостатическом давлении 35 МПа. Видно, что скорость продольных волн *Vp* растет быстрее скорости поперечных волн *Vs* при небольшом росте эффективного давления.

В той же работе приведены диагностические кроссплоты параметров

сейсмической инверсии, которые могут быть полезны в смысле выделения зон повышенного порового давления. Они основаны на лабораторных экспериментах с неконсолидированными песками из Северного моря. Различные области на кроссплоте «акустический импеданс/сдвиговый импеданс» соответствуют различным поровым давлениям и типам флюида, позволяя разделить эти эффекты (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Схематическое изображение смещения точек на кроссплотах акустического импеданса/сдвигового импеданса при увеличении порового давления для различных типов флюида [Dvorkin, 2001]

В течение многих лет оценки порового давления опирались на эмпирические связи между давлением и скоростью продольных волн (интервальными временами). Позже Хаффман и Кастагна [Huffman, Castagna, 2001] и Прасад [Prasad, 2002] показали, что соотношение скоростей продольных и поперечных волн может служить индикатором повышенного порового давления. Слабое место их анализа – недостаточность лабораторных данных, подходящих для того, чтобы откалибровать измеренные отношения скоростей с давлениями «insitu", особенно для неконсолидированных осадков при малых эффективных давлениях. В работе [Zimmer et al., 2002] были выполнены высококачественные акустические измерения скоростей продольных и поперечных волн в неконсолидированных водонасыщенных осадках при низких эффективных давлениях в диапазоне от 100 кПа до 20 МПа в килогерцевом частотном диапазоне. На рисунке 1.6 показана зависимость скорости продольных волн от эффективного давления для всех образцов, использованных в работе [Zimmer et al., 2002], и подобных измерений на чистых песках, выполненных другими авторами. На рисунке 1.7 представлена аналогичная зависимость для скорости поперечных волн.



Рис. 1.6. Зависимость скорости Р-волн от эффективного давления Ре для всех типов образцов и для подобных измерений в работах [Zimmer et al., 2002]



Рис. 1.7. Зависимость скорости S-волн от эффективного давления для всех образцов и для подобных измерений в работах [Zimmer et al., 2002]

Как видно из рисунков, кривые отношения скоростей резко реагирует на уменьшение эффективного давления (рост порового) для широкого диапазона пористостей. По мере того как эффективное давление становится малым, скорость Р-волн стремится к скорости в жидкости, а скорость поперечных волн – к нулю. Следовательно, если осадки находятся в переходном состоянии от несущих до

суспензии, отношение скорости продольных волн к скорости поперечных должно с ростом порового давления «взлетать» почти экспоненциально.



Рис. 1.8. Зависимость Vp/Vs от эффективного давления [Zimmer et al., 2002]

Рисунок 1.8 иллюстрирует эту ситуацию: Vp/Vs для водонасыщенных осадков могут достигать значений больше 10 (коэффициент Пуассона 0.49), если эффективное давление становится меньше 0.2 МПа. Этот результат имеет большое значение для выявления опасных зон АВПД. Подобные результаты получены также [Huffman and Castagna, 2001]. Однако наблюдается довольно большой разброс значений Vp/Vs при малых давлениях, т. е., например, при измеренном значении Vp/Vs равном пяти, диапазон эффективных давлений составит 0.2–2 МПа.

Таким образом, главным сейсмическим признаком водонасыщенных зон с АВПД является аномально высокое значение отношения скоростей *Vp/Vs* и повышенный коэффициент Пуассона. Газонасыщенные зоны с АВПД могут быть выявлены по тем же признакам, что и обычные газонасыщенные зоны, но еще более ярко выраженным.

Итак, специфические упругие свойства (отношение Vp/Vs, плотность р) газонасыщенных осадков и осадков, характеризующихся аномальным поровым давлением, являются предпосылками к успешному применению сейсмических исследований в различных частотных диапазонах с последующей интерпретацией кинематических и динамических особенностей волнового поля для целей выявления геологических опасностей. Отсюда возникает необходимость разработки технологии сейсмоакустических исследований, которая позволит осуществить переход от качественной интерпретации сейсмоакустических данных к количественной оценке скоростей P- и S-волн, плотностей и поглощающих свойств придонных осадков.

§3. Современные сейсмические методы изучения верхней части разреза на акваториях

Принятое в настоящее время деление сейсморазведки на разведочную, высокоразрешающую, сверхвысокоразрешающую и ультравысокоразрешающую связано с различием глубинности и разрешающей способности методов для решения поставленных задач. В настоящей работе будем придерживаться следующих определений, приведенных в таблице 1.3 [Thomas et al., 2012], где содержатся обобщенные сведения о частотном диапазоне и разрешающей способности всех видов сейсмических и сейсмоакустических съемок. Сейсмоакустические исследования в диапазоне частот 50–2500 Гц попадают сразу в три типа, но в основном соответствуют параметрам ССВР – сейсморазведке сверхвысокого разрешения (VHR – Very High Resolution).

Съемка	Частотный диапазон	Горизонтальная разрешающая способность	Вертикальная разрешающая способность
Нефтегазовая (exploration)	30-75 Гц	> 20 м	> 5 M
Высокоразрешающая (HR)	80–375 Гц	19–4 м	4.5-1 м
Сверхвысокоразрешающая (VHR)	375-1500 Гц	< 4 M	< 1 M
Ультравысокоразрешающая (UHR)	1.5–13 кГц	< 1 M	<25 см

Таблица 1.3. Классификация сейсморазведочных работ по [Thomas et al., 2012]

Надо заметить, что приведенные в таблице 1.3 значения разрешающей способности зависят не только от используемого частотного диапазона сейсмической съемки, но и от конфигурации установки: глубин погружения источника и приемника, выноса, длины сейсмической косы и т. д. [Missiaen, 2005].

Сейсмические исследования с приповерхностными системами

Для решения задач геологического картирования и инженерно-геологических изысканий, в том числе для оценки возможных осложнений при бурении на глубинах от 50 до100 м до требуемых 1–1.5 км [OGP № 373-18-1, 2011], могут быть использованы данные разведочной трехмерной сейсморазведки (exploration). Ее разрешающая способность по вертикали составляет 5–10 м и обычно недостаточна для уверенного выделения различных типов геологических опасностей. Тем не

менее трехмерная сейсморазведка остается вне конкуренции при решении задач локализации геологических объектов в пространстве.

Высокоразрешающая сейсморазведка (HR – High Resolution) в рамках инженерно-геологических изысканий служит средством детального изучения и предсказания опасностей в верхней части геологического разреза при бурении на шельфе. При наблюдениях с плавучими косами высокоразрешающая сейсморазведка характеризуется горизонтальной разрешающей способностью порядка 3–5 м и вертикальной – 1–5 м. Методика высокоразрешающей 2D-сейсморазведки для нужд нефтяной индустрии оставалась неизменной на протяжении нескольких лет. Стандартные методические параметры такой съемки следующие: частотный диапазон 75–350 Гц, сейсмическая коса с активной длиной 1200 м, интервал между группами приемников 6.25 м и шаг между профилями 100–500 м [Arthur et al., 2011].

Целью сверхвысокоразрешающей сейсморазведки (VHRHR – Very High Resolution) является достижение разрешения по горизонтали порядка 1–2 м и десятков сантиметров по вертикали. Именно этим требованиям отвечала методика непрерывного сейсмоакустического профилирования НСП, или НСАП, разработанная на кафедре сейсмометрии и геоакустики МГУ им. М.В. Ломоносова [Калинин и др., 1983]. Впервые подобное сейсмоакустическое профилирование на акваториях на практике было реализовано в США в 50-х годах XX века [Beckmann et al., 1959; Ewing and Tirey, 1961; Edgerton, 1963; Edgerton and Hayward, 1964]. Это было одноканальное профилирование наподобие съемки с эхолотом. Тем не менее для обеспечения проникновения акустических волн в отложения на дне использовались более мощные и низкочастотные источники: бумер, спаркер, пневматическая пушка. Тогда же для приема колебаний начали использовать буксируемую пьезокосу, которая обеспечивала большую помехоустойчивость на этих частотах.

В России аппаратура и методика сейсмоакустического профилирования на акваториях начала разрабатываться чуть позже в лаборатории сейсмоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [Калинин и др., 1964– 1983; Владов и др., 2004]. Мобильная экономически эффективная методика НСП благодаря своей наглядности и оперативности получения результатов повсеместно использовалась и продолжает использоваться для решения широкого круга геологических и инженерных задач на акваториях. Совершенствование метода шло главным образом по пути улучшения технологичности источников и приемных систем, регистрирующей аппаратуры [Калинин, 1974–1976; Калинин и др., 1983]. Постепенно происходило внедрение цифровой регистрации в практику полевых работ [Калинин и др., 1987; Калинин и др., 1989; Калинин и др., 1992; Кульницкий и др., 2001].

Автор присоединился к работам группы проф. А.В. Калинина на этапе внедрения цифровой обработки сейсмоакустических данных в 80-х годах прошлого столетия. Сначала задача состояла во внедрении методов оптимальной цифровой фильтрации для обработки данных одноканального сейсмоакустического профилирования на акваториях с целью повышения глубинности и разрешающей способности метода [Калинин и др., 1987; Калинин и др., 1992], затем была создана первая полнофункциональная система математической обработки данных НСП, получившая впоследствии название RadExPro.

Прогресс в развитии регистрирующих и обрабатывающих систем создал условия для реализации более сложных систем наблюдений при сейсмоакустических исследованиях на акваториях. Еще в 1988 г. компанией «АМИГЭ» выполнялись работы по методике многоканального цифрового сейсмоакустического профилирования (МЦСАП), разработанной в НПО «Союзморинжгеология» [Бондарев и др., 1988]. На непрерывном одноканальном профиле периодически со средней плотностью 10 на пог. км производились многоканальные зондирования. Зондирования представляют собой блоки из девяти последовательных сейсмограмм общего пункта возбуждения. Применялась 12-канальная коса с базой приема 264 м, вынос источника от первого канала составлял 18 м; глубина буксирования составляла около 1,5 м. Частота регистрируемых частот – 140–560 Гц, шаг дискретизации – 0,5 мс. При излучении использовался электроискровой многоэлектродный излучатель с электрической энергией в импульсе 2 кДж и частотой возбуждения 0,5 Гц. Достигнутая глубинность составила около 100 м. Результатом обработки являлись временные разрезы по профилям, двуслойные скоростные модели среды и прогноз физико-механических свойств грунтов по этим моделям [Длугач и др., 2007].

В 2003 году в компании «Деко-геофизика» под руководством автора был спроектирован и создан первый в России аппаратно-программный комплекс «Нильма» (приемно-излучающее регистрирующее устройство для дистанционного определения механических свойств донных и поддонных осадков (варианты): патент № 53458). Данный комплекс использовался для решения практических задач сверхвысокоразрешающей сейсморазведки [Гайнанов и др., 2006-2009]. Кроме того,

с данным комплексом был проведен большой объем одновременных наблюдений с использованием источников и приемных систем, работающих в разных частотных диапазонах [Безродных и др., 2002; Гайнанов и др., 2007-2010].

Следует отметить, что сейсмоакустическое профилирование изначально развивается как значительно более высокоразрешающий метод сейсморазведки: здесь применяются гораздо более высокочастотные источники колебаний, буксировка источников и приемников осуществляется на значительно меньших глубинах, чем в обычной сейсморазведке. Это требует существенно более точного задания и поддержания таких параметров системы, как глубина буксировки источников и расстояний между ними. С переходом к многоканальным наблюдениям эти требования ужесточаются.

Самая распространенная методика сейсмических исследований на акватории предполагает, что сейсмическая коса и источник буксируются на глубине порядка $\lambda/4$, где λ – преобладающая длина волны возбуждаемого импульса. В настоящей работе будем называть эту методику традиционной, приповерхностной или методикой оптимального заглубления. Обычно данная методика удовлетворяет требованиям глубинности и разрешающей способности при проведении сейсмоакустических наблюдений на любой глубине воды.

Однако если требуется обеспечить более высокое разрешение при относительно небольшой глубинности исследований, а также стабильность возбуждения и приема сейсмических волн, то предпочтительнее проводить сейсмоакустические наблюдения с приемно-излучающими системами, буксируемыми на большой глубине в толще воды. В связи с этим, а также по некоторым излагаемым ниже причинам автор считает перспективным применение в сейсмоакустических исследованиях на акваториях заглубленных буксируемых многоканальных систем [Tokarev et al., 2006; Tokarev et al., 2008].

Сейсмические исследования с заглубленными системами

О первых съемках с косами, буксируемыми на глубине, говорится в работах [Bryan, 1979] и [Purdy et al.,1980]. Главным результатом наблюдений, описываемых в данных работах, было повышение разрешающей способности сейсмических данных при изучении шероховатых отражающих границ на сейсмических данных. В работе [Purdy, 1986] описывается использование системы глубинной буксировки для повышения точности определения сейсмических скоростей в осадках. Об использовании одноканальных кос длиной 15–30 м, буксируемых на глубине, говорится в работе [Bowen, 1984].

В наши дни наиболее широко распространенными сейсмическими системами сбора данных подобного типа являются, возможно, PASISAR [Savoye et al., 1995; Nouze et al., 1997] и DTAGS [Bowles et al., 1991; Wood et al., 2003; Chapman et al, 2002]. Одной из самых последних, впервые описанной в 2010 г., является разработанная в IFREMER система SYSIF [Marsset et al., 2010].

РАSISAR является гибридной системой и включает одноканальную аналоговую сейсмическую косу, буксируемую на глубине, высокоразрешенный локатор бокового обзора (170–190 кГц) и набор буксируемых на малой глубине сейсмических источников (спаркер, воздушная пушка и гидропушка).

Система DTAGS включает 48-канальную цифровую косу длиной 622 м. Коса состоит из двух секций. Первая секция (удаления 70–118 м) состоит из 24 каналов с расстоянием между каналами 2,1 м. Вторая секция (удаления 139–662 м) состоит из 24 каналов с расстоянием между каналами 21 м. Источник типа акустический резонатор Гельмгольца используется для генерирования свип-сигнала в диапазоне 250–650 Гц (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Система DTAGS (deep-towed acoustic/geophysical system) [Chapman et al., 2002]

Еще одна гибридная система была разработана GEOMAR в 2001 г. [Breitzke and Bialas, 2003]. Она состоит из цифровой многоканальной сейсмической косы, буксируемой на глубине, набора источников, буксируемых на малой глубине, локатора бокового обзора и эхолота. Двухтонный углубитель используется для

обеспечения стабильности глубины буксировки. Для измерения положения источника и приемника используется специальная подсистема.

Система SYSIF разработана в двух конфигурациях: для высокоразрешающей съемки (250–1000 Гц) и для сверхвысокоразрешающей (650–2000 Гц). Источником является акустический резонатор Януса – Гельмгольца. Минусы этого источника – размеры и вес. Для работы в полосе частот 580–2200 Гц используется источник весом 90 кг, в полосе 220–1050 Гц – весом 450 кг [Marsset et al, 2010]. В качестве приемника используется пьезокоса, первым каналом которой является одиночный гидрофон, применяемый для работы с амплитудами, второй канал состоит из шести параллельно соединенных с шагом 30 см гидрофонов. Система предназначена для работ на глубокой воде. Общий вид системы приведен на рисунке 1.10.



Рис. 1.10. Система SYSIF (JH250-6000) [Marsset et al., 2010]

Наиболее распространено применение таких систем при изучении газогидратов [Chapman et al., 2002; Ker et al., 2014]. Другие примеры подобных съемок приводятся в работах [Bowles et al., 1991] и [Wood and Gettrust, 2001]. В работе [Marsset et al., 2010] заглубленная система использовалась для выделения геологических опасностей в верхней части разреза.

Рассмотрим достоинства и недостатки методики работ с заглубленной приемно-излучающей системой.

Вертикальная разрешающая способность и стабильность формы импульса

Под вертикальной разрешающей способностью понимается наименьшее расстояние между двумя поверхностями, при котором в волновом поле они выделяются как самостоятельные отражающие границы.

А.В. Калининым было показано, что при морских сейсмоакустических

наблюдениях по методике оптимального заглубления (глубина буксировки составляет $\lambda/4$) длительность зондирующего импульса увеличивается минимум в 1,5 раза за счет интерференции излучаемого сигнала с волнами-спутниками, отраженными от поверхности воды [Калинин и др., 1983]. Заглубление источника и приемной системы при сейсмоакустических исследованиях обеспечивает прежде всего избавление зондирующего импульса от интерференции со спутниками. Благодаря этому возрастает вертикальная разрешающая способность сейсмоакустических наблюдений.

Необходимо также отметить, что, в случае когда зондирующий импульс формируется в результате интерференции с отраженными от свободной поверхности волнами-спутниками, то есть в случае приповерхностной буксировки приемноизлучающей системы, его форма и динамические характеристики становятся нестабильными по профилю из-за влияния погодных условий, причем чем больше волнение моря, тем значительнее нестабильность зондирующего импульса. В случае буксировки источника акустических колебаний и приемной линии на большой глубине стабильность зондирующего импульса определяется исключительно стабильностью возбуждения самого источника и не зависит от волнения моря. Более того, при такой методике сигнал прямой волны можно использовать для оценки стабильности работы источника.

Таким образом, заглубление плавучей сейсмоакустической приемноизлучающей системы обеспечивает лучшие, по сравнению с приповерхностной буксировкой, условия по стабильности акустического излучения и вертикальной разрешающей способности регистрируемого волнового поля.

Это, в свою очередь, создает благоприятные условия для использования динамического анализа отраженных волн (анализ формы, амплитуды и других атрибутов сигнала) с целью количественной интерпретации регистрируемого волнового поля, а именно оценки физико-механических свойств изучаемых придонных отложений.

Пространственная разрешающая способность

Под пространственной (латеральной) разрешающей способностью понимается то минимальное расстояние между двумя структурными особенностями отражающей границы, при которой эти особенности могут быть выделены в процессе обработки данных [Калинин и др., 1983].

Теоретически горизонтальное разрешение определяется шириной зоны Френеля, диаметр которой зависит от заглубления источника и приемника, глубины отражающей границы, частоты сигнала и скорости распространения сейсмических волн в среде. Для разрешения в пространстве двух соседних структурных особенностей необходимо, чтобы они находились на расстоянии, превышающем размер первой зоны Френеля, то есть чтобы соблюдалось условие:

$$L \ge 2\sqrt{\lambda H_0/4} = \sqrt{\lambda H_0} , \qquad (1.1)$$

где *L* – расстояние между двумя соседними поднятиями, *H*₀ – эхоглубина отражающей границы, λ – длина волны [Калинин и др., 1983].

Существует несколько методов для повышения горизонтальной разрешающей способности. Повышение горизонтального разрешения в процессе обработки данных в первую очередь выполняется при помощи миграционных преобразований, позволяющих уменьшить зону Френеля или, другими словами, увеличить разрешение по латерали до величины соразмерной с длиной волны [Lindsey, 1989]. Стоит отметить, что в случае применения процедуры миграции на данных двумерных наблюдений повысить разрешение возможно только вдоль профиля [Bacon et al., 2007]. Следовательно, мигрированные двумерные данные имеют горизонтальное разрешение в направлении, перпендикулярном линии взрыва, равное разрешению немигрированных данных. Одно из главных преимуществ трехмерных сейсмических данных заключается в возможности осуществлять трехмерную миграцию, в результате которой сокращается зона Френеля как по линии профиля («инлайн»), так и в направлении, перпендикулярном профилю («кросслайн»).

Другим методом повышения латеральной разрешающей способности является группирование приемных гидрофонов на этапе сбора данных. Данный метод в случае двумерных наблюдений также позволяет повысить разрешение только вдоль профиля.

Таким образом, при двумерных наблюдениях с учетом выражения (1.1) горизонтальное разрешение в пространстве может быть повышено путем погружения приемной косы и источника к поверхности дна. Первые попытки применения заглубленных систем были осуществлены как раз с целью повышения пространственной разрешающей способности [Bowen, 1984]. Основные трудности тогда возникли с созданием заглубленного источника, который обеспечивал бы возбуждения акустических колебаний в диапазоне частот 15–150 Гц. Это привело к созданию так называемых гибридных систем, в которых использовались

поверхностные источники, например пневмоисточники (airguns) и заглубленные приемники. На рисунке 1.11 проиллюстрировано, что использование гибридных заглубленных систем приводит к значительному уменьшению диаметра зоны Френеля.



Рис. 1.11. Диаметр зоны Френеля при частоте 20 Гц для различной геометрии системы: а) источник и приемник на поверхности; б) источник на поверхности, приемник на расстоянии 100 м от уровня дна; в) источник и приемник находятся на расстоянии 100 м от уровня дна [Bowen, 1984]

Несмотря на все достоинства использования заглубленных систем, при сейсмоакустических исследованиях возникает множество трудностей как в их технической реализации, так и в обработке полученных данных. Как правило, возникают следующие проблемы: сложная геометрия наблюдений, сдвиг общей глубинной «точки» (ОГТ) отражения относительно условной срединной «точки» отражения (ОСТ) при увеличении глубины в системах с различным заглублением источника и приемников, интерференция волн-спутников с однократно отраженными волнами от более глубоких границ.

Изменение скорости корабля и морские течения приводят к изменениям в геометрии системы наблюдений. Это, в свою очередь, ведет к ошибкам в определении времен прихода отражений от морского дна и всех поддонных границ, что может сделать интерпретацию данных затруднительной. Для коррекции геометрии первоначально необходимо определить положение в пространстве каждого приемника в сейсмической косе, источника и глубину моря в каждый момент времени измерения. Часто эти параметры геометрии наблюдений измеряются непосредственно в ходе проведения сейсмоакустических работ. На ранних этапах исследования, например в работе [Lopes et al., 1996] заглубление сейсмической косы определялось по сенсорам давления, а глубина моря определялась по данным эхолота (3,5 кГц) и по данным антенны-сонара бокового обзора, горизонтальное расстояние между источником и приемником рассчитывалось исходя из глубины приемника и времени прихода прямой волны.

В то же время геометрия заглубленной расстановки может быть определена по временам прихода прямой волны, а также волн, отраженных от дна и свободной поверхности, при известных глубинах воды и в предположении плоского дна. Как было показано [Purdy, 1986], четыре времени пробега волны, определенные по прямой волне, волне, отраженной от поверхности воды, волне, отраженной от дна, и волне-спутнику, однозначно определяют время выстрела и глубину источника.

Суть коррекции геометрии заключается в приведении данных ко времени с нулевым выносом в одноканальном варианте или к заданному уровню приведения при многоканальных исследованиях. В работе [Lopes et al., 1996] приведение к заданному уровню данных заглубленной системы осуществлялось посредством ввода в каждую трассу временного сдвига, рассчитанного с учетом времени отраженной от морского дна волны и глубины моря в точке отражения (рис. 1.12). Положение точки отражения рассчитывалось исходя из данных о глубине приемника (D), положении приемника вдоль профиля (X), высоте приемника над морским дном (H) и горизонтальном расстоянии между источником и приемником (S).



Рис. 1.12. Лучевая схема пробега волны, отраженной от морского дна. Пунктирная кривая – глубина моря [Lopes et al., 1996]

Расчет высоты приемника относительно морского дна и положения точки отражения производился итеративно посредством минимизации функционала невязки между наблюденным и модельным временем прихода отраженной волны. Стоит отметить, что предложенный подход позволяет учесть эффект смещения точки отражения при различном заглублении источника и приемника, но не позволяет учесть эффект сейсмического сноса из-за неровностей отражающих границ.


Рис. 1.13. Потрассовая коррекция геометрии с использованием времени прихода волны, отраженной от поверхности моря [Walia and Hannay, 1999]

В работе [Walia and Hannay, 1999] временной сдвиг для приведения к единому уровню данных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной расстановкой рассчитывается с учетом времени прихода волны, отраженной от свободной поверхности. На рисунке 1.13 показана лучевая схема волн, по временам прихода которых предлагается производить расчет статических поправок.

Если глубина источника *d_s* известна, то глубина приемника *d_r* определяется по следующей формуле (1.2):

$$d_r = \frac{L^2 - X^2}{4d_s}, \ L = AB + BC = V t_1, \quad X = AC = V t_0 \quad , \tag{1.2}$$

где t_0 – время прихода прямой волны, t_1 – время прихода волны, отраженной от поверхности моря, X – расстояние от источника до приемника; определяется по времени прихода прямой волны с учетом скорости в воде V.



Рис. 1.14. Смещение «точки» отражения при увеличении глубины отражающей границы

Помимо приведения данных к выбранному уровню, необходимо также рассчитывать положение «точки» отражения, так как при наблюдениях с различным заглублением источника и приемников она смещается относительно условной общей срединной точки (ОСТ) с глубиной отражающей границы (рис. 1.14).

Отличительной особенностью сейсмоакустических данных, полученных при помощи заглубленной приемно-излучающей расстановки, для которой не выполняется условие «оптимального согласования», является отсутствие интерференции прямой волны и однократно отраженных волн от целевых горизонтов с волнами-спутниками, отраженными от свободной поверхности. При проведении исследований на большой глубине с источником и приемной сейсмической косой вблизи поверхности дна волны-спутники приходят значительно позже волн, однократно отраженных от границ в верхней части разреза (рис. 1.15). Однако стоит отметить, что в условиях предельного мелководья подобрать заглубление сейсмоакустической системы, обеспечивающее отсутствие интерференции волн-спутников с отражениями от излучаемых придонных рефлекторов, часто не представляется возможным.



Рис. 1.15. Лучевая схема распространения волн-спутников при разном заглублении приемноизлучающей системы

Анализ современного состояния сейсмических методов изучения верхней части разреза на акваториях показал, что переход от одноканального профилирования к многоканальным наблюдениям существенно расширил возможности

приповерхностных сейсмоакустических исследований. Однако существует ряд задач, для решения которых требуется обеспечить более высокую разрешающую способность исследований и стабильность условий возбуждения и приема.

Рассмотрение результатов использования заглубленных установок для работы в океане показало, что сейсмические исследования с заглубленными системами имеют ряд преимуществ перед профилированием с поверхностно-согласованными системами: более высокая разрешающая способность как по вертикали, так и в пространстве, высокая стабильность и возможность регистрации зондирующего импульса, высокое отношение сигнала к помехе. Несмотря на недостатки, связанные со сложностью определения геометрии наблюдений, сдвигом точки отражения в зависимости от глубины границы, наложением волн-спутников на отраженные волны от более глубоких границ, рассмотренная методика является, по мнению автора, перспективной для получения данных более высокого качества.

§4. Методы кинематического и динамического анализа сейсмических данных для определения упругих свойств пород

Для разработки методик количественной интерпретации сейсмоакустических данных с целью определения упругих свойств осадков и выявления опасных геологических процессов кратко рассмотрим комплекс методов, в настоящий момент широко применяемых в нефтегазовой сейсморазведке:

• кинематический анализ для построения глубинно-скоростной модели среды и выделения скоростных неоднородностей;

• количественный динамический анализ: анализ амплитуд отраженных волн в зависимости от удаления от источника – AVO-анализ, сейсмическая инверсия (акустическая, упругая (AVO), синхронная).

Кинематический анализ

В сейсмоакустических исследованиях переход от НСП к многоканальным наблюдениям МОВ с многократным перекрытием по ОГТ позволяет использовать весь арсенал разработанных в нефтегазовой сейсморазведке средств для построения глубинно-скоростной модели среды. Специфической особенностью сейсмоакустических исследований является широкий частотный диапазон и высокая центральная частота импульса. Это требует проведения съемки с небольшим шагом наблюдений во избежание пространственного алясинга. Дополнительными особенностями при изучении верхней части разреза также являются специфические сейсмогеологические условия: высокая скоростная неоднородность и большие углы падения слоев. В таком случае предположение о плоскопараллельной среде нарушается, что, в свою очередь, приводит к ошибкам в определении пластовых скоростей, рассчитываемых из скоростей суммирования по формуле Урупова– Дикса.

Наибольшее значение точность определения пластовых скоростей имеет при выявлении зон АВПД. В работе [Chopra, Huffman, 2006] перечислен целый ряд методов определения сейсмических скоростей для этих целей:

расчет вертикальных спектров скоростей суммирования (velocity analysis – VA) и оценка пластовых скоростей по формуле Дикса;

2) вертикальный анализ скоростей суммирования с калибровкой на данные ГИС (geologically consistent velocity analysis); коррекция проинтерполированной в межскважинное пространство модели интервальных скоростей;

3) горизонтальный анализ скоростей суммирования (horizon-keyed velocity analysis – HVA) и оценка пластовых скоростей по формуле Дикса;

4) «автоматическая» кинематическая инверсия [Mao et al., 2000) в предположении, что скорости суммирования соответствуют среднеквадратичным скоростям (RMS), требует предварительного проведения глубинной миграции до суммирования;

5) томография на отраженных волнах;

6) остаточный кинематический анализ, основанный на коррекции скоростей суммирования с учетом AVO-параметра RVI – residual velocity indicator [Swan, 2001];

7) сейсмическая инверсия (акустическая или упругая).

С точки зрения автора, наиболее перспективными методами определения кинематических характеристик верхней части разреза являются методы послойного решения обратной кинематической задачи, разработанные под руководством В.М. Глоговского [Глоговский, Лангман, 2009].

Послойную кинематическую инверсию выполняют для толстослоистой модели. Модель задается посредством корреляции выбранных отражающих горизонтов на суммированном разрезе. Послойно, начиная с первого выбранного горизонта (обычно рефлектор, соответствующий морскому дну), выполняется

анализ горизонтального спектра скоростей суммирования вдоль данного горизонта. С учетом выбранной скоростной функции решается обратная кинематическая задача для определения эффективной пластовой скорости в заданном слое и положения отражающих границ. Далее аналогичная процедура выполняется для подстилающего слоя с учетом определенной пластовой скорости в предыдущем слое и т. д. При этом для решения задачи в слое данные пересчитываются на уже известную его кровлю, и таким образом каждый раз вычисления ведутся в однослойной среде. Невязка между синтетическими и наблюденными скоростями выражается в виде временного параметра, минимальные значения которого соответствуют удовлетворительному решению («критерий достоверности»). В случае больших отклонений итеративно выполняется коррекция пикировки горизонтального спектра скоростей суммирования до момента получения удовлетворительного решения.

Для горизонтального скоростного анализа необходимо использовать данные после процедур подавления волн-помех («спутники», кратные и неполнократные волны). Стоит отметить, что горизонтальные спектры скоростей суммирования для глубоких горизонтов более устойчивы и однозначны по сравнению со спектрами для неглубоких горизонтов, для которых характерны низкая кратность и отсутствие ближних выносов.

Для получения решений и проверки адекватности выбранной модели используются два метода: *R*-способ и способ взаимных точек (*V*-способ). Решение *R*-способом находится следующим образом: в предположении локальной линейности отражающей границы и локального постоянства интервальной скорости методом наименьших квадратов (МНК) решается система нелинейных уравнений для времени распространения отраженной волны для близко расположенных фиксированных пар источников и приемников, расположенных на, вообще говоря, криволинейной кровле слоя. Это уравнение содержит три неизвестных параметра: глубину границы, ее наклон и скорость в слое.

Решение способом взаимных точек находится путем вычисления скорости слоя по каждой паре падающий – отраженный луч из уравнения для времени распространения отраженной волны вдоль этих лучей с учетом закона преломления на кровле слоя. После этого вычисляются параметры глубины и наклона отражающей площадки.

Подобный подход позволяет учитывать скоростную неоднородность в верхней части разреза, криволинейность отражающих границ и позволяет

осуществлять построение глубинно-скоростной модели среды с небольшим шагом по пространству.

Динамический анализ

Для решения задач инженерно-геологических изысканий необходимо проводить оценки литологического, гранулометрического состава, пористости и типа порозаполнителя в изучаемой среде. В некоторых случаях требуется выявление зон аномальных пластовых давлений. Для решения подобных задач с использованием данных сейсмоакустических наблюдений рекомендуется проводить атрибутный динамический анализ, дополняя его анализом скоростей распространения подольных волн Vp, проводить оценки акустического и сдвигового импедансов ($Zp = Vp * \rho$ и $Zs = Vs * \rho$ соответственно). Для оценки акустического импеданса в нефтегазовой сейсморазведке широко применяются инверсионные алгоритмы по полнократному суммированному кубу данных (акустическая инверсия). Основным способом получения информации об отношении Vp/Vs по амплитудам отраженных продольных волн является упругая инверсия до суммирования, основанная на принципах AVO/A-анализа (Amplitude-versus-Offset-Analysis – анализ поведения амплитуд в зависимости от удаления).

Принципы AVO/А-анализа

Метод AVO/А-анализа широко применяется в нефтегазовой сейсморазведке уже почти тридцать лет. Первоначально метод AVO-анализа был разработан для поиска и выделения песчаных коллекторов, содержащих газ. Дальнейшее развитие этого метода привело к расширению областей его применения, однако до настоящего времени попытки использования его для решения задач определения свойств придонных отложений по данным высокочастотной сейсмоакустики исключительно редки. Причины этого лежат в теоретических основах метода.

В основе AVO-анализа лежат уравнения Цеппритца [Zoeppritz, 1919] для зависимости коэффициента отражения плоской гармонической волны от угла падения волны на плоскую отражающую границу между двумя упругими полупространствами:

$$\begin{bmatrix} R_{P} \\ R_{S} \\ T_{P} \\ T_{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_{1} & -\cos\varphi_{1} & \sin\theta_{2} & \cos\varphi_{2} \\ \cos\theta_{1} & -\sin\varphi_{1} & \cos\theta_{2} & -\sin\varphi_{2} \\ \sin2\theta_{1} & \frac{V_{P1}}{V_{S1}}\cos2\varphi_{1} & \frac{\rho_{2}V_{S2}^{2}V_{P1}}{\rho_{1}V_{S1}^{2}V_{P2}}\cos2\varphi_{1} & \frac{\rho_{2}V_{S2}V_{P1}}{\rho_{1}V_{S1}^{2}}\cos2\varphi_{2} \\ -\cos2\varphi_{1} & \frac{V_{S1}}{V_{P1}}\sin2\varphi_{1} & \frac{\rho_{2}V_{P2}}{\rho_{1}V_{P1}}\cos2\varphi_{2} & \frac{\rho_{2}V_{S2}}{\rho_{1}V_{P1}}\sin2\varphi_{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin\theta_{1} \\ \cos\theta_{1} \\ \sin2\theta_{1} \\ \sin2\theta_{1} \\ \cos2\varphi_{1} \end{bmatrix},$$
(1.3)

где θ_1 – угол падения продольной Р-волны; θ_2 – угол преломления продольной Р-волны; φ_1 – угол отражения поперечной S-волны; φ_2 – угол преломления поперечной S-волны; V_{p_1} – скорость Р-волны в верхнем полупространстве; V_{p_2} – скорость Р-волны в нижнем полупространстве; V_{s1} – скорость S-волны в верхнем полупространстве; ρ_1 – плотность в верхнем полупространстве, ρ_2 – плотность в верхнем полупространстве; R_p – коэффициент отражения P-волны, T_p – коэффициент преломления S-волны. На рисунке 1.16 схематически показаны типы волн, образующихся в вышеуказанной ситуации.



Рис. 1.16. Отражение и обмен волн на границе полупространства [Riedel, Theilen, 2001]

Для границы между жидкостью и упругим полупространством система уравнений сводится к системе трех уравнений: для амплитуд отраженной Р-волны, преломленной Р-волны и обменной S-волны в осадке (так как в воде не распространяются поперечные волны):

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \cos(\theta_2) & \sin(\varphi_2) \\ -1 & \frac{Vp_2\rho_2}{Vp_1\rho_1}\cos(2\varphi_2) & \frac{(Vp_2\rho_2)/(Vp_1\rho_1)}{Vp_2/Vs_2}\sin(2\varphi_2) \\ 0 & \sin(2\theta_2) & -\frac{Vp_2}{Vs_2}\cos(2\varphi_2) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Rpp \\ Tpp \\ Tps \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$
(1.4)

В нефтегазовой сейсморазведке широкое применение AVO-анализа основывается на тех положениях, что, с одной стороны, как следует из уравнений

Цеппритца, коэффициент отражения продольной волны является функцией отношения скоростей продольной и поперечной волн или коэффициентов Пуассона, а с другой стороны, это отношение зависит от типа флюида в пористой породе-коллекторе. Поведение коэффициентов отражения Р-волн даже в области небольших углов (до 30°) существенно зависит от соотношения скоростей Vp/Vs (или коэффициентов Пуассона – σ) покрывающей и подстилающей толщ (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Зависимость коэффициента отражения Р-волн как функции угла падения от отношения коэффициентов Пуассона σ₁/σ₂ в контактирующих средах.

Модель среды: V_{P1} = 2000 м/с, V_{S1} = 1000 м/с, ρ_1 = 2.0 г/см³; σ_1 = 0.33. V_{P2} = 2500 м/с, ρ_2 = 2.0 г/см³. Параметр кривых – коэффициент Пуассона во второй среде

Так, если значения σ для обеих сред близки, то коэффициенты отражения в этом диапазоне углов также близки к коэффициентам отражения для нормального падения. Однако если σ для контактирующих сред различны, то поведение коэффициента отражения может сильно отклоняться от случая для нормального падения. Таким образом, отклонения поведения коэффициента отражения от его значения для нормального падения определяются величиной контраста соотношения *Vp/Vs*, или коэффициента Пуассона, на границе контактирующих сред и могут быть основой для сейсмического анализа литологии и насыщения.

При динамической интерпретации данных нефтегазовой сейсморазведки обычно используются линейные аппроксимации уравнений Цеппритца для слабоконтрастных границ [Shuey, 1985; Aki, Richards, 1980; Bortfeld, 1961 и др.]. Однако большинство аппроксимаций работают удовлетворительно, во-первых, именно

для слабоконтрастных сред, во-вторых, для углов падения волны, не превышающих 30 градусов. Неконсолидированные или слабо консолидированные морские осадки характеризуются обычно исключительно низкими скоростями распространения поперечных волн [Ayres, Theilen, 1999], что заведомо указывает на слабо выраженные угловые зависимости коэффициентов отражения от дна и поддонных границ. В пионерской работе [Riedel, Theilen, 2001] впервые было предложено использовать зависимость коэффициента отражения от угла падения для оценки упругих свойств приповерхностных морских осадков (глубинность исследования по грунту до 20 м) по данным высокочастотных (700 Гц – преобладающая частота возбуждения колебаний) сейсмоакустических наблюдений. Исследования показали, что в случае изучения придонных осадков значение коэффициента отражения и характер AVO-зависимостей существенным образом реагируют на изменение значений плотности и скорости продольной волны, но слабо чувствительны к изменению скорости поперечных волн (рис. 1.18). Это связано с тем, что скорости поперечных волн для неконсолидированных осадков слишком малы (до 200 м/с).



Рис. 1.18. Влияние скоростей Р-волн (а), S-волн (с) и плотности (b) на поведение коэффициента отражения в зависимости от угла падения [Riedel, Theilen, 2001]

Упругие свойства придонных осадков, определенные на основе AVO-анализа в работе [Riedel, Theilen, 2001], приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Упругие свойства неконсолидированных морских осадков по результатам AVO-анализа [Riedel, Theilen, 2001]

Литология	Мягкие глины	Моренные (валунные) глины
Скорость Р-волн, м/с	1450 ± 25	1620 ± 45
Скорость S-волн, м/с	90 ± 35	360 ± 200
Плотность, кг/м ³	1200 ± 45	1380 ± 85

Авторами было показано, что для изучения слабо консолидированных отложений верхней части разреза (характерные скорости продольных волн 1100–1800 м/с, поперечных – 10–300 м/с, плотности – 1.1–1.9), для которых амплитуды отраженных волн меняются незначительно с углом падения волны, рекомендуется изучать поведение амплитуд на больших углах и использовать точное решение системы уравнений Цеппритца.

Итак, автор данной работы придерживается точки зрения, что AVO-анализ является одним из наиболее перспективных методов для количественной оценки свойств осадков по сейсмоакустическим данным.

Сейсмическая инверсия

Под сейсмической инверсией понимается процесс перехода от параметров зарегистрированного волнового поля к эффективным свойствам изучаемой среды.

В настоящее время алгоритмы решения обратной задачи сейсморазведки широко применяются в нефтегазовой сейсморазведке для характеристики УВ резервуаров [Ампилов и др., 2009; Яковлев и др., 2011; Sirgue et al., 2004]. В общем, подходы к решению обратной задачи сейсморазведки можно разделить на две категории: детерминистические и стохастические. Первый предполагает поиск единственного решения (в смысле заданного критерия оптимизации целевой функции, например минимизации по норме параметра L_2), в то время как результатом стохастической инверсии является ансамбль вероятных решений с учетом заданных статистических функций распределений.

Наиболее распространенными инверсионными алгоритмами являются: 1) акустическая инверсия на полнократных суммированных данных, 2) упругая инверсия по частичным угловым суммам и 3) синхронная инверсия, позволяющая одновременно производить поиск акустического и упругого импедансов. Тем не менее в разведочной сейсморазведке также известны примеры успешного применения многокомпонентной инверсии для определения параметров анизотропии [Alkhalifah and Plessix, 2014] или неупругого поглощения в рамках заданной теоретической модели среды. Алгоритмы полноволновой инверсии до суммирования активно развиваются в настоящее время [Baiand Yingst, 2013; Biondi, 2012].

Как известно, инверсия данных сейсморазведки с ограниченной полосой частот – это некорректно поставленная задача. Для повышения устойчивости решения часто вводятся дополнительные ограничения (constraints) на характер

распределения свойств в среде и привлекаются данные скважинных исследований для восстановления отсутствующей в сейсмических данных низкочастотной составляющей.

Важным этапом инверсионного преобразования является оптимизация целевого нелинейного функционала. Наиболее эффективными считаются алгоритмы глобальной оптимизации (geneticoptimization, simulatedannealing, симплексный метод и др.), позволяющие избежать попадания в локальные минимумы целевого функционала, что повышает устойчивость решения обратной задачи.

В настоящее время одним из самых популярных алгоритмов является акустическая инверсия редких импульсов с ограничениями (CSSI – Constrained Sparse Spike Inversion), основанная на предположении, что изучаемая среда представляет собой толстослоистую однородную модель, а зарегистрированная сейсмотрасса во временной области может быть выражена в виде свертки коэффициентов отражения от границ слоев с зондирующим импульсом [Ампилов и др., 2009].

Необходимо отметить, что применение инверсионных алгоритмов низкочастотной (разведочной) сейсморазведки к данным высокоразрешающих сейсмоакустических исследований часто невозможно по следующим причинам:

– предположения, лежащие в основе инверсионных преобразований данных низкочастотной (разведочной) сейсморазведки, не применимы для высокочастотной сейсмоакустики, проводимой с целью изучения верхней части разреза (первые десятки и сотни метров): ВЧР, как правило, представляет собой существенно неоднородную среду;

– отсутствие данных прямых измерений свойств в верхней части разреза (инженерное бурение, пробоотбор редко дополняют сейсмоакустические наблюдения) не позволяет откалибровать сейсмоакустические данные и, соответственно, получить корректные оценки трендов уплотнения и т. п. Отсутствие информации на частотах до 100 Гц при инверсии данных с характерной полосой частот от 100 до 2500 Гц ведет к неустойчивому решению обратной задачи;

– существенное влияние выбранных параметров съемки на зарегистрированные амплитуды отраженных волн: направленность источника возбуждения колебаний, нестабильность возбуждения (особенно характерно для электроискрового источника), группирование гидрофонов и др. Впервые проблема учета диаграммы направленности высокочастотных источников колебания (в данном случае электродинамического бумера) для проведения AVO-инверсии на сейсмоакустических данных (рабочая полоса частот до $1\kappa\Gamma$ ц) упомянута в работе [Riedel, Theilen, 2001]. Согласно данным этих авторов, погрешность в определении диаграммы направленности достигала 20%. В 2006 году в работе [Mehta et al., 2006] представлена попытка одновременной оценки функции влияния приемно-излучающей системы на зарегистрированные амплитудыи отношения *Vp/Vs* для донных осадков посредством детерминистической AVO-инверсии с глобальной оптимизацией. В 2015 г. в статье [Токарев, Пирогова, 2015] предложен подход по учету влияния диаграммы направленности излучающей и приемной системы на этапе планирования полевых работ за счет использования одноэлектродного электроискрового точечного источника и одиночных гидрофонов в пьезокосе без группирования.

Это позволило сформировать значительный фон помех (поверхностные и внутренние кратные, неполнократные, «волны-спутники»), а также учесть влияние частотно-зависимого затухания на форму и амплитуду сигнала.

С учетом вышесказанного, автор утверждает, что для успешного применения инверсионных преобразований на данных высокоразрешающей и сверхвысокоразрешающей сейсмоакустики, помимо прочего, необходима разработка специальной системы наблюдений, обеспечивающей регистрацию зондирующего импульса, сферическую диаграмму направленности излучающей и приемной группы в рабочей полосе частот, пониженный уровень шумов и достаточный набор выносов.

Несмотря на трудности, связанные с реализацией инверсии на сейсмоакустических данных, в настоящее время это направление начинает развиваться. Первые опубликованные работы по результатам акустической инверсии для приповерхностных осадков принадлежат M.E.Vardy [Vardy, 2014].

В целом следует отметить отсутствие в настоящее время специализированных программных средств динамического анализа сейсмоакустических данных для специфических условий изучения верхней части геологического разреза.

§5. Требования к сейсмоакустическим данным для кинематического и динамического анализа

Для решения обратной кинематической задачи, рассмотренной в параграфе 3 настоящей главы, требования к методике полевых сейсмических наблюдений являются стандартными и подробно рассмотрены в классических учебниках [Боганик и Гурвич, 2006]. Для высокоразрешающих сейсмических исследований параметры съемки, такие как шаг наблюдений по профилю, длина годографа, шаг между каналами и т. д., рассмотрены в работе [Missiaen, 2005]. В то же время динамический анализ не используется для количественной интерпретации сейсмоакустических данных сверхвысокого разрешения, и требования к их качеству следует рассмотреть подробнее.

Как известно [Chopra and Castanga, 2014], зависимость амплитуды отраженной волны от угла падения определяется не только угловой зависимостью непосредственно коэффициента отражения, но также еще целым рядом факторов, зависящих от этого угла: характеристиками направленности источника-приемника, характеристиками группирования, потерями на геометрическое расхождение и неупругое поглощение, эффектами тюнинга (интерференцией на границах тонких слоев) и т. д.

В предположении идеально упругой среды с плоскими границами раздела, трасса для однократно отраженных волн, зарегистрированных на времени t на расстоянии x от источника, может быть выражена следующим образом:

$$S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * [Sou(t) * D_n^{sou}(t, \tau, \beta_n)] * [Rec_n(t) * D_n^{rec}(t, \tau, \alpha_n)]$$

$$(1.5)$$

$$f_n(t,\tau,x_n) \times F_n(r) + N_r,$$

где *t* – время,

n – номер сейсмического приемника,

x_n – расстояние между источником и n-м приемником,

 θ_{n} – угол отражения,

 β_n – угол выхода,

 α_n – угол подхода,

т – временной параметр,

Sou(t) – сигнатура зондирующего импульса,

 $D_n^{sou}(t,\tau,\beta_n) = \int \widehat{D}_n^{sou}(t,w,\beta_n) \exp(-jw\tau) dw - функция направленности источника возбуждения колебаний,$

Rec_n(t) – переходная функция n-го приемника (амплитудно-частотная характеристика приемного тракта),

 $D_n^{rec}(t,\tau,\alpha_n) = \int \widehat{D}_n^{rec}(t,w,\alpha_n) \exp(-jw\tau) dw$ — функция направленности n-го приемника,

 $f_n(t, \tau, x_n) = \int \hat{f}_n(t, w, x_n) \exp(-jw\tau) dw - функция, характеризующая частотно$ зависимые изменения зондирующего импульса при распространении в среде, а именно неупругое поглощение и рассеяние сейсмической энергии на неоднородностях, для n-го приемника,

 $F_n(r_n)$ — функция, определяющая частотно-независимые потери при распространении волны на расстояние для n-го приемника, в том числе за сферическое расхождение фронта (1/r для амплитуды), и потери на преломление, для n-го приемника,

 N_r – помехи.

В случае когда по сейсмическим данным планируется проведение динамического анализа, математическая обработка, помимо решения стандартных задач шумоподавления и повышения разрешающей способности метода, должна быть направлена на сохранение истинного соотношения амплитуд отраженных волн для каждого удаления. Более того, для количественного динамического анализа задача обработки состоит в максимальном приближении наблюденных зависимостей амплитуд от угла падения к зависимостям коэффициента отражения от угла – $R_n(t, \theta_n)$. Другими словами, задача обработки состоит в том, чтобы учесть все факторы, не связанные с отражательной способностью среды, но влияющие на зарегистрированную амплитуду. С той или иной успешностью существующими средствами обработки и анализа сейсмических данных мы можем подавить помехи, построить глубинно-скоростную модель среды, оценить поглощение и скомпенсировать частотно-независимые и частотно-зависимые потери. В этом случае выражение (1.5) приобретет следующий вид:

 $S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * [Sou(t) * D_n^{sou}(t, \tau, \beta_n)] * [Rec_n(t) * D_n^{rec}(t, \tau, \alpha_n)].$ (1.6)

Остается определить диаграмму направленности приемно-излучающей группы, характеристику приемного тракта и форму зондирующего сигнала для перехода от амплитуд отраженного сигнала к коэффициентам отражения.

Таким образом, для успешного проведения кинематического и динамического анализа данных многоканальных сейсмоакустических наблюдений на акваториях для изучения верхней части геологического разреза необходимо выполнение следующих требований.

1. Длина годографа должна быть достаточна для определения эффективных скоростей при требуемой глубинности.

2. Шаг между приемными устройствами и пунктами возбуждения должен быть выбран так, чтобы избегать пространственного алясинга.

3. Точность определения геометрии наблюдений должна не превышать 1/8

преобладающей длины волны.

4. Исследуемые отражающие границы должны находиться в дальней зоне, т. е. «на расстоянии, превышающем несколько преобладающих длин волн от источника» [Aki and Richards, 1980].

5. Диапазон углов падения-отражения должен удовлетворять требованиям AVO-анализа.

6. Форма зондирующего сигнала должна быть известна.

7. Условия возбуждения и приема должны быть идентичны или должна иметься возможность привести их к таковым.

8. Диаграммы направленности излучающей и приемной систем должны быть близки к сферическим или известны.

9. Отношение сигнал/шум должно быть достаточно высоким для решения обратной динамической задачи.

Первые три условия подробно рассмотрены в [Missiaen, 2005] и являются более или менее стандартными. Четвертое условие связано с тем, что применяемое в методах динамического анализа понятие коэффициента отражения строго определено только для плоской волны, отраженной от плоской границы. В работе [Калинин, Шалаева, 1999] показано, что при наклонном падении вплоть до углов, достигающих половины критического угла, можно с уверенностью применять приближения для плоских волн при расстояниях до границы, превышающих несколько (5-6 и даже менее) преобладающих длин волн, при этом величина расстояния может быть уменьшена при уменьшении контрастности упругих свойств на границе. Поскольку придонные отложения характеризуются небольшими перепадами скоростей (очень большими значениями критических углов), можно утверждать, что расчеты, основанные на коэффициентах отражения для плоских волн, имеют право на существование в большинстве практических случаев. Для отрицательных коэффициентов отражения диапазон углов падения может быть любым.

Ниже будет показано, что для приповерхностной системы наблюдений соблюсти изложенные требования в сейсмоакустическом диапазоне частот практически невозможно. Но в случае использования заглубленной сейсмоакустической системы для изучения первых десятков метров по грунту появляется возможность уменьшить размеры излучателя и приемной группы, для того чтобы считать источник и приемник точечными со сферической диаграммой

направленности в рабочем диапазоне частот ($D_n^{sou} = D_n^{rec} = 1$). Это, в свою очередь, обеспечивает возможность оценить сигнатуру источника Sou(t) и характеристику приемного тракта для данного приемника $Rec_n(t)$ по прямой волне и построить соответствующий корректирующий фильтр для перехода от выражения (1.5) к выражению:

$$S_n(t, x_n) \approx R_n(t, \theta_n). \tag{1.7}$$

Обоснование и практическое воплощение технологии, удовлетворяющей требованиям 5–8, указанным выше, являются предметом настоящей диссертационной работы.

Выводы

1. Повышение эффективности геологоразведочных работ на акваториях, направленных на изучение верхней части разреза, требует перехода от качественного анализа высоко- и сверхвысокоразрешающих сейсмоакустических данных к количественному. Для осуществления такого перехода необходимо обеспечить новое качество натурных наблюдений, а именно повысить временную и пространственную разрешающую способность метода МОВ ОГТ, улучшить соотношение сигнал/шум, перейти к двумерным или, что более предпочтительно, к трехмерным наблюдениям [Шматков, Токарев, 2014; Шматков и др., 2015], проводить исследования с регистрацией зондирующего импульса и без искажения соотношения амплитуд отраженных волн, обеспечить широкий диапазон углов отражения для более эффективного кинематического и динамического анализа.

2. Сейсмоакустическое профилирование с заглубленными системами имеет ряд преимуществ перед профилированием с поверхностно-согласованными системами: более высокая разрешающая способность как по вертикали, так и в пространстве; высокая стабильность и возможность регистрации зондирующего импульса; высокое соотношение сигнал/шум.

3. Сейсмоакустическое профилирование с заглубленными системами имеет также ряд недостатков: неопределенность геометрии наблюдений; сдвиг точки отражения в зависимости от глубины границы; интерференция волнспутников с отраженными от более глубоких границ волнами. Однако эти недостатки вполне могут быть преодолены при применении специальных способов сбора, обработки и анализа сейсмоакустических данных, разработке которых и посвящена данная работа.

52

4. В большинстве из указанных выше работ описываются большие и дорогие системы глубинной буксировки, которые ориентированы на работы в глубоководных условиях. Однако различные инженерно-геологические исследования, направленные на изучение мест под бурение, прокладку труб и других подводных конструкций, а также седиментологические и экологические исследования, часто выполняются на мелководье на глубинах воды от 10 до 100 м с маломерных судов, что накладывает ограничение на размеры и вес забортных устройств и системы сбора данных.

5. В существующем промышленном программном обеспечении отсутствуют специальные средства для обработки сейсмоакустических данных наблюдений с заглубленными источниками и приемниками, а именно: модули расчета геометрии наблюдений по данным времен прихода волн-спутников, вычитания волн спутников, асимптотического бинирования и скоростного анализа для гибридной (разноуровневой) приемно-излучающей системы, оценки частотно-зависимого поглощения.

6. В литературе практически не встречено примеров инверсии сейсмоакустических данных с заглубленной приемно-излучающей системой и результатов определения упругих свойств слабоконсолидированных осадков на мелководных акваториях. Таким образом, количественные оценки скоростей поперечных волн по данным дистанционных сейсмоакустических наблюдений в водной толще крайне редки.

В целом литературный обзор современного состояния сейсмоакустических наблюдений на акваториях показал отсутствие технологии определения упругих свойств осадков на мелководных акваториях по данным дистанционных исследований и потенциальную возможность решения такой задачи с использованием заглубленных систем. Необходимо было разработать новые и адаптировать существующие аппаратные комплексы, средства сбора и контроля качества сейсмоакустических данных, методики полевых наблюдений, программное обеспечение обработки и динамического анализа результатов наблюдений с заглубленными приемно-излучающими установками для исследований структуры и свойств осадков на мелководных акваториях.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

До недавнего времени сейсмоакустические исследования на акваториях в нашей стране в основном проводились одноканальными системными установками (см. главу 1), поэтому для реализации предлагаемой технологии заглубленной буксировки потребовалось прежде всего разработать многоканальную приемнорегистрирующую систему, состыковать ее с существующими источниками упругих волн, создать программное обеспечение сбора и контроля качества данных.

На кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова разработка аппаратно-программных средств для сейсмоакустических исследований всегда была одним из основных направлений деятельности [Калинин А.В и др., 1983; Владов и др., 2004]. Программа исследований по разработке аппаратно-программных средств была сформирована автором совместно с Н.А. Кузубом в 2002 году. Позже она нашла свое отражение в рамках выполнения НИОКР «Создание макета приемного аппаратно-программного комплекса для дистанционного определения устойчивости и прочностных свойств придонных осадков», в результате выполнения которой получен патент на полезную модель [Патент № 53458, 2006]. В данной главе представлены основные результаты работы по созданию аппаратной части и программного обеспечения системы сбора и контроля качества данных.

§1. Аппаратно-программный комплекс «Нильма»

Разнообразие задач, стоящих перед сейсмоакустическими исследованиями, определило базовые требования к аппаратуре. Основными конструктивными и функциональными чертами разработанного аппаратно-программного комплекса являются:

1. Малые габариты и вес. Комплекс может быть установлен на маломерных морских и речных судах или катерах.

2. Мобильность. Комплекс может быть смонтирован и подготовлен к работе за 20-30 мин.

3. Возможность работы в сложных условиях вибрации и качки при температурах окружающего воздуха 0 ± 40 °C.

4. Наличие специальных выходов и входов для импульсов синхронизации, а также электронный таймер с возможностью выбора периода запуска в пределах 0,5–10 с для стыковки и управления источниками упругих волн.

5. Важной особенностью является возможность параллельной работы нескольких комплектов приемно-излучающих систем под общим управлением.

Функциональная схема разработанного комплекса «Нильма» представлена на рисунке 2.1.



Рис. 2.1. Схема сейсмоакустического комплекса «Нильма»

Приемно-регистрирующая система

Приемно-регистрирующая система состоит из восьми основных блоков, представленных на рисунке 2.2.



Рис. 2.2. Блок-схема приемно-регистрирующего устройства

Условные обозначения: 1. Приемник сейсмоакустических колебаний (пьезокоса); 2. Соединительный буксировочный кабель; 3. Согласующее устройство; 4. Устройство электропитания; 5. Соединительный кабель; 6. Аналогово-цифровой преобразователь; 7. Кабель связи USB-PC; 8. Переносной персональный компьютер.

Пьезокоса (приемник сейсмоакустических колебаний) – наиболее сложная в техническом отношении часть приемно-регистрирующего устройства. Ее предназначение – преобразование распространяющихся в водном слое акустических сигналов в электрические и их предварительная обработка. Основные требования, предъявляемые к пьезокосе:

1. Высокая надежность вплоть до глубины буксировки 100 м и максимальной скорости буксировки 5 узлов.

2. Низкий уровень как собственных шумов электронных блоков, так и внешних электрических наводок и шумов обтекания.

3. Малый вес при достаточной длине и количестве приемных каналов (пьезоприемников).

4. Диапазон рабочих температур 0-30 °С.

В результате проведенных исследований была выбрана следующая конфигурация приемной части устройства:

1. Пьезокоса, состоящая из 16 цилиндрических пьезодатчиков типа SQ-06 производства компании Sensor Technology (Канада), расположенных линейно. Каждый датчик представляет собой отдельный канал регистрации. Технические характеристики датчиков приведены ниже (таблица 2.1). Расстояние между соседними датчиками 2 м, таким образом, активная длина пьезокосы составляет 30 м.

2. Для уменьшения влияния электрических помех предварительное усиление и фильтрация сигналов производятся непосредственно в пьезокосе. Предварительные усилители и фильтры выполнены в виде единого блока на открытой печатной плате и располагаются в передней части пьезокосы. Характеристики усилителей и фильтров следующие:

a)	коэффициент усиления	100
<i>b)</i>	частота среза ФВЧ	40 Гц
<i>c)</i>	частота среза ФНЧ	2000 Гц
d)	крутизна срезов АЧХ	18 дБ/октава
e)	максимальный выходной сигнал	±3,5 B

3. Пьезодатчики и электронный блок заключены в полиуретановый армированный шланг. Внутренний диаметр шланга составляет 26 мм, внешний – 32 мм. Принципиальным достоинством этой марки шланга является его способность не

утрачивать свою эластичность при низких температурах. С одной стороны, малый поперечный размер шланга позволяют сделать пьезокосу достаточно легкой, а с другой – добиться малых шумов обтекания и уменьшить тяговое усилие. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить требования к нагрузочной способности буксировочного кабеля. Общая длина полиуретанового шланга составляет 44 м, активная часть располагается ровно посредине шланга, расстояние от переднего края шланга до 1-го канала и от 16-го канала до заднего края составляет 7 м.

4. В передней части пьезокоса имеет одну из частей герметичного разъема, корпус которого выполнен из нержавеющей стали. Другая часть разъема располагается на буксировочном кабеле. Таким образом, пьезокоса и буксировочный кабель могут транспортироваться и храниться раздельно. В задней части расположена металлическая заглушка, к которой может крепиться капроновый фал для стабилизации положения пьезокосы в процессе буксировки.

5. Наполнителем косы является непроводящая жидкость, в качестве которой может использоваться пищевое растительное масло. Для обеспечения нейтральной плавучести по всей длине пьезокосы внутри нее располагаются свинцовые грузики, количество и вес которых определяется сухим весом пьезокосы и весом наполнителя.

Соединительный буксировочный кабель

Для буксировки пьезокос в морской сейсморазведке используются специальные буксировочные кабели с металлическим или кевларовым усилителем. Как уже отмечалось, конструкция разработанной пьезокосы позволяет существенно ослабить требования к нагрузочной способности буксировочного кабеля и использовать кабель марки Teldor FTP, 25 пар, категории 5, PVC, применяемый для прокладки внешних кабельных сетей. Следует отметить, что из 50 проводников используются только 20, остальные исполняют роль дополнительного экрана, что дает лучшую защиту от внешних электромагнитных полей. Общая длина кабеля 100 м. Кабель заканчивается многоштырьковым радиотехническим разъемом для соединения с согласующим устройством.

Согласующее устройство предназначено для:

1. Передачи сигналов от каналов с буксировочного кабеля на вход АЦП через соединительный кабель.

2. Подачи стабилизированного двуполярного напряжения питания ±9 В на

блок предварительных усилителей и фильтров в пьезокосе через буксировочный кабель.

3. Синхронизации момента старта АЦП и запуска генератора сейсмоакустических импульсов посредством встроенного таймера.

Питание согласующего устройства осуществляется либо от аккумулятора 12 В, либо от сетевого адаптера 220/12 В. Потребление согласующего устройства не более 250 мА.

Аналогово-цифровой преобразователь

В качестве аналогово-цифрового преобразователя был выбран модуль E-440, выпускаемый ООО «L-CARD» E-14-440. Данный модуль компактен, имеет достаточные временные и динамические параметры регистрации многоканальных широкополосных сигналов, позволяет программно управлять параметрами регистрации через USB-порт персонального компьютера.

Излучающая система

Излучающая система состоит из энергетического блока и забортного устройства возбуждения упругих волн: электроискровой спаркер или электродинамический бумер. Устройство энергетического блока описано в работах



Рис. 2.3. Диаграмма направленности многоэлектродного спаркера в полярных координатах

сейсмометрии кафедры И геоакустики геологического факультета МГУ [Калинин и др., 1989]. Типичным электроискровым источником сейсмоакустических для наблюдений является многоэлектродный спаркер. Диаграмма направленности, рассчитанная для многоэлектродного спаркера длиной 1 источника метр, с центральной частотой излучения 1250 Гц, состоящего из 100 электродов, находящихся на расстоянии 1 см друг от друга, приведена ниже (рис. 2.3).

На диаграмме направленности видно, что в горизонтальном направлении

суммарная амплитуда группы будет равна 0,2 условным единицам, а в вертикальном – 1,0. Таким образом, с помощью рассчитанной диаграммы могут быть оценены амплитудные поправки за направление подхода волны к приемнику, но оценки верны только для монохроматической волны. Для широкополосного импульса будет существенно меняться не только амплитуда, но и форма волны.

Так как одним из обязательных требований к методике работ для последующего динамического анализа является сферическая диаграмма направленности излучающей системы, очевидно, что идеальным излучателем будет являться одноэлектродный спаркер. В этом случае форма зондирующего импульса определяется только энергией излучения и глубиной источника.

Программное обеспечение системы сбора данных

Назначение программного обеспечения системы сбора данных многоканального сейсмоакустического профилирования сводится к следующему:

1. Установка параметров регистрации путем посылки команд на аппаратную часть комплекса (АЦП).

2. Визуализация потока данных.

3. Запись потока данных и необходимой сопровождающей информации на электронный носитель в формате, совместимом с системами обработки сейсмических данных.

4. Контроль качества данных и их предварительная обработка.

Примеры интерфейса программного обеспечения комплекса приведены на рисунке 2.4.



Рис. 2.4. Интерфейс программы регистрации сейсмоакустических данных

Выбор основных параметров методики работ происходит до начала работ и определяется геологической задачей, сейсмогеологическими условиями района работ, параметрами доступной аппаратуры, задействованного плавсредства и т.д. Основной же задачей оператора является контроль за соблюдением параметров регистрации и анализ изменений в регистрируемых данных. Все это требует наличия большего числа доступных средств анализа сейсмических, навигационных и технических данных в программном обеспечении системы сбора сейсмоакустических данных. Подробное описание функциональных возможностей ПО аппаратно-программного комплекса «Нильма» приведено в инструкции к ПО.

§2. Усовершенствованный аппаратно-программный комплекс «Нильма-2010»

Дальнейшее развитие технологии сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой потребовало разработки нового усовершенствованного аппаратно-программного комплекса (рис. 2.5). По предложению автора он был оснащен тремя датчиками глубины и дополнительными каналами с пониженным усилением во избежание переполнения разрядной сетки при регистрации прямой волны при близком расположении источника. Кроме того, стандартный комплекс с многоканальной пьезокосой был дополнен четырьмя отдельными приемными





Возможность работы с 16 канальной пьезокосой с 3 информационными каналами и четырьмя одноканальными пьезокосами



Высоковольтный силовой блок CSP-P





Сейсмоакустическая коса Геонт-Шельф × 2

Сейсмоакустическая станция Геонт-Шельф × 2

Рис. 2.5. Блоки усовершенствованного аппаратно-программного комплекса «Нильма-2010» гидрофонами. Это обеспечило возможность вести дополнительные наблюдения с нескольких точек вблизи поверхности воды при заглублении основного многоканального приемно-излучающего комплекса или в случае выполнения работ по стандартной методике оптимального согласования (приповерхностная буксировка комплекса) регистрировать зондирующий импульс.

В таблице 2.1 и на рисунке 2.6 представлены основные параметры и блоксхема аппаратно-программного комплекса «Нильма-2010».



Рис. 2.6. Схема сейсмоакустического комплекса «Нильма-2010»

Наименование параметра	Значение		
Регистрация			
Динамический диапазон	90 дБ		
Разрядность АЦП	14		
Количество каналов	19		
Шаг дискретизации, мс	0,1		
Длительность записи, мс	500		
Формат записи	SEG-Y		
Частотный диапазон предусилителя	50-2500 Гц		
ФНЧ, Гц	2500/6 дБ/окт		
ФВЧ, Гц	50/20 дБ/окт		
Синхронизация	Таймер		
Каналы датчиков гидростатического давления	3		
Приемная система	Многоканальный ком- плекс (1пьезокоса)	Одноканальный комплекс (4 пьезокосы)	
Количество каналов	16 – основные каналы; 3 – доп.	1	
Коэффициент усиления предусилителя	К = 10 – основные каналы К = 2 – доп.	K = 10	
Тип сейсмоприемника	SQ-05		
Расстояние между каналами	2 м	-	
Общая длина пьезокосы	36 м	-	

Таблица 2.1. Основные параметры аппаратно-программного комплекса «Нильма-2010»

Примеры данных, зарегистрированных описанной аппаратурой, приведены на рисунке 2.7.

В период с 2003 года по настоящее время разработанный аппаратнопрограммный сейсмоакустический комплекс «Нильма» и его модификации под руководством автора использовались при проведении опытно-методических работ для разработки технологии многоканальных сейсмоакустических наблюдений как с приповерхностными, так и с заглубленными системами.

С использованием созданной аппаратуры были выполнены большие объемы производственных работ на Черном, Балтийском, Белом, Баренцевом, Карском, Лаптевых и Охотском морях, геофизических наблюдений при изысканиях под



Рис. 2.7. Пример полевой записи одного приемного канала (заглубленная методика)

строительство мостов и трубопроводных переходов через Волгу, Ангару, Обь, Амур и ряд других рек [Tokarev et al., 2006, 2008; Гайнанов и др., 2006–2010].

Выводы

При участии автора в результате проведенных разработок спроектированы и созданы мобильные малогабаритные аппаратно-программные комплексы для многоканальных сейсмоакустических исследований на мелководных акваториях в частотном диапазоне 50–5000 Гц, обеспечивающие возможность проведения работ как со стандартных НИС, так и с малотоннажных плавательных средств. Отличительными особенностями аппаратно-программных комплексов являются: возможность параллельного подключения дополнительных приемно-излучающих устройств, построение сложной геометрии наблюдений с регистрацией сигналов в различных точках среды на одно- и многоканальные сейсмокосы, наличие средств контроля качества данных и проведения набортной предварительной обработки.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛЕВЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для того чтобы задать методику наблюдений, необходимо определить метод исследований для решения той или иной геологической задачи в заданных сейсмогеологических условиях: МПВ, НСП, МОВ ОГТ, пассивные наблюдения и т. д. В качестве типичных условий будут рассмотрены сейсмогеологические условия шельфов арктических морей РФ, а в качестве основной задачи – обеспечение инженерно-геологических изысканий: изучение геологического строения и упругих свойств осадков до глубин 30–50 м с разрешением 0,2–0,5 м.

Такой выбор сейсмогеологических определен тестовых условий актуальностью и практической значимостью сейсмоакустических исследований для инженерно-геологических изысканий при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса в Баренцевом и Карском морях, а также сходством строения и свойств осадков шельфов арктических морей с четвертичными отложениями Кандалакшского залива Белого моря – основного места проведения опытно-методических работ. Заданная глубинность и разрешающая способность продиктованы необходимостью достичь соответствия между результатами дистанционных исследований и данными инженерно-геологического бурения и пробоотбора. По мнению автора, выбранные сейсмогеологические и технические условия экспериментов соответствуют абсолютному большинству условий проведения инженерно-геофизических изысканий на мелководных акваториях морей и озер Российской Федерации.

Оптимальным методом для решения таких задач является метод отраженных волн с возможностью формирования сейсмограмм ОСТ для построения глубинноскоростной модели среды и динамического анализа. При планировании исследований и задании конкретной методики съемки должны быть определены параметры излучающей и приемной систем, в том числе их конфигурация. Параметры наблюдений можно разделить на следующие группы.

Регистрация

- Динамический диапазон
- Разрядность АЦП
- Количество рабочих каналов
- Шаг дискретизации

- Длительность записи
- Формат записи
- Фильтрация НЧ
- Фильтрация ВЧ
- Синхронизация

Конфигурация приемно-излучающей системы

- Заглубление источника
- Заглубление приемной системы
- Минимальный вынос
- Положение относительно судна
- Способы определения конфигурации системы

Излучающая система

- Тип источника энергии
- Тип излучателя
- Количество излучателей
- База излучателя
- Энергия заряда
- Центральная частота
- Рабочая полоса частот
- Шаг между пунктами возбуждения

Приемная система

- Активная длина пьезокосы
- Количество рабочих каналов
- Параметры группирования
- Расстояние между каналами
- Тип гидрофонов
- Вспомогательные каналы

Начиная с 2003 года по настоящее время разработанный аппаратнопрограммный сейсмоакустический комплекс «Нильма» и его модификации под руководством автора использовался при проведении опытно-методических работ для разработки технологии многоканальных сейсмоакустических наблюдений как с приповерхностными [Гайнанов и др., 2006–2010], так и с заглубленными системами [Tokarev et al., 2006, 2008]. Работы проводились ежегодно во время морской геофизической практики студентов на Беломорской биостанции МГУ с использованием плавсредств различного типа – от плотиков размером 4 м х 2 м до типовых маломерных научно-исследовательских судов, представленных на рисунках 3.1 и 3.2). В 2010 году при участии автора для решения научных и учебных задач был спроектирован и построен научно-исследовательский катер (НИК) «Студент МГУ», ставший основным плавсредством для выполнения опытных работ с заглубленными системами.



Рис. 3.1. Плавсредства различного типа, использованные во время проведения морской геофизической практики на Белом море



Рис. 3.2. Научно-исследовательский катер «Студент МГУ». Длина судна 13,3 м, ширина 2,8 м

Часть параметров методики определена геологической задачей и является общей для работ с приповерхностной и заглубленной системой. Так, требования к частотному диапазону зондирующего импульса определяются заданным временным разрешением наблюдений, длина сейсмокосы – глубинностью исследований и требованиями к параметрам глубинно-скоростной модели, шаг между каналами зависит от предполагаемых наклонов геологических границ и частоты зондирующего сигнала. Рассмотрение этих вопросов для «высокоразрешающей» и «сверхвысокоразрешающей» сейсморазведки проведено в работах Tine Missaen (1996–2003), а для многоканальной сейсмоакустики – в докторской диссертации

В.Г. Гайнанова (2009) и его совместных публикациях с автором диссертации [Гайнанов, Токарев, 2006–2008]. Основным выводом из этих работ можно считать следующее утверждение: для многоканальных исследований на мелководных акваториях с целью построения глубинно-скоростной модели и сейсмических изображений до глубин 30–50 м с разрешающей способностью 0,2–0,5 м минимальными требованиями являются наблюдения в полосе частот 50–3000 Гц с 16-канальной пьезокосой с шагом 2 м и регистрацией сигнала с 14-разрядным АЦП, так как обычно при сейсмоакустическом профилировании динамический диапазон сигналов не превышает 60–90 Дб. Эти же рассуждения послужили основой для формирования технического задания к программно-аппаратному комплексу «Нильма» и для большинства случаев определили параметры регистрации при наблюдениях с приповерхностными и заглубленными системами. В главе 2 при описании усовершенствованного АПК «Нильма-2010» приведены типичные параметры наблюдений, которые использовались для выполнения опытнометодических работ по теме диссертации (таблица 2.1).

Для оценки соответствия требованиям динамического анализа, сформулированным в главе 1, и в конечном итоге для определения эффективности применения той или иной методики работ для решения поставленных геологических задач следует рассмотреть следующие методические аспекты сейсмических наблюдений:

- конфигурацию приемно-излучающей системы;

– параметры излучающей системы: стабильность возбуждения, форму сигнала, преобладающую частоту, диаграмму направленности источника;

 параметры приемной системы: идентичность каналов, диаграмму направленности и стабильность приемного тракта;

– помехи: типы помех, их уровень и соотношение сигнал/шум.

Основные различия в методике с приповерхностной и заглубленной установкой: геометрия наблюдений и средства ее определения, конструкция излучателя и приемного устройства, направленность приемно-излучающей системы. Ниже будут рассмотрены различия в методиках наблюдений и результаты контроля качества данных на примере результатов опытно-методических работ в Кандалакшском заливе Белого моря в 2011–2015 гг.

§1. Методика многоканальных сейсмоакустических наблюдений с приповерхностными системами

Основной методикой сейсмических исследований верхней части геологического разреза на акваториях была и пока остается методика непрерывного сейсмоакустического профилирования с совмещенным источником и приемником, расположенными друг относительно друга на расстоянии много меньшем глубины отражающей границы. В этом случае все сводится к определению положения приемно-излучающей системы относительно судна для снижения уровня помех и определению оптимального заглубления. Эффективное использование энергии возбуждаемых источником упругих волн в методе отраженных волн на акваториях достигается при согласовании интерференционных характеристик источника, приемника и спектра излучаемого импульса. В этом случае глубину погружения источника и приемника необходимо выбирать из следующих соотношений:

$$h_r = h_s = v_0 / 4 f_0 = \lambda_0 / 4 = 375 / f_0, \tag{3.1}$$

где h_r – заглубление приемника, h_s – заглубление источника, f_0 – частота максимума спектра сигнала.

Данное заглубление называют оптимальным (для совмещенного источникаприемника), так как при фиксированной величине энергии источника в режиме оптимального согласования обеспечивается абсолютный максимум спектральной интенсивности [Калинин и др., 1983].

Конфигурация приемно-излучающей системы

При переходе от сейсмоакустического профилирования к высоко- и сверхвысокоразрешающей сейсморазведке с многоканальными системами методика наблюдений существенно усложняется. На рисунке 3.3 приведен пример приповерхностной расстановки для исследований СВР.

Буксировка приемно-излучающей системы

Очевидно, что условия буксировки источника проще, чем условия буксировки приемной косы. При буксировке последней важна не только стабильность ее положения в водной толще, но и уровень помех, который обусловлен влиянием кильватерной струи, акустическим излучением механизмов судна, обтеканием приемников, вибрациями буксирующего кабеля и самой оболочки, в которой



Рис. 3.3. Пример конфигурации приповерхностной приемно-излучающей системы

находятся чувствительные элементы. При проведении сейсмоакустических работ принципиально вынести систему из кильватерной струи, где вода интенсивно насыщена воздушными пузырьками. Достаточно просто осуществить вынос источника и приемника из данной зоны при помощи боковых выстрелов. Данный подход использовался и в наших экспериментах.

При проведении сейсморазведки МОВ ОГТ на нефть и газ используются относительно низкочастотные пневматические источники. При частотном диапазоне регистрируемого сигнала 10–70 Гц преобладающая длина волны составляет около 40 м, что требует буксировки источника и косы на глубине порядка 10 м. Для этой цели используются специальные активные заглубляющие устройства с крыльями – «кандепы», или «птички». В целом заглубление сейсмокос на такую глубину и контроль их положения под водой в настоящее время не является технической проблемой [СИ Технолоджи телеметрические системы. URL: www.intromarin.ru, Sercel. URL: www.sercel.com, SIMCO Ion. URL: www.ion.com]. Стоит отметить, что стоимость указанных систем высокая.

Если же рассматривать высокоразрешающие сейсмоакустические исследования с электроискровым источником – спаркером (частотный диапазон 50–3000 Гц) или электродинамическим бумером (500–5000 Гц), то оптимальные глубины буксировки

69



Рис. 3.4. Буксировочный плотик с установленным под ним бумером и 16-канальной косой

расстановки измеряются уже долями метра. В принципе, глубину источника можно задать, закрепив его под специальным плотиком или лодкой (рис. 3.4).

Ho В случае многоканальных сейсмоакустических наблюдений задание поддержание такой малой глубины И всей постоянной ПО ллине пьезокосы становится нетривиальной задачей.

активных заглубителей, способных поддерживать столь незначительные глубины, не существует. Вовторых, датчики глубины, в основном измеряющие гидростатическое давление, на таких малых глубинах показывают неустойчивые значения. В связи с этим при проведении сверхвысокоразрешающих сейсмических работ приходится пользоваться пассивными заглубителями и контролировать глубину косы лишь приблизительно по принимаемым сигналам. Это ведет к нестабильности заглубления в процессе работ. Волнение моря, соотношение курса судна и поверхностного течения приводят к изменениям планового положения приемноизлучающей системы относительно кильватерной струи. Как следствие, зарегистрированные данные часто характеризуются изменчивостью амплитуды и формы сигнала от канала к каналу и от возбуждения к возбуждению.

Во-первых,

Результаты опытно-методических работ с приповерхностной многоканальной сейсмоакустической системой

В этом подразделе будут рассмотрены результаты опытно-методических многоканальных сейсмоакустических наблюдений в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря. Сейсмоакустические работы проводились с борта НИК «Студент МГУ». Скорость буксировки при проведении съемки составляла 4 узла (≈ 2 м/с). Интервал возбуждения 1 сек. Позиционирование судна осуществлялось с помощью системы GPS (GPS Trimble AG132:) с точностью приблизительно 2 метра. Работы проводились по методике многократных перекрытий с использованием комплекса «Нильма-2010» с 16-канальной косой длиной 30 метров. Для достижения оптимального согласования излучаемого импульса и волны, отраженной от поверхности морского дна, производилось

заглубление на четверть длины волны (≈ 40 см). В районе исследования глубина воды составляла до 60 м. При центральной частоте излучения 700 Гц и глубине воды, превышающей 10 м, отражающие границы находятся в дальней зоне от источника, а максимальный угол отражения для дна достигает 25°.

При синхронизации возбуждения по времени неравномерность шага между ПВ может привести к изменению кратности наблюдений. Для контроля скорости буксировки по сглаженным координатам рассчитывалось изменение расстояния по профилю. Полученный интервал изменения скоростей буксировки приемноизлучающей системы изменялся от 2 до 2,5 м/с, что соответствует запланированной скорости и удовлетворяет требованиям формирования сейсмограмм ОСТ. Положение источника и первого канала сейсмокосы в плане было задано и измерено перед началом работ. Для контроля положения приемных каналов рассчитанные расстояния источник-приемник сравнивались со временем прихода прямой волны (рис. 3.5).





Определение геометрии планового положения расстановки приповерхностной системы наблюдений, как правило, не представляет особой сложности. При этом невозможность контроля заглубления каналов пьезокосы в процессе съемки приводит, как будет показано ниже, к существенным осложнениям при динамическом анализе отраженных волн.

Приемная система

Для оценки пригодности данных к динамическому анализу прежде всего необходимо оценить амплитудно-частотную идентичность приемных каналов. Подобные измерения недостаточно проводить в лабораторных условиях перед началом работ, так как полевые условия могут повлиять на чувствительность приемников, а питание встроенных усилителей может со временем измениться и привести к неидентичности каналов.

В случае приповерхностных наблюдений прямая волна не может быть использована для оценки характеристик приемного тракта из-за ее интерференции с волной-спутником. Поэтому контроль качества данных для различных каналов принято проводить по отражениям от морского дна, что не всегда корректно из-за зависимости отражающей способности от угла падения.

Как правило, в приемных устройствах используют группирование для подавления помех, распространяющихся вдоль пьезокосы, что приводит к искажению истинного соотношения амплитуд отраженных волн (влияние диаграммы направленности группы). В связи с тем, что в процессе съемки положение приемной линии (пьезокосы) в водной толще более стабильно по сравнению с положением источника акустических колебаний, погрешность в определении диаграммы направленности приемной группы существенно меньше, чем для источника. Тем не менее даже небольшие погрешности в определении диаграммы направленности приемной группы не желательны при проведении динамического анализа многоканальных сейсмоакустических данных. В настоящей работе предлагается исключить влияние направленности в приемной линии на этапе проведения работ за счет использования единичных гидрофонов без группирования.

В случае сейсмоакустических наблюдений с приповерхностной методикой основной проблемой при проведении динамического анализа является учет влияния интерференционной системы, связанной с поверхностью моря, которое различно для каждого канала. На рисунке 3.6 представлены сейсмограммы равных удалений для первого и последнего, шестнадцатого каналов, а на рисунке 3.7 – для первого, пятого, девятого и тринадцатого каналов записи соответственно. На представленных данных (рис. 3.8, рис. 3.9) можно наблюдать рассогласование зондирующего импульса, увеличивающееся к последнему шестнадцатому каналу.


Рис. 3.6. Сейсмограмма равных удалений для 1-го (А) и 16-го (Б) каналов записи соответственно



Рис. 3.7. Сейсмограмма равных удалений для 1, 5, 9 и 13-го каналов записи соответственно с введенными статическими поправками (отражение от дна приведено к одному уровню)



Рис. 3.8. Сигнал отраженной от дна волны в зависимости от канала (отражение от дна приведено к одному уровню)



Рис. 3.9. Спектр сигнала отраженной от дна волны в зависимости от канала

Из рисунка 3.8 видно, что форма сигнала сильно различается на разных каналах. На рисунке 3.9 также заметны существенные различия в амплитудных спектрах. Данные различия обусловлены разницей в заглублении приемников, которое может быть определено по положению «нулей заглубления» (notches) в частотной области.

Если на первом канале наблюдается конструктивная интерференция отраженной от дна волны и ее спутника от источника благодаря оптимальному заглублению источника и приемника, то для последнего шестнадцатого канала данное условие не выполняется. С изменением расстояния от источника к приемнику (даже при постоянной глубине приемников вдоль сейсмической косы) изменяется время запаздывания волн-спутников, зависящее от угла подхода отраженной волны. Угол подхода, даже в случае горизонтально-слоистой среды, будет изменяться с глубиной отражающей границы, что, в свою очередь, приведет к изменению параметров интерференционной системы источник – свободная поверхность – приемник. Таким образом, для многоканальных сейсмоакустических наблюдений принципиально невозможно в широкой полосе частот создать условия «оптимального» согласования отраженной волны и волны-спутника.

Излучающая система

Для проведения многоканальных сейсмоакустических исследований используются различные источники: пневматические пушки малого объема, электроискровые, электродинамические и пьезокерамические излучатели. В процессе проведения работ использовался электроискровой источник упругих колебаний типа спаркера, наиболее удобный для проведения опытнометодических работ. Связь между электрической энергией единичного

источника и параметрами возбуждаемых импульсов накладывает существенные ограничения на возможность варьирования глубинности и вертикальной разрешающей способности при исследованиях с использованием единичного источника. Увеличение интенсивности возбуждаемых акустических колебаний, т. е. потенциальной глубинности метода, приводит к ухудшению разрешающей способности метода. В этой связи возникает методическая и техническая задача независимого варьирования интенсивности и длительности генерируемых колебаний при фиксированном значении энергии источника. Эту задачу можно решать путем группирования источников, когда заданная общая накопительная *W* трансформируется энергия В акустическую одновременно через N отдельных излучателей. Физическая предпосылка для такого решения задачи заключается в том, что если амплитуда упругого импульса пропорциональна *W*^{*a*}, то амплитуда импульса, возбуждаемая одновременно *N* независимыми источниками с энергией каждого *W/N*, будет пропорциональна (*W/N*)^{*a*}. Тогда суммарная интенсивность излучаемой упругой волны будет пропорциональна $(W/N)^{\alpha} N = N^{1-\alpha} W^{\alpha}$ при $\alpha < 1$, что имеет место для всех известных источников упругих волн. В итоге получается выигрыш, пропорциональный $N^{1-\alpha} > 1$. Из физических основ образования упругих волн очевидно, что длительность упругих импульсов, включая повторные удары, и длительность фаз сжатия будут уменьшаться, причем (*W*/*N*) $^{\beta} \approx T$, и в первом приближении для сферически симметричного источника энергии $\beta \approx 1/3$. Таким образом, повышение интенсивности волны, возбуждаемой групповым источником, неизбежно будет сопровождаться уменьшением ее длительности, сдвигом всех спектральных составляющих в сторону высоких частот и общим расширением спектра. Также предполагается, что расстояния между отдельными излучателями в группе таковы, что между ними отсутствует взаимовлияние, а характерные максимальные размеры всей группы много меньше минимальной длительности волны в спектре принимаемого сигнала. В этом случае источник упругих волн рассматривается как точечный [Калинин и др., 1983]. Рассмотрим соответствие этого утверждения для излучателя, стандартно используемого при проведении сейсмоакустических работ «сверхвысокого разрешения».

В эксперименте, который проводился автором в диссертации, использовался электроискровой источник упругих волн длиной 1,5 м с расположенными на нем 36 электродами с шагом 5 см (рис. 3.10, рис. 3.11, рис. 3.12).



Рис. 3.10. Схема устройства электроискрового источника упругих волн типа спаркера, использованного при проведении экспериментальных работ с приповерхностной методикой



Рис. 3.11. Спектр регистрируемого сигнала. Энергия электроискрового источника упругих волн W/N = 10 джоулей



Рис. 3.12. Схема расположения электродов (А) и диаграмма направленности для источника упругих колебаний на центральной частоте 1000 Гц (Б)

Параметры группы наиболее просто рассчитываются для случая, когда криволинейностью годографа наблюденной волны можно пренебречь, т. е. сейсмические волны можно считать локально плоскими, а их кажущиеся скорости в пределах базы группы – постоянными. Для однородной группы с постоянным шагом dx между приемниками с прямоугольной огибающей характеристика направленности группы R(k) имеет вид:

$$R(k) = \sum_{k=1}^{N} \exp\left[-j(-1)dxk^*\right] = \frac{\sin\frac{1}{2}nk^*dx}{n\sin\frac{1}{2}nk^*dx} = \frac{\sin\left(n\pi\frac{\sin\theta dx}{\lambda}\right)}{n\sin\left(\pi\frac{\sin\theta dx}{\lambda}\right)},$$
(3.2)

где *k* – кажущееся волновое число [Боганик и Гурвич, 2006].

Одним из следствий группирования источников является зависимость амплитуды регистрируемого сигнала в широкой полосе частот от угла наклона излучателя по отношению к отражающей границе и плоскости источник-приемник. На основании рисунка 3.12 можно сделать вывод, что при изменении угла наклона источника на 20° амплитуда отраженной волны изменится не менее чем на 20%, что значительно превышает допустимый порог для AVO-анализа [Токарев, Пирогова, 2015]. К тому же заглубление источника даже на 1,5 м может изменяться в процессе съемки, что, в свою очередь, приведет к изменению формы волны-спутника в источнике.



Рис. 3.13. Электродинамический источник типа бумера, закрепленный на плотике

Частично ситуация может быть улучшена при использовании плотика с закрепленным источником (рис. 3.13), но несущественно, так как важно изменение положения группы не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости.

Однако даже в случае буксировки источника под плотиком с фиксированным заглублением зондирующий сигнал, сформированный интерференционной

системой источник-приемник поверхность воды будет значительно зависеть от волнения моря и изменяться от выстрела к выстрелу. Пример различий в дисперсии амплитуд зондирующего сигнала без влияния волны-спутника и с его учетом приведены ниже (рис. 3.14).



Рис. 3.14. Дисперсия амплитуд зондирующего сигнала (А), волны-спутника (Б) и оптимально согласованного сигнала по данным полевых наблюдений (В)

В главе 1 упоминается, что при использовании заглубленной системы наблюдений стабильность излучения можно оценить по амплитуде и форме зарегистрированной прямой волны. Иная ситуация возникает в случае приповерхностной буксировки: прямая волна интерферирует с отражением от поверхности воды (рис. 3.15) и не может быть использована для коррекции



Рис. 3.15. Лучевая схема распространения прямой волны и волны, отраженной от свободной поверхности

амплитуд, а форма сигнала, измеренная в водной толще с заглубленным контрольным приемником, не совпадает с зондирующим сигналом за счет волнспутников в приемной системе (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Зарегистрированные сигналы прямой волны для каждого выстрела по профилю. Многоканальные наблюдения с приповерхностной методикой

Из-за указанных проблем, проиллюстрированных на рисунке 3.15 и рисунке 3.16, зондирующий сигнал принято оценивать по зарегистрированным отражениям донного импульса. В таблице 3.1 приведена оценка разброса амплитуд донного импульса при выборке 50 трасс по данным ОМР на тестовом профиле в Кандалакшском заливе Белого моря.

Канал	Среднее значение	Мин. значение	Макс. значение	Ст. отклонение, %
1	7611	2579	7575	38
2	11679	1194	15906	38
6	11919	1662	26244	36
9	11548	1904	27480	33
10	12085	638	27861	41
11	11543	1298	31517	42
12	12236	1643	31913	36
			2	24
13	12037	1182	9884	34
14	11162	952	25646	35
16	10470	1815	27026	35
	Выборка:	50 трасс	(1880–1930)	

Таблица 3.1. Оценка разброса амплитуд (для каждого канала) по данным многоканальных наблюдений с приповерхностной методикой

Стандартное отклонение для главного максимума донного отражения приповерхностной системы составило около 40%.

Помехи

Как было упомянуто выше, характерными уже помехами при приповерхностных наблюдениях являются некогерентные помехи: ШУМ, вызванный кильватерной струей, акустическим излучением механизмов судна, обтеканием косы, вибрациями буксирующего кабеля и т. д. Когерентные помехи, а именно поверхностные кратные волны, волны-спутники, мешают анализу данных ССВР в меньшей степени, чем в случае стандартной разведочной сейсморазведки, так как требуемая глубинность исследований ССВР часто сравнима или меньше глубины воды на площади исследований.

На рисунке 3.17 приведены спектры полезного сигнала и некогерентной помехи.



Рис. 3.17. Оценка частотных характеристик случайной помехи (А) и сигнала (Б). Данные 2011 г.

Основная энергия некогерентного шума находится в низкочастотной области (частоты ниже 50 Гц) и не является проблемой для обработки данных. Тем не менее из оценки сигнал/помеха, рассчитанной как отношение пиковой амплитуды донного отражения к среднеквадратической амплитуде шума, видно, что в рабочей полосе частот для многоканальных данных, полученных с приповерхностной методикой наблюдения, уровень шумов также достаточно высок (3–7 для разных каналов).

Выводы

Рассмотрение методических аспектов полевых наблюдений с приповерхностной системой на примере данных ОМР в Кандалакшском заливе Белого моря в 2011–2015 гг. показало следующее.

• Геометрические параметры приемно-излучающей системы позволяют проводить стандартный кинематический анализ МОВ ОГТ с заданной точностью до заданных глубин.

• Стандартные средства привязки позволяют определять плановую геометрию расстановки с достаточной точностью.

• Форма зондирующего сигнала в общем случае не может быть определена в процессе наблюдений: прямая волна не может быть использована для определения излучаемого импульса в силу интерференции с отражением от поверхности воды, а импульс, накопленный по донному отражению, в силу возможной интерференции с отражениями от поддонных границ.

• Условия возбуждения и приема не идентичны от выстрела к выстрелу в широкой полосе частот, и амплитудно-частотные характеристики приемных каналов не могут быть измерены вне влияния поверхности воды.

• Влияние свободной поверхности и необходимость применения многоэлектродных излучателей для достижения необходимого частотного диапазона приводит к тому, что диаграмма направленности приемной и излучающей системы существенно отличается от сферической.

• На тестовом примере автором показано, что отношение сигнал/шум на дне составило приблизительно от 3 до 7, разброс амплитуд излученного импульса около 40% для различных каналов. При центральной частоте излучения 700 Гц и глубине воды, превышающей 10 м, отражающие границы находятся в дальней зоне от источника, а максимальный угол отражения для дна достигает 25°.

Основным выводом является утверждение, что данные сейсмоакустических наблюдений с приповерхностной расстановкой удовлетворяют требованиям кинематического анализа, но не обладают достаточным качеством для количественного анализа динамических характеристик. Далее будет показано, что данные, полученные при проведении многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной расстановкой, лишены этого недостатка.

§2. Методика многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленными системами

Методика работ

Одним из основных недостатков сейсмоакустического профилирования с поверхностными системами является невысокая динамическая стабильность как излучаемого, так и принимаемого сигнала из-за влияния волнения поверхности воды и невозможности его контроля в процессе съемки. Искажения амплитуд за счет влияния свободной поверхности можно избежать, погружая приемноизлучающую расстановку на некоторую глубину. Как известно, при наблюдениях на акваториях возбуждение и прием колебаний производятся в идеальной с точки зрения стабильности среде – водной толще. Кроме того, выбор энергии и глубины погружения источника позволяет формировать спектр возбуждаемых колебаний [Калинин и др., 1983]. Все это открывает возможности использования динамических особенностей отраженных волн для определения физических свойств геологической среды.

Конфигурация приемно-излучающей системы

Принципиальная схема работ с заглубленной расстановкой изображена на рисунке 3.18. С помощью обтекаемого груза, прикрепленного к концу металлического троса, расстановка, состоящая из излучателя (спаркера) и пьезокосы, погружается на глубину, превышающую требуемую глубинность по грунту (если она не превышает глубины дна в районе исследования).



Рис. 3.18. Принципиальная схема наблюдений с заглубленной расстановкой. 1 – заглубитель (вес 100 кг), 2 – спаркер (34 электрода, мощность 800 Дж, заглубление 10–25 м),

3 – коса (16 каналов, с шагом 2 м, заглубление 10–25 м)

Волновая картина, получаемая при работах с заглубленными системами, существенно отличается от волновой картины, получаемой с методикой оптимального заглубления. Однократные отражения, являющиеся основным носителем интересующей информации о свойствах придонных осадков, оказываются хорошо отделенными по времени от волн-спутников и не подверженными влиянию поверхности вода-воздух (рис. 3.19, рис. 3.20, рис. 3.21).



Рис. 3.19. Пример сейсмической записи по одному из профилей, полученному с заглубленной расстановкой. Канал № 1



Рис. 3.20. Сейсмограммы ОПВ по одному из участков профиля



Рис. 3.21. Траектории лучей в методике с заглубленной расстановкой

Отражения от более глубоких границ интерферируют с волнами-спутниками. Однако применение современных способов обработки данных позволяет существенно ослабить фон помех и сделать интерпретируемыми эти интервалы временных разрезов (глава 4).

Наибольшие сложности при проведении работ с заглубленной системой связаны с неравномерным заглублением приемной косы. С одной стороны, это обусловлено отсутствием активных заглубителей для сейсмоакустических кос, с другой – с изменением объема маслонаполненных кос в случае изменения гидростатического давления. Однако эти сложности не носят принципиального характера и могут быть решены посредством применения твердотельных кос и разработки заглубителей. В работе [Breitzke and Bialas, 2003] описывается большая сейсмическая система глубинной буксировки, где все основные геометрические параметры записывались последовательно, что позволяло более точно производить ввод геометрии без дополнительных расчетов. Гетруст и Вуд [Gettrust, Wood, 2004] разработали систему, содержащую помимо основного сейсмоакустического комплекса дополнительное оборудование: эхолокаторы, датчики давления и т. д. Использование такой системы, очевидно, увеличивает стоимость съемки и делает ее более сложной. Во многих случаях дополнительные приспособления нежелательны, и съемка выполняется без дополнительного позиционирования источника и пьезокосы в водной толще.

Когда неизвестно точное положение источника и косы, точная геометрия систем, буксируемых на глубине, может быть восстановлена по измеренным



Рис. 3.22. Геометрия лучевых траекторий волн, значения времен пробега которых используются для восстановления точных параметров системы глубинной буксировки

временам пробега пяти типов волн (рис. 3.22): (T_1) прямой волны, (T_2) отражению от дна, (T_3) отражению от поверхности воды и двум волнам-спутникам – (T_4) спутнику в источнике и (T_5) в приемнике [Walia and Hannay, 1999].

Простые геометрические реконструкции по рисунку 3.23 позволяют составить систему уравнений:

$$\begin{cases} (T_1 V)^2 = (A - B)^2 + X_2 \\ (T_2 V)^2 = (A + B)^2 + X_2 \\ (T_3 V)^2 = (d_r + d_s)^2 + X_2 \\ (T_4 V)^2 = (A + B + 2d_s)^2 + X_2 \\ (T_5 V)^2 = (A + B + 2d_r)^2 + X_2 \end{cases}$$
(3.3)



Рис. 3.23. Геометрические построения системы прямоугольных треугольников, позволяющей составить систему уравнений (3.3)

где T₁, T₂, T₃, T₄, T₅ – двойные времена пробега волн, V – скорость в воде, d_s – глубина источника, d_r – глубина приемника, X – горизонтальное расстояние между источником и приемником, A и B – высота приемника и источника над морским дном соответственно. Все геометрические построения в данном методе основаны на предположении о том, что морское дно горизонтальное.

Решая систему уравнений, получаем все параметры геометрии системы глубинной буксировки. На основе этих параметров можно оценить статические сдвиги, необходимые для приведения данных на один уровень. Глубины





буксировки отдельных приемников косы, рассчитанные по временам пробега волн для тестового профиля, приведены на рисунке 3.24.

Представленный метод определения параметров геометрии заглубленной системы, основанный на временах прихода волн, безусловно, полезен и позволяет в отсутствие каких-либо данных о положении системы восстановить ее в рамках заданной точности. Основные ограничения, не позволяющие провести точный расчет геометрических параметров, – это, во-первых, допущение о горизонтальности границы дна, во-вторых, погрешности в пикировании первых вступлений отраженных волн. Помимо прочего, трудно избежать ошибок, связанных с определением времен прихода волн-спутников из-за их плохого прослеживания в результате интерференции с отражениями от поддонных границ (рис. 3.25).



Рис. 3.25. Иллюстрация затруднений в прослеживании волн-спутников

Также стоит отметить, что одним из методических требований к приемной системе является требование сферической диаграммы направленности, которая может быть обеспечена за счет использования одиночных пьезоприемников в приемной линии.

Буксировка приемно-излучающей системы

В отличие от приповерхностных наблюдений использование заглубленной системы не нуждается в боковом выносе, она может быть развернута вдоль оси судна. Кильватерная струя маломерных судов не достигает глубины 10 метров, и, таким образом, за счет погружения системы глубже этого уровня влияние шумов обтекания и поглощения энергии излучения пузырьками воздуха становится минимальным. Регулировка заглубления осуществляется за счет изменения угла атаки в активных заглубителях, веса груза в пассивных заглубителях, скорости буксировки и в основном длины троса-носителя.

Результаты опытно-методических работ с заглубленной многоканальной сейсмоакустической системой

Ниже приведены результаты контроля качества сейсмоакустических данных, полученных по разработанной автором методике глубинной буксировки, на примере опытно-методических работ, которые проводились в Кандалакшском заливе Белого моря с 2003 года. В качестве приемной системы использовалась 16-канальная пьезокоса с интервалом между одиночными гидрофонами (без группирования) 2 м. Для расширения динамического диапазона регистрации прямой волны дополнительно три одиночных гидрофона с пониженной чувствительностью. В разные полевые сезоны применялись различные источники акустических колебаний – многоэлектродные и одноэлектродные излучатели различной конфигурации.

Буксировка системы производилась на глубинах от 5 до 40 м в зависимости от местонахождения полигона исследований.

Приемная система

Заглубление системы не оказывает непосредственного влияния на идентичность приемных условий, так как чувствительность гидрофонов практически не меняется с изменением глубины. Кроме того, оно позволяет, в отличие от данных

приповерхностной методики, проводить контроль идентичности параметров приемного канала по сигналу прямой волны.

Проведем анализ идентичности приема по прямой волне на конкретном примере. Зарегистрированные сигналы прямой волны, осредненные по каналу и приведенные к одному времени, представлены на рисунке 3.26, а на рисунке 3.27 показаны соответствующие им амплитудные спектры.





Рис. 3.26. Сигнал прямой волны (осреднение по каналу)



Представленные выше графики иллюстрируют тот факт, что амплитудночастотные характеристики рассматриваемых приемных каналов идентичны.

Далее выполнялась проверка уровня аналогового усиления для каждого гидрофона. Для этого по трем пикам прямой волны снимались амплитуды до и после коррекции за сферическое расхождение фронта и анализировался характер поведения амплитуд в зависимости от удаления, что иллюстрирует рисунок 3.28.



Рис. 3.28. Сейсмические трассы в сортировке канал – ПВ с выделенными временами первых вступлений (А), амплитуды первых вступлений прямой волны до коррекции за расхождение фронта (Б)

Как видно из рисунка 3.28, амплитуды прямой волны на первом и втором каналах записи интерферируют с сигналом наводки. Из-за этого влияния поведение амплитуд на первом и втором каналах регистрации до учета геометрического расхождения фронта нелинейно относительно выноса (расстояние источник-приемник). В дальнейшем эти данные не использовались для расчета поправок по каналам.

После коррекции амплитуд за сферическое расхождение выделились две группы гидрофонов с различным усилением: первая группа с номерами 5, 11, 12 и вторая – № 6, 10, 14, что отчетливо видно на рисунке 3.29.



Рис. 3.29. Амплитуды прямой волны по профилю для каналов № 5, 6, 10–12, 14, после коррекции за сферическое расхождение фронта. Выделяются две группы приемников с различным усилением

Были рассчитаны и введены в эти данные соответствующие поправочные коэффициенты за разное усиление каналов (таблица 3.2). Амплитуды после коррекции представлены на рисунках 3.30 и 3.31.

Таблица 3.2. Нормировочные коэффициенты для каждого канала для приведения записи к одному уровню усиления

Канал	Нормировочный коэффициент
5	1.043
6	1.012
10	1
11	1.040
12	1.044
14	1.001



Рис. 3.30. Амплитуды прямой волны по профилю для каналов № 5, 6, 10–12, 14 после коррекции за сферическое расхождение фронта и за различное усиление каналов



Рис. 3.31. Сейсмические трассы в сортировке канал – ПВ с выделенными временами первых вступлений (А), амплитуды прямой волны после коррекции за сферическое расхождение фронта и за различное усиление каналов № 5–14 (Б)

Для первых двух каналов, на которых запись прямой волны искажена влиянием наводки (рис. 3.31), приведение к одному уровню усиления выполнялось по волне, отраженной от свободной поверхности (рис. 3.32).

90



Рис. 3.32. Амплитуды волны, отраженной от свободной поверхности, по первому вступлению. 5-й и 6-й каналы скорректированы за усиление приемников

Таблица 3.3. Нормировочные коэффициенты за усиление для 1-го и 2-го каналов

Канал	Нормировочный коэффициент
1	1.102
2	1.104

Распределение амплитуд прямой волны по каждому каналу после ввода поправок за различное усиление приемников и расхождение фронта обусловлено неидентичностью излучения колебаний и присутствием шума, поэтому амплитуды также необходимо корректировать за функцию источника возбуждения колебаний.

Излучающая система

Самым большим достоинством технологии с заглубленной многоканальной расстановкой является стабильность зондирующего импульса, его независимость от состояния поверхности моря. Прямая волна не интерферирует с отражением от свободной поверхности, что дает возможность контролировать форму сигнала как вдоль самой косы, так и от возбуждения к возбуждению.

На рисунке 3.33 представлена сейсмограмма ОПВ с прямой волной, зарегистрированной с заглубленными пьезокосой и многоэлектродным спаркером в качестве источника акустических колебаний. Для более четкого контроля изменения амплитуды и формы волны от канала к каналу вступления прямой волны приведены к одному времени. Как видно из рисунка, амплитуда прямой волны монотонно затухает, сигнатура практически не меняется, о чем свидетельствует идентичная форма спектров.



Рис. 3.33. Пример сейсмограммы ОПВ, полученной с заглубленной расстановкой (источник – спаркер). Справа показаны спектры прямой волны для разных приемных каналов

Однако подобное замечание верно только для излучающей системы со сферической диаграммой направленности. На рисунке 3.34 приведена форма спектра отраженной от дна волны, которая незначительно меняется от возбуждения к возбуждению (спектр 1–3 или 2–4) и изменяется существенно от канала к каналу (спектр 1–2 или 3–4). По мнению автора, причина этого явления в диаграмме направленности многоэлектродного источника.



Рис. 3.34. Пример двух сейсмограмм ОПВ, полученных с заглубленной расстановкой (источник – многоэлектродный спаркер)

Учет диаграммы направленности при анализе сейсмоакустических данных необходим для восстановления «истинных» соотношений амплитуд отраженных волн для разных углов отражения. Для высокочастотных наблюдений в полосе до 2,5 кГц разница между теоретической функцией направленности для заданной конфигурации источника и реальной направленностью может быть

92

крайне существенной [Riedel, Theilen, 2001]. Это связано с неконтролируемым изменением заглубления источника в процессе буксировки. При погружении источника на глубину его положение в среднем становится более стабильным, чем в случае приповерхностной буксировки. Однако погрешность в оценке диаграммы направленности все равно будет присутствовать, хотя и менее значительная.

Одним из способов исключения влияния диаграммы направленности излучения может быть использование точечного источника, например одноэлектродного спаркера. Заглубление такого источника на глубину позволяет получить сферическую диаграмму направленности при сохранении требуемой центральной частоты излучения.

Ниже приведены данные, полученные автором в результате полевого эксперимента 2013 года с заглубленными пьезокосой и одноэлектродным спаркером. Подаваемая энергия в накопителе составила 50 Дж. При заглублении на 35 м центральная рабочая полоса частот излучаемого импульса составила от 50 Гц до 4 кГц с преобладающей частотой сигнала около 500 Гц (рис. 3.35).



Рис. 3.35. Пример сейсмоакустических данных, полученных с заглубленной расстановкой. Сейсмограмма равного удаления

Контроль идентичности условий приема и излучения проводился по прямой волне. Стандартное отклонение амплитуд по исходным данным в рабочей полосе частот составило 6%, что значительно меньше, чем для данных, полученных при

помощи аналогичной системы, но буксируемой около поверхности моря. Форма импульса прямой волны для соседних выстрелов приведена на рисунке 3.36.



Рис. 3.36. Форма импульса прямой волны для соседних выстрелов

Плавные изменения интенсивности измеряемых амплитуд могут быть связаны с изменением глубины буксировки и, соответственно, формой зондирующего импульса. После приведения условий приема к идентичным, автор рекомендует выполнять коррекцию за функцию источника посредством применения процедуры потрассной сигнатурной деконволюции с сигналом прямой волны. Погрешность амплитуд после этой процедуры не превысила 2% (рисунок 3.37, таблица 3.4).



Рис. 3.37. Сейсмические трассы в сортировке канал – ПВ с выделенными временами первых вступлений (А), амплитуды прямой волны по профилю для каждого канала записи после коррекции за неидентичность приема и излучения (Б)

Для каналов с пятого по четырнадцатый оценка разброса амплитуд для различных каналов была выполнена по амплитудам прямой волны (таблица 3.4).

Канал	Среднее значение	Мин. значение	Макс. значение	Разброс между мин. и макс., %	Ст. отклонение, %
5	3.71	3.59	3.78	5.1	1.26
6	3.83	3.68	4.03	9.1	2.01
10	3.76	3.71	3.81	2.7	0.57
11	3.81	3.76	3.84	2.1	0.4
12	3.73	3.66	3.79	3.5	0.68
14	3.66	3.54	3.74	5.5	0.85

Таблица 3.4. Разброс амплитуд для различных каналов заглубленной системы

Остаточное отклонение амплитуд прямой волны от среднего значения после деконволюции обусловлено присутствием шума в записи.

Для первого и второго каналов оценка разброса амплитуд выполнялась по амплитудам волн-спутников (таблица 3.5).

Таблица 3.5. Разброс амплитуд для различных каналов заглубленной системы для каналов 1 и 2

Канал	Среднее значение	Мин. значение	Макс. значение	Ст. отклонение, %
1	2.77	2.53	2.92	2.91
2	2.83	2.58	3.04	3.21

Таблица 3.6. Отношение сигнала к помехе для многоканальных данных, наблюденных с заглубленной методикой

Канал	Отношение сигнал/помеха (по донному импульсу)
1	29
2	32
5	39
6	39
10	37
11	34
12	31
14	27

Таким образом, амплитуды сейсмической записи, полученной с помощью описанной выше методики, могут быть приведены к уровню, соответствующему идентичным условиям приема и излучения, в рамках заданной точности, определяемой отношением сигнала к помехе (таблица 3.6).

Помехи

При сходных сейсмогеологических условиях данные, наблюденные с заглубленной методикой, характеризуются большим отношением полезного сигнала к помехе (в 4–10 раз для разных каналов записи), что, вероятно, обусловлено отсутствием влияния поверхностных условий на запись при буксировке приемно-излучающей системы на большой глубине (рис. 3.38).



Рис. 3.38. Отношение амплитуды первых вступлений для донного отражения (соотв. пикировке) к среднеквадратичному шуму в окне 3 мс

Выводы

Рассмотрение методических аспектов полевых сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой на примере данных ОМР в Кандалакшском заливе Белого моря в 2011–2015 гг. показало следующее.

• Для выполнения стандартного кинематического анализа МОВ ОГТ на данных многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой необходимо привести наблюдения к единому уровню.

• Для определения геометрии расстановки с заданной точностью не достаточно использования стандартных навигационных средств. Необходимо применять либо дорогостоящие средства подводной привязки либо проводить дополнительные расчеты по временам прихода волн различных типов.

• Заглубление расстановки обеспечивает больший диапазон углов отражения волн и более высокую разрешающую способность по времени и по горизонтали по сравнению со стандартными наблюдениями по приповерхностной методике.

• Форма зондирующего сигнала может быть определена в процессе наблюдений по прямой волне.

• Условия приема и возбуждения мало меняются от выстрела к выстрелу и могут быть приведены к идентичным с использованием зарегистрированного зондирующего импульса.

• Использование заглубленного одноэлектродного спаркера позволяет получить сферическую диаграмму направленности при сохранении требуемой центральной частоты излучения, а применение одиночных гидрофонов без группирования – сферическую диаграмму направленности для приемной системы.

• На тестовом примере соотношение сигнал/шум на дне составило приблизительно от 30 до 40, разброс амплитуд излученного импульса около 3% для различных каналов до приведения условий приема и возбуждения к идентичным, максимальный угол отражения от дна достигал 35°.

Основным выводом проведенных исследований является утверждение, что данные сейсмоакустических наблюдений с заглубленной расстановкой обладают достаточным качеством для количественного анализа динамических характеристик однократно отраженных волн в диапазоне времен, соответствующем заглублению приемно-излучающей системы.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ГРАФА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Цель предлагаемой технологии работ – определение структуры и упругих свойств придонных отложений. В § 5 первой главы были сформулированы требования к качеству сейсмоакустических данных для эффективного проведения кинематического и динамического анализа. Большинство задач должно быть решено на этапе сбора данных и определяется аппаратурно-методическими параметрами съемки. Так, длина годографа, шаг между точками возбуждения и приема, глубина буксировки и диапазон углов падения волн на целевую границу, параметры группирования, определяющие диаграмму направленности приемной и излучающей системы, являются основными факторами, влияющими на качество данных. Задача обработки – «исправить» объективные или случайные «погрешности» полевых наблюдений. Результаты наблюдений с заглубленными системами для изучения верхней части геологического разреза, как было рассмотрено в третьей главе, имеют несомненные преимущества перед приповерхностными системами. Прежде всего следует отметить, что в этом случае в целевом интервале исследования рассматриваются однократные отражения, не осложненные интерференцией с отражениями от поверхности воды, для которых справедливо выражение (1.5) первой главы. Кроме того, при размерах источника и приемной группы меньше длины волны верхней границы рабочего диапазона частот, в нашем случае 30 см, можно считать диаграмму направленности сферической и привести выражение для сейсмической трассы к виду:

 $S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * [Sou(t)] * [Rec_n(t)] * f_n(t, \tau, x_n) \times F_n(r) + N_r, \qquad (4.1)$

где t – время, n – номер сейсмического приемника, x_n – расстояние между источником и n-м приемником, θ_n – угол отражения, τ – временной параметр,

Sou(*t*) – сигнатура зондирующего импульса,

Rec_n(t) – функция n-го приемника (амплитудно-частотная характеристика приемного устройства),

 $f_n(t, \tau, x_n)$ — функция, характеризующая частотно-зависимые изменения зондирующего импульса при распространении в среде,

 $F_n(r_n)$ — функция, определяющая частотно-независимые потери при распространении волны на расстояние *r* для n-го приемника,

 N_r – помехи.

Следует отметить, что в случае необходимости изучения геологического разреза на глубину, превышающую заглубление приемоизлучающей системы, к случайным помехам следует добавить основные регулярные помехи, связанные с границей вода-воздух, волны-спутники и кратные волны.

В этом случае задачи подготовки данных к динамическому анализу сводятся к подавлению помех N_r , построению глубинно-скоростной модели среды для учета и оценки поглощения для компенсации $f_n(t,\tau,x_n)$, определению идентичности приемных каналов $Rec_n(t)$ и стабильности излучения Sou(t) с последующим построением корректирующего фильтра для приведения условий возбуждения и приема к идентичным.

Для обработки данных многоканальных сейсмоакустических наблюдений под руководством и при непосредственном участии автора была разработана система RadExPro – первая полнофункциональная система обработки данных сейсмоакустических наблюдений на акваториях (свидетельство № 2006612028) [Токарев, 1997; Гофман П.А. и др. 2002]. Несмотря на разнообразие средств, предоставляемых указанной системой, для данных, полученных с заглубленной установкой, на некоторых этапах обработки потребовалась модификация существующих и в некоторых случаях разработка дополнительных алгоритмов. Среди них следует отметить следующие процедуры, которые были разработаны и усовершенствованы при участии автора:

• восстановление глубин буксировки и пространственного положения элементов приемно-излучающей системы по временам прихода прямой волны, отражений от морского дна и волн-спутников;

• приведение источника и приемника на один уровень наблюдений (посредством ввода статических поправок);

• оценка условий приема и возбуждения по сигнатуре зондирующего импульса (по сигналу прямой волны), соответствующая коррекция амплитуд;

• удаление случайных высокоамплитудных помех, характерных для данных, полученных в условиях глубинной буксировки;

• деконволюция с использованием сигнатуры прямой волны для каждой трассы;

• моделирование и адаптивное вычитание волн-спутников.

В целом последовательность процедур обработки при наблюдениях с многоканальной заглубленной сейсмоакустической системой та же, что и для

данных, полученных при помощи других модификаций МОВ ОГТ [Хаттон, 1989]. Стандартный граф выглядит следующим образом.

- Загрузка данных и присвоение геометрии наблюдений.
- Контроль качества входных данных.
- Оценка идентичности условий возбуждения и приема.
- Подавление нерегулярных помех.
- Подавление регулярных помех.
- Обработка сигналов.
- Кинематический анализ.
- Построение сейсмических изображений.
- Подготовка данных для динамического анализа.

Ниже приведено описание указанных разработанных процедур обработки и продемонстрировано их применение на одном из профилей, отработанных на тестовом полигоне в Кандалакшском заливе Белого моря в 2016 году (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Положение тестового профиля (отмечено красным) на карте фактического материала сейсмоакустических наблюдений в проливе Великая Салма в 2003–2016 гг.

Сейсмоакустические работы проводились с борта НИС «Академик Зенкевич». Скорость буксировки при проведении съемки составляла 4 узла (≈ 2 м/с). Позиционирование судна осуществлялось с помощью системы GPS с точностью приблизительно 2 метра. Интервал возбуждения 1 сек. В качестве накопителя энергии использовался блок CSP-D, который разряжался через 26-электродный излучатель на базе 20 см. Система буксировалась на глубине 40 метров, при этом источник находился вблизи 3-го канала, на 1 метр ниже пьезокосы. При таких параметрах возбуждения центральная частота сигнала составила 1000 Гц, а рабочая полоса частот 50-4000. Прием сигнала осуществлялся 16-канальной аналоговой косой, в которой одиночные пьезоприемники расположены через 1,5 метра. После предварительного усиления и аналоговой фильтрации оцифровка сигнала производилась на 16-битной станции с шагом дискретизации 0,05 мс. Длина записи составила 400 мс. В районе исследований глубина воды составляла 80 метров, таким образом, система буксировалась на 40 метрах от поверхности дна. На представленной части профиля угол отражения от дна достигает 14°. Пример полученных данных приведен на (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Пример 2D-данных ССВР, полученных при наблюдениях с заглубленной системой в 2016 году

§1. Контроль качества и обработка сигналов Контроль качества входных данных

Контроль качества данных осуществляется как в процессе полевых наблюдений, так и при формировании графа обработки данных.

В системе для обработки RadExPro для осуществления контроля качества данных используются модули *Ensemble QC (контроль качества ансамбля трасс)* для поканальной оценки отношения сигнал/шум и контроля проектных параметров, таких как рабочая полоса частот, уровень регулярных и нерегулярных помех, разрешающая способность и др. (рис. 4.3).

Ensemble QC Compute	×
Window Amplitite Image: Polygonal Image: Load polygon Image: Polygonal Image: Poly	ude an Trace Header RMS AAXSLOP 💌 an 1D RMS
Signal / Noise ratio Iv Compute Signal/Noise Ratio Min frequency 0 Max frequency 125 C Max shift 10 Resolution Iv Compute resolution SOU_H2OD Max time of Mode: Iv South200 Iv Max time of Mode: Iv Use mean ACF C Use mean CCF C Use see	e as signal in each ensemble as model ACF to use 50 parate CCFs
Normalize CF (affects Apparent Frequency estimation also Frequency attributes Apparent frequency AAXFILT AAXFILT AAXFILT	Peak frequency AAXFILT
At 70 % of peak amplitude Min Square under amplitude spectrum curve / maximum amp	Morage integral values imum window lenght
OK Cancel]

Рис. 4.3. Окно параметров модуля Ensemble QC

Цель такого анализа – определение пропущенных ПВ, неработающих приемных каналов, наличие сигналов за пределами динамического диапазона, изменение параметров возбуждения и т.д. На рисунке 4.4 под сейсмическим разрезом (А) представлено распределение амплитуд шума (Б), прямой волны (В), отражения от поверхности воды (Г) и донного отражения (Д) в зависимости от пункта возбуждения и номера канала на тестовом профиле.



Рис. 4.4. Сейсмограмма общих удалений (А), распределение амплитуд шума (Б), прямой волны (В), отражения от поверхности воды (Г) и дна (Д) в зависимости от пункта возбуждения и номера канала

При анализе полученных атрибутов легко идентифицировать отсутствие сигнала на третьем канале, высокий уровень низкочастотных помех на первых шести каналах, превышение динамического диапазона на первом канале, повышение уровня шума на участке около 800-го ПВ и другие особенности.

Оценка идентичности условий возбуждения и приема

Помимо стандартных параметров, оцениваемых в рамках процедуры контроля качества, результаты наблюдений с заглубленной системой позволяют проводить количественную оценку условий возбуждения и приема. Для анализа амплитудных

атрибутов и частотного состава записи в окне вдоль заданного горизонта был разработан модуль SSAA (Seismic Sequence Attribute Analysis) (рис. 4.5).

Буксировка сейсмоакустической системы на глубине позволяет зарегистрировать сигнал прямой волны, распространяющейся от источника к приемнику, без искажений, возникающих из-за интерференции с отражением от свободной поверхности. Таким образом, в случае сферической диаграммы направленности излучения и приема сигнал прямой волны можно рассматривать как

	-	RMS Amplitude
Centroid frequency	· •	Pick amplitude
Apparent frequency		Peak amplitude time
Visible frequency		Through amplitude time
Bandwidth	v	Max. absolute amp. time
Peak amplitude	Ŧ	S/N Ratio
Through amplitude	Ŧ	Resolving power
Max. absolute amp.	Ψ	Time shift

Рис. 4.5. Окно параметров модуля SSAA

сигнатуру зондирующего импульса, что, в свою очередь, позволяет контролировать стабильность возбуждения по профилю, а также идентичность АЧХ приемных гидрофонов и усилителей.

На рисунке 4.6 представлен набор трасс в сортировке канал – ПВ с выделенными временами вступлений прямой волны (А), отражения от поверхности воды (Б) и дна (В) и оценками амплитуд этих волн после введения расхождения.



Рис. 4.6. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) после введения расхождения, с набором трасс с выделенными временами вступлений соответствующих волн

В главе 3 приводится последовательность процедур, рекомендуемая автором для проведения анализа условий возбуждения-приема и расчета поправок. На рисунке 4.7 представлены сигналы прямой волны и их спектры, накопленные по 300 ПВ.



Рис. 4.7. Сигналы прямой волны в зависимости от канала (А) и соответствующие амплитудные спектры

На первых трех каналах из-за близкого расположения излучателя амплитуда прямой волны превысила динамический диапазон регистрации, что привело к необратимым искажениям формы сигнала. Неидентичность приемных каналов с 4-го по 16-й не превысила 2%.

По результатам анализа рассчитывались поправки, по которым может быть сделана коррекция амплитуд по каналам и рассчитаны доверительные интервалы определения «истинных амплитуд отражения» при данных условиях съемки. В целом после оценки условий возбуждения и приема мы можем учесть фактор $[Rec_n(t)]$ в формуле (4.1):

$$S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * [Sou(t)] * \frac{[Rec_n(t)]}{[Sou(t)]} * f_n(t, \tau, x_n) \times F_n(r) + N_r.$$
(4.1)

На рис. 4.8 представлен набор трасс в сортировке канал – ПВ с выделенными временами вступлений прямой волны (А), отражения от поверхности воды (Б) и дна (В) и оценками амплитуд этих волн после введения поправок за канал.



Рис. 4.8. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) после введения поправок за канал

Подавление нерегулярных помех

Основные шумы при морских сейсмических наблюдениях связаны с движением косы в водной толще, влиянием кильватерной струи и работой

механизмов судна. В случае наблюдений с заглубленными системами на первый план выходят помехи, связанные с буксировкой системы: дрожание и резкие рывки троса с заглубителем, вибрации натянутого сигнального кабеля, плавные изменения давления при изменении глубины погружения системы. Как правило, такие помехи низкочастотные и легко подавляются полосовым фильтром (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Пример удаления низкочастотных помех при помощи полосового фильтра. А – до подавления, Б – после

Иногда помехи столь интенсивны, что динамического диапазона станции не хватает для регистрации сигналов, и они попадают в ограничения, «клипируются». В этом случае нелинейные искажения приводят к формальному расширению спектра помехи, и полосовая фильтрация не может принести желаемого результата. На рисунке 4.10 приведен пример таких данных.



Рис. 4.10. Пример удаления низкочастотных случайных помех при помощи модуля TFD Noise Rejection. А – до подавления, Б – после

Для подавления такого типа случайных помех используется модуль TFD Noise Rejection, включенный в программный пакет RadExPro. Принцип работы модуля заключается в анализе частотных спектров ансамбля соседних трасс (по ПВ). Если значение амплитуды для какого-либо отсчета в частотной области для данной трассы превышает пороговое значение, рассчитанное по всему ансамблю трасс в заданном временном окне для каждой частоты, оно заменяется на пороговое. Пользователь может задавать размеры временного и пространственного окон, пороговое значение, а также диапазон частот, в котором будет производиться процедура. Таким образом, этот алгоритм позволяет выделять помехи, отличающиеся от полезного сигнала по пространственному распределению и частоте. Качественное улучшение сейсмических данных с целью подавления высокоамплитудных помех-выбросов после применения описанного модуля приведен на рисунках 4.9 и 4.10.

Подавление основных регулярных помех

Часто задачей для сейсмических наблюдений с заглубленной системой является изучение верхней части разреза приблизительно на глубину буксировки. Однако при глубине дна, сравнимой с требуемой глубинностью исследований, цуг волн-спутников и кратных волн интерферирует с однократными отражениями от вышележащих границ и возникает необходимость подавления данного типа регулярных помех.

Для подавления кратных и неполнократных отражений применяются хорошо известные в современной индустрии алгоритмы, такие как SRME и SRPA [Verschuur, 2006; Гофман, 2002].

Остановимся подробнее на подавлении волн-спутников – специфических регулярных помехах на данных, полученных с помощью заглубленных систем. В ПО RadExPro реализован алгоритм подавления волн-спутников со стороны источника и приемника, заключающийся в моделировании данных регулярных помех и их последующем адаптивном вычитании из наблюденного волнового поля [Tokarev etc., 2008].

Моделирование волны-спутника со стороны источника производится посредством алгоритма, подобного NMO. К исходной трассе применяется преобразование, эквивалентное растяжению во времени:

$$G_{s}(t, x, v, z_{s}) = Tr\left(\sqrt{t^{2} + 2z_{s}/v^{2}\left[\sqrt{v^{2}t^{2} - 4x^{2}} + z_{s}\right]}\right),$$
(4.2)
где t – время, x – расстояние между источником и приемником, v – скорость звука в воде, z_s – глубина до дна от источника.

Аналогичное преобразование выполняется для моделирования волны-спутника со стороны приемника. Отметим, что алгоритм работает в предположении горизонтальной слоистости среды.

Модельное поле волн-спутников вычитается из наблюденного поля адаптивно по алгоритму, описанному в работе Денисова М.С. и Финикова Д.Б. [Denisov et al., 2006].



Рис. 4.11. Сейсмограмма ОПВ и сейсмический разрез до (А) и после (Б) подавления волнспутников

Представленный на рисунке 4.11 результат такого вычитания показывает эффективность предлагаемой методики, несмотря на указанные ограничения.

В главе 3 при сравнении качества наблюдений с приповерхностной и заглубленной системами было показано, что последние имеют более низкий уровень помех, что со ссылкой на результаты текущего раздела позволяет говорить о возможности учета фактора N_r в формуле (4.1):

$$S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * [Sou(t)] * \frac{[Rec_n(t)]}{[Rec_n(t)]} * f_n(t, \tau, x_n) \times F_n(r) + N_{\overline{r}}.$$
(4.1)

Обработка сигналов

В случае заглубленной системы на расстоянии, превышающем несколько длин волн (дальняя зона), в случае отсутствия направленности у источника излучения колебаний и приемной группы сигнал, соответствующий прямой волне, можно рассматривать как сигнатуру зондирующего импульса с точностью до амплитудного коэффициента, обратно пропорционального расстоянию *r*, на которое распространился сигнал. Следовательно, для учета функции источника для каждой трассы можно применить фильтр:

$$F(w)_{i,j} = \frac{1}{S(w)_{i,j} + \varepsilon^2} \times e^{-i\varphi(w)_{i,j}},$$
(4.3)

где $F(w)_{i,j}$ – спектр фильтра в частотной области; $S(w)_{i,j}$ – амплитудный спектр прямой волны для данной трассы, $\varphi(w)_{i,j}$ – фазовый спектр прямой волны для данной трассы, i – номер выстрела; j – номер канала. Такая процедура носит название детерминистической деконволюции и может являться частью корректирующей фильтрации при задании желаемой формы выходного сигнала [Гурвич и Номоконов, 1981].

Технически для этого применяется модуль обрабатывающей системы RadExPro *Custom Impulse Trace Transforms* (операции с трассами с использованием формы импульса). Окно задания параметров описываемого модуля представлено на рисунке 4.12.

Dataset	2.5-3.5 CHAN			Browse Add
Matching field				
	et time from headers	s		
t1	2.3	t2	3.7	
	Browse		Browse,	
O Get im	pulse from file			
File				Browse
dt	0.2			
t1	0	t2	1	
	Get time from heade	rs		
t1	0	t2	300	
	Browse		Browse	
Amplitude	spectra		Phase spectra —	
O No operation			O No operation	
O Multip	У		O Add	
 Divide 			 Subtract 	
Damp =	1e-006 *Ar	max	Additional phase	0

Рис. 4.12. Окно задания параметров модуля Custom Impulse Trace Transforms

Рассмотрим параметры модуля. Требуемый набор зондирующих импульсов может быть предварительно обработан и собран в отдельный файл (Get impulse from file) либо взят из трасс обрабатываемого набора данных (Get impulse from

dataset). Для каждой трассы указывается интервал времени сигнала, который используется для формирования оператора (t_1, t_2) . Помимо этого существует возможность раздельной коррекции амплитудного и фазового спектра (опции раздела Amplitude spectra и Phase spectra), что важно при формировании выходного сигнала. Необходимость формирования различной сигнатуры для решения задач обнаружения объекта, проведения кинематического и динамического анализа была показана автором в работе, посвященной линейной одномерной корректирующей фильтрации [Калинин и др., 1992]. Представленный модуль деконволюции позволяет реализовать подобный подход к обработке сигналов. На рисунке 4.13 приводится фрагмент сейсмического разреза до и после деконволюции.



Рис. 4.13. Фрагмент сейсмического разреза. А – до деконволюции, Б – после деконволюции

Помимо задачи повышения разрешающей способности использование сигнатуры прямой волны от каждого выстрела для построения оператора деконволюции позволяет скомпенсировать нестабильность источника и, таким образом, определить и исключить влияние еще одного члена в выражении (4.1):

$$S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * \frac{[Sou(t)]}{[Sou(t)]} * \frac{[Rec_n(t)]}{[Rec_n(t)]} * f_n(t, \tau, x_n) \times F_n(r) + \frac{N_r}{r}.$$
(4.1)

§ 2. Кинематический анализ и построение сейсмических изображений

Кинематический анализ, с точки зрения автора, необходим не только для получения сейсмических изображений, но и для перехода к количественной интерпретации получаемых данных. В отличие от нефтяной сейсморазведки, при сейсмоакустических исследованиях оценка интервальных скоростей в верхней части геологического разреза может быть использована для определения типа и свойств осадков с большей достоверностью в силу их большей неоднородности. Как было упомянуто выше, в главе 3, буксировка источника и всех приемников на одной глубине представляется небезнадежной, но трудной задачей в практическом исполнении. Если ее не удается решить при проведении полевых работ, в обработку данных приходится включать расчет и применение статических поправок. В этом случае оптимальный граф оценки пластовых скоростей выглядит следующим образом:

 приведение источника излучения и приемников на один уровень посредством статических поправок.

 пересчет удалений в соответствии с новой конфигурацией системы наблюдений.

анализ эффективных скоростей суммирования (вертикальные, горизонтальные спектры скоростей).

построение пластовой модели скоростей (послойная кинематическая инверсия).

Завершающим этапом обработки является получение суммированных и мигрированных разрезов. Далее будут рассмотрены ключевые пункты графа кинематического анализа и примеры построения сейсмических изображений по данным наблюдений с заглубленной расстановкой.

Приведение данных к единому уровню буксировки, ввод статических поправок

Приведение источника и приемной линии к одному уровню предлагается производить посредством ввода статических поправок, рассчитываемых по системе подобных прямоугольных треугольников для двойного времени пробега отражения от дна (рис. 4.14).

Строго говоря, рассчитанные таким образом поправки справедливы только для рефлектора, соответствующего морскому дну. Для случая



Рис. 4.14. Схема для расчета статических поправок.

горизонтально-слоистой среды И при малой условии мощности изучаемого разреза, по сравнению с высотой источника и приемника относительно дна, статические поправки за уровень приведения ДЛЯ нижележащих отражающих границ отличаются на величину, пропорциональную V_1/V_n , где V_1 и V_n – эффективные скорости в водной толще и до n-го слоя соответственно. В случае акустически слабоконтрастных которых изменение скорости сред, для

с глубиной незначительно, различие в статических поправках за уровень приведения для дна и нижележащих рефлекторов пренебрежимо мало [Kalmykov, Tokarev, 2008], что позволяет осуществлять приведение данных к одному уровню посредством статического сдвига, рассчитанного следующим образом:

$$Y_{s} = \frac{T_{2} |d_{s} - P|}{A + B}; \ Y_{r} = \frac{T_{2} |d_{r} - P|}{A + B},$$
(4.4)

где Y_s и Y_r – статические поправки за источник и приемник соответственно, d_s – заглубление источника, d_r – заглубление приемника, T_2 – двойное время пробега отраженной от поверхности дна волны, P – глубина уровня приведения, A – глубина от источника до дна, B – глубина от приемника до дна. Уровень приведения выбирается исходя из среднего значения глубин источника и приемников.

Ввод статических поправок приводит к «перемещению» источника и приемников на уровень приведения, что изменяет времена вступлений волн и ведет к необходимости изменения величины разносов в заголовках трасс. Новые выносы также рассчитываются из системы треугольников. Для этого определяется горизонтальное смещение источника и приемника вдоль профиля – X_s и X_r соответственно:

$$X_s = \frac{X \times Y_s}{T_2}; \ X_r = \frac{X \times Y_r}{T_2}, \tag{4.5}$$

где X – горизонтальное расстояние по профилю, Y_s и Y_r – рассчитанные статические поправки.

После расчета статических поправок и нового положения источника и приемников проводятся бинирование и обработка данных по методу ОСТ.

При бинировании ОСТ автоматически учитывается разница в заглублении источника и приемников, так как после приведения данных к одному уровню происходит изменение координат источника и приемников и как результат – изменение координат общих точек отражения. При разнице в заглублении 2 м и расстоянии между источником и приемником 20 м точка отражения смещается на расстояние от 20 см до 1,5 м (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Смещение точки отражения от положения общей средней точки при различном заглублении источника и приемника



Рис. 4.16. Величина радиуса первой зоны Френеля в зависимости от глубины в случае сферической волны

Такое смещение незначительно по сравнению с размером зоны Френеля на большой глубине, но может стать сравнимым с размером зоны Френеля на мелководье, особенно при увеличении выносов. На рисунке 4.16 приводится график зависимости размеров первой зоны Френеля для частоты сигнала 830 Гц и скорости 1500 м/с.

Конечно, обработку данных можно проводить и без изменений геометрических параметров заглубленной системы. Однако это ведет к ряду ошибок, например, к ошибкам в определении скоростей суммирования или к ошибкам в определении положения точки отражения. Более того, в большинстве случаев сейсмическая коса искривлена, и все приемники находятся на разной глубине, это, в свою очередь, приводит к негиперболичности годографа отраженных волн и, как следствие, к неправильному суммированию трасс ОГТ. Исправить это можно либо путем ввода статических поправок, либо при учете реальной геометрии наблюдений в миграции до суммирования. На рисунках 4.17 и 4.18) представлены сейсмограммы ОГТ со спрямленными годографами до и после ввода статических поправок соответственно.



Рис. 4.17. Сейсмограмма ОГТ после ввода NMO до статических поправок за криволинейность системы наблюдения



Рис. 4.18. Сейсмограмма ОГТ после ввода NMO после статических поправок за криволинейность системы наблюдения

На рисунке 4.19 представлен фрагмент суммарного разреза, полученный по данным без ввода статических поправок (А) и по данным после введения статических поправок (Б).



Рис. 4.19. Фрагмент суммарного разреза, полученного без ввода статических поправок (A) и после ввода статических поправок (Б)

Сравнивая разрезы, можно сделать вывод о том, что введение статических поправок существенно улучшает качество данных.

Анализ эффективных скоростей суммирования и построение пластовой модели

Основной задачей скоростного анализа является получение оптимальных скоростей суммирования. Если разница в глубинах буксировки источника и приемника невелика или скомпенсирована статическими поправками, то скоростной анализ результатов наблюдений с заглубленной системой не отличается от стандартного подхода МОВ ОГТ. Пример интерактивного модуля авторского программного обеспечения RadExPro представлен ниже (рис. 4.20).



Рис. 4.20. Пример вертикального скоростного анализа для данных, полученных по заглубленной методике.

А – вертикальный спектр скоростей, Б – суперсейсмограмма ОСТ, В – сумма с текущей скоростной функцией, Г – суммы с постоянными скоростями (Constant Velocity Stackdisplay)

Тем не менее следует отметить большую латеральную изменчивость скоростного поля верхней части геологического разреза по сравнению с зоной интересов нефтегазовой сейсморазведки. Рельеф дна, резкая смена осадков требуют проведения скоростного анализа с предельно малым шагом по профилю (25–50 м) для расчета вертикальных спектров скоростей либо использования горизонтального скоростного анализа. Кроме того, для решения задач количественной интерпретации необходимо определение пластовых скоростей продольных волн, которые могут быть получены методами кинематической инверсии.

Одним из наиболее перспективных методов, по мнению автора, является метод послойного пересчета, рассмотренный в первой главе [Глоговский, Лангман, 2009]. В основу инверсии скоростей с помощью методов послойного пересчета заложена идея о чередовании оценок интервальных скоростей и определении геометрии границ для последовательных слоев, начиная с поверхности и каждый

раз перемещаясь вниз на один слой. На рисунке 4.21 приведен пример определения эффективных скоростей для дна (А) и кровли акустического фундамента (Б).



Рис. 4.21. Пример определения эффективных скоростей на тестовом профиле в ПО Prime 3D для донного отражения (А) и кровли акустического фундамента (Б)

Зная геометрию границы (кровли) первого слоя и его скоростную характеристику, с помощью моделирования годографов в предположении нормального падения лучей к границам можно определить геометрию кровли второго слоя и его интервальную скорость (задавшись этой скоростью и проверив правильность ее задания при сравнении реального и модельного годографов) и так далее. Расчетные скорости сравниваются с реальными скоростями, полученными из анализа горизонтальных спектров скоростей. Если скорости, рассчитанные по модельному годографу, совпадают с реальными скоростями, то заданная скорость считается верно определенной. Ниже представлен пример построения горизонтально-скоростной модели в ПО Prime 3D (рис. 4.22).





Другой метод оценки правильности задания скоростей состоит в расчете подобия трасс в узком временном окне. Скорость в испытываемом слое считается выбранной правильно, когда подобие трасс в окне максимально. В целом указанный подход реализован в программном обеспечении Prime 3D [Руководство пользователя ПО Prime 3D, http://yandex-terra.ru/prime/].

Построение сейсмических изображений

Специфика миграционного преобразования для данных заглубленной методики заключается в учете разноуровневого положения источника возбуждения колебаний и приемной системы. В ПО RadExPro для такого случая реализован алгоритм взвешенной миграции Кирхгофа [Dillon, 1990] для горизонтальнослоистой однородной изотропной модели. По результатам кинематического анализа строится пластовая модель скоростей, с учетом которой выполняется миграционное преобразование сейсмограмм МОВ ОГТ после шумоподавления.

В случае когда заглубление источника и приемной линии предварительно приведено к одному уровню путем ввода соответствующих статических поправок, возможно использование алгоритма миграции Столта (Stolt) после суммирования, реализованного в модуле *FK Stolt Migration*. Пример работы модуля на суммарном разрезе данных заглубленной системы представлен на рисунках 4.23 и 4.24.



Рис. 4.23. Пример обработки данных в ПО RadExPro с применением модуля FK Stolt Migration. Суммарный сейсмический разрез до миграции (А) и после миграции (Б)

Необходимо отметить, что знание скоростной модели не только позволяет нам собрать сейсмическое изображение и получить более достоверное представление о структуре осадков, но и оценить влияние функции $F_n(r)$, отвечающей за частотнонезависимые потери, в формуле (4.1):

$$S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * \frac{[Sou(t)]}{[Rec_n(t)]} * f_n(t, \tau, x_n) \times \frac{F_n(r)}{N_r} + \frac{N_r}{N_r}.$$
(4.1)



Рис. 4.24. Пример обработки данных в ПО RadExPro с применением модуля FK Stolt Migration. Фрагмент сейсмического разреза до миграции (А) и после миграции (Б)

§ 3. Подготовка данных для динамического анализа и инверсии

В параграфе четвертом главы первой были сформулированы требования к качеству данных для динамического анализа. Часть из них определяется аппаратурно-методическими аспектами наблюдений: длина годографа, диаграмма направленности приемно-излучающей системы, расстояние до ближайшей отражающей границы, диапазон углов падения/отражения волны от целевой границы и пространственный шаг наблюдений – в общем случае не могут быть изменены в процессе обработки. Однако остальные факторы, определяющие отличия сейсмической трассы от импульсной характеристики среды, могут быть учтены в рамках тех или иных математических процедур. Описанные выше способы позволяют в той или иной мере перейти от выражения (4.1) к выражению $S_n(t, x_n) = R_n(t, \theta_n) * f_n(t, \tau, x_n)$ слабого поглощения. Другими словами, мы получаем желаемое – переход от зарегистрированного волнового поля к разрезу коэффициентов отражения в рабочей полосе частот. В противном случае мы не можем раздельно определить влияние частотно-зависимых потерь и коэффициентов отражения на зависимость амплитуды отраженной волны от угла падения на границу пластов. Эффективные методы учета поглощения или рассеяния при подготовке данных для динамического анализа и инверсии пока разрабатываются и требуют дальнейших исследований.

Помимо рассматриваемых в выражении (4.1) факторов, амплитуда сигнала может искажаться в результате применения некоторых процедур обработки, таких как ввод кинематических поправок, преобразование Радона, FK-фильтрация и некоторые другие процедуры подавления когерентного и случайного шума. Помехи могут иметь различные характеристики, определяющие целесообразность применения той или иной процедуры, и, следовательно, не может быть общего вывода о влиянии различных процедур на восстановление «истинных» амплитуд. В каждом случае рекомендуется анализировать разностное поле (до и после применения процедуры подавления шумов) и графики зависимости амплитуды отражения от разноса на реперных горизонтах. Удобно проводить анализ качества динамической обработки по отражению от свободной поверхности: в случае если обработка выполнена с сохранением амплитуд, коэффициент отражения от границы вода-воздух ожидается равным 1 (допустимы отклонения на 5–10% в случае неспокойной погоды). Пример такой оценки на данных заглубленной системы после обработки по описанному графу приведен на рисунках 4.25 и 4.26.



Рис. 4.25. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) до обработки, с набором трасс с выделенными временами вступлений соответствующих волн



Рис. 4.26. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) после обработки, с набором трасс с выделенными временами вступлений соответствующих волн

Дальнейшая подготовка данных к динамическому анализу заключается в расчете AVO-параметров. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.27.

123



Рис. 4.27. Результаты расчетов AVO-параметров на тестовом профиле. Интерсепт (А), градиент (Б), их произведение (В)

Инверсионные преобразования традиционно являются частью интерпретации, и будут рассмотрены в следующей главе.

Выводы

Методы повышения отношения полезного сигнала к помехе при обработке данных заглубленных систем являются стандартными методами обработки данных морской сейсморазведки, за исключением способов подавления специфических регулярных помех – волн-спутников. По мнению автора, моделирование и последующее адаптивное вычитание волн-спутников является эффективным способом решения такой задачи.

Разработанные процедуры приведения сейсмоакустических данных, полученных при помощи заглубленных систем, к заданному уровню наблюдений позволяют выполнять стандартный кинематический анализ.

В случае контрастного разреза для коррекции амплитуд за расхождение фронта необходима достоверная скоростная модель. Специфические условия верхней части разреза для решения этой задачи требуют применения горизонтально-скоростного анализа с последующим послойным восстановлением пластовых скоростей.

Основным этапом подготовки данных для динамического анализа является восстановление «истинных амплитуд», т. е. коррекция амплитуды и формы зондирующего импульса либо с помощью поправок за неидентичность каналов по контрольным замерам и компенсации нестабильности излучения по результатам записи на контрольном канале, либо путем потрассовой деконволюции с сигнатурой прямой волны.

Описанные алгоритмы и методы обработки реализованы в программном пакете RadExPro. Разработанный граф обработки многоканальных сейсмоакустических данных включает специальные оригинальные модули для работы с данными заглубленных систем для выполнения кинематического анализа, а также позволяет восстановить «истинные амплитуды» для их дальнейшего использования в целях динамического анализа.

ГЛАВА 5. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

В главе приводятся практические примеры применения технологии многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами, полученные автором в рамках учебно-научных и производственных исследований, для решения ряда типовых задач инженерно-геологических изысканий на акваториях: а) типизация и картирование донных осадков; б) определение упругих свойств газонасыщенных отложений; в) сейсмическое микрорайонирование; г) выделение объектов различной природы в верхней части разреза, неблагоприятных для бурения и морского строительства. Рассмотрим эти задачи подробнее.

§1. Типизация и картирование донных осадков в проливе Великая Салма (Кандалакшский залив, Белое море)

Задачи исследования

Важной задачей изучения верхней части разреза на акваториях среди прочих является типизация и картирование донных осадков. Одним из первых примеров использования заглубленной приемно-излучающей системы являются результаты решения подобной задачи в рамках учебно-научных исследований в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря. Материалы полевых наблюдений были получены во время летних студенческих геофизических практик в 2003–2006 годах. На выбранном полигоне исследований получение сведений о типах донных отложений являлось принципиальным для определения факторов, влияющих на формирование донных осадков и рельефа морского дна.

Стоит отметить, что верхняя часть геологического разреза в исследуемом районе была сформирована в четвертичное время. Ледниковые, позднеледниковые И послеледниковые условия осадконакопления определили формирование лито-стратиграфических комплексов осадочного чехла исследуемом В районе. Активизация обновления древних разломов и блоковых поднятий в происходившая одновременно неоген-четвертичное время, процессами С

осадконакопления, обусловила крайне неоднородное распространение по площади гетерогенных разнофациальных маломощных придонных осадков.

Многолетний опыт автора показывает, что в указанных сложных сейсмогеологических условиях решение задачи площадного картирования придонных отложений по данным традиционных сейсмоакустических наблюдений с поверхностными системами затруднено, так как качественная интерпретация сейсмоакустических данных, основанная на принципах сейсмофациального анализа, не всегда позволяет однозначно провести дифференциацию изучаемых придонных отложений. В данном параграфе приводится пример решения задачи по переходу от амплитуд донного отражения, получаемых по технологии наблюдений с заглубленными системами, к упругим свойствам донных осадков [Токарев, 2008].

Методика полевых наблюдений

Исследуемый полигон, расположенный между мысом Савватиевским и островом Великий, с размером 2 км х3 км, был отработан по системе профилей с шагом 200 м между профилями. При сейсмоакустических измерениях с многоканальной системой в качестве источника использовался спаркер (30 излучающих электродов, энергия 700 Дж, центральная частота 800 Hz); приемная сейсмическая 16-канальная пьезокоса с одиночными гидрофонами (16 каналов через 2 м). Для заглубления системы использовался груз весом 20-30 кг. Заглубление источника и приемника составляло приблизительно 10-15 м, что гарантировало свободную от волн-спутников запись до глубины 10–15 м. Желаемым взрывным интервалом было расстояние 2 м. Однако в реальности система производила возбуждение каждую 1 с, а скорость буксировки составляла 3,7-4,5 узла, что дало взрывной интервал 1,9-2,3 м. Регистрация данных осуществлялась сейсмостанцией «Нильма» (см. раздел 2) на основе ПК с 12-разрядным АЦП и шагом дискретизации 0,05 мс. Запись измерений велась в формате SEG-Y. Для получения профиля глубин использовался эхолот с узкой диаграммой направленности.

Весь исследуемый полигон был отработан с удалением от источника до первого приемника на расстояние 10 м. Затем некоторые профили были пройдены повторно для исключения влияния кильватерной струи и увеличения диапазона углов падения волны на дно, для этого вынос источника был увеличен до 20 м.

Данное расстояние гарантировало, что регистрирующая группа находится вне зоны действия кильватерной струи. Для контроля стабильности излучения сигнал без усиления регистрировался на одноканальное приемное устройство, расположенное рядом с первым каналом многоканальной косы.

Обработка данных и AVA-инверсии донного отражения

Обработка полученных данных проводилась по разработанным автором алгоритмам и графу, подробное описание которого приведено в главе 4. Ниже перечислены основные этапы данного графа обработки МОВ ОГТ и подготовки данных к количественной интерпретации:

1. Ввод и коррекция геометрии наблюдений.

2. Ввод статических поправок (приведение данных к единому уровню наблюдений).

3. Детерминистическая деконволюция.

4. Подавление волн-спутников.

5. Кинематический анализ (анализ вертикальных и горизонтальных спектров скоростей суммирования).

6. Суммирование и миграция после суммирования.

Обработка выполнялась с использованием программы RadExPro Plus. Некоторые процедуры (например, моделирование волн-спутников) потребовали разработки специальных алгоритмов, которые были внедрены и интегрированы в пакет программ. Результаты обработки представлены на рисунке 5.1.



Рис. 5.1. Мигрированный разрез, полученный с помощью многоканальной системы глубинного буксирования

После обработки проводилась количественная оценка упругих свойств донных грунтов с помощью процедуры AVA-инверсии для отражений от морского дна. Данные, полученные с использованием многоканальной системы сейсмической регистрации, буксируемой на глубине, можно использовать для прямых измерений коэффициента отражения от морского дна для разных углов падения. Это позволяет применить AVA-анализ для предсказания физических свойств (таких как скорости продольных и поперечных волн и плотности) придонных осадков. Коэффициент отражения от дна можно рассчитать путем деления амплитуды отражения от дна на амплитуду прямой волны при условии, что в обе амплитуды заранее введены поправки за расхождение волнового фронта. Углы падения рассчитываются по общим точкам отражения на дне, которые определяются на основе известной геометрии наблюдений и батиметрии, полученной при одновременном эхолотировании. Далее сейсмотрассы сортируются по общей точке отражения, и снимаются значения амплитуд донного отражения. В качестве теоретической модели для инверсии была выбрана полная система уравнений Цеппритца для упругого полупространства (см. главу 1).

Результаты количественной оценки свойств отложений донных проиллюстрированы на примере одного профиля в районе исследования на рисунке 5.2. Значения скоростей V_{p} и плотностей ρ , полученные по результатам инверсионного преобразования коэффициента отражения от дна, лежат в допустимом диапазоне для донных грунтов: от 1600 до 2000 м/с и от 1100 до 1400 кг/м³ соответственно. Оценка скоростей распространения поперечных волн V_s в осадках менее достоверна по сравнению с оценкой V_p из-за незначительной чувствительности инверсионного преобразования к изменению значений скоростей поперечных волн V, которые в неконсолидированных донных грунтах крайне низки, как правило, не превышают 500 м/с. Тем не менее полученные оценки позволили успешно провести типизацию и картирование донных отложений. На примере профиля, фрагмент которого представлен на рисунке 5.2, было выделено три типа отложений: 1) плотные, более сцементированные донные грунты, характеризующиеся значениями ρ от 1300 до 1400 кг/м³ и V_p от 1800 до 2000 м/с, вероятно, соответствующие отложениям ледникового генезиса (моренные отложения); 2) отложения со слоистой волновой картиной, характеризующиеся ρ от 1200 до 1300 кг/м³ и V_p от 1600 до 1800 м/с; 3) наиболее мягкие отложения, распространенные в понижениях рельефа, характеризующиеся ρ от 1100 до 1200 кг/м³ и V_p около 1600 м/с.



Рис. 5.2. Иллюстрация результатов количественной оценки упругих свойств донных грунтов посредством AVA-инверсии.

A – суммированный разрез по сейсмоакустическому профилю, полученному с заглубленной системой; Б – рассчитанный коэффициент отражения от морского дна для профиля (A); В – рассчитанная плотность ρ донных отложений; Г – рассчитанная скорость поперечных волн Vs; Д – скорость продольных волн Vp; Е –характеристическое отношение Vs/Vp

Результаты проведенных исследований показали высокую эффективности применения разрабатываемой технологии для решения задачи типизации и картирования донных осадков [Токарев и др., 2008].

§ 2. Определение упругих свойств газонасыщенных осадков в проливе Великая Салма (Кандалакшский залив, Белое море)

Задачи исследования

Второй важной задачей инженерно-геологических изысканий является выявление геологических процессов и явлений в верхней части разреза, которые могут представлять угрозу при строительстве и эксплуатации морских сооружений и особенно для бурения на акваториях. Классификация таких объектов, называемых в литературе «геологическими опасностями» (geological hazards), приводится в главе 1.

В настоящем параграфе автор демонстрирует применение технологии сейсмоакустических работ с заглубленными системами для количественной оценки упругих свойств отложений с повышенной газонасыщенностью в верхней части разреза – классическим примером геологических опасностей на шельфе.

Полигон для опробования разработанной технологии был выбран Кандалакшского акватории залива Белого ПО результатам на моря сейсмоакустических наблюдений НСП ПО методу одноканального Проведенные исследования позволили откартировать зоны распространения приповерхностных отложений в интервале глубин до 50 м от дна с предположительно повышенной газонасыщенностью. Интерпретация выполнялась качественно, по типу волновой картины на сейсмическом разрезе: предположительно газонасыщенные интервалы выделялись по интенсивному отражению с обратной полярностью относительно дна и характерной хаотической волновой картине под аномальными отражениями. На рисунке 5.3 представлена схема сейсмоакустических работ вблизи мыса Киндо в проливе Великая Салма с оконтуренными по результатам НСП зонами «газовых аномалий», распространенных в верхней части геологического разреза.

В данном случае основной целью проведения дополнительных многоканальных сейсмоакустических исследований являлось уточнение природы выделенных ранее по данным НСП аномалий и количественная характеристика их свойств.



Рис. 5.3. Схема профилей сейсмоакустических работ 2013 г. Пролив Великая Салма (Кандалакшский залив Белого моря)

Методика полевых наблюдений

На выбранном полигоне исследования (рис. 5.3) с заглубленной методикой было отработано шесть профилей различной протяженности (в объеме 9,5 км). Для возбуждения и регистрации акустических колебаний использовался усовершенствованный аппаратно-программный комплекс «Нильма-2010» (см. главу 2).

В районе работ глубины до морского дна варьировались от 40 до 60 м, а глубина залегания кровли предполагаемого газонасыщенного пласта составляла около 10 м от морского дна. Для данных условий и характерных свойств изучаемых осадков было проведено AVO-моделирование, с учетом которого выбрано проектное заглубление 40–45 м, обеспечивающее последующее эффективное применение AVO-анализа [Токарев, Пирогова, 2015]. В этом случае максимальные углы падения составляли до 40°.

Для повышения качества получаемого полевого материала в качестве источника упругих колебаний вместо стандартного многоэлектродного спаркера использовался одноэлектродный излучатель, диаграмму направленности которого

132

можно считать сферической (ненаправленный точечный источник). Для обеспечения рабочей полосы излучаемого сигнала в диапазоне от 50 Гц до 4 кГц с преобладающей частотой около 500 Гц на заданной глубине 40–45 м на один электрод подавалась энергия 50 Дж. В качестве приемной линии использовалась 16-канальная пьезокоса с одиночными гидрофонами, расположенными друг от друга на расстоянии 2 м. С учетом линейных размеров изучаемых объектов был выбран шаг по профилю 0,4 м. Таким образом, при скорости судна в 1,5 узла излучение акустического сигнала производилось каждые 1,25 с.

Оценка упругих свойств газонасыщенных осадков. Послойная AVA-инверсия

Для построения сейсмических изображений и подготовки данных к динамическому анализу был применен следующий граф обработки:

1. Восстановление пространственной конфигурации системы. Присвоение геометрии согласно методу ОСТ.

1.1. Присвоение навигации.

1.2. Решение системы квадратных уравнений с использованием времен прихода прямой волны, волны-спутника и волны, отраженной от морского дна, для расчета заглубления источника и приемников.

1.3. Решение прямой задачи для проверки результата восстановления геометрии системы по кинематическим параметрам (эффективные скорости в водной толще). Итеративная коррекция положения приемников и источников.

1.4. Расчет наклонов границ морского дна и определения площадок отражения ОСТ.

1.5. Приведение источника излучения и приемников на один уровень. Расчет и ввод соответствующих поправок. Пересчет удалений в соответствии с новой конфигурацией системы наблюдений. Бинирование ОСТ с размером площадки 1 м.

2. Работа с сигналом.

2.1. Полосовая фильтрация в рабочей полосе частот [75-150; 3500-4500] Гц.

2.2. Адаптивное вычитание волны-спутника. Несколько итераций.

2.3. Сигнатурная обратная фильтрация (детерминистическая деконволюция). Построение фильтров с учетом сигнатуры прямой волны и волны-спутника в случае их различия.

2.4. Коррекция за сферическое расхождение фронта.

3. Кинематический анализ.

3.1. Амплитудная регулировка амплитуд. Анализ вертикального спектра эффективных скоростей.

3.2. Пересчет скоростей суммирования в интервальные скорости (по Диксу). Определение диапазона изменения интервальных скоростей продольных волн.

4. Построение сейсмического изображения.

4.1. Ввод NMO-поправок с учетом скоростного закона.

4.2. Построение суммированного сейсмического разреза.

4.3. Миграция Столта в частотной области (PostStack).

Пример суммированного сейсмического изображения приведен на рисунке 5.4.



Рис. 5.4. А Сейсмический разрез равных удалений, полученный с помощью заглубленной сейсмоакустической методики; Б суммированный разрез после адаптивного вычитания волны-спутника и миграции. Вертикальная шкала в мс

Для AVA-инверсии использовались сейсмограммы ОСТ до миграции и адаптивного вычитания после соответствующего контроля качества динамических характеристик, подробное описание графа которого приведено в главе 4.

Была реализована модификация детерминистической инверсии. Критерием для решения обратной задачи являлось минимальное среднеквадратичное отклонение модельных данных от наблюденных. Оптимизация производилась методом симплексов в заданных пределах возможных значений. В качестве теоретической модели использовалась полная система уравнений Цеппритца (1919 г.) для упругого полупространства. Обоснование выбора данной модели приведено в главе 1. Коэффициенты отражения R_p определялись путем пикировки амплитуд отражения для каждого выбранного горизонта. Значения R_p осреднялись по профилю в пределах первой зоны Френеля, которая в данном случае составляла около 8 м для частоты f = 2500 Гц.

Инверсионное преобразование осуществлялось послойно, начиная с первой границы полупространства – морского дна. Свойства в водной толще полагались известными $V_{p1} = 1480 \text{ м/c}$, $V_{s1} = 0$, $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$ (слой (1) на рис. 5.5). Комплексное использование кинематического и AVA-анализа заключалось в привлечении информации о пределах изменения пластовых скоростей распространения продольных волн V_p , полученных путем пересчета скоростей суммирования в пластовые скорости по Диксу.



Рис. 5.5. Пример волнового поля по разрезу равных удалений (слева) и сейсмограммы ОСТ (справа) над областью предположительно газонасыщенных отложений (кровля – отражение с обратной полярностью). Цифрами обозначены номера слоев, для которых применялась послойная AVA-инверсия

Ниже описаны результаты решения обратной задачи для осадочной толщи в зоне предположительного газонасыщения.

Коэффициент отражения для придонного слоя (обозначен как (2) на рис. 5.5) равен приблизительно 0,05 и не меняется при изменении углов падения от 0 до 35°. Упругие свойства для данного слоя по результатам детерминистической инверсии: $Vp_2 = 1450 \text{ м/c}; Vs_2 = 10-100 \text{ м/c}; \rho_2 = 1200 \text{ кг/м}^3.$



Рис. 5.6. Зависимость коэффициента отражения Rpp от угла падения волны для ОСТ 214



Рис. 5.7. Изменение Vp₃ для газонасыщенного слоя по результатам инверсии на участке профиля

представленную на рисунке 5.8.

В следующем слое (обозначен как (3) на рис. 5.5) вниз по разрезу предполагалось присутствие свободного газа. Коэффициент отражения от кровли предположительно газонасыщенных отложений меняется в пределах от -0,38 до -0,45 в диапазоне углов от 0 до 32°. (рис. 5.6)

По результатам инверсионного AVA-преобразования были получены упругие свойства для изучаемого третьего пласта: $Vp_3 = 600-700 \text{ м/c}$; $Vs_3 = 10-100 \text{ м/c}$; $\rho_3 = 1100 \text{ кг/m}^3$.

Изменение Vp₃ по фрагменту профиля, соответствующего ОСТ 200–220, представлено на рисунке 5.7.

Рассмотренная последовательность действий была применена к ряду характерных точек профиля, что позволило получить количественную оценку упругих свойств газонасыщенных осадков и вмещающих пород и составить модель,



Рис. 5.8. Модель упругих свойств, полученная по результатам AVA-инверсии для сейсмоакустического профиля вблизи мыса Киндо Кандалакшского залива Белого моря

Таким образом, газонасыщенная природа амплитудной аномалии, выявленной по данным НСП, была подтверждена количественными оценками упругих свойств отложений. Эти результаты удалось получить с использованием разработанной автором технологии сверхвысокоразрешающих многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой [Токарев М.Ю., Пирогова А.С., 2015].

§ 3. Сейсмическое микрорайонирование. Шельф Японского моря

Задачи исследования

Исследования по сейсмическому микрорайонированию являются важным этапом работ комплекса инженерно-геологических изысканий, которые проводятся с целью количественной оценки изменений интенсивности сейсмических колебаний грунтов, обусловленных локальным отличием их инженерно-геологических характеристик.

Одной из задач при проведении сейсмического микрорайонирования является получение информации о строении верхней части разреза и распределении скоростей распространения поперечных волн *Vs* до глубин 30 м. На основе получаемой информации производится количественная оценка величины приращения сейсмической активности (приращение балльности по шкале Рихтера) к эталонному грунту для основных типов грунтовых толщ, выделенных по результатам инженерно-геологических изысканий.

Расчет параметра приращения балльности (*dl*) осуществляется по следующей формуле:

$$dI = 1.67 * \lg\left(\frac{\rho_0 * V_{s0}}{\rho_{30} * V_{s30}}\right),\tag{5.1}$$

где ρ_0 и V_{s0} – фоновые значения плотности и скорости поперечных волн соответственно, а ρ_{30} и V_{s30} – среднее значение плотности и скорости поперечных волн в слое от дна до 30 м по грунту.

Скорость V_{s30} определяется по формуле:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i} \frac{h_{i}}{V_{i}}}$$
(5.2)

где h_i и V_i – мощность слоя и скорость поперечных волн для *i*-го слоя соответственно.

Как правило, для решения данной задачи применяется сейсмический метод, основанный на анализе поверхностных волн, – метод многоканального спектрального анализа поверхностных волн (MASW). Однако реализация MASW при исследованиях на акваториях существенно затруднена из-за технических особенностей возбуждения и регистрации данного типа волн на дне водоема. С точки зрения автора, альтернативой данному методу могут служить многоканальные сейсмоакустические наблюдения MOB ОГТ с плавучими сейсмическими косами при условии, что наблюдения обеспечивают получение материала высокого качества, достаточного для проведения динамического анализа (AVO) и, соответственно, оценки важного параметра *Vs*.

В качестве практического примера решения этой задачи автор приводит результаты сверхвысокоразрешающих сейсмоакустических 2D-наблюдений с заглубленной приемно-излучающей системой, которые под его руководством проводились в 2014 г. на шельфе Японского моря для оценки сейсмогеологических условий верхней части разреза на участке под строительство морского терминала отгрузки СПГ и грузового причала.

Методика многоканальных сейсмоакустических наблюдений

Согласно техническому регламенту на проведение изысканий, сейсмоакустические наблюдения проводились по методике одноканального непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП). Во время опытнометодических работ на площадке было также дополнительно отработано несколько сейсмоакустических профилей по методике многократных перекрытий ОГТ (ОСТ) с приповерхностной и заглубленной расстановкой.

Для проведения работ на этом полигоне использовался комплект аппаратуры «Нильма-2010» с накопителем энергии CSP-P и 16-канальной аналоговой пьезокосой с одиночными гидрофонами, шаг между которыми составлял 2 м.

Скорость профилирования поддерживалась в пределах 3,5–4 узлов для обеспечения шага по профилю около 1 м при возбуждении сигнала каждую 0,5 с.

Оценка скоростей поперечных волн и сейсмическое микрорайонирование

Для решения задач сейсмического микрорайонирования по результатам сейсмоакустических исследований автор предлагает применять следующую последовательность графа интерпретации данных:

1. Увязка данных одноканального и многоканального НСАП с данными инженерного бурения. Выделение и картирование базовых сейсмических комплексов (СК).

2. Кинематический анализ по временам прихода отраженных волн на данных многоканального профилирования. Оценка пластовых скоростей *Vp* в выделенных СК.

3. Динамический анализ данных многоканального профилирования с заглубленной методикой. АVA-моделирование. Оценка скоростей *Vs* в выделенных СК.

4. Экстраполяция полученных упругих свойств на исследуемом участке. Расчет карт приращения параметра балльности.

На рисунке 5.9 приведен фрагмент профиля, полученного по методике многоканальных наблюдений с поверхностной приемно-излучающей системой и обработанного по стандартному графу для МОВ ОГТ. На профиль вынесены отбивки литологических разностей, определенные по данным инженерного бурения (скважина № 53). По результатам анализа волновой картины и с учетом бурения было выделено четыре сейсмокомплекса: СК 3.1, СК 3.2, СК 2 и СК 1.



Рис. 5.9. Сейсмоакустический разрез с привязкой к инженерной скважине № 53

По аналогичной методике была проведена корреляция опорных горизонтов на сейсмоакустическом профиле line 137, отработанном с заглубленной системой. Фрагмент проинтерпретированного сейсмического разреза по данному профилю представлен на рисунке 5.10.



Рис. 5.10. Результаты интерпретации вдоль профиля line 137, полученного с заглубленной сейсмоакустической системой

Заглубление приемно-излучающей системы на 10–15 м во время многоканального сейсмоакустического профилирования позволило получить данные с диапазоном углов отражения акустических волн до 35°, что, в свою очередь, обеспечило возможность для проведения AVA-анализа и, соответственно, оценки скорости распространения поперечных волн *Vs* в отложениях верхней части разреза. Теоретические основы данного метода описаны в главе 1.

Для каждого выделенного опорного горизонта по данным, полученным с заглубленной системой, были определены характерные зависимости



поведения амплитуды отражения от угла падения волны – так называемые AVAкривые. Пример сейсмограммы ОПВ с выделенными опорными горизонтами, по которым снимались амплитуды для AVAанализа, приведен на рисунке 5.11.

Рис. 5.11. Фрагмент профиля, полученного с заглубленной методикой (слева). Справа показана сейсмограмма ОПВ с выделенными опорными горизонтами, по которым снимались амплитуды для AVA-анализа



Рис. 5.12. Наблюденная AVA-кривая (красная линия) и модельные кривые для кровли СК 3.1 (черные линии)

Наблюденные значения амплитуд сравнивались с результатами упругого AVA-моделирования, в результате чего были получены оценки эффективных упругих свойств отложений для выделенных сейсмокомплексов. На рисунке 5.12 приведена наблюденная кривая изменения амплитуды волны, отраженной от кровли СК 3.1, в зависимости от ее угла падения (обозначена красной линией) и модельные кривые (черные линии), рассчитанные со следующими упругими параметрами: плотность $\rho = 1,3$ г/см³, скорость продольной волны Vp = 1650 м/с, скорость поперечной волны Vs изменяется от 0 до 700 м/с. Параметры для моделирования выбирались с учетом имеющейся информации о плотностях в породах (по данным инженерного бурения) и скоростях Vp, полученных по результатам кинематического анализа многоканальных сейсмоакустических данных.

Автором были проведены расчеты для других комплексов: было выполнено упругое AVA-моделирование и определены эффективные значения *Vs* для сейсмокомплексов CK 3.2, CK 2, CK1. Для CK 3.1, соответствующего рыхлым придонным отложениям, значения *Vs* составили 300–350 м/с. Для CK 3.2 были определены значения *Vs* порядка 400 м/с. Сейсмический комплекс 2, подстилающий CK 3.2 и CK 3.1, согласно результатам AVA-анализа, характеризуется повышенными значениями Vs = 500–600 м/с. Наибольшие скорости распространения поперечных волн были характерны для CK 1, который представлен плотными отложениями коренных пород: Vs = 1000–1100 м/с.

Пример карты параметра *dl*, рассчитанного по формуле 5.1, приведен на рисунке 5.13.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что задача микрорайонирования на одном из участков шельфа Японского моря решена успешно.

Автор считает, что в дальнейшем можно предлагать такой комплекс работ для целей сейсмического микрорайонирования.



Рис. 5.13. Карта-схема приращения сейсмической балльности (*dl*) в районе исследования. Проектируемые гидротехнические сооружения обозначены условными знаками

§ 4. Выделение зон газонасыщенных и мерзлых грунтов. Арктический шельф

При перспективном инженерно-техническом освоении шельфов арктических морей – установке буровых платформ, прокладке подводных трубопроводов, инженерном обустройстве месторождений УВ, строительстве терминалов – одной из главных проблем является потенциальная опасность, связанная с наличием в разрезе многолетнемерзлых пород (ММП) и газонасыщенных отложений. Сходство проявления ММП и газонасыщенных отложений в волновых полях диктует необходимость разработки методики сейсмических исследований, нацеленных на повышение достоверности выявления и надежного разделения этих двух

видов геологических опасностей. Идентификация этих двух видов опасностей по сейсмическим данным является чрезвычайно актуальной задачей, особенно в связи с практически полным отсутствием других информативных геофизических данных и данных бурения по арктическим шельфам.

В 2014 году на шельфе моря Лаптевых в рамках региональных инженерногеологических исследований подруководством автора была разработана и применена методика двухуровневых трехчастотных сейсмических наблюдений. Целью исследования являлось обнаружение и картирование геологических опасностей в верхней части разреза.

Методика полевых наблюдений

В предыдущих параграфах настоящей главы были рассмотрены результаты сейсмоакустических наблюдений с заглубленной приемно-излучающей системой. В целом можно сказать, что рассмотренная методика обладает несомненными преимуществами перед стандартной методикой для проведения динамического анализа данных сейсморазведки «сверхвысокого» и «ультравысокого» разрешения в частотном диапазоне 150–3500 Гц при изучении верхней части геологического разреза. В то же время традиционная приповерхностная методика удовлетворяет всем требованиям кинематического анализа и успешно применяется в обычной и «высокоразрешающей» сейсморазведке.

При применении многоканальных сейсмоакустических наблюдений с комбинированными приповерхностными и заглубленными системами в качестве излучателей сигнала использовались спаркер с центральной частотой сигнала около 500 Гц и пневмоисточник с центральной частотой порядка 250 Гц с попеременным возбуждением. Источники буксировались на двух уровнях: пневмопушка на глубине погружения поверхностной косы, электроискровой источник на уровне заглубленной приемной системы. Приповерхностная пьезокоса, состоящая из 96 каналов, расположенных с шагом 3,125 метра, была заглублена примерно на 1,5 метра, 16-канальная пьезокоса (шаг между одиночными приемниками 2 метра) заглублялась в среднем на 25 метров. В качестве третьего приемно-излучающего устройства использовался параметрический профилограф, работающий на частоте 8 кГц. Для определения особенностей рельефа дна использовались гидролокатор бокового обзора (ГЛБО) и многолучевой эхолот (МЛЭ). Принципиальная схема работ с «комбинированной» двухуровневой расстановкой изображена на рисунке 5.14.



Рис. 5.14. Принципиальная схема многоканальных сейсмоакустических наблюдений с двухуровневой расстановкой

Дополнение многоканальных наблюдений высокочастотным непрерывным сейсмоакустическим профилированием в набортном или заглубленном варианте позволяет за один проход судна получать данные в трех частотных диапазонах сейсмических наблюдений, предназначенных для изучения верхней части геологического разреза. Эта методика в 2016 году была оформлена автором патентом №. 2592739. Пример данных, полученных при вышеописанных наблюдениях, приведен на рисунке 5.15.



Рис. 5.15. Пример сейсмического вертикального среза по профилю, отработанному с двухуровневой расстановкой в трех частотных диапазонах. (А) Данные профилографа; (Б) данные сверхвысокого разрешения, полученные с заглубленной приемно-излучающей системой; (В) данные высокого разрешения, полученные с приповерхностной приемно-излучающей системой
Обработка и интерпретация данных с целью выделения мерзлых и газонасыщенных грунтов

Обработка данных приповерхностной высокоразрешающей сейсморазведки и заглубленной сверхвысокоразрешающей сейсморазведки производилась раздельно с объединением результатов на этапе интерпретации.

Граф обработки данных приповерхностных наблюдений достаточно стандартен и включал в себя следующие процедуры.

- 1. Присвоение геометрии, бинирование по ОСТ (шаг бинирования 3,125 м).
- 2. Полосовая фильтрация.
- 3. Приведение импульса к нулевой фазе.
- 4. Амплитудная коррекция за сферическое расхождение.
- 5. Удаление высокоамплитудных помех.
- 6. Статические поправки.
- 7. Скоростной анализ (первая итерация).
- 8. Пикировка дна по мигрированным разрезам.
- 9. Подавление кратных отражений.
- 10. Подавление неполнократных отражений.
- 11. Скоростной анализ (вторая итерация).
- 12. Подавление линейных помех в тау-пи области.
- 13. Регуляризация.
- 14. Расчет АVО-атрибутов.
- 15. Временная миграция Кирхгоффа до суммирования.
- 16. Выгрузка сейсмограмм ОСТ.
- 17. Суммирование по ОСТ.

Граф обработки данных наблюдений с заглубленной системой, в отличие от приповерхностных наблюдений, включал в себя следующие процедуры

- 1. Ввод данных в систему обработки.
- 2. Присвоение геометрии наблюдений.
- 3. Приведение к единому уровню наблюдений.
- 4. Полосовая фильтрация.
- 5. TFD.
- 6. Детерминистическая деконволюция.
- 7. Амплитудная коррекция.

- 8. Расчет АVO-атрибутов.
- 9. Ввод кинематических поправок и суммирование.
- 10. Миграция Столта после суммирования.
- 11. Ввод поправок за заглубление приемно-излучающей системы.

Ключевым отличием обработки сейсмоакустических данных с заглубленной системой является возможность использовать импульс прямой волны для учета изменения сигнатуры источника вдоль профиля, а также для учета различия в АЧХ приемного тракта для разных каналов. Для этого применяется детерминистическая деконволюция, проиллюстрированная на рисунке 5.16.



Рис. 5.16. Пример суммированного временного разреза до (А) и после (Б) процедуры деконволюции

Чтобы получить разрезы по кинематическим параметрам однократно отраженных волн аналогичных данным с поверхностной системой, необходимо добавить в мигрированные разрезы статические поправки, равные времени вступления волны-спутника на суммарных разрезах. То есть такая поправка приводит разрез на уровень невозмущенной поверхности моря. Пример временного разреза до и после введения статических поправок представлен на рисунке 5.17.



Рис. 5.17. Фрагмент суммарного временного разреза до (А) и после (Б) ввода статических поправок за заглубление системы наблюдений

Отражение от кровли газонасыщенных отложений имеет много общего с отражением от кровли многолетнемерзлых пород. Обе эти поверхности характеризуются повышенными амплитудами отражений, неровным рельефом, краевыми дифракционными эффектами, могут располагаться резко дискордантно по отношению к отражениям от геологических слоев. При высокочастотных сейсмоакустических исследованиях (профилографы SES, Parasound и др.) обе поверхности почти всегда являются акустическим фундаментом, что не позволяет изучить нижележащую часть разреза. Единственным надежным критерием, позволяюшим идентифицировать газонасышенные отложения. является отрицательная полярность отражения от их кровли (т. е. обратная по отношению к полярности отражения от дна), что связано с резким понижением скорости волн в загазованных интервалах разреза. В многолетнемерзлых породах скорости упругих волн, наоборот, выше, чем фоновые, и полярность отражений от их кровли – положительная. В то же время при применении только высокочастотных профилографов определить полярность отражений практически невозможно, поскольку используется огибающая сигнала.

Сейсмические исследования на шельфе моря Лаптевых в трех частотных диапазонах позволили не только решить эту проблему, но и получить дополнительные преимущества при интерпретации. Заглубление приемного

устройства (косы) при работе в среднечастотном диапазоне (ССВР) дало возможность избавиться от волн-спутников, что не только повысило вертикальную разрешающую способность, но и позволило надежно определить полярность отражений и более полно использовать динамические характеристики записи. В частности, на рисунке 5.18 видно заметное увеличение амплитуды донного отражения, связанного с наличием на дне отложений ледового комплекса.



Рис. 5.18. Выраженность в современном рельефе участков выхода на дно отложений ледового комплекса и возрастание амплитуды донного отражения на этих участках (красные стрелки). Синие стрелки – погребенные термокарстовые впадины. Черная стрелка – артефакт

В низкочастотном диапазоне поверхность ММП уже не всегда является акустическим «фундаментом», особенно при островном или линзовидном распространении мерзлых пород. Приповерхностные газовые аномалии в этом диапазоне частот также не всегда экранируют нижележащий разрез. На некоторых участках появляется возможность определения скоростных характеристик разреза, а также применение AVO-анализа. Пример выявления газовых аномалий приведен на рисунке 5.19, а кровли реликтовых зон ММП – на рисунке 5.20.



Рис. 5.19. Идентификация газовых аномалий на основе AVO-анализа



Рис. 5.20. Предполагаемая кровля реликтовых ММП (красная стрелка). Признаки: высокая амплитуда отражения, прямая полярность, неровная конфигурация, экранирование разреза. Синие стрелки – подозерные талики, зеленые стрелки – термокарстовые впадины в кровле ледового комплекса

Для разделения газонасыщенных и многолетнемерзлых пород по суммарным мигрированным временным разрезам СВР дополнительно к стандартному подходу в интерпретации автором выполнялась акустическая инверсия, последовательность процедур которой представлена на рисунке 5.21.



Рис. 5.21. Граф выполнения акустической инверсии

Конкретные примеры по результатам выполненной инверсии для объектов «газонасыщенный слой» и «мерзлота» приведены на рисунке 5.22 и рисунке 5.23. Полученные данные позволили сделать важный вывод, что газонасыщенность проявляется на разрезе акустического импеданса в виде пониженных значений, по сравнению с фоновыми, а «мерзлота» – повышенными.



Рис. 5.22. Временной разрез (А) и результат акустической инверсии (Б) на объекте «газонасыщенный слой»



Рис. 5.23. Временной разрез (А) и результат акустической инверсии (Б) на объекте «мерзлота»

Представленная технология сейсмических исследований в широком диапазоне частот от 50 Гц до 3,5 кГц позволила достичь оптимальных параметров съемки по глубинности и вертикальной разрешающей способности за один проход судна. Применение методики сейсмических работ с комбинированной приповерхностной

и заглубленной приемно-излучающей установкой позволило автору впервые применить методы динамического анализа и инверсии для сейсмоакустических данных в характерных для Арктического региона сейсмогеологических и гидрометеорологических условиях.

Выводы

Применение разработанной технологии многоканальных сейсмоакустических наблюдений позволяет проводить типизацию, картирование и количественную оценку свойств донных осадков в сейсмогеологических условиях, характерных для арктических и дальневосточных шельфов РФ.

Использование методики сейсмоакустических исследований с заглубленной системой позволило решить задачу сейсмического микрорайонирования без установки донных станций и проведения специальных работ.

Комбинирование наблюдений с приповерхностными и заглубленными системами обеспечивает повышение достоверности идентификации опасных геологических процессов и явлений, в том числе повышение достоверности выявления в геологическом разрезе зон мерзлых пород и газонасыщенных отложений.

Разработанная технология позволила успешно решать вышеуказанные инженерно-геологические задачи в различных гидрометеорологических условиях с судов различного типа и тоннажа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании конкретных выводов, полученных в каждой из глав диссертации, основные результаты работы можно свести к следующим положениям.

1. В результате проведенных разработок спроектированы, созданы и запатентованы аппаратно-программные комплексы для многоканальных сейсмоакустических исследований на мелководных акваториях в частотном диапазоне 50–5000 Гц, обеспечивающие возможность проведения работ с использованием как стандартных НИС, так и малотоннажных плавательных средств.

2. Разработана методика полевых многоканальных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной расстановкой, удовлетворяющая требованиям к качеству данных для проведения кинематического и динамического анализа с целью изучения строения и свойств придонных осадков.

3. Создана и запатентована система обработки сейсмоакустических данных и предложены специальные процедуры восстановления «истинных амплитуд» для выполнения кинематического анализа и динамического анализа результатов наблюдений с заглубленной расстановкой.

4. Предложена технология количественных оценок упругих свойств осадков, и на конкретных примерах показаны возможности сейсмоакустических исследований с заглубленными системами для решения ряда инженерногеологических задач, таких как типизация морских осадков, сейсмическое микрорайонирование, выявление зон газонасыщенных и мерзлых грунтов и иных опасных геологических процессов и явлений.

Разработанная автором и подтвержденная практическими результатами технология многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами открывает новые возможности метода и обеспечивает переход от качественной к количественной интерпретации данных, что имеет существенное значение для развития теории, методики и практики морских геолого-геофизических исследований и значительный прикладной потенциал в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

1. Рис. 1.1. Опасные геологические явления при бурении на дне акваторий [Vanneste, 2010].

2. Рис. 1.2. Рассчитанные значения скоростей Р- и S-волн (A) и их отношения (B) в зависимости от газонасыщения (пунктир – однородного, сплошные линии – неоднородного «пятнами») в разных приближениях для неконсолидированных осадков при пористости 50% и дифференциальном давлении 1 МПа [Lee, 2004].

3. Рис. 1.3. Теоретические графики зависимости отношения скоростей и наблюденные значения для неконсолидированных осадков (А) с пористостью 38% при давлениях 10 и 31 МПа; для консолидированных осадков (В) с пористостью 26% при давлениях 7, 35 и 69 МПа [Lee, 2004].

4. Рис. 1.4. Зависимость скорости продольных волн от дифференциального давления (а). Те же данные изображены относительно порового давления (b) [Dvorkin, 2001].

5. Рис. 1.5. Схематическое изображение смещения точек на кроссплотах акустического импеданса/сдвигового импеданса при увеличении порового давления для различных типов флюида [Dvorkin, 2001].

6. Рис. 1.6. Зависимость скорости Р-волн от эффективного давления Ре для всех типов образцов и для подобных измерений в работах [Zimmer et al., 2002].

7. Рис. 1.7. Зависимость скорости S-волн от эффективного давления для всех образцов и для подобных измерений в работах [Zimmer et al.,2002].

8. Рис. 1.8. Зависимость Vp/Vs от эффективного давления [Zimmer et al., 2002].

9. Рис. 1.9. Система DTAGS (deep-towed acoustic/geophysical system) [Chapman et al., 2002].

10. Рис. 1.10. Система SYSIF (JH250-6000) [Marsset et al., 2010].

11. Рис. 1.11. Диаметр зоны Френеля при частоте 20 Гц для различной геометрии системы: а) источник и приемник на поверхности; б) источник на поверхности, приемник на расстоянии 100 м от уровня дна; в) источник и приемник находятся на расстоянии 100 м от уровня дна [Bowen, 1984).

12. Рис. 1.12. Лучевая схема пробега волны, отраженной от морского дна. Пунктирная кривая – глубина моря [Lopes и др., 1996].

13. Рис. 1.13. Потрассовая коррекция геометрии с использованием времени прихода волны, отраженной от поверхности моря [Walia and Hannay, 1999].

14. Рис. 1.14. Смещение «точки» отражения при увеличении глубины отражающей границы.

15. Рис. 1.15. Лучевая схема распространения волн-спутников при разном заглублении приемно-излучающей системы.

16. Рис. 1.16. Отражение и обмен волн на границе полупространства [Riedel, Theilen, 2001].

17. Рис. 1.17. Зависимость коэффициента отражения P-волн как функции угла падения от отношения коэффициентов Пуассона s1/s2 в контактирующих средах. Модель среды: VP1 = 2000 м/с, VS1 = 1000 м/с, r1 = 2,0 г/см³; s1 = 0,33. VP2 = 2500 м/с, r2 = 2,0 г/см3. Параметр кривых – коэффициент Пуассона во второй среде.

18. Рис. 1.18. Влияние скоростей Р-волн (а), S-волн (с) и плотности (b) на поведение коэффициента отражения в зависимости от угла падения [Riedel, Theilen, 2001].

19. Рис. 2.1. Схема сейсмоакустического комплекса «Нильма».

20. Рис. 2.2. Блок-схема приемно-регистрирующего устройства.

21. Рис. 2.3. Диаграмма направленности многоэлектродного спаркера в полярных координатах.

22. Рис. 2.4. Интерфейс программы регистрации сейсмоакустических данных.

23. Рис. 2.5. Блоки усовершенствованного аппаратно-программного комплекса «Нильма-2010».

24. Рис. 2.6. Схема сейсмоакустического комплекса «Нильма-2010».

25. Рис. 2.7. Пример полевой записи одного приемного канала (заглубленная методика).

26. Рис. 3.1. Плавсредства различного типа, использованные во время проведения морской геофизической практики на Белом море.

27. Рис. 3.2. Научно-исследовательский катер «Студент МГУ». Длина судна 13,3 м, ширина 2,8 м.

28. Рис. 3.3. Пример конфигурации приповерхностной приемноизлучающей системы.

29. Рис. 3.4. Буксировочный плотик с установленным под ним бумером и

16-канальной косой.

30. Рис. 3.5. Оценка присвоенной геометрии по временам прихода прямой волны. Красным показано расчетное время прихода волны.

31. Рис. 3.6. Сейсмограмма равных удалений для 1-го (А) и 16-го (Б) каналов записи соответственно.

32. Рис. 3.7. Сейсмограмма равных удалений для 1, 5, 9 и 13-го каналов записи соответственно с введенными статическими поправками (отражение от дна приведено к одному уровню).

33. Рис. 3.8. Сигнал отраженной от дна волны, в зависимости от канала (отражение от дна приведено к одному уровню).

34. Рис. 3.9. Спектр сигнала отраженной от дна волны в зависимости от канала.

35. Рис. 3.10. Схема устройства электроискрового источника упругих волн типа спаркера, использованного при проведении экспериментальных работ с приповерхностной методикой.

36. Рис. 3.11. Спектр регистрируемого сигнала. Энергия электроискрового источника упругих волн W/N = 10 джоулей.

37. Рис. 3.12. Схема расположения эллектродов (А) и диаграмма направленности для источника упругих колебаний на центральной частоте 1000 Гц (Б).

38. Рис. 3.13. Электродинамический источник типа бумера, закрепленный на плотике.

39. Рис. 3.14. Дисперсия амплитуд (А) зондирующего сигнала, (Б) волны-спутника и (В) оптимально согласованного сигнала по данным полевых наблюдений.

40. Рис. 3.15. Лучевая схема распространения прямой волны и волны, отраженной от свободной поверхности.

41. Рис. 3.16. Зарегистрированные сигналы прямой волны для каждого выстрела по профилю. Многоканальные наблюдения с приповерхностной методикой.

42. Рис. 3.17. Оценка частотных характеристик случайной помехи (А) и сигнала (Б). Данные 2011 г.

43. Рис. 3.18. Принципиальная схема наблюдений с заглубленной расстановкой. 1 – заглубитель (вес 100 кг), 2 – спаркер (34 электрода, мощность 800

44. Рис. 3.19. Пример сейсмической записи по одному из профилей, полученному с заглубленной расстановкой. Канал № 1.

45. Рис. 3.20. Сейсмограммы ОПВ по одному из участков профиля.

46. Рис. 3.21. Траектории лучей в методике с заглубленной расстановкой.

47. Рис. 3.22. Геометрия лучевых траекторий волн, значения времен пробега которых используются для восстановления точных параметров системы глубинной буксировки.

48. Рис. 3.23. Геометрические построения системы прямоугольных треугольников, позволяющей составить систему уравнений (3.3).

49. Рис. 3.24. Глубины приемников сейсмической косы, рассчитанные по временам прихода волн из уравнения (3.3).

50. Рис. 3.25. Иллюстрация затруднений в прослеживании волнспутников.

51. Рис. 3.26. Сигнал прямой волны (осреднение по каналу).

52. Рис. 3.27. Амплитудный спектр сигнала прямой волны (осреднение по каналу).

53. Рис. 3.28. Сейсмические трассы в сортировке канал – ПВ с выделенными временами первых вступлений (А), амплитуды первых вступлений прямой волны до коррекции за расхождение фронта (Б).

54. Рис. 3.29. Амплитуды прямой волны по профилю для каналов № 5, 6, 10–12, 14 после коррекции за сферическое расхождение фронта. Выделяются две группы приемников с различным усилением.

55. Рис. 3.30. Амплитуды прямой волны по профилю для каналов № 5, 6, 10–12, 14 после коррекции за сферическое расхождение фронта и за различное усиление каналов.

56. Рис. 3.31. Сейсмические трассы в сортировке канал – ПВ с выделенными временами первых вступлений (А), амплитуды прямой волны после коррекции за сферическое расхождение фронта и за различное усиление каналов № 5–14 (Б).

57. Рис. 3.32. Амплитуды волны, отраженной от свободной поверхности, по первому вступлению. 5-й и 6-й каналы скорректированы за усиление приемников.

58. Рис. 3.33. Пример сейсмограммы ОПВ, полученной с заглубленной расстановкой (источник – спаркер). Справа показаны спектры прямой волны для разных приемных каналов.

59. Рис. 3.34. Пример двух сейсмограмм ОПВ, полученных с заглубленной расстановкой (источник – многоэлектродный спаркер).

60. Рис. 3.35. Пример сейсмоакустических данных, полученных с заглубленной расстановкой. Сейсмограмма равного удаления.

61. Рис. 3.36. Форма импульса прямой волны для соседних выстрелов.

62. Рис. 3.37. Сейсмические трассы в сортировке канал – ПВ с выделенными временами первых вступлений (А), амплитуды прямой волны по профилю для каждого канала записи после коррекции за неидентичность приема и излучения (Б).

63. Рис. 3.38. Отношение амплитуды первых вступлений для донного отражения (соотв. пикировке) к среднеквадратичному шуму в окне 3 мс.

64. Рис. 4.1. Положение тестового профиля (отмечено красным) на карте фактического материала сейсмоакустических наблюдений в проливе Великая Салма в 2003–2016 гг.

65. Рис. 4.2. Пример 2D-данных ССВР, полученных при наблюдениях с заглубленной системой в 2016 году.

66. Рис. 4.3. Окно параметров модуля Ensemble QC.

67. Рис. 4.4. Сейсмограмма общих удалений (А), распределение амплитуд шума (Б), прямой волны (В), отражения от поверхности воды (Г) и дна (Д) в зависимости от пункта возбуждения и номера канала.

68. Рис. 4.5. Окно параметров модуля SSAA.

69. Рис. 4.6. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) после введения расхождения, с набором трасс с выделенными временами вступлений соответствующих волн.

70. Рис. 4.7. Сигналы прямой волны в зависимости от канала (А) и соответствующие амплитудные спектры.

71. Рис. 4.8. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) после введения поправок за канал.

72. Рис. 4.9. Пример удаления низкочастотных помех при помощи полосового фильтра. А – до подавления, Б – после.

73. Рис. 4.10. Пример удаления низкочастотных случайных помех при помощи модуля TFD Noise Rejection (А) – до подавления, (Б) – после.

74. Рис. 4.11. Сейсмограмма ОПВ и сейсмический разрез до (А) и после (Б)

подавления волн-спутников.

75. Рис. 4.12. Окно задания параметров модуля Custom Impulse Trace Transforms.

76. Рис. 4.13. Фрагмент сейсмического разреза. А – до деконволюции, Б – после деконволюции.

77. Рис. 4.14. Схема для расчета статических поправок.

78. Рис. 4.15. Смещение точки отражения от положения общей средней точки при различном заглублении источника и приемника.

79. Рис. 4.16. Величина радиуса первой зоны Френеля в зависимости от глубины в случае сферической волны.

80. Рис. 4.17. Сейсмограмма ОГТ после ввода NMO до статических поправок за криволинейность системы наблюдения.

81. Рис. 4.18. Сейсмограмма ОГТ после ввода NMO после статических поправок за криволинейность системы наблюдения.

82. Рис. 4.19. Фрагмент суммарного разреза, полученного без ввода статических поправок (А) и после ввода статических поправок (Б).

83. Рис. 4.20. Пример вертикального скоростного анализа для данных, полученных по заглубленной методике. А – вертикальный спектр скоростей, Б – суперсейсмограмма ОСТ, В – сумма с текущей скоростной функцией, Γ – суммы с постоянными скоростями (Constant Velocity Stackdisplay).

84. Рис. 4.21. Пример определения эффективных скоростей на тестовом профиле в ПО Prime 3D для донного отражения (А) и кровли акустического фундамента (Б).

85. Рис. 4.22. Построение горизонтально-скоростной модели в ПО Prime 3D.

86. Рис. 4.23. Пример обработки данных в ПО RadExPro с применением модуля FK Stolt Migration. Суммарный сейсмический разрез до миграции (А) после миграции (Б).

87. Рис. 4.24. Пример обработки данных в ПО RadExPro с применением модуля FK Stolt Migration. Фрагмент сейсмического разреза до миграции (А) после миграции (Б).

88. Рис. 4.25. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) до обработки, с набором трасс с выделенными временами вступлений соответствующих волн.

89. Рис. 4.26. Оценка амплитуд прямой волны (А, зеленый), отражения от поверхности воды (Б, красный) и дна (В, синий) после обработки, с набором трасс с выделенными временами вступлений соответствующих волн.

90. Рис. 4.27. Результаты расчетов AVO-параметров на тестовом профиле. Интерсепт (А), градиент (Б), их произведение (В).

91. Рис 5.1. Мигрированный разрез, полученный с помощью многоканальной системы глубинного буксирования.

92. Рис. 5.2. Иллюстрация результатов количественной оценки упругих свойств донных грунтов посредством AVA-инверсии. А – суммированный разрез по сейсмоакустическомупрофилю, полученному с заглубленной системой; Б – рассчитанный коэффициент отражения от морского дна для профиля А; В – рассчитанная плотность ρ донных отложений; Г – рассчитанная скорость поперечных волн Vs; Д – скорость продольных волн Vp; Е – характеристическое отношение Vs/Vp.

93. Рис. 5.3. Схема профилей сейсмоакустических работ 2013 г. Пролив Великая Салма, (Кандалакшский залив Белого моря).

94. Рис. 5.4. (А) Сейсмический разрез равных удалений, полученный с помощью заглубленной сейсмоакустической методики; (Б) суммированный разрез после адаптивного вычитания волны-спутника и миграции. Вертикальная шкала – в мс.

95. Рис. 5.5. Пример волнового поля по разрезу равных удалений (слева) и сейсмограммы ОСТ (справа) над областью предположительно газонасыщенных отложений (кровля – отражение с обратной полярностью). Цифрами обозначены номера слоев, для которых применялась послойная AVA-инверсия.

96. Рис. 5.6. Зависимость коэффициента отражения Rpp от угла падения волны для ОСТ 214.

97. Рис. 5.7. Изменение Vp₃ для газонасыщенного слоя по результатам инверсии на участке профиля.

98. Рис. 5.8. Модель упругих свойств, полученная по результатам AVAинверсии для сейсмоакустического профиля вблизи мыса Киндо Кандалакшского залива Белого моря.

99. Рис. 5.9. Сейсмоакустический разрез с привязкой к инженерной скважине № 53.

100. Рис. 5.10. Результаты интерпретации вдоль профиля line 137,

полученного с заглубленной сейсмоакустической системой.

101. Рис. 5.11. Фрагмент профиля, полученного с заглубленной методикой (слева). Справа показана сейсмограмма ОПВс выделенными опорными горизонтами, по которым снимались амплитуды для AVA-анализа.

102. Рис. 5.12. Наблюденная AVA-кривая (красная линия) и модельные кривые для кровли СК 3.1 (черные линии).

103. Рис. 5.13. Карта-схема приращения сейсмической балльности *dl* в районе исследования. Проектируемые гидротехнические сооружения обозначены условными знаками.

104. Рис. 5.14. Принципиальная схема многоканальных сейсмоакустических наблюдений с двухуровневой расстановкой.

105. Рис. 5.15. Пример сейсмического вертикального среза по профилю, отработанному с двухуровневой расстановкой в трех частотных диапазонах. (А) Данные профилографа; (Б) данные сверхвысокого разрешения, полученные с заглубленной приемно-излучающей системой; (В) данные высокого разрешения, полученные с приповерхностной приемно-излучающей системой.

106. Рис. 5.16. Пример суммированного временного разреза до (А) и после (Б) процедуры деконволюции.

107. Рис. 5.17. Фрагмент суммарного временного разреза до (А) и после (Б) ввода статических поправок за заглубление системы наблюдений.

108. Рис. 5.18. Выраженность в современном рельефе участков выхода на дно отложений ледового комплекса и возрастание амплитуды донного отражения на этих участках (красные стрелки). Синие стрелки – погребенные термокарстовые впадины. Черная стрелка – артефакт.

109. Рис. 5.19. Идентификация газовых аномалий на основе AVO-анализа.

110. Рис. 5.20. Предполагаемая кровля реликтовых ММП (красная стрелка). Признаки: высокая амплитуда отражения, прямая полярность, неровная конфигурация, экранирование разреза. Синие стрелки – подозерные талики, зеленые стрелки – термокарстовые впадины в кровле ледового комплекса

111. Рис. 5.21. Граф выполнения акустической инверсии.

112. Рис. 5.22. Временной разрез (А) и результат акустической инверсии (Б) на объекте «газонасыщенный слой».

113. Рис. 5.23. Временной разрез (А) и результат акустической инверсии (Б) на объекте «мерзлота».

СПИСОК ТАБЛИЦ

1. Таблица 1.1. Инженерно-геологическая классификация опасных геологических процессов и явлений Западно-Арктического шельфа России [Козлов, 2005].

2. Таблица 1.2. Проявление геологических опасностей на сейсмических записях и их степень опасности [Миронюк, 2012].

3. Таблица 1.3. Классификация сейсморазведочных работ по [Thomas et al., 2012].

4. Таблица 1.4. Упругие свойства неконсолидированных морских осадков по результатам AVO-анализа [Riedel, Theilen, 2001].

5. Таблица 2.1. Основные параметры аппаратно-программного комплекса «Нильма-2010».

6. Таблица 3.1. Оценка разброса амплитуд (для каждого канала) по данным многоканальных наблюдений с приповерхностной методикой.

7. Таблица 3.2. Нормировочные коэффициенты для каждого канала для приведения записи к одному уровню усиления.

8. Таблица 3.3. Нормировочные коэффициенты за усиление для 1-го и 2-го канала.

9. Таблица 3.4. Разброс амплитуд для различных каналов заглубленной системы.

10. Таблица 3.5. Разброс амплитуд для различных каналов заглубленной системы для каналов 1 и 2.

11. Таблица 3.6. Отношение сигнала к помехе для многоканальных данных, наблюденных с заглубленной методикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е, Радченко А.А., Приезжев И.И. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки, 2009, № 4.

2. Безродных Ю.П., Лисин В.П., Федоров В.И., Кутузов А.Н. Опыт применения сейсмоакустики и комплексирование ее с другими методами при инженерных изысканиях и обследовании подводных трубопроводов // Разведка и охрана недр. 2002. № 1. С. 2–5.

3. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка. 2006. Тверь. АИС. 743 с.

4. Бондарев В.И., Вейцман Б.А., Федоров В.И., Захарченко В.В., Онищенко С.В., Шипилов А.Л. Применение данных многоканальной цифровой сейсмоакустики для прогнозирования физико-механических свойств морских грунтов // Морская инженерная геофизика, Рига: ВНИИморгео. С. 3–10. 1988.

5. Владов М.Л., Гайнанов В.Г., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Шалаева Н.В. Сейсмоакустические исследования на кафедре сейсмометрии и геоакустики в МГУ // Ломоносовская школа МГУ по геофизическим методам исследования земных недр: прошлое, настоящее, будущее. Сб. научных трудов. Москва: МГУ. 2004. С. 57–59.

6. Гайнанов В. Г. Об использовании динамических параметров записи при сейсмоакустическом профилировании // Вестник Московского университета, 2008. Т. 4. № 5.

7. Гайнанов В.Г. Разработка компьютеризованной технологии одноканальных и многоканальных сейсмоакустических исследований на акваториях // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 2009.

8. Гайнанов В.Г., Зверев А.С. Сейсмоакустический комплекс для двухчастотного профилирования на акваториях // Океанология. 2010. Том 50. № 4. С. 649–653.

9. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Клещин С.М., Кузнецова О.В., Архипов А.А., Федоров А.С. Многоканальное сейсмоакустическое профилирование в Байдарацкой губе // Расширенные тезисы Международной конференции «Нефть и газ Арктического шельфа-2006». Мурманск. 2006.

10. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Лупырь Р.Р. Опыт сейсмоакустического профилирования с многократным перекрытием – возможности и ограничения // Тезисы Международной конференции «Инженерная геофизика-2006». Геленджик. 2006.

11. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Лупырь Р.Р. Многоканальное сейсмоакустическое профилирование на акваториях – ожидания и результаты // Расширенные тезисы Международной конференции «Санкт-Петербург-2006». Санкт-Петербург. 2006.

12. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Токарев М.Ю. Многоканальное сейсмоакустическое профилирование в инженерных целях – больше возможностей, больше информации // Тезисы третьей Международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика-2007». Геленджик. 2007.

13. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Токарев М.Ю. Особенности обработки данных многоканального сейсмоакустического профилирования на акваториях // Сб. тр. кафедры общей и прикладной геофизики Университета «Дубна». Москва. РАЕН. 2007а. С. 42–54.

14. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Токарев М.Ю., Клещин С.М. Опыт сейсмоакустического профилирования с многократным перекрытием: возможности и ограничения // Разведка и охрана недр. 2006в. № 12. С. 21–24.

15. Гайнанов В.Г., Старовойтов А.В., Баскакова Г.В. Сейсмоакустические методы при инженерно-геологических изысканиях на реках // Разведка и охрана недр. № 12. 2008.

16. Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю., Зверев А.С., Росляков А.Г. Многоканальное сейсмоакустическое профилирование на разных частотных диапазонах – реальные возможности // Разведка и охрана недр. 2008а. № 1. С. 35–38.

17. Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю., Зверев А.С., Росляков А.Г. Технология сейсмоакустических исследований на акваториях – от двухчастотного профилирования к многоканальным системам // Расширенные тезисы Международной конференции «Санкт-Петербург-2008». Санкт-Петербург. 2008б.

18. Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. Возможности и ограничения многоканального сейсмоакустического профилирования в инженерных целях: теория и практика // Вестник МГУ. Серия Геология. № 4. 2008. С. 53–62.

19. Глоговский В.М., Лангман С.Л., Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки.//Технологии сейсморазведки 1-2009. С 10–17.

20. Гофман П.А., Кульницкий Л.М., Певзнер Р.Л., Токарев М.Ю. Обработка морских сейсмических данных средствами системы RADEXPRO PLUS // Разведка и охрана недр. 2002. № 1. С. 49–53.

21. Гурвич И.И., Номоконов В.П. Сейсморазведка. Справочник геофизика // Москва. Недра. 1981.

22. Ионов В.Ю., Калинин Э.В., Фоменко И.К., Миронюк С.Г. Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Чёрного моря в районе поселка Архипо-Осиповка // Инженерная геология. 2012. № 5. С. 36–46.

23. Калинин А.В. Основные положения методики сейсмического профилирования с электроискровым источником давления // Методика геофизических исследований океанов. Москва. 1974. С. 66–76.

24. Калинин А.В. Теория, методика и техника сейсмоакустических исследований на море с электроискровым источником упругих волн // Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра физ.-мат. наук. Москва. МГУ. 1976.

25. Калинин А.В., Азими Ш.А., Калинин В.В. Разведочные возможности метода эхолотирования и высокочастотной сейсморазведки при исследовании придонных отложений // Геофизические исследования, сб. 1. Изд. МГУ. 1964. С. 269–278.

26. Калинин А.В., Азими Ш.А., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Спектральные характеристики импульсов давления, возбуждаемых при электроискровом разряде в морской воде // Прикладная геофизика, вып. 64. 1971.

27. Калинин А.В., Казанин А.Г., Шалаева Н.В., Токарев М.Ю. Интенсивность головных волн при малоглубинных сейсмических исследованиях на мелководном шельфе арктических морей // Геофизика. 2000. № 3. С. 21–25.

28. Калинин А.В., Казанин А.Г., Токарев М.Ю., Шалаева Н.В. Интенсивность обменных волн в сейсмогеологических условиях шельфа арктических морей // Вестник МГУ, сер. 4. Геология. 2001. № 5. С. 67–72.

29. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Определение основных параметров непрерывного сейсмического профилирования с электроискровым источником // Прикладная геофизика, вып. 73. 1974. С. 69–94.

30. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. Москва. «Недра». 1983.

31. Калинин А.В., Шалаева Н.В.. О пределах применимости лучевых приближений при оценке динамических параметров отраженных волн // Вестник Московского Университета. 1999. №5. С.49–54.

32. Калинин В.В., Кульницкий Л.М., Токарев М.Ю. Повышение разрешающей способности сейсмоакустических исследований на акваториях // Сб. тезисов Всесоюзной конференции по морской геофизике: «Проблемы геофизики океанского дна». 1987. Том 1. С. 59.

33. Калинин В.В., Кульницкий Л.М., Токарев М.Ю. Линейная одномерная

корректирующая фильтрация для повышения разрешающей способности сейсмических данных // Вестник МГУ, сер. 4. Геология. 1992. № 3. С. 67–73.

34. Калинин В.В., Кульницкий Л.М., Шалаева Н.В., Токарев М.Ю. Система цифровой обработки для целей сейсмостратиграфической интерпретации // Материалы рабочего совещания по геологической истории и современным процессам осадконакопления в Черном море». София. 1989.

35. Козлов С.А. Опасные для нефтегазопромысловых сооружений геологические и природно-техногенные процессы на Западно-Арктическом шельфе России // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006.

36. Кульницкий Л.М., Гофман П.А., Токарев М.Ю. Математическая обработка данных георадиолокации в системе RADEXPRO // Разведка и охрана недр. 2001. № 3. С. 6–11.

37. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск // Наука. 1995. С. 198.

38. Миронюк С.Г., Отто В.П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // ГеоРиск. 2014. № 2. С. 8–18.

39. Миронюк С.Г. Локализация приповерхностных зон скопления газа (газовых карманов и труб) геофизическими методами и оценка их опасности для морских сооружений // ТЭК. Безопасность. 2013. № 2. С. 74–79.

40. Миронюк С.Г. Оценка сейсмической опасности участков размещения морских сооружений на шельфе // Нефть и Газ Евразия. 2012. № 11. С. 58–61.

41. Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королев В.А. Инженерная геология России. Том 1. Грунты России. Москва: КДУ. 2011.

42. Токарев М.Ю. Методика обработки данных малоглубинных сейсмических исследований // Сб. рефератов докладов конференции «Геофизическии исследования в компании «Алмазы России-Саха». Мирный. 1997.

43. Токарев М.Ю., Пирогова А.С. Определение упругих свойств газонасыщенных осадков по данным сверхвысокоразрешающих сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой. Кандалакшский залив, Белое море // Технологии сейсморазведки. 2015. № 3. С. 66–74.

44. Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика // Пер. с англ. Москва: Мир. 1989. С. 216. 45. Хведчук И.И., Агеев В.Н., Рабей И.В. и др. Прогнозирование нефтегазоносности на акваториях. Москва: Недра. 1988. С. 167.

46. Хилтерман Ф.Д. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. Изд-во ГЕРС. 2010. С. 256.

47. Шматков А.А., М.Ю. Токарев. Новая методика трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 6. С. 39–42.

48. Шматков А.А., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических исследований на акваториях // Технологии сейсморазведки. 2015. № 2. С. 86–97.

49. Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е. Почти все о сейсмической инверсии // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15.

50. Яшин Д.С., Мельницкий В.Е., Кириллов О.В. Строение и вещественный состав донных отложений Баренцева моря // Геологическое строение Баренцево-Карского шельфа. ПГО «Севморгеология». 1985. С. 101–115.

51. Aki K., and Richards P.G. Quantitative Seismology: Theory and Methods. W.H. Freeman and Co. San Francisco. 1980.

52. Alkhalifah, Tariq and Plessix, René-Édouard. A recipe for practical full-waveform inversion in anisotropic media: An analytical parameter resolution study //. 79(3). 2014. P. 91–101.

53. Anderson A. L., Hampton L. D. Acoustics of gas-bearing sediments I-II. J. Acoust. Soc. Am. 67. 1980. P. 1865–1903.

54. Arthur J., Long D., Vanneste M. and Wardell N. Special issue on applied marine geophysics foreword // Near Surface Geophysics. 2011. 9. P. 263–265.

55. Ayres A., Theilen. F. Relationship between P- and S-wave velocities and geological properties of near-surface sediments of the continental slope of the Barents Sea // Geophysical Prospecting. 1999. 47. P 431–441.

56. Bacon M., Simm R. and Redshaw T. 3-D Seismic Interpretation // Cambridge University Press. 2007. P. 224.

57. Bai J. and Yingst D. Q estimation through waveform inversion // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. Extended Abstract. TH 10 01. 2013.

58. Beckmann W.C., Roberts A.C., Luskin B. Sub-Bottom Depth Recorder // Geophysics. 1959. v. 24, # 4. P. 749–760.

59. Best A. I., Tun M. D. J., Dix J. K., Bull J. M. Tidal height and frequency dependence of acoustic velocity and attenuation in shallow gassy marine sediments // Geophysics. 2004. Res. 109. B08101.

60. Biondi B. and Almomin A. Tomographic full waveform inversion (TFWI) by combining full waveform inversion with wave-equation migration velocity analysis // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 1–5. 2012.

61. Bortfeld R. Approximations to the reflection and transmission coefficients of plane longitudinal and transverse waves // Geophysical Prospecting. 1961. 09. P. 485–502.

62. Bowen A.N. A high-resolution seismic profiling system using a deep-towedhorizontal hydrophone streamer // Marine geophysical Researches. 1984. 6. P. 275–293.

63. Bowles F.A., Gettrust J.F. and Rowe M. Geological interpretations based on deeptow single channel and multichannel seismic data from the Bermuda Rise // Marine geology. 1991. 96. P 279–293.

64. Breitzke M. Physical Properties of Marine Sediments // Marine Geochemistry. Springer. 2006.

65. Breitzke M., J.Bialas A deep-towed multichannel seismic streamer for very high-resolution surveys in full ocean depth // First Break. 2003. v. 21. 2003.

66. Bryan G.M. Basement profiling with a deep-towed hydrophone near deep sea drilling project site 417 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Part 1. 1979.

67. Chapman R., Walia R., Gettrust J., Wood W., Hannay D., Spence G., Hyndman R., Macdonald R., Rosenberger A. High Resolution deep-towed multi-channel seismic survey of deep sea gas hydrates off western Canada // Geophysics. 2002. 67. P. 1038–1047.

Chopra S., Castanga J.P. AVO (Investigations in geophysics series, no. 16) // SEG.
 Tulsa. USA. 2014. P. 283.

69. Chopra S., Huffman A. Velocity Determination for pore pressure prediction // The Leading Edge. 2006. 25(12). P. 1502.

70. Denisov M.S., Polubojarinov M.A., Finikov D.B. Robust Methods of Adaptive Seismic Multiple Suppression // Saint Petersburg. Russia. 16–19 October 2006.

71. Dvorkin J. Pore pressure and fluid detection from compressional and shear-wave data. Pangea. Stanford. 2001.

72. Dvorkin J., Prasad M., Sakai A., Lavoie D. Elasticity of marine sediments // Rock physics modeling. 1999.

73. Dillon P.B. A Comparison Between Kirchhoff and GRT migration on VSP Data // Geophysical Prospecting. 1990. 38. P. 757–777.

74. Dutta N. C. Geopressure prediction using seismic data: current status and the road ahead // Geophysics. 2002. 67. P. 1–30.

75. Edgerton H.E. Sub-Bottom Penetrations in Boston Harbor // Journal of Geophysical Research. 1963. Vol. 68. No. 9. P. 2753–2760.

76. Edgerton H.E., Hayward G.G. The 'Boomer' Sonar Source for Seismic Profiling // Journal of Geophysical Research. 1964. Vol. 69. N. 14. P. 3033–3042.

77. Ewing J.I., Tirey G.B. Seismic Profiler // Journal of Geophysical Research. 1961. Vol. 66. No. 9. P. 2917–2927.

78. Gettrust J.F., Wood W., Spychalski S. High-resolution MCS in deepwater // The leading Edge. 2004. 23. P. 374–377.

79. Gettrust J. F., Wood W.T. and Lindwall D.A. High-resolution seismic investigations of shallow flow site in the Gulf of Mexico // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2005. 24. P. 13–16.

Hamilton E.L. Compressional-wave attenuation in marine sediments // Geophysics.
 1972. 4. P. 620–646.

81. Huffman A.R. and Castagna J.P. The Petrophysical Basis for Shallow Water Flow Prediction Using Multicomponent Seismic Data // The Leading Edge. September 2001.
P. 1030–1035.

82. Kalmykov D., Tokarev M. Datuming of Multi-channel Deep-tow & Accoustic Data in the Shallow Water Conditions // 3rd EAGE St. Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences. Geosciences: From New Ideas to New Discoveries. 2008.

83. Ker S., Le Gonidec Y., Marsset B., Westbrook G.K., Gibert D. Fine-scale gas distribution in marine sediments assessed from deep-towed seismic data // Geophysical Journal International. Oxford University Press (OUP): Policy P - Oxford Open Option. 2014. 196 (3). P. 1466–1470.

84. Kvalstad T.J. What is the Current Best Practice in Offshore Geohazard investigations ? // A State-of-the-Art Review. Offshore Technology Conference. 2007. P. 1–14.

85. Lee M.W. Elastic velocities of partially gas-saturated unconsolidated sediments // Marine and Petroleum Geology. 2004. 21. P. 641–650.

86. Lee M.W. Elastic properties of overpressured and unconsolidated sediments // U.S. Geological Survey Bulletin. 2003. P. 2214.

87. Lee M.W. Modified Biot-Gassmann Theory for Calculating Elastic Velocities for Unconsolidated and Consolidated Sediments // Marine Geophysical Researches. 2002. Vol. 23. Issue 5-6. P. 403–412.

88. Lindsey J.P. The Fresnel zone and its interpretive significance // The Leading Edge.1989. Vol. 8. N 10. P. 33–39.

89. Lopes L., Marquis G., Pascal G., Marsset B., Savoye B., De Roeck Y.H. Processing of high resolution, deep-tow marine seismic data // The Leading Edge. 1996. Vol. 15 (1).
P. 25–30.

90. Mao W., Fletcher R., Deregowski S. Automated interval velocity inversion // 70th Int'l Ann. Meeting. SEG. Expanded Abstracts. 2000. P. 1000–1003.

91. Marsset T., Marsset B., Ker S., Thomas Y., LeGall Y. High and very high resolution deep-towed seismic system // Performance and examples from deep water Geohazard studies. Deep-Sea Research I. 2010. 57. P. 628–637.

92. Mehta C.H., Singh S. P., Polash R. Extraction of Vp & Vs of sea bottom sediments, directivity correction, and QC of amplitudes for inversion of marine seismic data // 6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. 2006. P. 567–571.

93. Missiaen T. VHR 3D marine seismics for shallow water investigations: some practical guidelines // Marine Geophysical Researches. 2005. 26. P. 145–155.

94. Nouze. H., Sibuet J.-C., Savoye B., Marsset B., Thomas Y. Pasisar: performances of a high and very high resolution hybrid deep-towed seismic device // Marine Geophysical Researches. 1997. 19 (5). P. 379–395.

95. Prasad M. Acoustic measurements in sands at low effective pressure: Overpressure detection in sands // Geophysics. 2002. Vol. 67. №2. P. 405–412.

96. Purdy G.M., Ewing J.I., Bryan G.M. A deep-towed hydrophone seismic reflection survey around IPOD sites 417 and 418 // Marine Geology. 1980. 25. P. 1–19.

97. Rechtien R.D. In Situ Liquefaction Investigation of Liquefaction Potential of Soils // Report GL-96-1-USArmy Corps of Engineer. Waterways Experiment Station. 1996. 46.

98. Riedel M. and Theilen F. AVO investigations of shallow marine sediments // Geophysical Prospecting. 2001. 49. P. 198–212.

99. Robb G. B. N., Leighton T. G., Dix J. K., Best A. I., Humphrey V. F., White P.R. Measuring bubble populations in gassy marine sediments: a review // Proceedings of the Institute of Acoustics 28. 2006. Pt.1. P. 60–68.

100. Savoye B., Leon P., De Roeck Y.H., Marsset B., Lopes L., Herveou J. Pasisar: a new tool for near-bottom very high resolution profiling in deepwater // First break 13(6). 1995. P. 253–258.

101. Shuey R.T. A simplification of the Zoeppritz equations // Geophysics. 1985. 50.

P. 609–614.

102. Sirgue L. and Pratt R.G. Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies // Geophysics. 2004. 69. P. 231–248.

103. Stoll R. D., Batista E. O. Using the Biot theory to establish a baseline geoacoustic model for seasor sediments // Cont. Shelf Res. 1998. 18. P. 1839–1857.

104. Swan H.W. Velocities from amplitude variations with offset // Geophysics. 2001.66. No.6. P. 1735–1743.

105. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics // John Wiley & Sons. New York. 1943.

106. Thomas Y., Marsset B., Westbrook G.K., Grall C., Geli L., Henry P., Cifci G., Rochat A. and Saritas H. Contribution of high-resolution 3D seismic near-seafloor imaging to reservoir-scale studies: application to the active North Anatolian Fault, Sea of Marmara // Near Surface Geophysics. 2012. 10. P. 291–301.

107. Tokarev M., Kuzub N., Pevzner R. Deep-towed high-resolution seismic system for investigation of the uppermost subbotom sediments at shallow waters // EAGE Near Surface. 2006.

108. Tokarev M., Kuzub N., Pevzner R., Kalmykov D., Bouriak S. High resolution 2D deep-towed seismic system for shallow water investigation // First break. 2008. Vol. 26.

109. Vardy M.E. Deriving shallow-water sediment properties using post-stack acoustic impedance inversion // Near Surface Geophysics. 2014. 12. P. 1–11.

110. Verschuur D.J. Seismic multiple removal techniques. Past, present and future // EAGE Publications. 2006.

111. Walia R., Hannay D. Source and receiver geometry corrections for deep-towed multichannel seismic data // Geophysical Research Letters. 1999. 26. P. 1993–1996.

112. Wood W.T., Gettrust J.F., Spychalsky S.E. A new deep-towed, multi-channel seismic system // Sea Technol. 2003. 44. P. 44–49.

113. Wood W., and Gettrust J. Deep-tow seismic investigations of methane hydrates, Natural Gas Hydrate: Occurrence, Distribution, and Detection // Geophysical Monogram. 2001. 124.

114. Zimmer M., Prasad M., Mavko G. Pressure and porosity influences on Vp-Vs ratio in unconsolidated sands // The Leading Edge. 2002. Vol. 21. No. 2.

115. Zoeppritz K., Erdbebenwellen V. Uber Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durchUnstetigkeitsflachen // Mathematisch-physikalische Klasse. 1919. P. 66–84.

Диссертации

116. Рокос С. И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа // Автореф. дис. канд. геогр. наук / С. И. Рокос. Мурманскю 2009. С. 35.

Стандарты

117. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений // Москва: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России. С. 105.

118. OGP № 373-18-1 Guidelines for the conduct of offshore drilling hazard site surveys. 2011.

Отчеты о научно-исследовательской работе

119. Интерпретация ЗД сейсморазведочных данных верхней части разреза Туапсинского лицензионного участка ОАО «НК «Роснефть» с целью изучения развития гидратоносных толщ, прогнозирования физических свойств пород, определения возможных осложнений при бурении // Научно-исследовательский отчет. Отв. исп. М.Ю. Токарев. Москва. 2008.

120. Инженерно-геологическая съемка Штокмановской площади масштаба 1:100000 для подготовки к глубокому бурению. Отчет по объекту № 143 за 1988– 1989 гг // Длугач А.Г., Кулага А.И., Монахов Е.И., НПО «Союзморинжгеология» АМИГЭ. Мурманск. 2007.

121. Обзор структуры, свойств донных грунтов и выявление опасных инженерногеологических процессов и явлений для обеспечения выполнения поисков и добычи нефти на территории Усть-Ленского, Усть-Оленекского, Анисинско-Новосибирского, Северо-Врангелевского-1, 2 и Южно-Чукотского, Северо-Карского участков по материалам ранее выполненных изысканий и исследований // Тихоцкий С.А. и др. Москва. ИФЗ РАН. 2016.

122. Разработка и создание прототипа импульсного электродинамического источника упругих волн в воде // Отчет о выполнении НИОКР. Рук.: Токарев М.Ю. – ГК № 4614 р/5386 от 25.12.2006. Москва. 2008. С. 47.

Патенты и свидетельства

123. Приемно-излучающее регистрирующее устройство для дистанционного определения механических свойств донных и поддонных осадков (варианты): пат. 53458 Рос. Федерация. № 2005136775/22; заявл. 28.11.2005; опубл. 10.05.2006.

124. Система обработки сейсмических и георадиолокационных данных RadExPro Plus: свид. 2006612028/ Буряк С.В., Певзнер Р.Л., Полубояринов М.А., Гофман П.А., Токарев М.Ю.// зарег. 14.06.2006.

125. Способ сейсмических исследований на акваториях и устройство для его осуществления: пат. 2592739 Рос. Федерация. № 2015114121/28; заявл. 17.04.2015; опубл. 27.01.2016. Бюл. № 21.

Интернет-ресурсы

126. Руководство пользователя программным обеспечением Prime 3D. URL: http:// yandex-terra.ru/prime (дата обращения 16.07.2016).

127. СИ Технолоджи телеметрические системы. URL: http://www.intromarin.ru, Sercel. URL: http://www.sercel.com, SIMCO Ion. URL: http://www.ion.com (дата обращения 09.06.2016).

128. Vanneste M. Offshore Geohazards // Int. Centre for Geohazards. 2010. URL: http://www.ngi.no/en/Geohazards/Content/Shortcuts/Research-and-development/ to-be-filled-1/ (дата обращения 05.05.2016).