

Сборник тезисов Научно-практической конференции «СЕЙСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ-2015»

ОРГАНИЗАТОРЫ









ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В.Ломоносова» Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН ОАО «Цетральная геофизическая экспедиция» Евро-Азиатское геофизическое общество

СПОНСОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ











Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек») ООО «Деко-геофизика» ООО «ГЕОЛАБ» ООО «Геофизические системы данных» ООО «ПетроТрейс Глобал»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

Грант РФФИ 15-0520157\15



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ









WWW.SEISMICTECHNOLOGIES.RU

О КОНФЕРЕНЦИИ

13-15 апреля 2015 года в ИФЗ РАН состоялась Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2015". Организаторами конференции выступили Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В.Ломоносова, ИФЗ имени О.Ю.Шмидта РАН совместно с Центральной геофизической экспедицией и Евро-Азиатским геофизическим обществом.

Первая конференция «Сейсмические технологии» была организована в апреле 2014г. и получила широкий отклик и многочисленные положительные отзывы. Участники Первой конференции согласились с целесообразностью ежегодного проведения таких встреч, и было принято решение сделать конференцию традиционной. В конференции 2015 года приняло участие более 200 специалистов.

В рамках докладов и обсуждений на конференции были рассмотрены ключевые вопросы современной сейсморазведки – от техники и технологии полевых наблюдений до геологогеофизической интерпретации результатов обработки сейсмических данных – в условиях сухопутных и

комитет

Председатель организационного комитета	
Пудовкин Александр Андреевич	
Председатель программного комитета Ампилов Юрий Петрович	PGS
Сопредседатель организационного комитета Гогоненков Георгий Николаевич	ОАО "Центральная геофизическая экспедиция"
Сопредседатель организационного комитета Тихоцкий Сергей Андреевич	Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН
Сопредседатель организационного комитета Токарев Михаил Юрьевич	Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В.Ломоносва
Владов Михаил Львович	МГУ имени М.В.Ломоносова
Горбачев Сергей Викторович	ООО "РН-Шельф-Арктика"
Дучков Антон Альбертович	Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН
Жуков Александр Петрович	ООО "Геофизические системы данных"
Керусов Игорь Николаевич	ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг"
Лаптев Ярослав Владимирович	ООО "ГеоПрайм" (IGSS)
Ляндрес Александр Юрьевич	ООО "СЖЖ ВОСТОК"
Птецов Сергей Николаевич	ООО "ПетроТрейс Глобал"
Рыжков Валерий Иванович	РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина
Силаенков Олег Александрович	Яндекс. Терра (ООО "Сейсмотек")

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ 13 апреля, понедельник

10.00-10.20 Открытие конференции. Вступительное слово организаторов		
	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ	
10.20-10.45	В.М. Глоговский и его «Прикладная теория определения скоростных и глубинных параметров среды»	Каплан С.А. (ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИГЕОСИСТЕМ»), Кузнецов И.К., Лангман С.Л., Силаенков О.А., Фиников Д.Б., Шалашников А. В. (Яндекс. Терра (ООО «Сейсмотек»)
10.45-11.10	Модели реальных сред в технологиях метода вертикального сейсмического профилирования	Шехтман Г.А. (ООО «Геофизические системы данных»), Баюк И.О.(ИФЗ РАН)
11.10-11.35	Сопоставление альтернативных технологий широкополосной морской сейсморазведки	Ампилов Ю.П. (PGS)
11.35-12.00	К вопросу о применении вибрационных сигналов, расширенных в область низких частот	Жуков А.П. (ООО «Геофизические системы данных»)
12.00-12.20	Кофе-брейк	
12.20-12.45	Практическая значимость работ С.В. Гольдина: кинематические и динамические аспекты	Дучков А.А., Митрофанов Г.М. (ИНГГ СО РАН)
12.45-13.10	Сейсмоакустические исследования керна при пластовых условиях	Баюк И.О. (ИФЗ РАН)
13.10-13.35	Новый подход к кластеризации трещиноватых коллекторов углеводородов на основе данных 3D сейсморазведки	Масюков В.В. (ООО «Славнефть – НПЦ»)
13.35-14.00	Использование новых технологий сейсморазведочных работ для повышения эффективности ГРР (на примере верхнемеловых отложений севера Западной Сибири)	<u>Жемчутова В.А.</u> , Жуков А.П, Наумчев Ю.В. (МГУ им. М.В. Ломоносова), М.О. Бербенев (ООО «Геофизические системы данных»)
14.00-15.00	Обед	
	ПОЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
15.00-15.20	Технологии микросейсмического мониторинга ГРП	Александров С.И., <u>Мишин В.А.</u> (ООО «Викосейс»), Буров Д.И.(ООО«Газпром Георесурс»)
15.20-15.40	Контроль качества обработки данных скважинного микросейсмического мониторинга	<u>Яскевич С.В.</u> , Логинов Г.Н., Дучков А.А. (ИНГГ СО РАН), Керусов И.Н., Вингалов В.М. (ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг")
15.40-16.00	Интегрированная система анализа и контроля качества сейсмических данных	Тищенко А.И. (ООО «Геофизические системы данных»)
16.00-16.10	Кофе-брейк	
16.10-16.30	Способы анализа эффективной кратности при оценке параметров систем наблюдений	<u>Фролов А.С.</u> , Горбачев С.В.(ООО «РН-Шельф-Арктика»), Белоусов А.В.(РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина)
16.30-16.50	Современные технико-методические возможности проведения сейсморазведочных работ 3D в лиманно-плавневых зонах	<u>Рудаков А.В.,</u> Шумский Б.В.(ГНЦ ФГУГП "Южморгеология")
16.50-17.10	Опыт получения в ОАО АНК «Башнефть» сейсмических данных необходимого качества.	<u>Стулов В.В.,</u> Матвеев Ф.В., Василенко Д. А. (ОАО АНК "Башнефть")
17.10-17.20	Кофе-брейк	× /
17.20-17.40	Свойства сигналов с опорной плиты и инертной массы сейсмического вибратора и использование их для изучения условий возбуждения	<u>Колесов С.В.,</u> Жуков А.П. (ООО «Геофизические Системы Данных»)
17.40-18.00	Новые возможности системы управления виброисточниками	Жуков А.П., <u>Гридин П.А.,</u> Малышев А.С., Телков М.П., Тищенко А.И. (ООО "Геофизические Системы Данных")
18.00-18.20	Технология синхронной регистрации геофизической информации комплексированием кабельной телеметрической сейсморегистрирующей системы и блоков автономной регистрации «SCOUT», при изучении глубинной части разреза земной коры	Гнатюк А.И., Кузнецов И.М., <u>Тарасов Н.В.</u> (ОАО «СКБ сейсмического приборостроения»)
18.20-18.55	Программа RadExPro для контроля качества и экспертной обработки сейсмических данных (сделано в России)	Вакуленко С.А. (ООО "Деко-геофизика СК")

14 апреля, вторник

	ОБРАБОТКА	
09.40-10.00	Восстановление скоростных аномалий по данным сейсмического мониторинга	<u>Абакумов И.В</u> ., Каштан Б.М. (СПбГУ)
10.00-10.20	Метод обращения интерференционных рефрагированных волн для оценки скоростного строения среды	<u>Пономаренко А.В.</u> , Каштан Б.М. (СПбГУ), Мулдер Вим Александр (Делфтский технический университет, Shell Global Solution International)
10:20-10:40	Многокомпонентные сейсмические исследования в морской геофизике	Н.Т. Дергунов, <u>И.А. Матвеев,</u> С.С. Унчур, С.Н. Кашубин, Е.В. Сидоренко (ОАО «Севморгео»)
10.40-11.00	Особенности обработки данных сейсморазведки 3D 2C на шельфе Печерского моря	Никульников А.Ю., Горбачев С.В., Нурмухамедов Т.В. (ООО «РН-Шельф-Арктика»)
11.00-11.20	Многоканальные фильтры обработки морских 3D наблюдений	<u>Рябинский М.А</u> ., Фиников .Б. Яндекс. Терра (ООО "Сейсмотек")
11.20-11.40	Кофе-брейк	
11.40-12.00	Возможности современной переобработки архивных сейсмических материалов в Восточной Сибири	Мосягин Е.В. (ФГУП СНИИГГиМС)
12.00-12.20	Устойчивая поверхностно-согласованная деконволюция и ее применение при обработке данных наземной 3D сейсморазведки	Адамович О.О., Лаптев Я. В., Тинакин А. О., <u>Журавко Н.С.</u> (ООО «ГеоПрайм»)
12.20-12.40	Учёт влияния ВЧР при построении глубинно-скоростной модели среды	Давлетханов Р.Т. (Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек»)
12.40-13.00	Повышение эффективности обработки данных 3D сейсморазведки с использованием информации о строении верхней части, полученной на основе анализа поверхностных волн	<u>Адамович О.О.</u> , Лаптев Я.В. (ООО «ГеоПрайм»)
13.00-13.20	Псевдо-спектральное обращение полных волновых полей	<u>Казей В.В.</u> , Каштан Б.М., Троян В.Н. (СПбГУ), Тессмер Эккарт (Университет Гамбурга)
13.20-13.55	Коммерческая презентация Фидесис	
14.00-15.00	Обед	
	ИНТЕРПРЕТАЦИЯ	
15.00-15.20	Комплексная интерпретация данных сейсмических исследований, керна и ГИС с целью поиска и оценки новых залежей УВ на примере Киняминского месторождения	Мустафина Р.Х., , Орлов В.А. (ООО «РН-УфаНИПИнефть»)
15.20-15.40	Комплексная интерпретация данных сейсмических исследований, керна и ГИС с целью поиска и оценки новых залежей УВ на примере Чупальского ЛУ	Уралова Л.Р., Атауллина З.М. (ООО «РН-УфаНИПИнефть»)
15.40-16.00	Интерпретация данных сейсмического просвечивания на площадках изысканий в карстово-суффозионно-опасных районах г. Москвы	<u>Габдуллин Р.Р.</u> , Вайтекунас А.К., Бадулина Н.В. (МГУ имени М.В.Ломоносова, ООО «Центр геодинамических исследований")
16.00-16.10	Кофе-брейк	
	СПЕЦИАЛЬНАЯ СЕССИЯ "ШИРОКОАЗИМУТАЛЬНАЯ	
16.10-16.30	О роли Е.А. Козлова в развитии теории и практики сейсморазведки	Баранский Н.Л., Птецов С.Н. (ООО «ПетроТрейс Глобал»)
16.30-16.50	Опыт анизотропной полно-азимутальной глубинной миграции на данных широкоазимутальной 3D сейсморазведки на Центрально- Астраханском месторождении	Бояркин Р.Ю. (ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг")
16.50-17.10	Проявление анизотропии в подсолевых отложениях Центрально- Астраханского месторождения по результатам широкоазимутальной 3D сейсморазведки.	Мирошниченко Д.Е. (ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг")
17.10-17.30	Возможности восстановления параметров анизотропии по сейсмическим данным	Анисимов Р.Г. (Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек»)
17.30-17.40	Кофе-брейк	
17.40-18.00	Основы и технология глубинной полно-азимутальной угловой миграции EarthStydy360®	Иноземцев А.Н. (Paradigm)
18.00-18.20	Некоторые возможности локализации рассеивающих элементов строения изучаемых сейсморазведкой геологических объектов.	Куретова О.З., Российская Е.М., <u>Смирнов К.А.</u> (ООО «ПетроТрейс Глобал»), В.И. Логовской К.А. (ОАО АНК «Башнефть»).
18.20-18.40	Применение современных технологий полноазимутальной обработки сейсмических данных на примере Тимано-Печорской провинции	<u>Литвякова О.О.</u> , Вороновичева Е.М., Птецов С.Н. (ООО «ПетроТрейс Глобал»)

15 апреля, среда

	ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД	
10.00-10.20	Структура разрушения в области гидроразрыва газоносного пласта. Результаты тектонофизической реконструкции природных напряжений	<u>Ребецкий Ю.Л.</u> (ИФЗ РАН), Чесноков Е.М.(Университет, Хьюстон)
10:20-10:40	Визуализация комплексом различных петрофизических методов фрустумационного (кусковатого) внутреннего строения массивных горных пород и связанной с ним систем первичной микротрещиноватости	<u>Поваренных М.Ю.</u> (ИИЕТ РАН), Матвиенко Е.Н. (ФММ РАН)
10.40-11.00	Эффективность применения различных подходов ROCK PHYSICS в петрофизической интерпретации для решения задач сейсмической инверсии	Некрасова Т.В., <u>Козлов К.Д.</u> (CGG Geosoftware)
11.00-11.20	Методы оценок возможной гидратонасыщенности морских осадков по сейсмическим данным	Суетнова Е.И. (ИФЗ РАН)
11.20-11.40	Кофе-брейк	
	ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА	
11.40-12.00	Развитие методов инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН	Авербах В.С., Коньков А.И., <u>Лебедев А.В.</u> , Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И. (ИПФ РАН)
12.00-12.20	Аппаратно-программный комплекс для физического сейсмического ультразвукового моделирования	<u>Попов Д.А.,</u> Мусин М.В., Половков В.В., Рослов Ю.В., Молодцов Д.М., Кучеровский Г.А. (ООО "Сейсмо-Шельф")
12.20-12.40	Ультразвуковые и акустические лабораторные измерения на моделях неконсолидированных придонных осадков	Владов М.Л., Шалаева Н.В., Стручков В.А., Токарев М.Ю., Бричева С.С. (МГУ имени М.В.Ломоносова)
12.40-13.00	Кофе-брейк	
13.00-13.20	Моделирование повреждений трубопровода	Епифанов В.П. (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН)
13.20-13.40	Новые методы сейсмоакустического мониторинга в условиях Северного ледовитого океана	Шуруп А.С., <u>Преснов Д.А.,</u> Жостков Р.А., Гусев В.А., Собисевич А.Л. (ИФЗ РАН)
13.40-14.00	Эксперементальные и теоретические исследования электроискрового источника	Тихоцкий С.А. (ИФЗ РАН)
14.00-15.00	Обед	
15.00-15.20	Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических исследований на акваториях.	<u>Гайнанов В.Г. (</u> МГУ имени М.В.Ломоносова), Токарев М.Ю. (ЦАСД МГУ), Шматков А.А. (ООО «МГ-Сервис»)
15.20-15.40	Анализ данных, зарегистрированных мультилиненйной донной антенной в акватории Голубой бухты	<u>Максимов Г.А.</u> , Ларичев В.А., Лесонен Д.Н., Денисов Д.М., Деров А.В. (Акустический институт им. Н.Н. Андреева)
15.40-16.00	Когерентные методы сейсмоакустического зондирования морского дна	В.А. Лазарев, А <u>.И. Малеханов,</u> В.И. Романова, В.И. Таланов, А.И. Хилько (ИПФ РАН), Л.Р. Мерклин (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)
16.00-16.10	Кофе-брейк	
16.10-16.30	Обработка сейсмоакустических данных с наклонной косой	Понимаскин А.И., Токарев М.Ю., Суханова Д. (ЦАСД МГУ), Гайнанов В.Г. (МГУ имени М.В.Ломоносова)
16.30-16.50	Сейсмика высокого разрешения для прогноза скоплений мелкозалегающего газа в верхней части разреза	Иванов Г.И. (ОАО "МАГЭ")
16.50-17.10	Оценка геологических опасностей для бурения по данным 3Д сейсморазведки	Глубоковских С.М., Пирогова А.С., Росляков А.Г, <u>Токарев М.Ю.</u> , Терёхина Я.Е., Шалаева Н.В. (ЦАСД МГУ)
17.10-17.40	Дискуссия. Закрытие конференции.	

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Оглавление

ІЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	
В.М. Глоговский и его «Прикладная теория определения скоростных и глубинных параметров среды»	11
Модели реальных сред в технологиях метода вертикального сейсмического профилирован	ния 14
К вопросу о применении вибрационных сигналов, расширенных в область низких частот	17
Практическая значимость работ С.В. Гольдина: кинематические аспекты	20
Практическая значимость работ С.В. Гольдина: динамические аспекты	22
Новый подход к кластеризации трещиноватых коллекторов углеводородов на основе данн сейсморазведки	ых 3D 23
Использование новых технологий сейсморазведочных работ для повышения эффективнос (на примере верхнемеловых отложений севера Западной Сибири)	ти ГРР 25
ЮЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	30
Технологии микросейсмического мониторинга ГРП	
Контроль качества обработки данных скважинного микросейсмического мониторинга	
Программная интегрированная система анализа и контроля качества сейсмических данных	x 36
Способы анализа эффективной кратности при оценке параметров систем наблюдений	
Современные технико-методические возможности проведения сейсморазведочных работ . лиманно-плавневых зонах.	3D в 44
Свойства сигналов с опорной плиты и инертной массы сейсмического вибратора и исполь их для изучения условий возбуждения	зование
Новые возможности системы управления виброисточниками	50
Технология синхронной регистрации геофизической информации комплексированием кабельной телеметрической сейсморегистрирующей системы и блоков автономной реги «SCOUT», при изучении глубинной части разреза земной коры	істрации 52
ЭБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ	55
Восстановление скоростных аномалий по данным сейсмического мониторинга	56
Метод обращения интерференционных рефрагированых волн для оценки скоростного стр среды	оения 60
Многокомпонентные сейсмические исследования в морской геофизике	64
Особенности обработки данных сейсморазведки 3D 2C на шельфе Печерского моря	
Многоканальные фильтры обработки морских 3D наблюдений	70

Возможности современной переобработки архивных сейсмических материалов в Восточной Сибири	73
Устойчивая поверхностно-согласованная деконволюция и ее применение при обработке данных наземной 3D сейсморазведки	x 78
Учёт влияния ВЧР при построении глубинно-скоростной модели среды	83
Повышение эффективности обработки данных 3D сейсморазведки с использованием информац строении верхней части, полученной на основе анализа поверхностных волн	ии о 87
Псевдо-спектральное обращение полных волновых полей	91
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ	96
Комплексная интерпретация данных сейсмических исследований, керна и ГИС с целью уточней геологического строения Киняминского месторождения	ния 97
Комплексная интерпретация данных сейсмических исследований, керна и ГИС с целью поиска оценки новых залежей УВ на примере Чупальского ЛУ	и .100
Интерпретация данных сейсмического просвечивания на площадках изысканий в карстово- суффозионно-опасных районах г. Москвы	.103
ШИРОКОАЗИМУТАЛЬНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА	.106
Возможности восстановления параметров анизотропии по сейсмическим данным	.107
Некоторые возможности локализации рассеивающих элементов строения изучаемых сейсморазведкой геологических объектов.	.110
ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД	.111
Структура разрушения в области гидроразрыва газоносного пласта. Результаты тектонофизической реконструкции природных напряжений	.112
Визуализация комплексом различных петрофизических методов фрустумационного (кусковато внутреннего строения массивных горных пород и связанной с ним систем первичной	го)
микротрещиноватости	.116
Эффективное применения различных подходов рок-физики в петрофизической интерпретации, решения задач сейсмической инверсии	для .121
Методы оценок возможной гидратонасыщенности морских осадков по сейсмическим данным	.125
ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА	.129
Развитие методов инженерной сейсморазведки в ИПФ РАН.	.130
Аппаратно-программный комплекс для физического сейсмического ультразвукового моделирования	.134
Ультразвуковые и акустические лабораторные измерения на моделях неконсолидированных придонных осадков	.138
	120

Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических исследований на акваториях14	43
Когерентные методы сейсмоакустического зондирования морского дна14	47

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

В.М. Глоговский и его «Прикладная теория определения скоростных и глубинных параметров среды»

Каплан Самуил Абрамович (ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИГЕОСИСТЕМ», Москва), Кузнецов Иван Константинович, Лангман Сергей Леонидович, Силаенков Олег Александрович, Фиников Дмитрий Борисович, Шалашников Андрей Владимирович (Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек»), Москва)

Работы В.М. в геофизике носили ярко выраженный прикладной характер. Их целью было решение насущных задач обработки и интерпретации сейсмических данных. Поэтому созданную им теорию определения скоростных и глубинных (геометрических) параметров модели среды он называл прикладной, хотя она и носит фундаментальный характер. Доказано, что имеют место (1) устойчивость и корректность обратной кинематической задачи в рамках локально однородной изотропной пластовой модели среды, (2) структурная неустойчивость обратной кинематической задачи (т.е. неустойчивости по модели), преодоление которой возможно только при наличии априорной информации. Кроме того, был выработан критерий (т.н. «Суперный»), позволяющий выяснить внутреннюю непротиворечивость модели или, наоборот, неправомерность ее описания выбранной параметризацией (Глоговский В.М. «Прикладная теория определения скоростных и глубинных параметров среды», дисс. доктора физ.мат. наук, М., 1986).

Отличительной чертой верной теории является возможность её развития и, как следствие сохранение актуальности. Справедливо ли это по отношению к теории В.М.? Это вопрос не просто дань памяти и уважения ученому, но и повод рассмотреть концептуальные проблемы обработки, поднятые им в свое время и важные для нас сегодня.

В.М. утверждал, что геофизика существует в фольклоре. В.М. любил и умел рассказывать, но публиковал немного. Тем не менее, его опубликованные работы охватывают широкий спектр задач от конечно-разностных алгоритмов решения прямых задач до финальных построений глубинных изображений сред. Он разрабатывал алгоритмы расчета статических поправок, миграционные преобразования, но главной его темой его интересов оставалось определение скоростных и глубинных параметров среды. Именно построение глубинно-скоростной модели среды он считал главным этапом обработки, что, надо полагать, вполне оправдано.

Прикладная теория не заслуживала бы своего названия, если бы не была воплощена в работающей на практике системе обработки реальных данных. К счастью, В.М. удалось это сделать, и под его руководством была разработана система VELINK, идеологию которой унаследовала система Prime (Прайм).

В докладе воспроизводятся последние модельные примеры В.М., иллюстрирующие суть означенной проблематики, а также его последние результаты исследований той необходимой априорной информации, которая позволяет преодолеть сложности, связанные с принципиальной неопределенностью решений. При этом, следуя практической направленности научной деятельности В.М., лейтмотивом обсуждаемых решений является оценка реальных возможностей сейсморазведки МОВ, как по точности оценок характеристик среды, так и степени детальности её представления.

Что же дальше? Структурная неустойчивость ставит множество запретов на обобщение класса моделей, а реальные геологические задачи требуют расширения этого класса.

Вот в русле, намеченном последними работами В.М. по изучению того необходимого набора априорных данных, которые позволяют обоснованно расширять класс моделей, и развивается это направление друзьями и коллегами В.М. Глоговского.

В докладе иллюстрируется это направление на примере расширения пластовой модели для градиентных и анизотропных пластов.

На специально воспроизведенном для этих исследований примере В.М. Глоговского показано, что неоднородный пласт, который успешно замещался кинематически эквивалентной двуслойной средой, также может быть замещен градиентным или анизотропным пластом с плавно меняющимися параметрами по латерали. В данном случае – это свидетельствует о той неединственности решения, которая смело может быть использована геофизиками в «мирных целях»: получить эффективную модель, которая позволит двигаться дальше (глубже), осуществляя глубинные построения ниже опорного горизонта.

Для идентификации параметров градиента разработан и новый алгоритм, позволяющий в ряде случаев отказаться от опорной границы, но привлекая данные об отражениях внутри пласта, что может быть во многих случаях удобнее (а, возможно, и правильнее), нежели включение их в модель, как преломляющих для пластовой локально-однородной модели среды.

Способам определения параметров анизотропии посвящен доклад Р.Г. Анисимова, представленный на этой же конференции.

способы решения обратной кинематической задачи в системе Prime (Прайм) в Bce качестве входных данных используют поля времен. Это, кстати, нельзя считать общепринятым, поскольку существуют направления кинематической инверсии, опирающиеся на критерий «спрямления» годографов в области глубин, т.е. на сейсмограммах общей точки изображения. Недостаточность такого критерия и выявляется на контрпримерах Глоговского. Задачу восстановления среды по временам прихода отраженных волн нынче принято называть томографической. Оставим это название за «сеточным» описанием среды. Быстрые, эффективные и надежные алгоритмы определения глубинно-скоростных моделей среды, разработанные В.М. Глоговским и С.Л. Лангманом, позволяют реализовать столь важный в инверсионных задачах интерактив, который, хотя еще и не вполне вычислительно эффективен в больших пространственных задачах, но неизбежно дорастет до нужного на практике быстродействия хотя бы и с ростом вычислительных мощностей при надлежащем распараллеливании вычислений.

К сожалению, В.М. не дожил до обобщения предложенного им еще в 80-е годы способа кинематико-динамического преобразования для прослеживания поля времен по глубинным годографам сейсмограмм общей точки изображения, которое осуществил С.Л. Лангман. До этого должны были дорасти и вычислительные мощности. Сейчас такого рода «кинематические инварианты» известны и в других системах. Но тут уместно вспомнить и про тот фольклор, в котором существует геофизика. Во всяком случае, эта технология получения оценок временных полей превосходно согласуется с общей идеологией решения

обратных задач, которую отстаивал В.М. и здесь она получила интересное и очень практическое развитие.

В.М. Глоговский много занимался проблемами коррекции статических поправок (первые работы относятся к 60-м годам, последние к 90-м). При этом главное внимание было направлено на те же проблемы преодоления сложностей, связанных как с плохой обусловленностью системы уравнений (80-е годы), так и невыполнением физических представлений, на основе которых она пишется (90-е годы). В этом направлении развивается и технология коррекции за поверхностные условия в системе Prime на основе новых возможностей в построении глубинно-скоростной модели. Этой теме посвящен доклад Р.Т. Давлетханова на настоящей конференции.

Работы В.М. Глоговского по разработке способа ступенчатой миграции во многом предвосхитили то направление, в котором развиваются современные алгоритмы, но в чем-то и параллельны им. В.М. рассматривал миграционный оператор, как способ переноса полезного сигнала, принадлежащего некоторой синфазности, по некоторому закону, определяющимся кинематической схемой задачи. При этом он предлагал послойный пересчет волнового поля с одного уровня на другой, как способ миграции. Вместе с Д.Б. Финиковым он предложил класс оптимальных кинематических фильтров для реализации этой процедуры. В те годы, когда разрабатывались алгоритмы и программы ступенчатой миграции – речь могла идти только о миграции временных разрезов (по крайней мере, в нашей стране). Схема послойной миграции сейсмограмм ОПВ реализованная в системе Prime (Прайм) во многом наследует этой идеологии. По нашему мнению эта миграция является лучшей альтернативой популярной нынче RTM –миграции.

Одно из возможных применений кинематических фильтров, предложенных когда-то для реализации миграционного послойного пересчета – обработка морских данных с погруженными косами. Этой теме посвящен доклад М.А. Рябинского и Д.Б. Финикова на этой конференции.

Имея немалый опыт решения прямых динамических задач сейсмики, В.М. с большой осторожностью и недоверием относился к интерпретации динамических параметров.

Надо признать, что для подобного скепсиса у него были веские основания. Между тем нельзя не признать, и об этом свидетельствует весь опыт сейсморазведки, что в динамических параметрах содержится огромная информация о вещественном составе пород. Эта обширная область исследований, которой явно не хватает той доказательной базы, которую пытался (и с успехом) выстроить В.М. в области интерпретации кинематических параметров.

Думается, что вовлечение в практику обработки методов решения прямых динамических задач – необходимое (хотя и недостаточное) условие обеспечения достоверности решений в этой области. В докладе приводятся примеры, иллюстрирующие плодотворность такого подхода.

Однако анализ динамических параметров может быть вполне обоснованным только в том случае, если решена обратная кинематическая задача в постановке В.М. Глоговского, т.е. построена глубинно-скоростная модель с контролем ее непротиворечивости.

Поскольку речь идёт о развитии комплекса программ обработки, то обсуждаемые задачи относятся к классическим для этой научно-технической деятельности. Статика, фильтрация, кинематика, кинематическая инверсия, миграция. На самом деле, решение задач внутри этого классического пентакля – дело неблагодарное, все эти вопросы муссируются десятилетиями и, кажется, что трудно ожидать новых эффективных решений. Это в корне неверное мнение, но развенчивать его непросто. Когда приходится участвовать в конференциях, по крайней мере, в нашей стране – складывается впечатление, что все классические задачи решены и остается только заниматься вопросами интерпретации результатов. Надеемся, что настоящая конференция становится исключением.

Необходимо знать, что в прикладных науках не бывает решенных задач – растут вычислительные мощности и то, что раньше для алгоритмиста было почти запретной темой – становится актуальным и востребованным.

Так и этот классический набор мы дополняем комплексом программ решения прямых задач, считая , что из области академических исследований эти задачи должны войти в повседневный обиход обработки.

Следуя воззрениям В.М., не стоит делать излишне оптимистических выводов. Глубоко понимая проблемы познания геологической среды средствами геофизики, В.М., следуя известной формуле У.Черчилля о демократии, утверждал, что сейсморазведка «топорный метод» и мало (в сравнении с желанием или мечтами геолога – Главного Заказчика) может, но лучшего нет! Возможности сейсморазведки ограничены и не все задачи геологоразведки могут быть решены ее методами. Это положение как раз проще всего подтвердить на примерах искусственно рассчитанных волновых полей. Однако развитые методы верификации результатов помогают ставить перед обработкой и интерпретацией разумные задачи и получать обоснованные решения.

В завершении сообщения приводятся примеры использования возможностей системы Prime (Прайм) при обработке реальных сейсмических материалов, полученных в сложных сейсмогеологических условиях, как по восстановлению глубинно-скоростной модели среды, так и по определению и интерпретации динамических характеристик отражённых волн, в т.ч. AVO.

МОДЕЛИ РЕАЛЬНЫХ СРЕД В ТЕХНОЛОГИЯХ МЕТОДА ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ <u>Григорий Аронович Шехтман</u>¹, Ирина Олеговна Баюк²

(ООО «Геофизические системы данных»)¹, (Институт Физики Земли РАН)²

Наряду с развитием сейсморазведки как науки усложнялись и совершенствовались модели реальных сред, занявшие к началу XXI века прочное место во всех этапах подготовки и проведения исследований – от составления проекта работ до геологической интерпретации полученных результатов (Пузырев, 2001; Козлов, 2006).

Принято считать, что метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП) является основным источником информации при построении моделей реальных сред в

сейсморазведке. Однако этот метод сам по себе крайне нуждается в построении моделей, параметризация которых проводится на всех этапах работ – от их проведения до решения обратных задач, нацеленных на количественное определение параметров модели.

При проведении работ методом ВСП априорная информация о строении верхней части разреза позволяет управлять спектром возбуждаемых сейсмических колебаний, а информация о глубинах и геометрии сейсмических границ – обоснованно спроектировать систему наблюдений, позволяющую соответствующим образом осветить изучаемый объект.

Управление спектром возбуждаемых колебаний достигается, главным образом, путем выбора глубины источника, расположенного под акустически наиболее резкой границей (как правило, под подошвой ЗМС). Интерференция импульсов прямой волны и волны-спутника приводит к усилению тех компонент спектра, которые находятся в окрестности первого максимума частотной характеристики интерференционного источника колебаний. Существенно, что концепция погружения источника под подошву ЗМС на глубину, равную «четверти длины волны», со временем претерпела существенные изменения. Так, если в первые десятилетия существования сейсморазведки под «длиной волны» подразумевалась видимая длина волны (цель состояла в еще большем усилении амплитуды на видимой частоте), то современная сейсморазведка все больше оперирует с минимальной длиной волны, соответствующей правому срезу рабочего диапазона частот. Погружение источника на глубину, равную четверти минимальной длины волны, обеспечивает максимальное расширение спектра возбуждаемых колебаний. Для ВСП это весьма существенно, поскольку этот метод изучает условия выделения волн в широком диапазоне частот. В высокоразрешающей же сейсморазведке расширение полосы возбуждаемых частот вправо является одним из важнейших условий проведения работ.

Геометрию сейсмических границ при проведении работ необходимо учитывать для того, чтобы должным образом осветить объект, представляющий разведочный интерес. При отработке искривленных скважин в сложно построенных средах рационально расположить пункты возбуждения (ПВ) позволяет моделирование, выполненное перед проведением работ. Тем самым при обработке материалов ВСП создаются условия для получения изображений среды вдоль линий бинирования, ориентированных в наиболее интересных направлениях изучения целевого объекта (Шехтман и др., 2013).

При обработке записей, полученных методом ВСП, адекватная модель реальной среды позволяет избежать абсурдных решений, которые скажутся на этапе интерпретации. К примеру, игнорирование вертикальных градиентов скоростей при формировании толстослоистых моделей чревато грубыми ошибками при определении неупругого поглощения (Берденникова и др., 1971).

Взяв на себя задачи сейсмокаротажа, метод ВСП стал основным источником получения сейсмических скоростей, столь важных для наземной сейсморазведки, да и для самого метода ВСП. Однако чрезмерно упрощенная модель среды (обычно – модель однородной среды), традиционно используемая при приведении к вертикали вертикальных годографов, приводит к существенным ошибкам из-за недоучета эффекта преломления лучей на преломляющих границах. Определение скоростей методами оптимизации без приведения вертикальных годографов к вертикали позволило существенно повысить точность определения скоростей (Долгов, Шехтман, 1986; Савин, Шехтман, 1995). Однако столь часто

15

принимаемое при этом предположение о горизонтальном залегании выделенных пластов в условиях наклонно-слоистых сред может привести к грубым ошибкам, несмотря на хорошую внутреннюю сходимость при решении обратной кинематической задачи (Шехтман, 2011). Существенное расхождение пластовых скоростей, наблюдаемое с различных ПВ, чаще всего объясняют влиянием анизотропии, хотя причиной тому может служить вовсе не анизотропия, а гораздо более сложная геометрия границ реальной среды, воспринимаемая как ее неоднородность.

Совершенствование процедур обработки и определение интервальных скоростей с высокой точностью приблизило метод ВСП по разрешающей способности к акустическому каротажу (АК) (Шехтман Попов, 2007). Вместе с тем, открытым остается вопрос об увязке данных АК и ВСП при выборе модели при решении прямых задач, поскольку в методе ВСП давно отмечено закономерное уменьшение с глубиной средних скоростей, вызванное трансформацией импульса прямой волны из-за наложения кратно-отраженных падающих волн (R.Stewart et al., 1984). Попытки свести наблюдаемые расхождения данных АК и ВСП лишь к погрешностям наблюдений, имеющим место в каждом из этих методов, явно запутывают вопрос. Причину отмеченных расхождений, если они имею место, следует искать в особенностях данной конкретной модели.

Неточности скоростной модели и отсутствие информации о геометрии границ приводят к грубым искажениям при формировании изображений среды и стратиграфической привязке отражений, регистрируемых в наземной сейсморазведке. Негоризонтальное положение отражающих границ обусловило правомерность использования монтажей ВСП, полученных путем размножения трасс однократных отражений, поскольку реальные отражения в таких случаях не будут характеризоваться вертикальными осями синфазности после ввода кинематических поправок в предположении горизонтально-слоистой среды.

На этапе интерпретации данных ВСП все большее место занимает моделирование волновых полей, позволяющее сделать обоснованный вывод о пространственном положении объекта, представляющего разведочный интерес. Примером тому могут быть динамические характеристики обменных волн. отраженных от коллектора с вертикальной трещиноватостью. Необоснованное обобщение выводов, полученных в качестве частного случая для одной из моделей, может привести к выдаче неверных заключений о направлении последующего бурения. В технологиях метода ВСП, использующих круговые наблюдения (см., например, Maultzsch et al., 2009), моделирование волновых полей в условиях моделей с вертикальными трещинами смогло бы помочь делать более однозначные выводы об их простирании.

Выбор той или иной модификации метода ВСП при решении геологических и технологических задач наиболее обоснованно решается при помощи моделирования волновых полей на адекватном целевом объекте с последующим сопоставлением изображений среды, полученных для различных модификаций метода. Примером тому может быть математическое моделирование на рифоподобном объекте (Шехтман, Череповский, 2008).

Примером решения технологических задач методом ВСП является опережающий прогноз зон АВПД в процессе бурения. В условиях Восточной Туркмении, где АВПД проявляется в виде рапоопасных зон, модель рапонасыщенного трещиноватого слоя

ангидрита позволила выполнить такой прогноз с максимальной достоверностью, т.е. когда результаты прогноза проверяются буровым долотом (Шехтман и др., 1992).

ЛИТЕРАТУРА

Берденникова Н.И., Чижова М.В., Белозеров В.А. Об изучении некоторых эффективных параметров реальных сред по данным сейсмических наблюдений в скважинах//Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, № 11, Л., Наука, 1971, 124-135.

Долгов Б.Ф., Шехтман Г.А., 1986, Определение сейсмических скоростей по вертикальному годографу без приведения к вертикали: Прикладная геофизика, 114, 56-82.

Козлов Е.А.// Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: ГЕРС, 2006. 480 с.

Пузырев Н.Н. О моделях в разведочной сейсмологии//Геофизика, 5, 2001, 10-19.

Савин И.В., Шехтман Г.А., 1995, Обратная кинематическая задача ВСП для сред с неплоскими границами раздела: Прикладная геофизика, 129, 34-46.

Шехтман Г.А., Зернов А.Е., Лебедева И.И., Панфилов В.Н. Прогноз рапоопасных зон методом ВСП//Бюллетень Ассоциации Нефтегазгеофизика, вып. 3, М.: 1992, 52-58.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Громыко В.М. Изучение структуры околоскважинного пространства в Припятской впадине комплексом модификаций метода ВСП // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. № 1. С. 83-86.

Шехтман Г.А., Попов В.В., 2007, Изучение структуры околоскважинного пространства по разностным и дифференциальным вертикальным годографам: Технологии сейсморазведки, 3, 39-43.

Шехтман Г.А., Череповский А.В. Выделение погребенного рифа различными модификациями метода ВСП по данным моделирования//Технологии сейсморазведки. 2008. № 4. С. 65-71.

Maultzsch S., Nawab R., Yuh S., Idrees M., Frignet B. An integrated multi-azimuth VSP study for fracture characterization in the vicinity of a well// Geophysical Prospecting, 2009, 57, 263-274.

Stewart R.R., Huddleston P.D. and T.K. Kan, 1984, Seismic versus sonic velocities: A vertical seismic profiling study, Geophysics, 49, 1153-1168.

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, РАСШИРЕННЫХ В ОБЛАСТЬ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Жуков Александр Петрович

ООО "Геофизические Системы Данных"

Расширение частотного диапазона регистрируемых сейсмических колебаний является, наряду с увеличением соотношения сигнал/помеха, одной из задач как полевого, так и этапа обработки сейсмических данных, что позволяет увеличить разрешенность сейсмических сигналов и соответственно детальность изучения исследуемой геологической толщи.

На этапе обработки данная задача с успехом решается применением различных операторов обратной фильтрации, выравнивающей частотный спектр сейсмических колебаний. Однако, как правило, земная толща представляет собой сильнейший фильтр, ослабляющий средневысокочастотные составляющие генерируемых сигналов, что затрудняет, и зачастую делает неэффективным применение обратной фильтрации. Поэтому появляются полевые технологии, позволяющие компенсировать частотно-зависимое затухание земной толщи, в

частности, так называемое нелинейные зондирующие сигналы, на основе применения которых разработана достаточно широко применяемая в настоящее время технология адаптивной сейсморазведки – АВИСейс [1].

Серийно произведенные виброисточники устойчиво работают в диапазоне 7-10 до 90-100-150 Гц, что в целом позволяет решать большой круг геологических задач, чем и обусловлено их широкое применение при проведении сейсморазведочных работ.

Дальнейшее повышение эффективности вибрационной сейсморазведки связано с реализацией вибрационного воздействия с ультра-низких частот1.5 – 3 Гц, что позволит, при условии выравнивания спектра колебаний, увеличить динамическую выразительность конечных результатов обработки и глубинности исследований (см. рисунки)



Стандартный свип 6 – 90 Гц

Широкополосный свип 3 – 90 Гц



Разница между стандартными и широкополосными данными



В докладе рассмотрены возможные пути реализации ультра-низкочастотного возбуждения вибрационными источниками на основе проектирования специальных сигналов и через конструирование виброисточников, позволяющих возбуждать ультра-низкие частоты без ущерба для своей конструкции.

Основные выводы:

Применение свип-сигналов, начинающих возбуждение с ультра-низких частот (1.5 – 3 Гц), позволяет

1. Значительно увеличить динамическую выразительность и глубинность результирующих данных.

2. Обеспечить оптимальное применение алгоритмов инверсии сейсмических данных с целью определения литологических характеристик исследуемой толщи.

3. Реализовать режим воздействия на стандартных виброисточниках и сейсмоприемниках.

4. Достичь расширения спектра в широком диапазоне частот (при комплексировании с технологией АВИСейс).

Литература

Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТ С.В. ГОЛЬДИНА: КИНЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ **Дучков А.А., Митрофанов Г.М.**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

В докладе будет рассмотрена кинематическая теория миграции, которая была разработана в работах С.В. Гольдина в 80-х годах прошлого века. Он использовал геометрическую теорию сейсмики и основы контактной геометрии для анализа процедур обработки сейсмических данных. В частности, это позволило формализовать анализ разнообразных процедур сейсмической миграции, которые используются в практике сейсморазведки. Единый формализм позволяет сравнивать разные алгоритмы с точки зрения их геометрической эквивалентности, т.е. точности восстановления геометрии отражающих горизонтов. Это было важным качеством теории, т.к. исторически разные миграционные алгоритмы создавались независимо, исходя из разных интуитивных предпосылок, что затрудняло их сравнение и выбор оптимального метода для разных задач.

Интересно, что предложенный С.В. Гольдиным формализм, хотя вытекает из сложной теории контактной геометрии, может быть легко изложен геометрическим языком, давая интуитивное представление о действии операторов сейсмической миграции. Первым базовым элементом является рассмотрение разрывов сейсмического поля, которые являются идеальной моделью волны для геометрической сейсмики (как материальная точка является моделью тела конечного размера для ньютоновской механики). Вторым базовым элементом является понятие контактного элемента (пары координата - направление движения) и контактного продолжения (продолжение волн по времени является только одним из примеров), которые позволяют формализовать геометрический анализ миграционных операторов.

Будут приведены примеры, как предложенный С.В. Гольдиным формализм позволяет связать воедино лучевое описание процесса распространения волн, принцип Гюйгенса и интеграл Дюамеля в рамках исследования миграционных операторов (что вызывало споры между Г.И. Петрашенем и Ю.В. Тимошиным при обсуждении первого алгоритма миграции). Будут также приведены примеры использования теории для рассмотрения других операторов сейсмической обработки – продолжение данных и изображений по удалению, по скорости и т.д.

Основное внимание уделяется форме сейсмических сигналов. Такие сигналы могут быть получены непосредственно в процессе наблюдения или при обработке данных. Указанные в названиях кинематические и динамические аспекты являются не разделяющими, а объединяющими для обоих докладов. Это являлось одним из принципов С.В.Гольдина при рассмотрении решений сейсмических задач, где он стремился объединить времена прихода и форму анализируемых сигналов.

Хорошо понимая важность времен распространения волн для построения структуры модели среды, начиная с вывода формул Дикса и пакета КИНГ (кинематическая интерпретация годографов), он осознавал важность анализа формы сигнала. Ее высокая вариабельность существенно ограничивает точность и детальность структурных построений, а также не позволяет в полной мере реализовывать эффективные инверсные алгоритмы даже для одномерных моделей сред. Поэтому требуется проводить детальное исследование изменений формы сигнала, которые она претерпевает при распространении упругих колебаний в реальной среде. Очевидно, что здесь возникает широкий круг задач.

В докладе рассматриваются две задачи, относящиеся к проблеме учета верхней части разреза, через которую распространяется отраженный сигнал. Проблема состоит в том, что сложность строения покрывающей части на порядок выше сложности изучаемого интервала среды. Понимая неконструктивность решения проблемы в общем классе трехмерных (анизотропных, неупругих и т.п.) сред, Гольдин стремился разрабатывать специфические приемы ее учета. В результате формулировались подзадачи: (1) построения конкретной модели верхней части среды по экспериментальным данным и (2) приведение сейсмограмм к виду, на котором определено решение соответствующей обратной динамической задачи. Одним из развитых приемов являлся спектрально-статистический метод. Он реализовывал многомерную гомоморфную фильтрацию и позволял проводить более качественный учет изменений формы сигнала, связанных с верхней частью среды.

Еше одна задача. связанная с обработкой и анализом отраженных сигналов, распространяющихся в сложно-построенных средах, относится к определению петлевых ситуаций. В этой задаче Гольдину удалось обратить внимание на рассмотрение характеристики, относящейся к якобиану преобразования лучевых координат в декартовы, которые могут быть рассчитаны в процессе построения лучей. Такой характеристикой является КМАН-индекс. Он дает возможность выделить области в наблюдениях отраженных сейсмических волн, где имеются петлевые ситуации, существенно снижающие качество получаемых сейсмических разрезов и ухудшающие выделение целевых отраженных сигналов. Значимость использования КМАН-индекса возрастает при решении задач 4D съемки, когда структура модели известна и требуется проведение детального исследования формы сейсмического сигнала с повышением точности решаемых обратных задач. Индекс может быть важен и при решении задач выделения сигналов, относящихся к немонотипным волнам, регистрируемым поверхностной морской сейсморазведкой.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТ С.В. ГОЛЬДИНА: ДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИТРОФАНОВ Г.М., Дучков А.А.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Во втором докладе, посвященном практическому использованию работ С.В.Гольдина, основное внимание уделяется форме сейсмических сигналов. Такие сигналы могут быть получены непосредственно в процессе наблюдения или при обработке данных. Указанные в названиях кинематические и динамические аспекты являются не разделяющими, а объединяющими для обоих докладов. Это являлось одним из принципов С.В.Гольдина при рассмотрении решений сейсмических задач, где он стремился объединить времена прихода и форму анализируемых сигналов.

Хорошо понимая важность времен распространения волн для построения структуры модели среды, начиная с вывода формул Дикса и пакета КИНГ (кинематическая интерпретация годографов), он осознавал важность анализа формы сигнала. Ее высокая вариабельность существенно ограничивает точность и детальность структурных построений, а также не позволяет в полной мере реализовывать эффективные инверсные алгоритмы даже для одномерных моделей сред. Поэтому требуется проводить детальное исследование изменений формы сигнала, которые она претерпевает при распространении упругих колебаний в реальной среде. Очевидно, что здесь возникает широкий круг задач.

В докладе рассматриваются две задачи, относящиеся к проблеме учета верхней части разреза, через которую распространяется отраженный сигнал. Проблема состоит в том, что сложность строения покрывающей части на порядок выше сложности изучаемого интервала среды. Понимая неконструктивность решения проблемы в общем классе трехмерных (анизотропных, неупругих и т.п.) сред, Гольдин стремился разрабатывать специфические приемы ее учета. В результате формулировались подзадачи: (1) построения конкретной модели верхней части среды по экспериментальным данным и (2) приведение сейсмограмм к виду, на котором определено решение соответствующей обратной динамической задачи. Одним из развитых приемов являлся спектрально-статистический метод. Он реализовывал многомерную гомоморфную фильтрацию и позволял проводить более качественный учет изменений формы сигнала, связанных с верхней частью среды.

Еще одна задача, связанная с обработкой и анализом отраженных сигналов, распространяющихся в сложно-построенных средах, относится к определению петлевых ситуаций. В этой задаче Гольдину удалось обратить внимание на рассмотрение характеристики, относящейся к якобиану преобразования лучевых координат в декартовы, которые могут быть рассчитаны в процессе построения лучей. Такой характеристикой является КМАН-индекс. Он дает возможность выделить области в наблюдениях отраженных сейсмических волн, где имеются петлевые ситуации, существенно снижающие качество получаемых сейсмических разрезов и ухудшающие выделение целевых отраженных сигналов. Значимость использования КМАН-индекса возрастает при решении задач 4D

съемки, когда структура модели известна и требуется проведение детального исследования формы сейсмического сигнала с повышением точности решаемых обратных задач. Индекс может быть важен и при решении задач выделения сигналов, относящихся к немонотипным волнам, регистрируемым поверхностной морской сейсморазведкой.

НОВЫЙ ПОДХОД К КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТРЕЩИНОВАТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ **3D** СЕЙСМОРАЗВЕДКИ **Масюков Владимир Вадимович**

ООО «Славнефть - НПЦ», г. Тверь

Для анализа структуры трещинного резервуара предлагается кластеризация сейсмического атрибута «синергетических сингулярностей» (или SS), на котором отображаются особенности сейсмического поля, ассоциируемые с разрывными нарушениями, трещинами и зонами дезинтеграции среды. На кластеризацию SS подается карта (куб) ее фрактальной размерности и атрибуты, характеризующие направления сингулярностей, их плотность и интенсивность.

Ключевые слова: трещиноватые коллектора, «синергетические сингулярности», фрактальная размерность, кластеризация, цифровая обработка изображений.

Введение

Продуктивность нефтедобычи и объем запасов в массивных трещинных коллекторах часто обуславливается лишь открытой трещиноватостью. В работах [1,2] была предложена технология «Синергетические сингулярности» (SS), которая была успешно использована для отображения и анализа трещиноватых коллекторов Восточной Сибири [3,4]. Однако до настоящего времени на практике для выделения кластеров трещин и перспективных для бурения зон требовалась «ручная» интерпретация «синергетических сингулярностей», что являлось очень сложной и неоднозначной процедурой. Целью настоящей работы является автоматическое выделение новой информации о трещиноватой среде на основе сейсмических атрибутов, отображающих сингулярности сейсмического поля.



Рис.1 Блок-схема кластеризации сейсмического атрибута «синергетические сингулярности» для классификации трещиноватой среды.

Кластеризация карт (кубов) «синергетических сингулярностей»

Будем считать, что «синергетические сингулярности» характеризуют именно трещиноватую среду и дают количественную оценку ее дезинтеграции. Основной идеей классификации (кластеризации) трещиноватой среды является использование нескольких трансформаций «синергетических сингулярностей», а именно использование атрибутов, характеризующих:

1) густоту и выраженность сингулярностей (амплитудный фактор);

2) ориентацию сингулярностей в пространстве (фактор направленности);

3) сложность «рисунка» сингулярностей и их извилистость (текстурный фактор).

Как охарактеризовать сложность «рисунка» сингулярностей? Для этого мы предлагаем воспользоваться оценкой фрактальной размерности [5], которая эффективна для классификации текстур [6], а именно вычислять размерность Минковского в скользящем окне. Основные этапы кластеризации SS изображены на блок-схеме (рис.1). Отметим, что в ряде случаев, помимо различных трансформаций SS, для кластеризации трещиноватого коллектора целесообразно использовать и другие атрибуты (например, мощность, пористость, если она существенна для данного типа коллекторов, AVO атрибуты и др.). Предложенная методика естественно обобщается на 3D случай.

Обсуждение и выводы.

Заметим, что для анализа всего одной карты атрибута SS предлагается использовать несколько ее производных (трансформаций), что соответствует естественным процессам анализа сложного объекта в голове интерпретатора, который одновременно учитывает и

анализирует различные его свойства. В данной статье мы не обсуждаем фрактальность трещиноватой среды, а рассматриваем фрактальную размерность просто как удобный инструмент для объективной оценки «сложности» графической текстуры. Заметим, что развиваемая в статье техника подходит и для структурирования (кластеризации) любых полутоновых изображений с выраженными линеаментами.

Литература

1. Shlionkin S.I., Masjukov A.V., Masjukov V.V. and Yurchenko O.S. Seismic Data Discontinuity Computation for Fault/Fracture Imaging, EAGE, Sant-Petersburg International Geophysical conference Expanded Abstracts. 2008.

2. С.И.Шленкин, А.В.Масюков, В.В.Масюков, А.Н.Козлова Вычисление кубов когерентности и сингулярностей // Технологии сейсморазведки, 2012, № 2, с.5-15.

3. Харахинов В.В., Шленкин С.И., Зеренинов В.А., Каширин Г.В., Кулишкина О.Н., Масюков А.В., Масюков В.В., Рудь О.В., Берин М.В. Новые подходы к созданию геологических моделей трещинных резервуаров в древних комплексах Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство, № 11, 2012, С.93-97.

4. Харахинов В.В., Шленкин С.И., Афонасин В.В., Зеренинов В.А., Каширин Г.В., Кулишкина О.Н., Масюков А.В., Масюков В.В., Рудь О.В., Берин М.В. Особенности геологического и гидродинамического моделирования трещинных резервуаров в древних комплексах Восточной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, № 2, 2013, С.11-20.

5. Г.Я.Иванюк и др. Самоорганизация рудных комплексов (синергетические принципы прогнозирования и поисков полезных ископаемых), М.: Геокарт-Геос, 2009, 392 с.

6. A.F. Costa, G.E. Humpire-Mamani, A.J.M. Traina. An Efficient Algorithm for Fractal Analysis of Textures, Conference on Graphics, vol. 1, pp. 39-46, 2012.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРР (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

В.А. Жемчугова¹, А.П. Жуков¹, Ю.В. Наумчев¹, М.О. Бербенев²

1 – МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва;

2 - ООО «Геофизические системы данных», г. Москва

Экономическая привлекательность освоения запасов углеводородов, приуроченных к верхнемеловым отложениям северных регионов Западной Сибири обусловлена, помимо значительных объемов этих запасов, небольшими (до 1 км) глубинами залегания содержащих газ резервуаров. Однако последнее обстоятельство обусловливает низкую информативность сейсмических данных, полученных с помощью стандартных методик проведения полевых сейсморазведочных работ. Применение новой технологии адаптивной вибросейсморазведки (АВИС) существенно повысило разрешенность сейсмических данных,

и их использование в технологической цепочке комплексной интерпретации геологогеофизических данных позволило разработать детальные модели резервуаров, необходимые для рационального освоения месторождения.

Верхнемеловые отложения региона включают два крупных резервуара газа: сеноманский и туронский. Генетическая типизация осадков, слагающих эти резервуары, и выделение фаций базировались на анализе их вещественного состава, текстурных и структурных характеристик, а также диагностике ихнофаций. Прогноз распределения фаций в межскважинном пространстве основывался на анализе сейсмических атрибутов.

Сеноманский резервуар представлен сложно построенной генетически разнородной толщей, накопление которой происходило в условиях приливно-отливного побережья и прилегающей сублиторали. Зоны распространения песчаного материала в нижней части сеноманской толщи были приурочены к русловым отмелям флювиальных потоков. Вверх по разрезу в составе пластов наблюдается увеличение доли литоральных, а затем и сублиторальных отложений, а также площадь и объемы присутствия песчаного материала. Основные неоднородности волнового поля в этой части продуктивного разреза связаны с развитыми на побережье прирусловыми отмелями и песчаными врезами древних русел (Рисунок 1). На сейсмических срезах уверенно выделяются палеорусла по характерным изгибам (меандрам), приливно-отливные каналы – по узкой спрямленной форме аномалий, а также отдельные элементы речной системы – протоки, старичные петли и т.д. Наибольшее распространение песчаники имеют в верхней части сеномана, их накопление происходило в условиях мелкой сублиторали. Отложения сублиторального комплекса имеют плащеобразное распространение в пластах ПК₁₋₂, в целом, выдержанные толщины и характеризуются в волновом поле слабой вертикальной и латеральной изменчивостью.

Туронский резервуар сложен преимущественно шельфовыми осадками. Пористостью в них обладают тонкозернистые песчаники и крупнозернистые алевролиты. Предполагается, что их накопление связано с подводными поднятиями, в пределах которых формировались шельфовые бары или песчаные валы.

Одной из задач, решение которой определяет повышение эффективности разработки залежей УВ в резервуарах, является создание их объемных цифровых моделей, в которых учитываются закономерности трехмерного распределения фильтрационно-емкостных характеристик.



Рисунок 1. Седиментационная модель сеноманских продуктивных отложений (a), проиллюстрированная межскважинным разрезом (б):

1 – трансгрессивные поверхности; 2 – границы песчаных тел; 3 – эрозионные поверхности; 4 – древние каналы и русла; осадочные комплексы (5-10): 5 – шельфа; 6 – переходной и нижней предпляжевой зоны; 7 – верхней предпляжевой зоны и берегового склона; 8 – межприливной зоны (а) с приливно-отливными каналами на ней (б); 9 – прибрежной континентальной равнины; 10 – приливно-отливных отмелей и русловых песков; 11 – индексы циклитов (пластов).

Исходными данными для моделирования структуры и свойств резервуаров служат результаты:

– фациальных реконструкций, реализованные в виде набора кривых фаций, построенных по скважинным данным – керна и данных ГИС (Рисунок 2);

- петрофизических исследований керна (включая компьютерную микротомографию);

– интерпретации сейсмических данных АВИС и в первую очередь куб плотности, полученный после проведения упругой инверсии.

Так, например, на одном из месторождений Русско-Часельского мегавала анализ связи между данными плотности и фациальным распределением в скважинах показал наличие линейной зависимости между этими параметрами. Полученные зависимости были использованы для получения пространственного распределения (куба) фаций на основе куба плотности (Рисунок 2). Эта процедура контролировалась трехмерными вариограммами, расчет которых выполнялся для каждой фации, присутствующей в соответствующей зоне.

Наличие устойчивых зависимостей между параметрами плотности и пористости в пределах каждой фации позволил рассчитать куб пористости, сформированный отдельными

элементами, в каждом из которых математическое распределение пористости характеризует автономную фацию (Рисунок 2).



Рисунок 2. Распределение фаций в разрезе турона:

осадочные комплексы (1-7): 1 – шельфа; 2 – переходной зоны; 3 – нижней предпляжевой зоны; 4 – темпеститов; 5 – тылового бара; 6 – центрального бара; 7 – верхней предпляжевой зоны; 8 – интервалы отбора керна; 9 – индекс зоны.

В структуре сеноманского и туронского резервуаров коллекторы развиты очень широко и характеризуются высокими значениями открытой пористости (ее граничные значения составляют 27% – для сеноманских и 24.3% – для туронских коллекторов), что связано главным образом с низкой степенью литификации обломочного материала. При этом коллекторам свойственны крайне изменчивые значения газопроницаемости. Соотношение пористости и проницаемости коллекторов определяется строением их пустотного пространства. В обломочных коллекторах параметры этого пространства зависят главным образом от структурных характеристик породы; последние, в свою очередь, контролируются условиями седиментации обломочного материала.

Для выявления взаимосвязи между условиями образования коллекторов и их фильтрационно-емкостными свойствами, были выполнены томографические исследования образцов керна ряда скважин с одновременной диагностикой их генезиса, в результате чего общая выборка была разделена на кластеры, объединяющие нескольких фаций с близкими характеристиками емкости; для каждого из них определена автономная зависимость проницаемости от пористости. Использование результатов компьютерной томографии позволило рассчитать куб проницаемости с учетом особенностей строения пустотного пространства разнофациальных отложений (Рисунок 3).



Рисунок 3. Модели пространственного распределения геолого-петрофизических параметров: а – плотности; б – фаций; в – пористости; г – проницаемости.

Заключение. Разработанный подход, базирующийся на результатах комплексной сейсмических И интерпретации скважинных данных, направлен на повышение достоверности прогноза структуры и свойств природных резервуаров – основных вместилищ УВ. Применение новой методики АВИС повысило разрешенность сейсмических данных, что позволило существенно детализировать строение продуктивных объектов в межскважинном пространстве. В свою очередь, внедрение в процесс комплексной интерпретации данных микротомографических исследований образцов керна дало возможность выявить устойчивые зависимости петрофизических параметров коллекторов от упругих характеристик среды и разработать трехмерные модели распределения фильтрационно-емкостных свойств. Выполненные построения являются обоснованной надежной основой И для гидродинамического моделирования залежей, позволяют планировать работы по дальнейшему геолого-геофизическому изучению и разбуриванию территории.

ПОЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технологии микросейсмического мониторинга ГРП

С.И. Александров, <u>В.А. Мишин</u> (ООО «Викосейс»), Д.И. Буров(ООО«Газпром Георесурс»)

Достигнутый объем обработок скважин методом гидравлического разрыва пласта на нефтегазоконденсатных месторождениях Западной Сибири свидетельствует о его интенсивном промышленном применении. Однако наряду с очевидным эффектом от применения метода ГРП нефтяники часто сталкиваются с рядом проблем, например, с возникновением аварийных «стопов», обводнением пластов, с отсутствием запланированного увеличения притоков пластовых флюидов и т.п. В последние годы с целью снижения технологических рисков и повышения эффективности операций ГРП на месторождениях Западной Сибири геофизическими компаниями ООО «Газпром георесурс» 000 «Викосейс» И лля мониторинга ГРП была привлечена инновационная микросейсмическая технология, родившаяся из площадной сейсморазведочной съемки. Она заключается в определении простирания, геометрических и гидродинамических параметров трещинных зон ГРП на основе регистрации глубинных сейсмоэмиссионных событий в зоне образования разрыва при помощи площадных сейсмических расстановок с большой апертурой и большим количеством приемников (до полутора тысяч). Высокая кратность накапливания и специальные приемы обработки по алгоритмам сейсмоэмиссионной томографии высокого разрешения позволяют уверенно выделять слабые глубинные микросейсмические сигналы из зоны ГРП на фоне интенсивных поверхностных помех.

Применение микросейсмического мониторинга помогло решить следующие актуальные задачи:

- ✤ обнаружить несоответствие дизайна ГРП фактической геометрии и размерам трещинной зоны (в т.ч., обнаружить асимметрию разрыва);
- ✤ дать прогноз негативным сценариям распространения трещин за пределы целевого пласта (в т.ч., в область соседних водонасыщенных горизонтов);
- ◆ выявить причины преждевременных аварийных остановок закачки («стопов») и др.

Для рассматриваемых случаев микросейсмический мониторинг позволяет предоставить фильмы динамической 3D визуализации, с помощью которых нефтяник может получить ясное представление об особенностях формирования трещинной зоны гидравлического разрыва, осуществить оперативный анализ и дать диагностическое заключение о качестве выполняемой операции ГРП и технологических рисках последующих операций. Дополнительно, дизайнер ГРП получает возможность проверки расчетов на основе определения фактического тензора проницаемости трещинной зоны, т.е. 3D контроля фильтрационных свойств трещины in situ.

В качестве примера здесь приводится иллюстрация по обнаружению асимметрии трещины ГРП на Ямбургском НГКМ. Асимметрия не учитывается современными моделями дизайна, однако она оказывает существенное влияние на характер установления гидродинамической связи с соседними скважинами, поэтому ее своевременное выявление является одним из принципиальных факторов для разработки месторождения. Таким образом, микросейсмическая технология помогает увидеть и понять, что происходит в околоскважинном пространстве во время стимуляции и экстраполировать результат на будущие ГРП, чтобы уменьшить технологические риски и оптимизировать процесс разработки месторождения. Такой подход делает работы по мониторингу вполне рентабельными, обеспечивая строгую документальную основу для проектирования рациональной схемы разработки месторождений.



Рис. Обнаружение асимметрии трещины ГРП. В окрестности интервала перфорации показана геометрия трещины по дизайну ГРП со стандартной цветовой раскраской по прогнозной толщине трещины и рой зарегистрированных микросейсмических источников, смещение которого относительно интервала закачки в скважине ГРП (показанного красным цветом) характеризует асимметрию разрыва.

Контроль качества обработки данных скважинного микросейсмического мониторинга

<u>Яскевич Сергей Владимирович¹,</u> Логинов Георгий Николаевич¹, Дучков Антон Альбертович¹,

Керусов Игорь Николаевич², Вингалов Вячеслав Михайлович²

¹ - Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, ² - ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг".

Микросейсмический мониторинг (ММ) активно используется для оценки результатов работ по гидроразрыву пласта, который применяется при разработке трудно-извлекаемых запасов газа и нефти. Принцип подходов, применяемых под собирательным названием «микросейсмический мониторинг», основывается на том, что при гидроразрыве пласта (ГРП) развитие трещин может сопровождаться возникновением в среде сейсмических событий, которые могут быть наблюдены с помощью сейсмоприемников, расположенных на поверхности или в близлежащей скважине. Технология микросейсмического мониторинга набирает популярность в США при разработке нетрадиционных запасов углеводородов (главным образом, сланцевые нефть и газ). Эта технология применяется и в России, но в гораздо меньшем масштабе и с менее очевидной результативностью работ. С нашей точки зрения - это во многом связано с необходимостью отработки технологии при ее перенесении на новые объекты. В докладе планируется затронуть важный вопрос правильной организации работ по микросейсмическому мониторингу, которая позволит перейти от эпизодических, слабо спланированных работ к систематическому накоплению опыта по результатам изучения российских объектов. В докладе также представлены результаты переобработки материалов скважинного микросейсмического мониторинга и показана важность контроля качества для оценки достоверности результатов и анализа успешности проведения ГРП.

Организация микросейсмических работ. При проведении полевых сейсморазведочных работ подразумевается, что полученные данные организуются и передаются таким образом, чтобы была возможность их независимой обработки сторонней организации. В этом смысле, микросейсмический мониторинг в полной мере относится к сейсморазведочным работам, а возможность независимой обработки позволит заметно повысить качество обработки и информативность метода. Требования, сформулированные в [1], позволяют заказчику получать от исполнителя работ данные и отчетную документацию в объеме, достаточном для независимой обработки и контроля качества работ. Однако при заказе микросейсмических работ это делают редко, довольствуясь отчетом с интерпретаций данных сервисной организацией. Последнее особенно удивительно, так как стандарты контроля качества являются неотъемлемой частью других методов сейсморазведочных исследований. Микросейсмический мониторинг уже достиг такого же технологического уровня, так что требуется только внедрение правильных практик проведения работ и формирования отчетности.

Переобработка данных микросейсмического мониторинга. Мы выполнили независимую обработку данных скважинного микросейсмического мониторинга пятистадийного ГРП в Западной Сибири. В качестве исходных данных были использованы первичные данные и отчетные материалы компании–исполнителя. Данные промежуточных этапов обработки,

были представлены не полно, соответственно детали качества обработки на промежуточных этапах было сложно оценить. Заметим, что не было способа проверить качество построения и калибровки скоростной модели среды, т.к. даже в самых полных материалах не было данных, с использованием которых она строилась, не были выделены отдельные записи от калибровочных событий типа "падение шара", не была описана их геометрия. Также отсутствовала часть первичных данных (3-я стадия ГРП и мини-ГРП 4-й стадии).

Изначально качество данных оценивалось как плохое, так как соотношение сигнал/шум было мало по сравнению с проектами мониторинга ГРП по сланцевой нефти, в которых принимали участие авторы [2].

Для независимой обработки данных ММ ГРП был использован следующий граф обработки:

- ориентация скважинных сейсмоприемников (по данным от поверхностных воздействий);

- анализ шумов и подбор оптимальных фильтров, нарезка и классификация триггерфайлов;

- определение времен прихода Р- и S- волн, поляризационный анализ Р-волн (азимут на событие);

- локализация гипоцентров микросейсмических событий (с использованием скоростной модели из отчета сервисной компании).

Система наблюдений представляла собой восемь трехкомпонентных скважинных сейсмоприемников с общей длиной субвертикальной расстановки 240 м. После экспертного анализа были выбраны 22 триггер-файла с событиями относительно хорошего качества (четкие вступления Р- и S-волн и достоверные поляризации Р-волн). Среди них были идентифицированы события, которые указаны в отчетных материалах компании исполнителя. Наилучший и наихудший триггер файлы, с точки зрения событий с еще меньшим уровнем сигнала была бы сомнительной.



Рис. 1 Пример триггер-файлов с наиболее и наименее интенсивными записями от микросейсм: красные отметки - времена вступлений Р-волн; синие – S-волн.



Рис. 2 Результаты локализации событий: слева – вид сбоку, справа – вид в плане, пунктирная линия - нагнетательная скважина. Цветом обозначены стадии ГРП; треугольники - положение сейсмоприемников. Цветом обозначены стадии ГРП. Треугольники обозначают положение скважинных сейсмоприемников.

Результаты локализации гипоцентров микросейсмических событий представлены на рис. 2. Заметим, что в результате независимой обработки нами было получено значительно меньше событий, чем компанией-исполнителем - 22 вместо 135. Это может быть связано с отсутствием части первичных данных (см. выше). Также это может говорить о том, что при первоначальной обработке были использованы события с низким отношением сигнал/помеха, может приводить к появлению гипоцентров с недостоверной что локализацией.

Выводы

Обработка данных микросейсмического мониторинга показала малое количество микросейсмических событий, наблюденных в ходе ГРП. Одной из причин является большое удаление наблюдательной скважины (рекомендуемое расстояние гипоцентров OT наблюдательной скважины обычно не превышает 300-400 м, а все наблюденные события находятся дальше). Для повышения эффективности микросейсмического мониторинга рекомендуется провести опытные работы по отработке оптимальной системы наблюдений ММ ГРП для новых районов

Гипоцентры достоверно локализованных событий сконцентрированы в области нагнетательной скважины для всех стадий. Таким образом, результаты обработки (с поправкой на пропущенный интервал данных) не позволяют сделать вывод о том, что произошло развитие трещины ГРП, отходящей в сторону от скважины.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Сколтеха (Соглашение № 711-MRA). БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Maxwell S., Reynolds F., 2013, Guidelines for Standard Deliverables from Microseismic Monitoring of Hydraulic Fracturing // CSEG Recorder, March, pp. 56-59.

2. Grechka, V., and S. Yaskevich, 2014. Azimuthal anisotropy in microseismic monitoring: A Bakken case study. Geophysics, 79(1), pp. KS1-KS12.
ПРОГРАММНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Тищенко Александр Игоревич

ООО «Геофизические системы данных», г. Москва

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ

Программа "SeisWin-QC" позволяет решать следующие задачи:

- расчет геофизических и технических атрибутов качества сейсмического материала;

 представление результатов расчета в виде цветных карт атрибутов с возможностью статистического анализа;

 – экспорт результатов анализа в профессиональные пакеты картопостроения и табличные редакторы;

- контроль геометрии сейсмических съемок;

– удобный и быстрый просмотр полевых записей с возможностью применения интерактивных инструментов обработки и измерения геофизических характеристик;

- выполнение технических операций с полевым материалом;

– выполнение контроля регистрируемых записей в режиме реального времени при подключении к сейсмостанции.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОДПРОГРАММЫ

Основным форматом сейсмических данных, с которыми работает программа "SeisWin-QC", является SEG-Y с присвоенной геометрией. Однако в полевых условиях, как правило, супервайзеру со станции передаются сейсмограммы в формате SEG-D, каждая из которых записана отдельным файлом. Поэтому первая техническая задача, которая возникает перед супервайзером, – объединить набор файлов формата SEG-D в один файл SEG-Y, с которым в дальнейшем и будет работать программа. Сопутствующая техническая задача – присвоение геометрии в файл SEG-Y на основе SPS-файлов. Обе эти задачи решаются с помощью дополнительных утилит, входящих в состав пакета "SeisWin-QC".

ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Важной особенностью интерфейса программы и безусловным удобством с точки зрения пользователя является интерактивная связь основных окон программы. Программа содержит три основных окна представления данных – таблицу геофизических атрибутов, изображение

сейсмограммы и координатную схему с визуализацией геометрии сейсмической съемки и рассчитанных атрибутов качества (рис. 1).

В программе реализована интерактивная взаимосвязь этих окон через данные, что обеспечивает необходимое удобство использования и быстрый доступ к данным различных категорий, не нарушая при этом простоту интерфейса пользователя. Так, выбирая нужную запись в таблице, пользователь одновременно видит изображение сейсмограммы в другом окне и ее расположение на координатной схеме. Аналогично, выбирая ПВ на координатной увидеть схеме. пользователь имеет возможность моментально соответствующую выбранному ΠВ сейсмограмму, а также точные значения атрибутов качества, соответствующие выбранной записи. На практике такая организация взаимодействия окон обеспечивает существенную экономию времени при работе с программой, наибольший комфорт с которой достигается при подключении к компьютеру двух мониторов, что вполне реализуемо в условиях современного полевого центра обработки данных.



Рис. 1. Взаимосвязь основных окон программы "SeisWin-QC".

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АТРИБУТЫ И ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА

К геофизическим атрибутам качества, которые можно рассчитать в программе, относятся:

– медианная амплитуда записи как энергетическая характеристика;

 набор спектральных атрибутов (ширина спектра, доминантная частота, нижняя и верхняя частоты спектра);

- отношение сигнал/помеха;

- отношение среднеквадратичных амплитуд в заданных окнах;

- комплексный коэффициент геофизического качества записи с редактируемой формулой расчета.

Также в качестве атрибутов программа позволяет прочитать и проанализировать такие значения заголовков трасс, как глубина заложения заряда, альтитуда, время Т-вертикальное и др.

Перечисленные характеристики имеют важное значение при выполнении комплексного анализа результатов, помогая понять особенности распределения по площади того или иного рассчитываемого атрибута качества. Так, площадная корреляция между областью пониженных значений отношения сигнал/помеха и повышением рельефа местности может свидетельствовать о том, что в процессе выполнения полевых работ был допущен брак, связанный с недостаточной глубиной бурения взрывных скважин (рис. 2).

Комплексный коэффициент качества является интегральной характеристикой полевой записи, базирующейся на значениях взаимно независимых геофизических атрибутов и с редактируемыми весовыми коэффициентами. Значения комплексного коэффициента качества могут рассчитываться как в абсолютных значениях, так и с приведением к заданному динамическому диапазону. Первый вариант расчета может быть полезен для сопоставления качества сейсмического материала по различным площадям и регионам, полученного в разное время. При подборе весовых коэффициентов атрибутов, входящих в формулу расчета коэффициента качества, может быть использован эффективный автоматический инструмент статистического анализа, что значительно облегчает данную задачу для пользователя.



Рис. 2. Сопоставление фрагментов карт атрибутов "сигнал/помеха" и "альтитуда ПВ":

а – карта отношения "сигнал/помеха"; b – карта рельефа местности (м).

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОГРАММЫ. СРЕДСТВА ОТБОРА И ГРУППИРОВАНИЯ ЗАПИСЕЙ ПО ЗНАЧЕНИЯМ АТРИБУТОВ

При работе с данными значительного объема не обойтись без удобных средств сортировки, группирования и отбора этих данных по любым критериям. Не обойден этот вопрос и в программе "SeisWin-QC". Технический прогресс не стоит на месте, благодаря постоянному усовершенствованию технологии проведения полевых работ неуклонно растет и объем ежедневно регистрируемого геофизического материала. Объем данных, зарегистрированных в рамках одного типичного 3D проекта, уже может составлять несколько сотен тысяч сейсмограмм. И программное обеспечение должно соответствовать растущим требованиям геофизики. Уже сейчас программа "SeisWin-QC" позволяет быстро и с легкостью манипулировать данными всего проекта 3D на обычном ноутбуке, а расчет всех атрибутов качества по суточному объему сейсмограмм выполняется не более чем за 1 ч. Такая производительность системы позволяет геофизику-супервайзеру "держать руку на пульсе" порцесса изменения качества получаемого материала и в случае появления брака в неприемлемом объеме настоять на повторной отработке материала.

Программа позволяет выполнить сортировку сейсмограмм по значению любого атрибута, отметить некондиционные записи с целью исключения их из работы и расчетов. Путем задания предельно допустимых значений для любого из атрибутов в программе можно сформировать критерии геофизического брака и группировать сейсмограммы по этому признаку. Фактически программа "SeisWin-QC" содержит в себе все необходимые функции табличного редактора, что исключает необходимость работы с результатами расчетов в других программах, таких как MS Excel и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа "SeisWin-QC" изначально была спроектирована как универсальный программный инструмент супервайзера-геофизика без попытки повторить идеологию и пользовательский интерфейс какой-либо существующей системы аналогичного назначения, она не является наследником или результатом развития какой-либо ранее существовавшей системы. Благодаря этому программа отвечает современному уровню требований к программному обеспечению – это весомое преимущество по сравнению с конкурирующими системами. На всех стадиях развития пакета разработчики старались придерживаться нескольких важных принципов:

 решение полного цикла технических и геофизических задач, возникающих перед специалистом-геофизиком в процессе выполнения контроля качества сейсмических данных в полевых условиях;

– обеспечение быстрого доступа к большому объему полевых данных и их визуализации;

– простой, удобный и интуитивно понятный интерфейс пользователя программы;

– отсутствие повышенных технических требований к компьютеру, на котором работает ПО.

За свою семилетнюю историю пакет "SeisWin-QC" претерпевал значительные модификации, но благодаря соблюдению изначальных принципов развития сумел приобрести широкий круг пользователей и продолжает совершенствоваться, стараясь соответствовать современным стандартам геофизического ПО.

Способы анализа эффективной кратности при оценке параметров систем наблюдений

<u>Фролов Артем Сергеевич</u> (ООО «РН-Шельф-Арктика», Москва),

Белоусов Александр Валерьевич (РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, Москва),

Горбачев Сергей Викторович (ООО «РН-Шельф-Арктика», Москва).

Значение номинальной (проектной) кратности наблюдений является одним из основных контролируемых параметров систем наблюдений (далее - CH) на всех этапах работ - от планирования и проектирования до построения глубинно-скоростной модели и динамической обработки [1]. Огромную роль имеет характер набора кратности с глубиной или, что в первом приближении, одно и то же, с удалением источник-приемник, отображающий распределение кратности на уровне исследуемых горизонтов. Данный параметр принято называть эффективной кратностью наблюдений. Эффективная кратность (по сравнению с номинальной) является более точным инструментом выбора оптимальной CH, так как позволяет оценить степень влияния целого ряда факторов (мьютинг за растяжение импульса, степень регуляризации и т.п.) на качество конечного разреза.

Для сравнения способов представления эффективной кратности были выбраны две СН (Табл. 1), показанных в статье [2].

Параметры СН	CH1	CH2	CH1
Шаг ЛПВ, м	300	300	
Шаг ЛПП, м	300	300	
Шаг ПВ, м	50	50	
Шаг ПП, м	50	50	CH2
Количество ЛПП	12	12	
Количество ПП в ЛПП	96	96	
Количество ПВ	6	36	
Количество элементов (salvo)	1	6	
Смешение по Inline, м	300	300	
Смещение по X-line, м	300	1800	
Номинальная кратность	48	48	

Табл. 1. Параметры анализируемых съемок.

Традиционным способом изображения эффективной кратности являются так называемые «скатерограммы» кратности (Рис. 1), получаемые численным расчетом, проводимым при ограничении диапазона удалений. [2, 3].



Рис. 1. Пример скатерограммы эффективной кратности для CH1 и CH2 в диапазоне удалений 0-2300 м.

Отметим, что при всей наглядности подобных изображений достаточно тяжело провести сравнительный анализ СН между собой ввиду неравномерности цветовой палитры; необходимости построения подобных скатерограмм для каждого исследуемого интервала, а также необходимости выбора одинаковых элементов съемки для анализа. Характер распределения кратности может существенно меняться с изменением удалений, что приводит к неоднозначности выводов по единичным скатерограммам.

Помимо скатерограмм, определенное распространение при проектировании СН получили графики набора эффективной кратности с удалением источник-приемник, на которых представлены все диапазоны удалений. В то же время, на таком графике невозможно увидеть, как именно распределены бины по кратности в пределах одной подборки удалений.



Рис. 2. Пример графиков набора кратности.

Мы предлагаем альтернативный способ изображения эффективной кратности с использованием так называемых диаграмм размаха, также известных как «ящиковые диаграммы». Они позволяют изобразить нижний квартиль (25% бинов имеют данное или меньшее значение кратности), медиану (уровень 50%), верхний квартиль (75% бинов имеют данное или меньшее значение кратности) в пределах «ящика»; минимальную и максимальную кратность как концы «усов». Размеры различных частей «ящиков» позволяют определить, насколько велик разброс в значениях кратности. При этом их визуализация достаточно компактна и позволяет одновременно сравнивать несколько различных подборок удалений для достаточно большого числа СН.

Для примера построим диаграмму размаха для одного диапазона удалений (0-2300) и сравним ее со скатерограммой для тех же диапазонов (Рис. 3). Наглядно видно, что в пределах элементарной ячейки наблюдается малый разброс по кратности (на это нам указывает небольшая протяженность диаграммы), минимальная кратность имеет значение 38, максимальная 43, четверть бинов имеет значение кратности 40 и ниже, половина - 41 и ниже, три четверти бинов - 42 и ниже. Основной вклад в формирование кратности вносят бины с кратностью 40-42, при этом количество бинов, содержащих каждое из этих значений, одинаково, т.к. на диаграмме размаха им соответствуют эквивалентные квартили. Очевидно, что при анализе больших подборок (распределений по системе наблюдений в целом), визуализация в виде диаграммы размаха проще для построения выводов при эквивалентном количестве визуализируемой информации.



Рис. 3. Пример диаграммы размаха построенной для элементарной ячейки CH1 в диапазоне удалений 0-2300 м.

Выполнив сравнение анализируемых СН по всем удалениям для всех бинов (Рис. 4) можно прийти к следующим выводам:

- до удалений 1000 м CH1 и CH2 обладают сходными интегральными характеристиками.

- по мере увеличения удаления (а, следовательно, и глубины исследований) в CH2 начинает проявляться все большая неоднородность в распределении числа трасс.

- CH1 выходит на номинальную кратность (48) на удалении в 3000 м., тогда как CH2 – только на 3600 м.



Рис. 4. Сравнение диаграмм размаха для СН1 и СН2 в пределах элементарной ячейки.

Таким образом, описанный выше способ представления данных в виде диаграмм размаха можно назвать реальной альтернативой как скатерограммам (благодаря компактности), так и графикам набора кратности (благодаря гораздо большей информативности). К недостаткам способа относится, в первую очередь, непривычность визуализации (для того чтобы свободно анализировать СН по данным диаграммам необходимо затратить какое-то время на изучение принципов их построения).

Список литературы.

- 1. Cordsen A., Galbraith M., Peirce J. Planning Land 3-D Seismic Surveys. // Society of Exploration Geophysicists, 2000;
- Актуальные вопросы оптимизации геометрии 3D-сейсмических наблюдений / А.В. Белоусов, Ю.Ш. Закариев, М.З. Мусагалиев, А.Л. Плешкевич, Н.Н. Цыпышев // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 74-81;
- 3. Acquisition footprint and fold-of-stack plots / S. Hill, M. Shultz, J. Brewer// The Leading Edge. 1999. C. 686-695 .

Современные технико-методические возможности проведения сейсморазведочных работ 3D в лиманно-плавневых зонах. <u>Рудаков Александр Владимирович, Шумский Борис Витальевич</u>

ГНЦ ФГУГП "Южморгеология" г. Геленджик

Лиманно-плавневые зоны еще в недалеком прошлом были технологически практически недоступны для проведения сейсморазведочных работ. Причиной является труднодоступность районов для прохождения вездеходной техники и невозможность использования технологий сухопутной, морской или транзитной сейсморазведки.[1-2].

В ходе многолетних небольших работ в таких зонах геофизические компании пришли к единой технологии выполнения работ, суть которой заключается в том, что с помощью вездеходной гусеничной техники в зарослях камыша прокладываются просеки в которых осуществляется раскладка приемных линий и проводится возбуждение сигнала. При наезде на заросли камыша или попадания техники в иловую зону происходит ее застраивание и поломки в связи с попаданием грязи, веток и камышей в гусеницы (рис. 1).



Рис. 1. Пример техники используемой при работах и ее поломка.

Возбуждение упругого сигнала осуществляется по следующей технологии: бурение скважин на заданную глубину, подъема оборудования, погружение пневмоисточника (ПИ) в скважину (при этом в зависимости от типа почвы, скважины могут обсыпаться, разрушаться, сжиматься и, что не дает возможности опустить ПИ на заданную глубину), возбуждение с накапливанием сигналов, извлечение ПИ и переезд на следующую точку. При этом, опережающее бурение, как это зачастую применяется при сухопутных работа, невозможно по причине того, что скважины в донных грунтах разрушаются практически сразу после извлечения шнека.

В 2014 лиманно-плавневой зоне побережья Азовского, впервые были применены в качестве базы для источника универсальные гусеничные платформы-амфибии (рис. 2).



Рис.2. Универсальная гусеничная платформа-амфибия и смонтированный на ней «взрыв-пункт».

Такая конструкция при габаритных размерах $9 \times 6 \times 4$ м имеет грузоподъемность до 12 тонн, а низкое удельное давление на грунт (из за широких гусениц) и наличие герметичных понтонов-поплавков позволяет ей перемещаться как по суше и камышам, так и свободно преодолевать водные зоны. Наличие большой свободной площади позволило установить на одной установке два комплекта пневматического и бурового оборудования (что позволяет одновременно выполнять возбуждения из двух скважинах). Каждый комплект состоит из бурового шнекового агрегата для бурения скважин и скважинного источника «BOLT» объемом 4 л, который смонтирован на штанге специального устройства, позволяющего опускать его в пробуренную скважину. Максимальная глубина погружения источника - 6.5 м, общий объем одновременного излучателей – 8 л. Также на установке установлен: компрессор высокого давления; ресивер с двумя баллонами высокого давления общим объемом 480 л; контроллер ПИ «LongShot»; система синхронизации возбуждения «Pelton»; навигационное оборудование. Все это позволяет ускорить выполнение работ в лиманаплавневых зонах примерно на 30%, по сравнению со стандартной технологией.

Фактически участок работ (рис. 3) представляет собой две зоны: сушу, с заболоченными лимана-плавневыми участками, с глубинами воды до 1-1,5 м закрытую камышом и открытую акваторию с глубинами от 1 до 3 м. Для отработки площади 3D применялись фактически две технологии: сухопутная и морская. Возбуждение на акватории выполнялось с применением мелководного буксируемого ПИ объемом 12 л. Использование различных активных расстановок связано с технологическими особенностями проведения работ. Из опыта работ на акватории актуальней осуществлять набор кратности за счёт перекрытия по ПВ. Ввиду того, что вода - нестабильная среда и возможны частые сносы приемного оборудования, то активная расстановка реализована меньшим количеством приемных линий нежели сухопутная. В лиманно-плавневой же зоне более технологично выполнять набор кратности за счёт перекрытия по ПП. Дизайн активных расстановок выбран из расчёта того, чтобы у систем была одинаковая кратность и азимутальность.



Рис. 3. Схемы ЛПП, ЛПВ и карты номинальной кратности для двух зон и объединённая по всей площади.

Регистрация данных в лиманно-плавневой зоне и на глубинах до 1 м осуществлялась датчиками СВГ-6 представляющий собой шесть геофонов GS20-DX смонтированных в цилиндрическом контейнере и соединенных последовательно. В качестве приемников на акватории применялись гидрофоны DT-25-11A[5].

Перед проведением производственных работ был выполнен большой комплекс опытнометодических работы направленных на выбор оптимальной глубины погружения ПИ и количества накоплений на ПВ, при этом работы выполнялись на четырех участках с различными поверхностными условиями.

По результатам опытных работ был установлен допустимый предел уровня отношения «сигнал/нерегулярный шум» для источника возбуждения и уровень микросейсм, соответствующие состоянию погоды. Совместно с представителями Заказчика были установлены следующие ограничения: 1. Производственные работы проводятся при уровне микросейсм менее 20 мкв.

2. Соотношение амплитуды сигнала к амплитуде микросейсм не менее 2-х на целевом горизонте.

Обращая внимание на рисунок 4 можно отметить, что отражения целевого комплекса отчётливо следятся как при морской технологии, так и при сухопутной. Результаты полевой экспресс-обработки, а также дальнейшая обработка на стационарном ВЦ позволяет ожидать решения поставленных геологических задач[4].



Рис. 4. Пример сейсмограммы ОПВ с возбуждением на акватории(сверху) и в лимана-плавневой зоне(снизу).

Результаты экспресс обработки данных показали хоровую стыковку данных разных частей съемки (рис. 4), что являлось одной из основных задач данных работ. На рисунке 4В хорошо видно хорошую увязку данных от разных источников и зарегистрированных разными типами приемников[3].



Рис. 4. Карта рельефа местности (А), фрагмент полученного куба (Б) и фрагмент разреза (В).

В результате применения современных технических средств и качественного выполнения полевых работ был получен кондиционный материал, отвечающий поставленным геолого-геофизическим задачам.

Использование современных технических средств платформ-амфибий позволило повысить производительность работ, минимизировав простои по поломкам и застреванию техники.

Применение специализированного разработанного бурового комплекса позволило оптимизировать время на отработку площади и добиться решения поставленных геологических задач.

При работах в сложных зонах необходимо большое внимание уделять омр, для оптимального выбора параметров, как с точки зрения качества данных, так и производительности.

Получен большой опыт выполнения работ с проработкой технических и методических особенностей при работах в столь сложных условиях, где ввиду множества особенностей различного характера(как природных так и техногенных) необходимо оптимально синтезировать комплекс технологического транспорта и геофизических решений по реализации проекта.

Список литературы

1. Захаров Н.В., Шумский Б.В. Технология и технические средства для сейсмических исследований на мелководье и транзитных зонах // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2005. – Т.11, №1. – С.23-26.

2. Мосякин А.Ю. Особенности сейсморазведки в лиманно-плавневой зоне Краснодарского края // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2005. – Т.11, №1. – С.20-22.

3. Захаров Н.В., Шумский Б.В., Рудаков А.В. Техника и технология сейсмических исследований в условиях предельного мелководья и выполнения "бесшовной" съёмки на границе вода-суша // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2012. – Т.41, № 3. – С.45-52.

4. Захаров Н.В. Рудаков А.В. К вопросу оценки качества сейсмических материалов в условиях транзитных зон // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2012. – Т.39, №1. – С. 20-23.

5. Гуленко В.И., Рудаков А.В. Технология морской 3D сейсморазведки с телеметрической системой «ARAM ARIES II» // Геология, география и глобальная энергия. – 2012. Т.51, №4. – С. 44-51.

Свойства сигналов с опорной плиты и инертной массы сейсмического вибратора и использование их для изучения условий возбуждения <u>Колесов Сергей Васильевич</u>, Жуков Александр Петрович

ООО «Геофизические Системы Данных», г. Москва

Сигналы вибратора, свойства которых рассматриваются, генерируются и используются в системе автоматического регулирования вибратора при отработке «программы» (опорного сигнала S(t)), заданной геофизиком на блоке управления вибратором (БУСВ). От системы автоматического регулирования требуется, чтобы свойства сейсмического сигнала, генерируемого вибратором и «освещающего» геологический разрез, были бы максимально близки к параметрам опорного сигнала. Характер спектра вибросейсмического сигнала можно оценить по «Ground Force» - GF(t) (называемой ещё действующей силой, или земляной силой). Она определяется как сумма масштабированных и со своими знаками сигналов с акселерометров, установленных на плите и на инертной массе вибровозбудителя, умноженных на массы, соответственно плиты со штоком и инертной, (реактивной) массы вибровозбудителя:

$$GF(t) = BP(t)*m + RM(t)*M,$$

где m – масса опорной плиты со штоком (и поршнем), BP(t) – её ускорение, как функция времени развёртки сигнала вибратора, М – реактивная масса (тяжёлый гидроцилиндр), RM(t) – ускорение реактивной массы, так же в зависимости от времени.

Ускорения BP(t) и RM(t) и есть сигналы вибратора, с помощью которых и осуществляется обратная связь в системе авторегулирования. Очевидно, что свойства сигналов BP(t) и RM(t) будут меняться в зависимости от относительных изменений свойств грунтов, на разных пунктах возбуждения (ПВ).

Одна из первых работ по изучению влияния условий установки источника на излучаемый сигнал относится к 1976г. (Кузнецов В.В., Осауленко В.И. АС № 744398 кл. G

01 V 1/00, заявлено 12.04.76, опублик. 30.06.80 бюлл. № 24.). В настоящее время на современных блоках управления вибраторами (БУСВ) имеется возможность регистрировать, хранить и даже обрабатывать сигналы вибратора. Потребность в повышении разрешающей способности вибрационной сейсморазведки, возможность использования адаптации характеристик вибрационных сигналов к меняющимся по площади условиям возбуждения (Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. 2000, Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки.//Недра, М., 2000г.), приводят к возврату интереса к оценке условий возбуждения сейсмических сигналов с помощью анализа сигналов вибратора. В докладе проанализированы вышеупомянутые сигналы, которые были зарегистрированы при проведении полевых сейсморазведочных работ 3Д по технологии АВИСейс на севере Тюменской области.

Основные выводы, полученные при анализе сигналов, следующие:

1. Сигналы с опорной плиты и инертной массы вибратора нужны не только для автоматического регулирования работы вибратора, но и для получения информации об условиях возбуждения сейсмического сигнала на месте установки вибратора, в частности для получения спектральных характеристик условий возбуждения и жёсткости системы вибратор/грунт.

2. Сигналы вибратора, полученные на каждом ПВ, дают информацию об изменениях спектральных характеристиках возбуждения по площади работ, что может быть использовано в методике наблюдений и при обработке результатов.

3. Сигналы вибратора могут быть также применены для улучшения корреляционной обработки виброграмм путём использования формы и частотного диапазона сейсмического сигнала, находящегося за пределами полосы возбуждения и включающего побочные волныгармоники.

4. Сигналы вибратора позволяют реализовать адаптацию вибросейсмического сигнала к меняющимся условиям возбуждения, в том числе при наблюдениях с помощью <u>нодальных</u> <u>регистрирующих</u> систем.

5. Волны-гармоники, оцениваемые по сигналам вибратора, могут быть использованы при выделении нелинейных сейсмических явлений, связанных с геологической средой, а не с системой возбуждения.

Новые возможности системы управления виброисточниками

Жуков Александр Петрович, <u>Гридин Павел Анатольевич</u>, Малышев Александр Сергеевич, Телков Михаил Павлович, Тищенко Александр Игоревич

ООО "Геофизические Системы Данных", г. Москва

Разработана система управления виброисточниками GDS-II, позволяющая решать, наряду со стандартными, целый ряд новых задач. Главные из них:

- работа с бескабельными сейсмостанциями;
- реализация новейших методов высокопроизводительной сейсморазведки;
- широкополосные свипы.

Для работы с бескабельными многоканальными сейсмостанциями (например SCOUT СКБ СП, ZLand FairFieldNodal), в GDS-II реализованы высокоточные часы с подстройкой от GPS,

аналогичные часам сейсмостанций и служащих для синхронизации с ними. Точность часов более высокая, чем сейсмостанций, так как мы неограниченны аккумуляторным питанием.

Имея в распоряжении точные часы, мы получили возможность создать принципиально новый TDMA¹-радиомодем. Причем это встроенный в блок управления радиомодем, работающий посредством обычных голосовых радиостанций. TDMA-модем позволяет нам, используя одну радиочастоту, организовать несколько независимых радиоканалов, каждый из которых можно использовать для управления группой вибраторов, а также для передачи GPS диф. поправок. Модем имеет не только высокую скорость обмена, но и отсутствие потерь времени на обнаружение поднесущей.

Устанавливаемый на сейсмостанцию энкодер GDS-II, используя вышеописанные технологии представляет собой фактически четыре энкодера, каждый из которых обладает собственным радиоканалом, выходным опорным сигналом и сигналом отметки момента и всё это с использованием единственной голосовой радиостанции (обычно используются автомобильные радиостанции Motorola или ICOM).

Современные методы высокопроизводительной сейсморазведки, как правило, используют несколько виброгрупп, которыми необходимо управлять отслеживая те или иные параметры. Такими параметрами, как правило является, контроль минимальной дистанции между виброгруппами и контроль времени между стартами групп. Программное обеспечение GDS-II при работе с бескабельными станциями может выполнять функции рабочего места оператора сейсмостанции. При этом возможна работа в полностью автоматическом режиме, отработка производится по SPS-файлам. Программное обеспечение работает по следующему алгоритму:

- программа принимает по радио готовность виброгруппы;
- контролируется, отработан ли данный пункт возбуждения, если отработан, то виброгруппа попадает в список групп готовых к работе;
- если для виброгруппы выполняются условия по времени и дистанции, программа по радио стартует для данной группы очередное накопление;
- завершив последнее накопление плиты автоматически поднимаются, а старший оператор виброгруппы на планшете видит следующий пикет.

Оборудование GDS-II позволяет использовать обычные вибраторы в очень широкой полосе частот, нижняя частота может составлять 2-3 герца. Достигается подобный эффект, тем что обходятся физические ограничения вибратора за счет снижения амплитуды на низких частотах и увеличением времени работы на этих частотах. Принципиальной особенностью работы в данном режиме нашей аппаратуры, состоит в том, что пользователь имеет возможность изменять частоты и параметры подобных свипов по радио, тогда как обычно пользователь вынужден загружать в каждый вибратор отдельно подобный свип, заданный сигнальной трассой.

¹ (англ. Time Division Multiple Access — множественный доступ с разделением по времени)

ТЕХНОЛОГИЯ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕМ КАБЕЛЬНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СЕЙСМОРЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ И БЛОКОВ АВТОНОМНОЙ РЕГИСТРАЦИИ

«SCOUT», ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЛУБИННОЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ЗЕМНОЙ КОРЫ.

Гнатюк Александр Иванович, Кузнецов Иван Михайлович, <u>Тарасов Николай</u> <u>Васильевич.</u>

ОАО «СКБ сейсмического приборостроения», г.Саратов

Ведущим разработчиком и изготовителем сейсморегистрирующего оборудования в России является компания ОАО «СКБ сейсмического приборостроения» (Саратов). На долю ОАО «СКБ СП» приходится немногим более 10% отечественного рынка сейсморегистрирующих систем. Компании приходится конкурировать на российском рынке геофизической аппаратуры, а также на рынках других стран СНГ с рядом крупнейших компаний Франции, США и Китая, имеющих доступ к значительным финансовым и технологическим ресурсам. В результате, чтобы обеспечить конкурентоспособность своей продукции ОАО «СКБ СП» проводит интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию аппаратуры, отвечающей потребностям как российских, так и зарубежных сервисных геофизических компаний.

В настоящее время в ОАО «СКБ СП» проведены основные поисковые работы по подготовке к выполнению проекта направленного на решение сложной задачи комплексирования кабельной и бескабельной системы, предназначенных для изучения глубинной части разреза земной коры.

Основной целью проекта является разработку и внедрение в производство телеметрической сейсморегистрирующей системы, обеспечивающей многоканальные сейсмические исследования со сбором данных, как в реальном, так и в нереальном времени, чрезвычайно надежной и удобной в эксплуатации, отвечающей всем требованиям экологической и технической безопасности. Т.е. предполагается создание сейсморегистрирующей системы, свободной от недостатков существующих в настоящее время систем.

Существующие телеметрические сейсморегистрирующие системы подразделяются на два класса, в основе которых лежат кабельная и бескабельная архитектуры. Появившиеся сравнительно недавно бескабельные системы в последние годы имеют постоянно увеличивающуюся долю на рынке оборудования и сейчас составляют примерно 20% всего количества сейсмических каналов в мире. Однако, имеющиеся у них некоторые существенные недостатки, свидетельствуют о том, что данные системы еще далеки от того, чтобы считаться «идеальным» инструментом для сбора сейсмоданных, что, соответственно, ограничивает их потенциальные возможности по полному вытеснению кабельных систем.

Среди ключевых ограничений, присущих каждой из вышеназванных типов систем, можно назвать следующие:

Ограничения кабельных систем

- Значительный вес системы;
- Интенсивность ручного труда и перемещений;
- Повышенный риск причинения вреда здоровью, нарушения экологии и требований безопасности;
- Ограниченный доступ в районы со сложным рельефом и развитой промышленной инфраструктурой;

- Потери времени, связанные с ремонтом и обслуживанием кабелей;
- Сложные схемы сети наблюдений;

Ограничения бескабельных систем

- Отсутствие контроля качества сейсмоданных в реальном времени;
- Отсутствие контроля состояния профиля;
- Низкая скорость доставки зарегистрированных сейсмоданных для последующего их анализа и обработки;

«Идеальная» сейсморегистрирующая система должна быть свободна от этих ограничений, чтобы удовлетворить требования, как сервисных геофизических компаний, так и нефтяных компаний.

ОАО «СКБ СП» имеет хорошие возможности использовать преимущества своего богатого опыта в разработке и производстве как кабельных, так и бескабельных систем.

Цель заключается в объединении лучших элементов обеих технологий.

Результатом должна стать инновационная сейсморегистрирующая система нового поколения с уникальной архитектурой.

Отличительной особенностью предлагаемой архитектуры системы является возможность обеспечения регистрации сейсмической информации в непрерывном режиме, без задержек и пауз в работе системы, независимо от состояния кабельной связи наземной расстановки с центральной регистрирующей системой (ЦРС), в любых районах проведения наземных сейсморазведочных работ, включая транзитные зоны.

Возможность работы системы в таком режиме обеспечивается:

- наличием в составе системы модулей концентратора линии наблюдения (МКЛ), каждый из которых обеспечивает прием сейсмоданных, поступающих в МКЛ из его линии наблюдения, а также сейсмоданных, поступающих из соседних линий, и передачу поступивших в МКЛ сейсмоданных в ЦРС по кабельному каналу. В случае невозможности передачи данных по кабельному каналу (обрыв кабеля, сбой в процессе передачи), поступающая в модуль информация запоминается во внутренней памяти и в последующем передается в ЦРС либо по восстановленному кабельному каналу связи, либо с использованием мобильного устройства сбора данных;

- наличием буферной памяти в каждый полевой блок сбора данных в линии наблюдения, что обеспечивает возможность в случае нарушения передачи данных по кабельному каналу связи линии наблюдения, не прерывая процесс сейсмического наблюдения, накапливать регистрируемую информацию непосредственно в блоке сбора данных и передать ее в ближайший МКЛ;

- наличием в составе системы блока автономной регистрации сегментного «БАРС-Т», обеспечивающего с подключенными к нему кабельными блоками сбора данных создание сегмента кабельной линии сейсмической расстановки с автономной регистрацией сейсмоданных во внутренней памяти блока «БАРС-Т» с последующей передачей накопленной в памяти БАРС-Т информации в ЦРС с использованием мобильного устройства сбора данных;

- возможностью использования в сейсмической расстановке автономных бескабельных блоков сбора данных «SCOUT».

В случае применения такой смешанной конфигурации, важно предусмотреть совместимость всех сегментов приемной расстановки. Важно получить однородную сейсмическую информацию (одни и те же параметры регистрации, одна и та же электроника, те же меры контроля качества) в одном выходном формате.

Одной из особенностей архитектуры предлагаемой системы является то, что она обеспечивает устранение временных простоев, связанных с необходимостью устранения неисправностей кабельного канала передачи данных в процессе выполнения работ. В случае возникновения неисправности в кабельном канале передачи данных, система либо выберет новый, безопасный маршрут передачи данных на соответствующем участке наземной расстановки, либо просто перейдет на этом участке наземной расстановки в автономный режим регистрации.

Использование в наземной расстановке системы кабельного канала обеспечит также:

- возможность контроля состояния профиля в реальном времени;

- возможность создания сети распределения питания блоков наземной расстановки, примерно так же, как это делается в современных кабельных системах. Это позволит существенно снизить количество батарей, используемых при выполнении полевых работ. В предлагаемой системе должны быть также обеспечены:

- возможность передачи зарегистрированных в ЦРС сейсмоданных в Систему контроля качества (Система QC) полевого материала с использованием кабельного канала либо радиоканала.

- возможность запуска и синхронной работы двух сейсмостанций, удаленных друг от друга на несколько километров и управляемых с пункта возбуждения с помощью системы синхронизации возбуждений ССВ-2.

- возможность реализации современных вибросейсмических технологий возбуждения сигнала на профиле (flip-flop, slip-swim и др.).

Таким образом, реализация Проекта «Технология синхронной регистрации геофизической информации комплексированием кабельной телеметрической сейсморегистрирующей системы и блоков автономной регистрации «SCOUT», при изучении глубинной части разреза земной коры», обеспечит создание сейсморегистрирующей системы, свободной от ограничений, присущих как кабельным, так и бескабельным системам.

Реализация Проекта должна поднять отечественное геофизическое приборостроение на качественно новый уровень и обеспечить ему конкурентоспособность, столь необходимую для реализации задачи импортозамещения в области геофизического приборостроения и устранения угрозы возникновения полной зависимости предприятий энергетического комплекса России от поставок зарубежными компаниями геофизического оборудования, предназначенного для поиска нефтяных и газовых месторождений.



Блок автономной регистрации «SCOUT».

ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТНЫХ АНОМАЛИЙ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Абакумов Иван Владимирович, Каштан Борис Маркович

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Введение

Интенсивная разработка морских месторождений углеводородов, при отсутствии регулярного мониторинга, может привести к просадке морского дна. Неконтролируемая просадка морского дна серьезно осложняет освоение месторождений и приводит к таким негативным последствиям как уменьшение клиренса платформ, выведение из строя скважин, смятие обсадных колонн, деформация трубопроводов и т.д. Информация о просадке морского дна широко используется для уточнения существующих геомеханических моделей месторождения путем сравнения смоделированного динамического поведения поверхностного пласта с полевыми измерениями.

Мониторинг просадки дна, как правило, осуществляется локально на платформе, однако данные о просадке в масштабах всего бассейна являются ценной информацией. Сейсмический мониторинг по технологии OBN (Ocean Bottom Node) позволяет получить информацию о просадке дна для всего бассейна посредством сравнения горизонтов на опорных и повторных глубинных мигрированных изображениях [Stopin et al., 2010]. Однако из-за ряда причин (сезонное изменение температуры и солености в водной толще, неточность координат источников, приливы, ошибки статических поправок на источник и т.д.) эти результаты содержат ложную информацию и артефакты, возникающие в процессе обработки сейсмических данных [Wu et al., 2012].

В этой работе мы предлагаем оригинальный способ определения крупномасштабных изменений скорости среды, потенциально указывающих на наличие просадки морского дна. Способ включает построение трасс виртуального источника (ВИ) рефрагированных волн, определение изменений на опорных и повторных трассах ВИ и инверсию этих изменений в скоростные аномалии среды. Вычисленные таким образом аномалии оказываются нечувствительными к неточностям определения скорости в покрывающем слое воды и шуму, связанному с источниками. Предлагаемый метод также может быть использован для контроля качества статических поправок на приемник.

Метод

Рассмотрим модель глубоководного месторождения, типичную для района Мексиканского залива. Модель состоит из слоя воды, слоя осадочных пород и системы соляных тел содержащей резервуар углеводородов (Рис. 1). Добыча нефти и газа из резервуара вызывает просадку морского дна и возникновение характерных низкоскоростных аномалий в осадочном слое. Предполагается использование схемы наблюдений OBN, при которой источники (пневмопушки) располагаются на поверхности моря, а приемники (сеть донных сейсмических станций) помещены на морское дно.

Сейсмический мониторинг подразумевает проведение серии наблюдений, разнесенных по времени. Будем считать, что опорные данные были получены до начала добычи углеводородов, а повторные данные спустя некоторое время после начала добычи. Если бы данные не были осложнены 4D шумом, то возможные изменения в повторных данных (относительно опорных данных) должны быть отнесены к аномалиям в осадочном слое и

резервуаре. Основными источниками 4D шума являются: скоростные аномалии в водной толще, обусловленные сезонными изменениями температуры, солености и т.д., погодные условия, разница в спектральном составе и воспроизводимость системы наблюдений в опорных и повторных экспериментах. Кроме того, восстановление полезного 4D сигнала осложнено такими факторами, как неточность определения координат источников и донных станций, неправильная статическая поправка на источник/приемник. Также серьезную проблему представляет дрейф внутренних часов донных станций [Hatchell and Mehta, 2010]. Мы предлагаем использовать следующую методику для выделения полезного 4D сигнала.



Рис. 1 Модель глубоководного месторождения. МВИ позволяет построить ВИ рефрагированных волн из донной станции "А" в станцию "В"

Шаг 1: Построение виртуального источника рефрагированных волн. Метод виртуальных источников (МВИ) [Bakulin and Calvert, 2006] позволяет подавить влияние скоростных аномалий в водной толще. В результате применения метода получаются данные, отвечающие новой конфигурации: источники расположены в положениях донных станций. Технически процесс построения ВИ рефрагированных волн из приемника "А" в приемник "B" (Puc. 1,2) сводится к кросс-корреляции волнового поля прямой волны, зарегистрированного в приемнике "А" и рефрагированной волны в приемнике "B", и последующему суммированию полученной корреляционной функции по всем источникам в окрестности так называемой стационарной точки (точки выхода на поверхность луча, проходящего из "B" в "А"). Восстановленное таким образом поле является полем рефрагированной волны из ВИ в приемник, построенным в лучевом приближении. ВИ обладает рядом преимуществ. Поле ВИ нечувствительно к изменениям в расстановке источников на поверхности и ошибкам в статических поправках за источник. Кроме того за счет выбора источников можно создать ВИ с определенной направленностью, что позволяет избежать интерференции прямых и рефрагированных волн на малых выносах.



Рис. 2 Метод виртуального источника. Для построения трассы виртуального источника из донной станции "A" в станцию "B" зарегистрированные в станции "A" прямые волны коррелируют с рефрагированными волнами в станции "B". В результате суммирования трасс коррелированной сейсмограммы получается искомая трасса виртуального источника. Синие линии обозначают временное окно, красные линии показывают апертуру суммирования.



Рис. 3 Временные сдвиги из-за ошибок статических поправок на приемник

Шаг 2: Выделение 4D временных сдвигов. МВИ применяется к опорным и повторным данным, в результате чего получаются виртуальные источники рефрагированных волн. Благодаря свойствам ВИ, временные сдвиги на этих трассах не чувствительны к изменениям в слое воды и ошибкам в координатах и статических поправках за источник. Хотя в теории импульс виртуального источника должен быть симметричным, что частично решает проблему разницы спектрального состава трасс, на практике (Рис. 2) из-за ограниченного количества источников, неточности определения стационарных точек, временных окон и др. трассы ВИ несимметричны и имеют незначительный фазовый сдвиг. Поэтому мы предлагаем вычислять временные сдвиги с помощью взвешенной нормы кросс-корреляции [van Leeuwen and Mulder, 2010], нечувствительной к фазовому сдвигу сигналов.

Шаг 3: Статистическая обработка 4D временных сдвигов. Временные сдвиги для множества пар ВИ – приемник образуют панели 4D временных сдвигов. Дальнейшая обработка панелей основана на статистических методах и базовых физических принципах, и направлена на подавление эффектов вызванных неповторяемостью положений донных станций, ошибками статистических поправок, неточностью координат донных станций. Например, согласно принципу взаимности, время пробега виртуальной рефрагированной волны из станции "A" в станцию "B" Т_{АВ} должно совпадать с временем пробега Т_{ВА} из станции "B" в станцию "A" (Рис. 3). Статическая поправка на приемник (постоянный временной сдвиг Δt_A , примененный ко всем трассам станции "A") влияет на время пробега виртуальной рефрагированной волны. Разница времен $\Delta T_{AB} = T_{AB} - T_{BA}$ позволяет восстановить статические поправки на приемник, т.к. $\Delta T_{AB} = 2(\Delta t_B - \Delta t_A)$. Полная последовательность обработки временных панелей представлена схематически на Рис. 4.





Рис. 4 Схема обработки панелей 4D временных сдвигов



Восстановление скоростных аномалий

Рассмотренные выше временные сдвиги используются в качестве входных данных алгоритма нелинейной инверсии [Abakumov et al., 2014] для вычисления скоростных аномалий. Суть алгоритма состоит в минимизации невязки между 4D временными сдвигами и смоделированными временными сдвигами (разницей между временами прихода рефрагированных волн в опорной и повторной скоростных моделях). Пример работы алгоритма показан на Рис. 6. Восстановленное изображение позволило локализовать зону аномалии, как латерально, так и по глубине и восстановить скоростные характеристики аномалии с высокой степенью точности.



Рис. 6 Правильная (слева) и восстановленная (в центре) скоростные аномалии и соответствующие значения скоростей вдоль трех профилей (справа).

Заключение

В данной работе предложен метод восстановления малоглубинных скоростных аномалий на основе 4D OBN данных. Оригинальность метода состоит в том, что восстановление скоростных аномалий производится путем обращения временных сдвигов на опорных и повторных трассах виртуального источника рефрагированных волн, что обеспечивает устойчивость метода к скоростным аномалиям в вышележащем слое воды и ошибкам координат источников. Восстановленные аномалии, наряду с измерениями с помощью автономных подводных аппаратов и датчиков давления, являются дополнительной информацией для лучшего понимания процесса просадки и повышения качества геомеханических моделей. Предложенный метод также может быть использован для контроля качества статических поправок на приемник.

Благодарности

Авторы благодарны Shell International E&P за финансовую поддержку проекта (грант CTDF RUG1-30027-ST-12).

Список литературы

- Abakumov, I., Kiyashchenko, D.A., Kashtan, B.M. [2014] Time-lapse Anomalies Reconstruction via Joint Inversion of Direct Waves and Reflection Images, 76th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, 2014, Extended Abstract, Th G102 02
- Bakulin, A., and R. Calvert [2006] The virtual source method: theory and case study, Geophysics, 71.
- Hatchell, P. J. and K. Mehta [2010] Ocean Bottom Seismic (OBS) timing drift correction using passive seismic data, 80th Annual SEG meeting, Expanded Abstracts, 29, 2054-2058

- Stopin, A., Hatchell, P., Beal, E., Gutierrez, C., Lepre, L., Correa, H., Corcoran, C., and G. Soto [2010] Fast OBS processing for imaging and time lapse monitoring, presentation in Shell Geophysics Conference 2010 and abstract in Shell Journal of Technology, EP 2010-7023
- van Leeuwen, T., and W. A. Mulder [2010] A correlation-based misfit criterion for wave-equation traveltime tomography. Geophysical Journal International, 182, 1383–1394.
- Wu, H., Kiyashchenko, D., Hatchell, P., Wang, K., Tatanova, M., Beal, L., Chang, G., and B. Rowley [2012] Re-processing to Maximize Value of Mars 4D OBS and i4D surveys, presentation in Shell Geophysics Conference 2012

МЕТОД ОБРАЩЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ РЕФРАГИРОВАНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ СРЕДЫ

<u>Пономаренко Андрей Валерьевич¹</u>, Каштан Борис Маркович¹, Мулдер Вим Александр^{2,3}

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет. Санкт-Петербург, Россия

²Делфтский технический университет. Делфт, Нидерланды

³Компания Shell Global Solution International, Райсвик, Нидерланды

Введение

Метод обращения интерференционных поверхностных волн применяется для восстановления скоростного строения среды, а также для получения начальной скоростной модели для метода полного обращения волнового поля. Для аппроксимации строения среды обычно используется упругая горизонтально-однородная слоистая модель.

В качестве альтернативы многослойной модели, в настоящей работе предложен вариант описания скоростного строения исследуемой среды одной из двух акустических скоростных моделей, в которых основные части разреза представляются гладким скоростным профилем. Первая модель - свободный слой с линейным уменьшением с глубиной квадрата медленности, лежащий на однородном полупространстве, однослойная модель. Вторая аналогичная первой двухслойная модель, в каждом слое которой изменение скорости происходит по закону линейного уменьшения с глубиной квадрата медленности. В моделях отсутствуют скачки значений скорости и плотности на границах между слоями и на границе с однородным полупространством. Волновое поле в таких моделях в основном состоит из интерферирующих кратных рефрагированных волн. Для акустической среды с линейным уменьшением с глубиной квадрата медленности существует простое аналитическое решение (Бреховских, 1973, [1]), позволяющее выписать для рассмотренных моделей дисперсионные уравнения интерференционных рефрагированных волн. Аналогично методу обращения поверхностных волн это позволяет использовать дисперсионные кривые интерференционных рефрагированных волн для восстановления параметров модели и оценки скоростного профиля продольной волны в исследуемой среде.

Теоретические модели и метод инверсии дисперсионных кривых

Рассмотрим двумерную горизонтально-однородную акустическую модель - свободный слой с линейным уменьшением с глубиной квадрата медленности, лежащий на однородном полупространстве. Схема модели изображёна на рисунке 1, (а). Источник сейсмических колебаний находится на глубине z_0 вблизи свободной поверхности, профиль приёмников расположен на той же глубине. Закон изменения скорости в слое с градиентом квадрата медленности выражается следующей формулой: $v_1(z) = v_0/\sqrt{1-az}$, где v_0 - значение скорости на поверхности, а - градиентный параметр, $z - глубина, z \le h$, где h - граница между слоем и однородным полупространством. На границе отсутствуют скачки значений параметров; значение скорости в полупространстве $v_2 = v_1(h)$.

Для рассмотренной модели дисперсионное уравнение интерференционных рефрагированных волн имеет вид:

$$U(\tau)\big|_{z=0} \left\{ V'(\tau)\big|_{z=h} + H\alpha_2 V(\tau)\big|_{z=h} \right\} - V(\tau)\big|_{z=0} \left\{ U'(\tau)\big|_{z=h} + H\alpha_2 U(\tau)\big|_{z=h} \right\} = 0$$
(1)

Здесь $H = (ak_0^2)^{-1/3}$, $\tau = \tau_0 + z/H$, $\tau_0 = H^2(k^2 - k_0^2)$, $\alpha_2 = \sqrt{k^2 - (\omega/v_2)^2}$, $k_0 = \omega/v_0$, $\omega = 2\pi f$,

 $U(\tau)$, $V(\tau)$ - функции Эйри вещественного аргумента τ , f - частота. Подробный вывод этого дисперсионного уравнения приведён в работе Пономаренко и др., 2014, [2].



Рисунок 1 Схематичное изображение рассмотренных моделей среды

На рисунке 1, (б) изображена схема усложнённой двухслойной модели, в каждом слое которой изменение скорости происходит по закону линейного уменьшения с глубиной квадрата медленности. В первом слое $v_1(z) = v_0/\sqrt{1-a_1z}$, где v_0 - значение скорости на поверхности, во втором слое $v_2(z) = v_0/(\sqrt{1-a_1h_1}\sqrt{1-a_2(z-h_1)})$. На границе между слоями, а также между вторым слоем и полупространством отсутствуют скачки скорости. Значение скорости в полупространстве определяется как $v_3 = v_2(h_2)$. Плотность во всей модели полагается одинаковой. Соответствующее дисперсионное уравнение выписывается аналогично уравнению (1), но имеет более сложный вид и не приводится в данном тексте.

Корнями дисперсионного уравнения являются значения фазовых скоростей интерференционных акустических волн, которые могут распространяться в рассмотренных моделях вдоль оси ОХ. В работе рассматриваются только вещественные корни, соответствующие нормальным акустическим модам. Начиная с некоторого значения частоты, называемой частотой отсечки, дисперсионное уравнение для каждой из рассмотренных моделей имеет хотя бы один корень. Для поиска корней дисперсионных уравнений была написана программа, которая определяет интервалы значений фазовой скорости, где левая часть дисперсионного уравнения меняет свой знак, а потом ищет значение корня на выделенных интервалах.

Для обращения дисперсионных кривых использовался функционал невязки в следующем виде (приводим здесь функционал для первой модели, для второй модели он строится аналогично, но зависит от большего числа параметров):

$$F_{j}(v_{0},a,h) = \sqrt{\sum_{i} D_{ij}^{2}(f_{i,j},V_{ij},v_{0},a,h)},$$
(2)

где D_{ij} - значение левой части дисперсионного уравнения (1), вычисленное для каждой точки на дисперсионной кривой – частоты f_{ij} и значения фазовой скорости V_{ij}; при этом i- номер точки на дисперсионной кривой, а j - номер самой дисперсионной кривой.

Способ задания функционала невязки на основе значений левой части дисперсионного уравнения впервые был представлен в работе Maraschini et al, 2008, [3]. При истинном значении параметров (близким к истинным) каждое из слагаемых D_{ij} обращается в нуль (становится малым), таким образом, достигается глобальный минимум функционала.

Примеры обращения дисперсионных кривых и оценки скоростного строения среды

Процедура обращения волнового поля интерференционных рефрагированных волн сводится к следующему: вычисляется пространственно-частотное спектральное преобразование от исходных данных, производится пикирование наблюдаемых дисперсионных максимумов и их последующая инверсия в рамках одной из рассмотренных моделей с градиентом квадрата медленности. Инверсия проводится методом минимизации функционала вида (2).

Рассмотренный метод может быть применён для оценки скоростного профиля продольной волны в акустических, а также упругих средах с малым отношением значения скорости поперечной волны к скорости продольной волны.

В работах Пономаренко и др., 2014, [2] и Ponomarenko et al, 2013, [4]; представлен результат тестирования метода для восстановления профиля скорости продольной волны на численных данных в программе REM2D, предоставленной университетом г.Гамбург. В качестве примера была показана возможность инверсии дисперсионных кривых однослойной модели с линейным градиентом квадрата медленности и проведена оценка профиля скорости продольной волны для упругой среды с малым отношением значения скорости поперечной волны к значению скорости продольной волны.

В работе Ponomarenko et al, 2013, [5] представленный метод обращения дисперсионных кривых интерференционных рефрагированных волн в рамках однослойной модели с линейным уменьшением квадрата медленности был применён также для оценки профиля

скорости продольной волны по реальным данным. Полученная оценка хорошо согласуется с ответом, полученным в рамках классической многослойной модели, состоящей из однородных акустических слоёв. На рисунке 2, (а) представлено сравнение результатов инверсии в рамках классической многослойной модели (красный профиль) с лучшим из результатов инверсии в рамках однослойной модели с линейным уменьшением квадрата медленности. Синий и зелёный профили соответствуют результатам инверсии разных групп пикированных максимумов. На рисунке 2, (б) представлено сравнение многослойного профиля с лучшим результатом инверсии в рамках двухслойной модели с линейным уменьшением квадрата медленности в каждом слое.



Рисунок 2 Сравнение результатов в рамках классической многослойной модели и в рамках однослойной (а) и двухслойной (б) модели с линейным уменьшением квадрата медленности

Обе полученные оценки хорошо согласуются с многослойным решением, описывая профиль скорости не столь детально, но значительно меньшим количеством параметров.

Применение рассмотренной однослойной модели с линейным уменьшением с глубиной квадрата медленности в качестве начальной модели для метода полного обращения волнового поля в акустической среде

Метод полного обращения волнового поля – это современный метод для детального восстановления внутреннего строения среды, используемый в сейсмических исследованиях. Однако, для надёжного восстановления параметров среды методом полного обращения волнового поля необходима начальная модель. Модель с градиентом квадрата медленности по глубине может быть использована в качестве такой начальной модели. При этом основными преимуществами её применения являются наличие относительно простого аналитического решения и отсутствие необходимости в сглаживании полученной модели. В работе Ponomarenko et al, 2014, [6] на численных примерах показана возможность использования однослойной модели с градиентом квадрата медленности как начальной скоростной модели для метода обращения полного волнового поля в акустической среде.

Заключение

Предложенный в работе метод позволяет уменьшить количество искомых параметров для оценки скоростного строения среды, а также получить гладкую начальную модель для

метода полного обращения волнового поля. Результаты работы могут быть применены в различных задачах геофизики, для дополнения и усовершенствования уже существующих методов по определению скоростного строения исследуемой среды: в сейсморазведке, сейсмологии, приповерхностной инженерной геофизике. Полученные результаты представляют интерес в качестве расширения уже имеющегося математического аппарата по описанию распространения упругих волн в неоднородных средах.

Литература

1. Бреховских Л.А. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

2. А.В.Пономаренко, Б.М.Каштан, В.Н.Троян, В.А. Мулдер. Восстановление профиля скорости продольной волны методом обращения поверхностных волн. // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 4: Физика, Химия, 2014. Вып.2. С. 21-32.

3. Maraschini, M., Ernst, F., Boiero, D., Foti, S. and Socco, L.V. A new approach for multimodal inversion of Rayleigh and Scholte waves. 70th EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts, 2008, D036, Rome, Italy

4. Ponomarenko, A.V., Kashtan, B.M., Troyan, V.N. and Mulder, W.A. Surface Wave Inversion for a P-wave Velocity Profile via Estimation of the Squared Slowness Gradient. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013, Extended Abstracts, 2013, We P02 10, London, UK

5. Ponomarenko, A.V., Kashtan B.M., Troyan V.N. and Mulder W.A. Estimation of the Pwave Velocity Profile of Elastic Real Data Based on Surface Wave Inversion. Near Surface Geoscience 2013, Extended Abstracts, 2013, We P 26, Bochum, Germany

6. Ponomarenko, A.V., Kashtan B.M., Troyan V.N. and Mulder W.A. Squared-slowness Gradient Profile from Surface-wave Inversion as a Starting Model for Full-waveform Inversion. Near Surface Geoscience 2014, Athens, Greece, We PA1 16

Многокомпонентные сейсмические исследования в морской геофизике Авторы: Н.Т. Дергунов, И.А. Матвеев, С.С. Унчур, С.Н. Кашубин, Е.В. Сидоренко. Докладчик – И.А. Матвеев, инженер ОАО «Севморгео»

Многокомпонентные сейсмические исследования на море открывают возможность работы с многоволновой сейсморазведкой (MBC). Основные положения MBC включают в себя совместное применение P- и S- волн для целей прогноза УВ. Так-же применение многоволновой сейсморазведки способствует дифференциации геологического разреза, появляется возможность более точного определения плотности горных пород и ориентации трещин в геологической среде. Совместный анализ скоростей продольных и обменных волн позволяет выделять аномалии, связанные с пониженным отношением Vp/Vs, которые могут связываться с наличием флюида. Совместная обработка H и Z компонент позволяет получить более разрезы по причине подавления реверберации в водном слое. На рисунке

1 представлен разрез по суммарной HZ компоненте, на рисунке 2 разрез по радиальной X компоненте (при помощи волн обмена)



Рис.1. Временной разрез отраженных волн по компонентам НZ профиль 1501418.



Рис.2. Временной разрез обменных отраженных волн X компонента после коррекции статики по профилю 1501418.

В докладе продемонстрированы примеры волновых полей и примеры их обработки, в рамках комплекса Paradigm, многокомпонентных записей полученных с помощью АДСС Fairfield Z700 на акватории Обской губы в 2014 году. Получены 4х компонентные сейсмограммы, которые в себя включают данные по H-гидрофону и X-Y-Z- геофонам. H- и Z- компоненты позволяют работать с продольными P волнами, а XY открывают возможность работы с обменными PS волнами. Приведены предварительные результаты обработки многокомпонентных записей на акватории Обской губы всех компонент, а также опытного профиля, сейсмические записи которого получены с помощью многокомпонентной донной косы на месторождении «Адапту» в Охотском море.

Предложение к проекту решения

После выполнения научно исследовательских работ ОАО «Севморгео» в области многоволновой морской сейсморазведке, были сделаны следующие выводы, и предложения в целях улучшения качества получаемого материала.

Улучшения методики полевых работ

Необходимо увеличить базу наблюдения (так как обменные волны лучше прослеживаются на больших удалениях).

- С целью облегчения выделения обменных волн и для более точного скоростного анализа целесообразно уменьшение расстояния между пунктами приема (так как скорости обменных волн ниже, чем у продольных волн).
- Необходимо увеличить длину записи (так как целевые горизонты на обменных волнах могут быть регистрированы на временах до 12 с)

Улучшения методики обработки

- Необходимо совершенствовать способы селекции (выделения) обменных волн
- Необходимо улучшить способы расчета и коррекции статических поправок для обменных волн
- Необходимо выполнять миграцию обменных волн.

Вывод.

Многокомпонентные исследования с помощью 4-х компонентных АДСС могут прочно войти в практику морской сейсморазведки, так как это существенно не удорожает этап полевых работ. При совместном использовании сейсмических записей гидрофона и вертикальной компоненты геофона возможно получение более разрешенных и информативных разрезов продольных волн. Для результативной обработки и более эффективного использования обменных волн в интерпретации необходимым условием является наличие многоволнового каротажа в скважинах. Обменные волны можно использовать для уточнения отдельных участков исследуемого объекта и в целях более точного нахождения углеводородов объектов.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 3D 2C НА ШЕЛЬФЕ

ПЕЧЕРСКОГО МОРЯ

<u>Никульников Алексей Юрьевич</u>, Нурмухамедов Тимур Ваисович, Горбачев Сергей Викторович

ООО «РН-Шельф-Арктика», г. Москва

Изучение Арктического шельфа является одной из приоритетных задач, стоящих перед крупными российскими нефтяными компаниями. Обширная акватория со сложными климатическими и сейсмогеологическими условиями определяет необходимость применения различных технологий сейсморазведки (буксируемое и донное оборудование). Эффективность выбранной технологии и методики [1, 6] проведения полевых работ может кардинально различаться в зависимости от района исследований, природно-климатической обстановки и геологических задач. В свою очередь, последующая обработка данных является важным этапом, иногда требующим нестандартных технологических решений в зависимости от типа и качества полевого материала.

В рамках данной работы представлен пример обработки сейсморазведочных данных 3D, полученных на шельфе Печорского моря с использованием двух компонентного донного оборудования. Исследуемый район находится в прибрежной зоне и характеризуется глубинами моря от 5 до 30 м. Сейсмогеологические условия и небольшая глубина морского дна приводят к тому, что в зарегистрированном волновом поле наблюдается интенсивный фон кратных волн. В данных условиях применение технологии двухкомпонентной регистрации сейсмических данных является наиболее технологичным решением [3]. Сейсмическая запись, полученная с помощью датчиков различного типа (геофона и гидрофона), дает возможность разделить поле на восходящие и нисходящие волны, а последующая обработка позволяет эффективно подавить кратные волны от водного слоя [2, 4, 5].

При обработке двухкомпонентных данных, применяется процедура РZ суммирования (в ряде случаев обозначается как De-ghosting), состоящая из нескольких шагов. Геофон (Z) измеряет скорость, а гидрофон (P) изменение давления, поэтому на первом этапе данные необходимо привести данные в единую область. После этого, с целью компенсации различного уровня амплитуд записи P и Z компонент (из-за отличающейся чувствительности датчиков разного типа) [7], рассчитываются и применяются к данным масштабирующие коэффициенты. Далее, для компенсации фазово-частотных характеристик, выполняется оценка формы импульса каждой компоненты и вычисляется согласующий фазовый фильтр. После приведения амплитудно-частотных и фазовых характеристик записей, данные гидрофона и геофона суммируются (рис. 1).



Рис. 1. Схема работы процедуры РZ-суммирования: А – запись геофона; Б – запись гидрофона; В – сейсмическая запись после РZ-суммирования.

В ходе анализа исходных данных двух компонент и предварительного тестирования РZ суммирования был сделан вывод о низкой эффективности работы данной процедуры в связи с большим количеством волн-помех различной природы. Поэтому было уделено особое внимание подготовке данных к PZ суммированию. Изначально, данные геофона и гидрофона значительно различались уровнем случайных помех. Запись Z компоненты (рис. 2A) была осложнена интенсивными низкочастотными шумами по всей площади, вызванными

особенностями строения верхней части разреза. При этом случайные помехи в волновом поле компоненты Р (рис. 2Б) характеризовались более широким диапазоном частот и меньшей амплитудой. Был разработан адаптивный подход к подавлению помех, позволивший для каждой компоненты максимально качественно и корректно их ослабить при сохранении динамики сигнала.

Б



Рис. 2. Фрагмент исходных сейсмограмм: А – геофонов (компонента Z); Б – гидрофонов (компонента P).

Еще одним важным моментом подготовки данных для PZ суммирования является выполнение процедуры сигнатурной деконволюции (подавления вторичных пульсаций) для каждой из компонент. Как правило, эта процедура применяется только для записи гидрофона. В случае двухкомпонентной регистрации ее необходимо применять к обеим компонентам. На рисунке 3 показан пример применения сигнатурной деконволюции к данным геофона и гидрофона.

Выполнение PZ–суммирования по стандартной технологии (без предобработки) на имеющемся материале не позволяет получить качественное подавление кратных волн. В результате проведенной предварительной обработки сейсмических данных удалось достигнуть оптимального ослабления помех на компонентах гидрофона и геофона, и как следствие лучшего результата процедуры PZ–суммирования.

По сравнению со стандартной обработкой (рис. 4А), полученный результат (рис. 4Б) характеризуется лучшей прослеживаемостью отражающих горизонтов, динамической выраженностью и вертикальной разрешенностью. Анализ результатов показал, что применение выбранной последовательности процедур перед РZ–суммированием позволило добиться более качественного результата, повлиявшего на эффективность последующих алгоритмов динамической обработки сейсмических данных и интерпретации.



Рис. 3. Результат применения сигнатурной деконволюции к геофону (А – до, Б – после) и гидрофону (В – до, Г - после).



Рис. 4. Фрагменты разрезов после временной миграции до суммирования: А – без предварительной обработки перед РZ-суммированием; Б – с предварительной обработкой перед РZ-суммированием.

Список литературы:

- 1. Горбачев С.В., Титов А.Б.// Комплексный подход при разработке оптимальных технических условий выполнения 3D сейсморазведочных работ в мелководной части шельфа Печорского моря// Приборы и системы разведочной геофизики, 1, 2015.
- 2. Жгенти С.А., Запорожец Б.В., Лещенко Д.П.// Использование синхронного РZ-приема колебаний при сейсморазведке в транзитных зонах для подавления интерференции волн в ближней зоне приемника // Технологии сейсморазведки, 3, 2008.
- 3. Титов А.Б., Горбачев С.В.// Широкоазимутальные сейсморазведочные работы с донным оборудованием на Арктическом шельфе Печерского моря // Сейсмические технологии 2014.
- 4. Al-Saleh S.M., Nietupski D.A.// A robust dual summation method: Application to OBC data from the Arabian Gulf // CSEG National Convention, 2005.
- 5. Hugonnet P., Boelle J.L., Herrmann P., Prat F., Lafram A. // PZ Summation of 3D WAZ OBS Receiver Gathers // 73th EAGE Conference & Exibition, 2011.
- 6. Stewart J, Shatilo A., Jing C., Rape T., Duren R., Lewallen K., Szurek G.// A comparison of streamer and OBC seismic data at Beryl Alpha field, U.K. North Sea // Geophysics, 72, 2007.
- 7. Wang Y., Grion S. // PZ Calibration in Shallow Waters The Britannia OBS Example // 70th EAGE Conference & Exibition, 2008.

Многоканальные фильтры обработки морских 3D наблюдений.

Рябинский Максим Андреевич, Фиников Дмитрий Борисович.

Яндекс. Терра (ООО "Сейсмотек"), Москва.

На прошлогодней конференции "Сейсмические технологии 2014" был представлен доклад П.Гофмана, Д.Финикова "Подавление волн-спутников методом адаптивной рекурсивной фильтрации", в котором был рассмотрен новый нелинейный алгоритм подавления спутника, состоящий из трех этапов:

1. Построение процедуры подавления спутника при сохранении полезного сигнала.

2. Построение процедуры подавления полезного сигнала при сохранении спутника, и преобразование спутника в полезный сигнал.

3. Комбинирование решений с целью подавления помех преобразований.

Этот алгоритм предусматривает реализацию в т-р области с целью правильно учесть зависимость спутника от угла подхода восходящих волн. Подготовка данных для т-р преобразования особенно в 3D случае при нерегулярных наблюдениях – отдельный этап обработки, которого хотелось бы избежать.

Одной из задач настоящего доклада является обобщение рассмотренного метода на разные системы морских наблюдений, данные, полученные с наклонными косами, и так далее.

Другой, не менее важной, задачей исследования мы считаем анализ и разработку эффективных систем наблюдений, которые становятся возможными только при наличии инструментов оптимальной обработки данных, полученных при определенной геометрии источников и приемников. В качестве одного из таких инструментов может быть выбран способ многоканальной фильтрации, основанный на технике расчета кинематических фильтров, которые были предложены в 80-е годы прошлого века В.М. Глоговским и Д.Б. Финиковым для решения задач миграционных преобразований, интерполяции данных и подавления помех.

Критерий кинематической фильтрации для подавления спутника и пересчета волнового поля на дневную поверхность в случае 2D наблюдений можно представить следующим образом:

$$J(f) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha \int dt \left(\sum_x \left(s \left(t - \alpha x \right) - \sigma s \left(t - \gamma_\alpha x - \beta_\alpha \right) \right) * f(x, t) - s \left(t - \frac{\beta_\alpha}{2} \right) \right)^2 \to \min$$

Здесь $s(t-\alpha x)$ – отраженный сигнал, $s(t-\gamma_{\alpha}x-\beta_{\alpha})$ – спутник отраженного сигнала, $s\left(t-\frac{\beta_{\alpha}}{2}\right)$ – полезный сигнал на дневной поверхности, σ – коэффициент учета спутника, f(x,t) – искомый многоканальный фильтр. Данный критерий очевидным образом можно обобщить на случай 3D наблюдений, заменив лучевые параметры α , γ_{α} , а также координату x соответствующими двумерными векторами.

Сразу отметим, что приведенный критерий основан на квадратичной норме. Разработка фильтров, оптимальных в других нормах, ждет своего исследователя. В связи с этим все выводы по оптимизации системы наблюдений на основе кинематических фильтров также основаны на принятом при их расчете критерии оптимальности.

Принцип получения разных решений с их последующей комбинацией, предложенный П.Гофманом, Д.Финиковым, легко реализуется и в технике многоканальной фильтрации. В случае 2D наблюдений с горизонтально погруженными косами новый способ вряд ли обладает особыми преимуществами и, даже, может уступать своему прототипу. Дело в том, что нелинейная комбинация результатов в области т-р разложения может быть эффективнее по конечному результату, чем аналогичное преобразование результатов оптимальной линейной фильтрации. Однако следует отметить, что для обработки 3D данных предлагаемая нами процедура представляется более технологичным решением, а, например, для обработки наблюдений на наклонной косе мы альтернативы не видим.

Кинематические фильтры могут решать многие задачи подавления помех и трансформации волновых полей. В морской сейсморазведке они перспективны при обработке многокомпонентных донных наблюдений. Операторы фильтров могут быть оптимизированы на любую геометрию наблюдений. Тем не менее, когда фильтр становится переменным по пространственным координатам, существенно возрастают затраты на расчет операторов. Оптимизация вычислений, создание библиотек фильтров для заданной расстановки, распараллеливание вычислений и их распределенная реализация,
использование эффективных программ и алгоритмов для проведения расчетов – все это немалый круг задач, решаемых при индустриализации обсуждаемой в докладе технологии.

Применение нелинейной (адаптивной) процедуры суммирования двух результатов подавления спутника допускает и получение двух вариантов ответов: с предохранением полезного сигнала (ценой неполного подавления помехи) и, наоборот, более глубокого подавления шумов при некотором искажении сигнальной компоненты. Такого рода возможности демонстрируются в докладе.

Для иллюстрации идеи метода приведем изображения операторов фильтра.



Рис. 1. Изображения операторов фильтра.

Слева на рис.1 показан оператор подавления спутника, осуществляющий, одновременно, поднятие поля на дневную поверхность. Справа оператор, трансформирующий спутник в сигнал и подавляющий сигнал как спутник (результат также поднимается на дневную поверхность). Операторы посчитаны для горизонтальной косы, заглубленной на 40 м. Для наклонной косы – операторы являются переменными вдоль координат приема на сейсмограмме ОПВ.



Рис. 2. Модельная сейсмограмма со спутником и результат фильтрации.

На рис.2 показаны модельная сейсмограмма и «комбинированный» результат подавления спутника. В докладе будут показаны примеры работы программы при наличии разного рода помех, не описывающихся моделью спутника (собственно, ради устойчивости к такого рода помехам и разработана технология комбинирования разных ответов).

В докладе анализируются результаты подавления спутника для горизонтальной косы, для наклонной косы и для системы заглубленных горизонтальных кос. Показано, что если разделение волн производится оптимальным фильтром, то наблюдения на наклонной косе имеют некоторые преимущества при обработке сейсмограмм по сравнению с наблюдениями на горизонтальной косе. Эти преимущества проявляются на волнах с высокими кажущимися скоростями (спутник на наклонной косе приобретает меньшую кажущуюся скорость).

Система наблюдений с наклонной косой создает дополнительные сложности при обработке получаемых данных, но на малых удалениях обеспечивает лучшее подавление помех. Перспективна система наблюдений, состоящая из нескольких заглубленных горизонтальных кос. Нам трудно судить, осуществима ли такая система наблюдений на практике (это вопрос инженерный), но с точки зрения подавления помех вертикальное группирование выглядит очень привлекательным.

Возможности современной переобработки архивных сейсмических материалов в Восточной Сибири Мосягин Евгений Вячеславович

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья/ФГУП СНИИГГиМС/г. Новосибирск

ФГУП "СНИИГГиМС" ведет работы по комплексному изучению строения рифейкембрийских отложений Восточной Сибири. Собран огромный массив информации, который продолжает пополняться. Для эффективного изучения строения отложений, исследователям должна быть доступна систематизированная информация как можно большего объема. И эта информация должна быть представлена в современном, удобном виде, с быстрым доступом и возможной коррекцией. Под эту задачу в Геофизическом центре (ГЦ) ФГУП "СНИИГГиМС" создан уникальный интерпретационный проект в программном комплексе Kingdom (IHS, USA), включающий необходимую базу сейсмических данных МОГТ 2Д и данных бурения по всей Восточной Сибири. Объем сейсмической информации превышает 200 000 пог.км. МОГТ 2Д.

Результаты сейсморазведочных работ МОГТ-2Д, проведенных в разные годы на территории Сибирской платформы показывают, что значительная часть полученных временных разрезов характеризуется недостаточной информативностью и не может обеспечить надежного решения поставленных геологических задач. Этому может способствовать ряд причин. Одна из основных, это неблагоприятные сейсмогеологические условия – резконеоднородное строение верхней части разреза, характеризующееся повышенной мощностью обломочных туфогенных образований триаса и наличием трапповых интрузий разнообразной конфигурации. Еще одной причиной являются неоптимальные параметры системы наблюдения, особенно это касается материалов, полученных в 80-90-е годы. Нельзя также сбрасывать со счетов и несовершенство применяемых алгоритмов и графов обработки. Так или иначе, на сегодняшний день мы имеем совокупность временных разрезов ОГТ, полученных по профилям разных лет при всём многообразии методик, применяемых при проведении полевых работ. При этом первичный материал был обработан различными организациями, что свидетельствует о различиях в программном обеспечении, подходах к учету ВЧР и графах обработки. Практика подтверждает – результаты обработки одного и того же профиля разными организациями могут существенно отличаться. Нередки случаи, когда сложность вызывает даже отождествление волновых картин пересекающихся профилей. По этим причинам в ГЦ ФГУП "СНИИГГиМС" выполняется большой объем работ по переобработке архивных материалов.

Использование современных средств и методик при переобработке материалов, как правило, позволяет получить временные разрезы с сохранением динамических особенностей сейсмической записи, а также повысить их временную и пространственную разрешенность. Кроме того, использование единых подходов к обработке материалов, полученных на смежных площадях в разные годы, позволяет решить проблемы увязки сейсмических разрезов.

Для обработки сейсмических данных в ГЦ ФГУП "СНИИГГиМС" используются два программных комплекса ProMAX (Landmark) и Geocluster v5100 (CGG). Кроме того, активно применяются внесистемные процедуры пакета обрабатывающих программ BONUS (авт. Евдокимов А. А.). Поскольку каждый пакет программ имеет свои плюсы и минусы, была построена такая схема обработки, при которой используются наиболее эффективные процедуры разных программных комплексов.

Анализируя результаты обработки прошлых лет можно выделить несколько основных особенностей и проблем имеющихся временных разрезов:

- 1. наличие недоучтенных статических аномалий;
- соотношение амплитуд в вертикальном направлении существенно искажено вследствие применения автоматической регулировки усиления (АРУ) как по сейсмограммам до суммирования, так и по разрезам;
- 3. узкий частотный диапазон;
- 4. присутствие интенсивных кратных волн (зачастую вычитание кратных волн не проводилось в принципе);
- 5. наличие на разрезах вертикальных зон отсутствия видимых отражений;
- 6. неудовлетворительная увязка профилей, обработанных разными организациями.

Причины возникновения этих проблем частично лежат в области обработки данных, поэтому переобработка материалов на современном уровне, как правило, позволяет повысить информативность временных разрезов.

Учет неоднородностей ВЧР. Этот этап является одним из важнейших составляющих процесса обработки, во многом предопределяющий информативность полученных разрезов. Для решения этой задачи у нас получил распространение следующий подход: на первом этапе выполняется построение модели ВЧР по преломленным волнам и расчет статических поправок, затем, при необходимости, на более позднем этапе обработки дополнительно выполняется замещение слоя по отраженной волне.

В качестве основного мы используем подход с корреляцией первых вступлений преломленных волн по сейсмограммам. Контроль перехода на фазу осуществляется по сейсмограммам в сортировках общего пункта приема и равных удалений. Для построения модели ВЧР и расчета поправок используется приложение GeoStar (CGG), которое позволяет строить модель верхней части по сети 2D линий, чтобы получать согласованные по площади статические поправки. Исходная модель уточняется с помощью пластовой или томографической инверсии. Кроме того, алгоритм допускает инверсию скоростей при построении модели, что позволяет описывать сложные среды.

Нередки случаи, когда после учета ВЧР по преломленным волнам на разрезах остаются временные аномалии, имеющие согласованный характер для верхних и нижних горизонтов. Это может быть вызвано недоучетом погруженных скоростных неоднородностей. В таких случаях дополнительно может быть использована процедура замещения слоя по отраженной волне. В верхней части разреза прослеживается отражающий горизонт, по горизонтальным спектрам оценивается средняя скорость до него, затем выполняется замещение слоя (желательно кинематическое) от поверхности до прослеженной границы.

Хорошим контролем статических и динамических невязок по профилям служит тот факт, что каждый геофизик-обработчик анализирует результаты своей работы на разных этапах в специально созданном едином интерпретационном проекте. Такой подход позволяет специалистам видеть общую картину всех обрабатываемых профилей, согласовывать свою работу и оперативно исправлять возможные ошибки.

Обработка с сохранением относительных амплитуд. Выполнение обработки с сохранением относительных амплитуд подразумевает получение разрезов, на которых амплитуды

волнового поля в вертикальном направлении адекватны коэффициентам отражения среды. Мы можем говорить о сохранении амплитуд лишь в некотором приближении, поскольку данная задача не может быть полностью решена в рамках тех данных, которыми мы располагаем. Тем не менее попытка сохранить амплитуды предполагает использование в графе обработки поверхностно-согласованных процедур деконволюции и нормировки амплитуд, отказ от применения процедур типа АРУ, что предъявляет повышенные требования к эффективному подавлению всех типов волн-помех. Однако отсутствие в популярных программных пакетах эффективных процедур подавления высокоамплитудных помех и поверхностно-согласованной нормировки амплитуд вынуждает применять пред суммированием процедуры типа АРУ. Помимо искажения динамических характеристик волнового поля, подобные процедуры никак не учитывают свойства помехи и области ее присутствия на сейсмограммах, поэтому по возможности должны быть исключены из графа обработки.

Подавление помех. В нашем графе обработки для эффективного подавления высокоамплитудных помех мы используем процедуры пакета BONUS, а в качестве двумерных процедур для подавления регулярных и случайных помех – сочетание процедур пакетов ProMAX и Geocluster. На рисунке 1а приведена исходная сейсмограмма, обработанная двумя разными способами. Первый способ состоял в использовании для обработки сейсмограмм только стандартных процедур комплекса ProMAX. Помимо компенсации геометрического расхождения были применены поверхностно-согласованные процедуры деконволюции и нормировки сейсмограмм, а так же комплекс процедур по подавлению различных типов волн-помех (рис. 16, 1в). Второй способ предполагал комплексирование процедур пакетов ProMAX, Geocluster и BONUS, APУ не применялась (рис.1г). Очевидно, что применение подхода с использованием широкого набора процедур разных пакетов позволило более аккуратно и качественно подавить помехи. В дальнейшем, решение кинематической задачи по таким сейсмограммам будет более эффективно и корректно.



Рис. 1. Исходная сейсмограмма (а), обработка в ProMAX без АРУ (б), обработка в ProMAX с АРУ (в), обработка в ProMAX, Geocluster и BONUS, АРУ не применялась (г)

Миграция до суммирования. Еще одним важным этапом является учет сейсмического сноса, которым иногда пренебрегают при обработке данных в Восточной Сибири либо выполняют этот этап весьма формально. На рисунке 2a приведен разрез обработки прошлых лет, с миграцией по суммарному разрезу. В ходе переобработки была применена временная

миграция до суммирования с уточнением скоростей миграции по сейсмограммам и получен разрез (2б). Оценить вклад только процедуры миграции по окончательным разрезам конечно сложно, но он весьма существенен.

Основные выводы:

• При работе на обширных территориях обработка сейсмических данных в рамках единого подхода позволяет получить разрезы, согласованные по фазовым и динамическим характеристикам, что существенно упрощает процесс дальнейшей интерпретации материалов;

• В результате переобработки архивных сейсмических материалов МОГТ, как правило, удается повысить информативность временных разрезов и получить прирост геолого-геофизической информации;





Рис. 2. Временной разрез обработки 2008 года, обработка с АРУ (а), результат переобработки

Рис. 3. Временной разрез обработки 2004 года, обработка с АРУ (а), результат переобработки с сохранением амплитуд (б), амплитудно-частотные спектры (в)

УСТОЙЧИВАЯ ПОВЕРХНОСТНО-СОГЛАСОВАННАЯ ДЕКОНВОЛЮЦИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ Авторы: Адамович О.О., Лаптев Я. В., Тинакин А. О., Журавко Н.С.

ООО «ГеоПрайм»

Современные геологические задачи, решаемые 3D сейсморазведкой, требуют выполнение обработки данных с восстановлением истинного отношения амплитуд отраженных волн при максимальном отношении сигнал/помеха и разрешающей способности. Ярким примером может служить изучение поведения амплитуд в зависимости от удаления (AVO). Это исключает использование на каком-либо этапе процедур, которые невоспроизводимым образом могут изменять истинные амплитуды сигнала. К таким процедурам, в частности, можно отнести потрассную деконволюцию, и что является одной из причин, почему получил распространение метод деконволюции в

поверхностно-согласованном варианте (Surface-consistent deconvolution). Другие причины популярности использования SCDecon заключаются в использовании более стабильных и таким образом (по крайней мере в теории) улучшенных операторов, которые получаются путем оценки спектров трасс и их дальнейшей поверхностно-согласованной декомпозиции.

На практике когерентный шум, например поверхностная волна или различной природы амплитудные выскоки, которые преобладают в большинстве случаев на наземных данных, могут значительным образом исказить оценку поверхностных факторов [1], что приводит к некорректному выполнению деконволюции.

Классический поверхностно-согласованный подход основан на представлении спектра отражённой волны в виде последовательной свертки различных факторов [1]:

$$T_{ij}(\omega) = S_i(\omega) * R_j(\omega) * C_{i+j}(\omega) * O_{i-j}(\omega)$$
(1)

Где Т- спектр сейсмотрассы, S- фактор источника, R-фактор приемника, Cструктурный фактор (ОГТ), O - фактор удаления источник-приемник. Полагая, что все члены уравнения имеют положительные значения (так как это амплитудный спектр) можно привести уравнение (1) к виду:

$$\ln T_{ij}(\omega) = \ln S_i(\omega) + \ln R_j(\omega) + \ln C_{i+j}(\omega) + \ln O_{i-j}(\omega) \quad (2)$$

Объединяя спектры всех сейсмотрасс, мы получаем переопределенную систему уравнений. Традиционно решение системы уравнений (2) выполняется методом наименьших квадратов (или очень грубой аппроксимацией данного метода). Модель, описанная уравнениями (1) учитывает помехи, которые являются общими для источника, приемника, ОГТ или удаления, но не учитывает случайное распределение помех. Это в своем роде становится «узким местом», когда перечисленный выше шум создает ошибки далекие от нормального распределения (распределения Гаусса). К таким ошибкам можно отнести шумы звуковой волны, поверхностной волны, электрические наводки от оборудования и др., амплитуды которых могут быть в несколько раз выше, чем полезный сигнал и могут составлять до нескольких десятков процент от всех трасс.

В самом деле, в большинстве проанализированных примерах реальных данных эти выбросы вызывают неточности, которые могут ослабить «хорошие» трассы в несколько раз. Таким образом, результат разложения (декомпозиции) будет искаженным, а это в свою очередь приведет к некорректному результату деконволюции. Классический подход, реализованный в большинстве программных продуктов, не способен подавить несогласованные шумы, в отличие от потрассного метода, который подавляет любые шумы, конструируя анти-операторы и скалируя их вниз.

Таким образом, при наличии несогласованных помех, результат поверхностносогласованной деконволюции на «хороших» трассах может быть хуже, чем результат потрассной деконволюции, и в то же самое время помехи от «плохих» трасс проходят не ослабевая. Данную проблему можно пытаться решать путем выполнения шумоподавления до деконволюции. Однако, во-первых, зачастую результаты шумоподавления зависят от сбалансированности данных в пространстве, то есть требуют применению деконволюции, во-вторых, практически при любом алгоритме шумоподавления могут происходит искажения однократно-отраженных волны, что с точки зрения поврехностносогласованного подхода равносильно шуму, поскольку что шум, что искаженный сигнал дают неверную оценку левой части системы уравнений (1).

Таким образом, поверхностно-согласованная деконволюция на наземных данных может быть использована совместно со сложным редактированием трасс или в технологической последовательности, которая не сохраняет истинные амплитуды. Однако, благодаря некоторым модификациям, удалось успешно реализовать поверхностно-согласованный подход, принимая во внимания решение проблем, о которых говорилось выше. В его основе лежит 2 фактора [2]:

1. Поверхностно-согласованная декомпозиция, которая дает устойчивое статистически точное решение, даже при наличии несогласованных помех;

2. Робастное применение – сравнение реального и модельного спектра трассы в ходе деконволюции позволяет рассчитать дополнительные операторы, которые трансформируют «шумные» трассы таким образом, что их спектр становится близким к спектру «хороших» трасс после деконволюции.

Разумеется, встает вопрос о контролировании амплитуд в ходе «внедрения» дополнительных операторов, которые «разрушают» истинные сейсмические амплитуды. Однако, отвечая на этот вопрос, стоит отметить [3]:

- 1. Дополнительный оператор приводит спектр обработанных трасс к наиболее вероятному значению;
- 2. Обычно не более 10% всех трасс подвергаются использованию дополнительного оператора;
- 3. При описанном подходе используются небольшие сегменты трассы для любой трассы не более 20% дискретных значений может быть изменено.

Все это означает, что в целом 2% всех дискретов больше не являются истинными амплитудами, но все еще близки по значению к вероятным значениям. Если распределение таких дискретов регулярно, эффект на данных после суммирования или после временной миграции до суммирования остается незначительным. С другой стороны, любая редакция трасс может быть проблематична с точки зрения сохранения амплитуд. Поэтому, использование дополнительных операторов является лучшей опцией в этом случае.

Различные помехи, изменяющие от трассе к трассе, и как следствие, рассчитанные по ним операторы деконволюции могут оказывать критическое воздействие на стабильность поведения фазовой компоненты сигнала. Использование описанного выше подхода позволил нам получить данные с более выдержанной и

устойчивой фазовой характеристикой, а также наиболее пригодными для стратиграфической и динамической (инверсии, AVO).

В ходе выполнения обработки данные 3D сейсморазведки были получены результаты применения робастной поверхностно-согласованной деконволюции, которые были сравнены со стандартной поверхностно-согласованной деконволюцией. На рисунке 1 представлено сравнение сейсмограммы ОПВ после робастной деконволюции, и классической поверхностно-согласованной деконволюцией. Видна лучшая прослеживаемость, амплитуда и фаза выдержанна по латерали. Видимые случайные шумы с аномальными амплитудами подавлены.

На рис.2 представлено сравнение вертикальных сечений куба после робастной и классической поверхностно-согласованной деконволюцией. Хорошо заметен эффект стабилизации амплитуд в пространстве, эффект подавления аномальных амплитуд, а так же изменения фазовых характеристик отраженных волн. Использование алгоритма робастной поверхностно-согласованной деконволюции позволяет стабилизировать форму импульса по площади, а так же подавить значительный уровень случайного шума.



Рис.1. Фрагмент сейсмограммы ОТВ после робастной деконволюции (а), после стандартной поверхностно-согласованной деконволюции (б).

Литература и ссылки:

- 1. Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн. // Геология и геофизика. 1975. № 6. С. 102-112.
- 2. Kirchheimer, F., Ferber R. "Robust surface consistent deconvolution with noise suppression" 71th Ann. Meetg. SEG, San Antonio 2001
- 3. Kirchheimer, F., Ferber R., Holling, M. "Surface consistent deconvolution featuring a robust solver and suppression of inconsistent noise" 2006



(a)



(б)



(B)

Рис.2. Вертикальное сечение куба до деконволюции (а), вертикальное сечение куба после стандартной поверхностно-согласованной деконволюции (б), вертикальное сечение куба после робастной поверхностно-согласованной деконволюции (в).

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ВЧР ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЛУБИННО-СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Давлетханов Ришат Талгатович Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек»), Москва

Подавляющее большинство сейсмических работ направлено на поиск месторождений нефти и газа, которые, как правило, расположены на глубинах в несколько километров. На мигрированных разрезах они проявляются в виде структурных аномалий и аномалий амплитуд. Общеизвестным фактом является то, что эти особенности могут быть связаны вовсе не с глубинными аномалиями, а с приповерхностными. В обработке данных всегда остаётся актуальной проблема их разделения, которую очень часто решают с помощью статических поправок, что отнюдь не всегда приемлемо.

Во многих справочниках и руководствах можно встретить классификацию статических поправок, основанную на отношении *k* размера аномалии ВЧР к длине сейсмической расстановки. В зависимости от величины *k* выделяют три группы поправок:

- короткопериодные (k << 1);
- среднепериодные ($k \approx 1$);
- длиннопериодные (*k* > 1).

Иными словами, короткопериодные аномалии ухудшают качество суммирования, но не искажают существенно формы отражающих горизонтов. Длиннопериодные аномалии, наоборот, слабо влияют на качество суммирования, но искажают структурный план. Именно ввод длиннопериодных статических поправок помогает устранить ложные структурные аномалии (связанные с ВЧР). Однако эти подвижки могут негативно сказаться на последующих глубинных построениях.

В работе показан модельный пример (Рис. 1 и Рис. 2), где ввод длиннопериодных поправок величиной ~100 мс (Рис. 3) приводит к ошибке определения глубины границы в 100 м при истинной глубине 500 м (Рис. 4а, Рис. 4б), а ошибка в пластовой скорости оказывается 800 м/с при истинном значении 1800 м/с (Рис. 5а, Рис. 5б).



Рис. 5. Пластовая глубинно-скоростная модель, использовавшаяся для получения синтетических сейсмограмм. Вертикальные линии обозначают пикеты, сейсмограммы ОСТ с которых показаны на Рис. 2.



Рис. 6. Примеры сейсмограмм ОСТ, полученных в модели из Рис. 1



Рис. 7. Статические поправки за замещение слоя WT на слой со скоростью нижележащего слоя а

Таким образом, длиннопериодные аномалии необходимо стараться учитывать не с помощью одноимённых поправок, а с помощью глубинно-скоростной модели. Короткопериодные аномалии включать в модель «затруднительно», поэтому их влияние приходится учитывать с помощью обычных статических поправок. Понятно, что эта «затруднительность» не может быть достаточным основанием для такого приёма. Поэтому погрешности, привносимые недостатками метода (в первую очередь из-за дискретности наблюдений), приходится компенсировать привлечением априорных представлений о возможном решении.



Рис. 8. Ошибки определения глубин, найденных в результате решения обратной кинематической задачи разными способами в разных случаях. Отрицательные значения ошибок соответствуют заниженным значениям оценённых глубин.



Рис. 9. Ошибки определения пластовых скоростей, найденных в результате решения обратной кинематической задачи разными способами в разных случаях. Отрицательные значения ошибок соответствуют заниженным значениям оценённых пластовых скоростей.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О СТРОЕНИИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН Авторы: Адамович О.О. Лаптев Я.В.

ООО «ГеоПрайм»

Введение

Проблема учета влияния верхней части разреза является одной из самых актуальных при обработке данных 3D сейсморазведки. Неоднородное строение ВЧР приводит к кинематическим и динамическим искажениям отраженных от нижележащих горизонтов волн, а так же к возникновению цуга когерентных волн-помех сложной формы. Изучение строения ВЧР с помощью отраженных волн затруднено вследствие низкой кратности и низкого отношения сигнал/помеха в верхней части разреза, недостаточной разрешенности сигнала и т.д.

Компенсация кинематических искажений выполняется путем ввода статических поправок в предположении 0 вертикальном распространении луча В ВЧР. Для расчета короткопериодной составляющей статических поправок используются автоматические корреляционные методы. Для расчета длиннопериодной составляющей используются методы на основе прослеживания первых вступлений рефрагированных волн с последующим получением скоростной характеристики ВЧР. Традиционным недостатком метода первых вступлений является невозможность учета слоя с инверсией скоростей распространения волн, вследствие чего длиннопериодная составляющая статических поправок является во многом искаженной. Стоит отметить, что данная особенность строения ВЧР характерна для большинства регионов работ севера РФ вследствие влияния многолетнемерзлых пород.

Одним из способов обхода данного ограничения является привлечение информации, которая «скрыта» в поверхностных волнах.

Методика

Получение информации о строении исследуемой толщи на основе поверхностных волн традиционно используется в сейсмологии [1] и в инженерной сейсморазведке [2] (MASW). Теория поверхностных волн предсказывает геометрическую дисперсию фазовых скоростей поверхностных волн возникающих на контрастных границах. На границе воздух твердая среда возникают поверхностные волны Релея и Лява. Основной особенностью данных волн является мульти модальность и зависимость фазовой скорости от частоты [1]. Дисперсия скоростей несет информацию, прежде всего о скоростях поперечных волн в верхней части разреза.

Схематически граф использования поверхностных волн можно представить в виде трех шагов [4] 1) Анализ 2) Расчет параметров среды (инверсия) 3) Моделирование.

Анализ выполняется путем прослеживания доминантной и последующих мод на специально построенных F-K спектрограммах высокого разрешения [3]. Анализ можно проводить как по сейсмограммам ОТВ, и ОТП так и по крестовым сейсмограммам (cross-spread). Для случая

наземных данных ключевым фактором успешности применения данного метода является тип источника, условия возбуждения колебаний, тип и условия приема, а также группирование источников и приемников.

Для успешной реализации данного метода желательно прослеживать поверхностную волну в широком диапазоне частот, начиная с самых низких. Наличие низких частот будет отвечать за глубинность. Глубинность метода примерно определяется отношением $\frac{k*V_{ph}(f)}{f}$, где V-рассчитанная интервальная фазовая скорость поперечной волны для заданной длинны волны, f- частота, к коэффициент обычно от 0.5 до 0.75. Для случая низкоскоростной ВЧР и взрывного источника колебаний (скорость поперечных волн 150-500 м/с) удалось проследить поверхностную волну на частотах до 1 Гц. Для такого случая глубинность составляет около 200 м. В случае виброисточника с начальной частотой 8 Гц глубинность метода составила бы несколько десятков метров, в случае виброисточника от 3 Гц, глубинность метода может составить до 100м.

Детальность строения первых метров определяется возможностью проследить энергию поверхностной волны в области высоких частот, которые зачастую искажены группированием источников или приемников при стандартных сейсморазведочных работах. Таким образом, для успешной реализации данного метода желательно иметь источник с наличием низкочасотной составляющей спектра, отсутствием группирования, а так же с достаточной плотностью пунктов приема или соответственно взрыва.

Полученные в ходе анализа дисперсионные кривые подаются на вход алгоритма инверсии. В результате 1D инверсии получается распределение скоростей поперечных волн с глубиной в точки анализа. Полученные скоростные поля могут отображать инверсию скоростей в отличие от методов, основанных на инверсии первых вступлений головных волн.

Полученная модель поперечных волн может быть переведена в модель скоростей продольных волн. Данный этап требует использования все доступной информации – волновые поля МСК и ВСП, данные инверсии первых вступлений головных волн, данные ГИС, записанные максимально близко к поверхности. Используя комплексирование методов можно повысить точность построения модели ВЧР, которую использовать для расчета статических поправок или при последующей глубинной миграции до суммирования

Традиционно производственная сейсморазведка 3D рассматривает поверхностные волны как которые необходимо удалить из сейсмограмм. Полученная помехи. скоростная характеристика ВЧР может быть использована как основа для моделирования поверхностной волны. Моделирование может быть выполнено как для прямой, так и для рассеянной составляющей. Данный подход имеет преимущества перед стандартными методами, поскольку по сути это не является многоканальной фильтрацией и практически не искажает полезные годографы отраженных волн, особенно в низкочастотном диапазоне спектра и области ближних удалений, что является ключевым фактором при последующей динамической интерпретации и расчете AVO-атрибутов. Еще одной особенностью данного метода является адаптация в каждую точке анализа, поскольку используются переменные в пространстве значения скоростей поперечных волн.

Опробование на реальных данных

Предложенная методика была реализована при обработке данных 3D сейсморазведки одного из месторождений центральной части Западной Сибири. Полученная скоростная модель поперечных волн (рис.1) позволила обнаружить слой с инверсией в поле скоростей поперечных волн, который отсутствовал в поле скоростей продольных волн, полученных на основе инверсии первых вступлений головных волн. Наличие данного слоя подтвердилось по данным ГИС, полученным в верхней части разреза.



Рис.1. Вертикальное сечение куба скоростей поперечных волны, полученного по результатам анализа частотной дисперсии поверхностных волн.



(a)





Рис. 2. Фрагмент сейсмограммы ОТВ до подавления когерентных волн помех (а), фрагмент сейсмограммы ОТВ после подавления когерентных волн помех с использованием методики анализа поверхностных волн (б).

Для оценки коэффициента гамма – отношения скоростей продольных и поперечных волн использовался комплекс методов – данные МСК, томографии первых вступлений головных волн, данные ГИС и данные скоростного анализа отраженных волн. На основе переменного по глубине и в пространстве коэффициента гамма была построена модель скоростей продольных волн, которая может быть в дальнейшем использована при выполнении глубинной миграции до суммирования. Значения коэффициента гамма в ВЧР составляли от 3 до 6 и более.

Методика анализа поверхностных волн была применена для подавления когерентных помех. Моделирование было выполнено для всех сейсмограмм общей точки взрыва, выполнялось моделирование как прямой поверхностной волн, так и рассеянной составляющей. Моделирование прямой поверхностной волны в данном режиме может быть выполнено обходя ограничения пространственного аляйсинга. Моделирование рассеянной составляющей является одним из основных преимуществ данной методики, поскольку годограф данного типа волн может иметь сложную зависимость от удаления, отдельные фрагменты могут иметь субгоризонтальные оси синфазности как на сейсмограммах ОПВ, ОПП, так и cross-spread [5]. Для подавления данного вида волн не подходят многоканальные скоростные фильтры. На рис.2 представлены сейсмограммы до и после подавления когерентных помех.

Выводы

Методика анализа поверхностных волн может быть применена в производственных работах при обработке данных 3D сейсморазведки для получения детальной скоростной модели ВЧР и для шумоподавления, позволяя обходить ограничения алгоритмов обработки. Существуют

все предпосылки, чтобы данный метод получил распространение и занял место в стандартном графе обработки данных.

Анализ поверхностных волн можно использовать и при морских работах - при работе с донными приборами и на мелководье. При работе на мелководье данный метод может быть использован для построения детальной модели первых десятков метров, которую зачастую не удается построить другими методами из-за принципиальных ограничений системы наблюдений.

Список Литературы

1. Aki, Keiti; Richards, Paul G. (2002). Quantitative seismology (2 ed.). University Science Books.

2. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., and Ivanov, J., 2000b, Construction of 2-D vertical shearwave velocity field by the Multichannel Analysis of Surface Wave technique, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2000), Washington D.C, February 20-24, p. 1197-1206.

3. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1998a, Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record: 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, p. 1377-1380.

4. Strobbia , C., P. Vermeer, A. Laake, A. Glushchenko, and S. Re, 2010, Surface waves: Processing, inversion, and removal First Break, 28.

5. 3D Seismic Survey Design Gijs J. O. Vermeer, Craig J. Beasley SEG Books, 2012

ПСЕВДО-СПЕКТРАЛЬНОЕ ОБРАЩЕНИЕ ПОЛНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

<u>Казей Владимир Владимирович¹</u>, Каштан Борис Маркович¹, Троян Владимир Николаевич¹, Тессмер Эккарт²

1 - Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

2 - Университет Гамбурга, Гамбург, Германия

Введение

Метод обращения полных волновых полей (full-waveform inversion) в его современной формулировке был предложен более 30-ти лет назад (Bamberger, 1979). Данный метод использует подход к решению обратной задачи сейсмики, как к задаче локальной оптимизации полных смоделированных волновых полей. Решение обратной динамической задачи сводится к итеративному поиску минимума функционала невязки между наблюденными и смоделированными данными. Поиск минимума функционала невязки между наблюденными и смоделированными полями последовательными изменениями модели среды представляется вполне естественным с математической точки зрения. На каждом шаге метода к модели среды делается относительно небольшая поправка, которая приводит к уменьшению несоответствия (невязки) между реальными и смоделированными данными. Поскольку смоделированные данные становятся ближе к наблюденным, естественно полагать, что распределение физических параметров среды, использованное при моделированны пумется к реальному. Использование обращения полных волновых полей (full-waveform inversion) при обработке данных сейсмической разведки позволяет

получить изображения среды в более высоком в сравнении с лучевыми методами разрешении (Virieux et. al., 2009). Обращение полных волновых полей также не требует пикирования первых вступлений на сейсмограммах. Основными недостатками метода, препятствующими его внедрению на практике, являются необходимость наличия низких частот в наблюденных данных и относительно высокие требования к вычислительным ресурсам.

Псевдо-спектральное моделирование

Моделирование полных волновых полей во временной или частотной области – наиболее ресурсоемкий процесс при применении данного метода. Как правило, для моделирования сейсмических полей используются конечно-разностные методы. В настоящей работе предлагается реализация метода обращения полных волновых полей с использованием псевдо-спектрального моделирования, что позволяет сократить количество необходимых для описания сейсмической среды параметров за счет использования более разреженных сеток. Псевдо-спектральный метод можно сравнить с конечно-разностным бесконечного порядка или порядка минимального линейного размера сетки параметров. Конечно-разностные схемы 2 порядка требуют сохранения физических параметров и полей на сетках с частотой 12 точек сетки на минимальную длину волны, чтобы избежать дисперсии. Псевдоспектральный метод позволяет использовать сетку с разрешением в 2 точки на длину волны, что также дает возможность увеличить шаг моделирования по времени (Fornberg, 1998). Число необходимых для описания модели среды параметров сокращается в 36 раз в двумерных задачах и в 216 раз в трехмерных, что делает возможной реализацию метода на графических процессорах в ряде случаев без декомпозиции модели. Метод обращения полных волновых полей имеет разрешающую способность в половину локальной длины волны (Вирье, 2011), которая совпадает с разрешением сетки при псевдо-спектральном моделировании. Данное обстоятельство приводит к полному восстановлению низкоскоростной части разреза в численных экспериментах с синтетическими данными.

Многомасштабная инверсия и фильтр «масштабирующий» частоту

Работа псевдо-спектрального метода обращения полных волновых полей далее рассматривается в применении к модели Мармузи (рис. 1). Для метода обращения полного волнового поля необходима также стартовая модель (рис. 1), которая в данной работе получена сильным сглаживанием самой модели.



Рис. 1 Скоростная модель Мармузи (слева) была специально построена для проверки алгоритмов сейсмической миграции. Начальная модель (справа) получена сглаживанием истинной гауссовым фильтром постоянной длины. Также показан предлагаемый для регуляризации решения обратной задачи фильтр нестационарный фильтр и локальная длина волны в различных частях модели для источника с низкой временной частотой.



Рис. 2 Данные для источника на поверхности, полученные псевдо-спектральным моделированием (центральная частота 10Гц). Слева – в модели Мармузи, по центру – в начальной модели, справа – разность полей. Использован одинаковый масштаб по цвету.

Классическим подходом для метода обращения полных волновых полей является последовательное обращение зарегистрированных данных по временным частотам. Сначала обращаются низкие частоты, что приводит к восстановлению гладкой части распределения физических параметров или тренда модели – крупный масштаб (рис. 1). После этого обращаются высокие временные частоты, что ведет к более детальному восстановлению физических параметров – мелкий масштаб. Такой подход необходим для устранения эффекта пропускания цикла, который возникает на высоких частотах (Аникиев и др., 2014), когда данные смоделированные в опорной модели недостаточно близки к реальным данным (Рис. 2). За счет меньшего количества параметров, которые необходимо определить, построенная на основе псевдо-спектрального моделирования инверсия позволяет добиться более быстрой сходимости. В работе использовался метод сопряженных градиентов для поиска минимума функционала невязки, удалось получить изображение в разрешении, совпадающем с разрешением сетки параметров необходимым для моделирования (Рис. 3).



Рис. 3 Решение обратной задачи псевдо-спектральным методом по данным 0-4 Гц (20 итераций метода сопряженных градиентов). Полных данных с использованием многомасштабного подхода (160 итераций). Были ипользованы интервалы по временной частоте: 0-4Гц, 0-8Гц, 0-12Гц, 0-16Гц по 20 итераций и 80 итераций для данных без фильтрации (0-20 Гц). Для каждого следующего интервала временных частот результат обращения предыдущего использовался в качестве начальной модели.

Тестирование метода на акустической модели Мармузи показало, что в идеальных условиях наличия низких частот псевдо-спектральное обращение полных волновых полей позволяет полностью восстановить строение данной модели. В отсутствии низких частот метод обращения полного волнового поля не дает удовлетворительных результатов решения обратной задачи сейсмики, что известно как проблема трендовой составляющей (Чеверда, 2009).



Рис. 4 Применение метода обращения полного волнового поля к данным 4-6Гц. Слева – поправка к начальной модели на первой итерации. Поправка содержит много мелких деталей, которые неверны и препятствуют сходимости метода, поскольку тренд еще не полностью восстановлен. Справа – конечный результат после 160 итераций метода сопряженных градиентов. Видно, что в верхней части разреза создается иллюзия достаточно высокого разрешения, однако модель не соответствует истинной.

Эффект пропускания цикла наблюдается в градиентах – изображениях, которые используются для получения поправки к модели на каждой итерации метода и затем в функционале невязки, который в некотором смысле усредняет информацию по всем данным. Можно показать (Алхалифах, 2014), что трендовая составляющая присутствует и в поправках полученных по данным, содержащим только высокие временные частоты, при условии освещения преломленными или ныряющими волнами всей модели. В работе предлагается извлечь данную информацию с помощью нестационарной фильтрации гауссовым фильтром, длинна которого соответствует локальной длинне волны при определенной более низкой частоте. Фильтр масштабирует частоту, приводя к особенностям отраженным на Рис. 5, позволяя восстановить модель даже в отсутствии очень низких частот в наблюденных данных (рис.6).



Рис. 5 Поправка к модели на 1-ой итерации, сглаженная Гауссовым фильтром (слева) и поправка после сглаживания фильтром масштабирующим частоту – нестационарным Гауссовым фильтром. За счет привязки длины фильтра к длинне волны, фильтр масштабирующий частоту позволяет восстановить детали верхней части разреза вначале, сглаживая высокоскоростную – нижнюю часть разреза значительно сильнее.



Рис. 6 Модель полученная методом обращения полных волновых полей по данным, содержащим частоты 4-6Гц с применением фильтра масштабирующего частоту к 2Гц после 20 итераций (слева) имеет значителную степень сходства с результатами обращения данных

0-4Гц (Рис. 3). А также многомасштабная инверсия, использующая данный фильтр для данных 4-10Гц. Частота была масштабирована сначала к 2 Гц, а затем к 4 Гц, после этого использовался полный набор данных.

Заключение

Псевдо-спектральное моделирование позволяет существенно сократить число параметров, необходимых для описания среды и волновых полей. Метод обращения полного волнового поля имеет более быструю сходимость и позволяет в идеальных условиях полностью восстановить строение среды. В отсутствии низких частот использование нестационарной фильтрации фильтром «масштабирующим» частоту позволяет снизить требования к необходимому спектральному составу зарегистрированных сейсмических трасс.

Список использованной литературы:

Alkhalifah T. Scattering-angle based filtering of the waveform inversion gradients //Geophysical Journal International. $-2014. - T. 200. - N_{2}. 1. - C. 363-373.$

Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation //Geophysics. – 1984. – T. 49. – №. 8. – C. 1259-1266.

Fornberg B. A practical guide to pseudospectral methods Cambridge university press, 1998.–T.1. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics //Geophysics. – 2009. – T. 74. – №. 6. – C. WCC1-WCC26.

Аникиев Д.В., Казей В.В., Каштан Б.М., Пономаренко А.В., Троян В.Н., Шигапов Р.А. Методы обращения сейсмических волновых полей // Технологии сейсморазведки, 2014. — № 1.С.38–58

Чеверда В.А. Восстановление скоростного строения неоднородных сред методом полного обращения волновых сейсмических полей: Дисс. д.ф.-м.н. Новосибирск, 2009. 262с.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, КЕРНА И ГИС С ЦЕЛЬЮ УТОЧНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КИНЯМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ Мустафина Руфина Халитовна, Орлов Владимир Алексеевич

ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа

В условиях перехода к разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами для эффективной добычи необходимо учитывать всю сложность геологического строения пластов, поэтому на начальном этапе работ актуальным является привлечение и анализ всех имеющихся данных. В работе изложен подход, комплексно объединяющий данные 3Д сейсмики, промыслово-геофизические исследования в скважинах и изучения кернового материала с целью уточнения геологического строения объекта ЮС₁³, ЮС₁¹ и прогноза развития коллекторов в ачимовских отложениях в пределах Киняминского месторождения.

В данной работе показано то, что для корректного прогнозирования развития песчаных тел необходим комплексный подход с привлечением ГИС, керна и сейсморазведки ЗД. Комплексный динамический и сейсмофациальный анализ продуктивных пластов Киняминского месторождения ЮС_{1}^{1} и ЮС_{1}^{3} проводился с целью определения особенностей строения пластов, которые в свою очередь связаны с существовавшими обстановками осадконакопления, что оказывает влияние на сложность и неоднородность строения залежей нефти, их петрофизические и гидродинамические особенности. При анализе локальных условий формирования отложений в пределах изучаемой площади Киняминского месторождения использовались данные о региональных особенностях обстановок Западно-Сибирской осадконакопления территории нефтегазоносной провинции. Комплексный анализ проводился по данным геофизических исследований скважин на основе электрофациального анализа, данных изучения керна, послойного описания с выделением слоевых и породных ассоциаций, содержащих генетические признаки седиментационных обстановок, а также на основе классификации сейсмических трасс.

Отложения пласта ЮC_1^1 формировались в прибрежно-морской дельтовой обстановке. По данным каротажных диаграмм ПС и ГК в пределах изучаемого участка в интервале пласта выделяются пять характерных форм кривых. По известной методике интерпретации форм кривых выделяются следующие фации: прибрежно-морских (устьевых) баров фронта дельты, распределительных каналов дельтовой равнины, песчаных кос меандрирующих каналов, песков пойменных разливов и фации пойменных глин (Рис.1). Для более детального картирования фациальных зон проанализированы карты сейсмических атрибутов, пропорциональные слайсы между отражающими горизонтами и карта сейсмоклассов. Карта сейсмофаций пласта ЮC_1^1 показана на рисунке 2. Литолого-фациальная схема представлена на рисунке 3.

Аналогичным образом проанализированы пласты БВ₁₀, ЮС₁³, ЮС₂.



Рис.1 Геологический разрез по пласту ЮС1-1 с выделением фаций по форме каротажа ПС и ГК

В работе изложен подход, комплексно объединяющий данные 3D сейсмики, промысловогеофизические исследования в скважинах с целью уточнения геологического строения объектов в интервале юрских отложений и прогноза развития коллекторов в ачимовских отложениях в пределах Киняминского месторождения.

Комплексный динамический И сейсмофациальный анализ продуктивных пластов месторождения проводился с целью определения особенностей строения пластов, которые в свою очередь связаны с существовавшими обстановками осадконакопления, что оказывает влияние на сложность и неоднородность строения залежей нефти, их петрофизические и гидродинамические особенности. На основе сейсмофациального и палеотектонического анализа восстановлена история геологического развития месторождения; создана модель геологического строения продуктивных пластов. Построены карты перспектив по пластам в интервале юрских отложений. Уточнены контуры нефтеносных залежей с учётом разломноблоковой и литофациальной моделей и даны рекомендации по направлению эксплуатации залежей.



Рис.2 Карта сейсмофаций пласта ЮС₁¹ (6 классов)



Рис.3 Литолого-фациальная схема пласта ЮС11

КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, КЕРНА И ГИС С ЦЕЛЬЮ ПОИСКА И ОЦЕНКИ НОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УВ НА ПРИМЕРЕ ЧУПАЛЬСКОГО ЛУ

Уралова Лия Рамитовна, Атауллина Земфира Мансуровна

ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа

В условиях перехода к разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами для эффективной добычи необходимо учитывать всю сложность геологического строения пластов, поэтому на начальном этапе работ актуальным является привлечение и анализ всех имеющихся данных. В работе изложен подход, комплексно объединяющий данные 3Д сейсмики, промыслово-геофизические исследования в скважинах и изучения кернового материала с целью уточнения геологического строения объекта БС8 и прогноза развития коллекторов ачимовских и юрских отложениях в пределах Чупальского лицензионного участка (ЛУ).

Показано, что для успешного прогнозирования развития песчаных тел – возможных коллекторов нефти необходимо изучать пласт как сложную систему, привлекая данные керна, ГИС и ЗД сейсмики. В работе предложена методика, объединяющая эти виды исследований и позволяющая на основе комплексного анализа прогнозировать развитие коллекторов в условиях сложного геологического строения клиноформенного комплекса неокомских отложений Западной Сибири.

В пределах ЛУ пробурены поисково-разведочные скважины, в некоторых из них проведены исследования керна. На данный момент месторождение не разрабатывается. Тем не менее, учитывая региональные особенности тюменской свиты и распространение ачимовских отложений по региону в целом, есть перспективы поиска нефтеносных объектов в ачимовских и юрских отложениях. Следовательно, данная работа нацелена на поиск и оценку новых перспективных залежей УВ и увеличение ресурсной базы Чупальского участка

Сейсмофациальный анализ по целевым пластам Чупальского ЛУ проведен с целью выявления условий осадконакопления и перспективных зон. Для анализа привлечены материалы работ: А.А. Нежданова «Геология и нефтегазоносность ачимовских отложений Западной Сибири», 2000 и А.Э. Конторович. «Оценка перспектив и выявление благоприятных зон распространения высокодебитных коллекторов в горизонте Ю2 на территории деятельности НК "РОСНЕФТЬ" в ХМАО», 2007. В данной работе подробно рассмотрены пласты ЮС2 и Ач0₁.

Отложения пласта ЮС2 сформировались в батское время в условиях постепенной трансгрессии моря, которая завершилась в келловейское время (к началу формирования пласта ЮС1) формированием глинистого разреза абалакской свиты.

Керновый материал был рассмотрен в скважинах 54P, 65P, и 67P. По форме каротажных кривых ПС и ГК выделяются потоковые фации русловых каналов, береговые валы, фация лопастей конусов выноса и области мелководно-морских отложений (Puc 1).



Рис.1 – Корреляционная схема пласта ЮС2

С целью более подробного картирования сейсмофациальных зон были рассмотрены временные пропорциональные срезы горизонта ЮС2. Карта сейсмофаций представлена на рисунке 2.

Итоговая сейсмофациальная модель пласта ЮС2 (Рис. 3), построена по данным ГИС, керна и 3D сейсморазведки. Ввиду особенностей континентального типа отложений, коллектора пласта ЮС2 в фациальных областях пойм имеют линзовидное строение, характеризуются высокой расчлененностью и неоднородностью как по площади, так и по разрезу. В скважине 61Р коллектора по данным ГИС не выделены, что говорит о наличии литологического замещения коллекторов в интервале изучаемого пласта.

Прогнозная карта эффективных толщин построена с помощью выбранного атрибута и скважинных данных. Карта нефтенасыщенных толщин построена с учетом обобщения данных испытания по скважинам, карт по кровле коллектора и эффективных толщин.

Аналогичным образом рассмотрены другие пласты

С учетом предложенных фациальных моделей исследуемых пластов и структурных особенностей каждого продуктивного горизонта даны рекомендации к первоочередному бурению трех поисково-разведочных скважин, которые включены в программу геологоразведочных работ. Целевое назначение проектных разведочных скважин – подтверждение прогнозных нефтенасыщенных толщин и прирост потенциальных запасов нефти.



Рис. 2 – Карта сейсмофаций пласта ЮС2



Рис. 3 – Сейсмофациальная модель пласта ЮС2

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ НА ПЛОЩАДКАХ ИЗЫСКАНИЙ В КАРСТОВО-СУФФОЗИОННО-ОПАСНЫХ РАЙОНАХ Г. МОСКВЫ Габдуллин Руслан Рустемович, Вайтекунас Андрей Клемович, Бадулина Наталья Викторовна

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА» ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ, МОСКВА; ООО «ЦЕНТР ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ», МОСКВА

Интерпретация данных сейсмического просвечивания в карстово-суффозионноопасных районах г. Москвы является важной частью инженерно-геологических изысканий. Используя эти данные в комплексе с ГИС, описанием керна скважин и представлениями о геологическом строении и истории развития района необходимо выбрать правильный вариант интерпретации в условиях III категории сложности. В докладе рассматривается площадка изысканий по адресу: г. Москва, ул. Зорге, вл. 9.

В геоморфологическом отношении участок строительства расположен в пределах Ходынской древнеаллювиальной террасы р. Москвы, на месте засыпанных золоотстойников.

Рельеф площадки претерпел значительные техногенные изменения в результате строительства производственных зданий, метро и прокладки инженерных коммуникаций.

Абсолютные отметки земли изменяются в пределах от 144,50 до 147,26 м. К северовостоку от участка протекает р. Таракановка, забранная в коллектор.

В геологическом строении участка, разведанном до глубины 85,0 м принимают участие: голоценовый техногенный слой (tQ_{IV}) , верхнеплейстоценовые аллювиальные отложения (aQ_{III}^{1}) , нижнеплейстоценовые – ледниковые $(gQ_{I}dn)$ и водно-ледниковые (flgQ_Io-dn), верхне-, среднеюрские (J_{2-3}) и верхне-среднекаменноугольные (C_{2-3}) отложения (рис. 1 и 2).

При измерениях использован комплект сейсмической аппаратуры, включающий цифровую сейсмическую станцию «Лакколит 24-М1» и гидроизолированную 12-канальную скважинную сейсмическую косу производства уфимского филиала фирмы ОҮО (Япония). Всего было выполнено сейсмическое просвечивание четырех целиков (рис. 3, 4) между 5 скважинами в интервале глубин от 33 до 80 м, соответствующем абсолютным отметкам от 67 до 114 м. Всего выполнено 68 физических точек. Также был выполнен гамма-каротаж по скважинам. Учитывая конструктивные особенности многоэтажного здания, на площадке было пробурено 6 скважин: 1 скважина глубиной 85 м, 1 скважина глубиной 81 м, 1 скважина глубиной 60,5 м, 3 скважины глубиной 60 м. Общий фактический метраж составил 406,5 п.м. Несмотря на небольшую площадь исследования, геологическое строение площадки и экзогенные процессы, протекавшие ранее в протекающие в настоящее время оказались весьма сложными, что существенно затрудняло межскважинную корреляцию и корреляцию с архивными материалами. Площадка расположена на склоне палеодолины и затронута палеооползнями посткаменноугольного возраста. Участок предполагаемого строительства относится к опасному в отношении проявления карстово-суффозионных процессов: в трещиноватом массиве каменноугольных известняков встречены карстовые полости разной степени заполнения и формы, вызывавшие провалы бурового инструмента. Полости в каменноугольных известняках частично заполнены глинами юрского возраста, формировавшихся в условиях трансгрессирующего моря и встреченные на глубине 20 и более метров ниже их обычного стратиграфического положения.

Абе. Отм., м		Абс. Отм., м.	Абс. Отм., м.	Абс. Отм., м
148.00		I 148.00	148.00	I ^{148.00}
146.00	III > ia III > ia	146.00	146.00 III 3 1 45.50	1.50 - 6145.30
144.00	100 144.00 142.00	144.00	144.00	144.00
142.00	(Q, 141.20)	142.00	142.00	142.00
140.00	<u>814510</u> 81.510	140.00	140.00 T	140.00
138.00	9,50 117.66 9,50 110,52 110,52 110,52 110,52 110,52 110,50 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 9,10 113,90 110 113,90 110 113,90 110 110 110 110 110 110 110 110 110 1	138.00	138.00	88.50 9.10.00 6.117.80 138.00 138.00 138.00 138.00 138.00
136.00	H1 3-3 H1 12 113540 gl Q, dn 10.50 115.50 H1 12 113540 115.50	136.00	136.00 156.40 10.00 116.20 117-11 10.00 116.40 10.000 116.20	136.00
134.00	12.20 134.00 20,0009 A 19.11.00	134.00	12.30 - 14.70 24.10.00 1313-40	134.00 III 134.00
132.00		132.00	132.00	₩ <u>132.00</u>
130.00	A	130.00	130.00	(a) []]])-i
128.00	III)-4	128.00	128.00	128.00
126.00		126.00	126.00	126.00
124.00	• @	124.00	124.00	• 124.00
122.00.0	@	122.00	171 m.	
122.00		122.00	122,00	®
120.00	(internet fill of the fill of	120.00	120.00 (M)	120.00
118.00		118.00		118.00
116.00	(1) 31.00 116.00 30.50 114.46 114.00 Jcl-ox pd	116.00	116.00 (1.1.30) (1.1.	H[3-6] (E)
114.00		114.00	114.00	(cl-ox pd) 33.40° (113.90 114.00
112.00	(Jelvd) HT3-76 Celvd	112.00	112.00 III 3-76 J.clvd	112.00
110.00	110,00 110,00 10,000 10	11.08 1110.00	110.00 11	
108.00	10 10 10 10 10 10 10	108.00	108.00 - (K)	108.00 105.00 105.00 105.00
106.00	(<i>btms</i>) (<i>t</i>	106.00		▲ 106.00
104.00		104.00	104.00 (<i>J.b.</i> kd)	1 104.00
102.00	e 0 45.00 102.16 (<i>J,b</i> kd)	102.00	102.00	44.90 102.40 102.00
100.00	C 46.00 100.55 4.20 100.88 46.00 101.00	100.00	dpC_1 100.00 dpC_1 100.00	100.00
98.00	HT3-11 (C,k v) (HT3-11) (07.70 (dpC))	98.00	98.00	Cik vs 48.800 598.50 19.200 198.10 7 98.00
96.00	1172-13 √ 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4	96.00	96.00	50.30 97.00 96.00
94.00	Q = q - q - q - q = - 52.00 - 55.00 - 55.00 - 55.00	94.00	94.00 94.00	S2 80 94.50 → ≪4(11) 2-15 - 01.50 → 94.00
92.00		92.00	92.00	92.00
90.00		90.00	n no.	S 20 00
50.00	$ \begin{array}{c} \Delta & \Delta & \Delta & \Delta & \mu \\ \hline \hline$	50.00		
88.00	40.00 87.00 AS	88.00	88.00 59.40 = 87.60 III - 14	60.00 87.30
86.00		\$6,00	86.00 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	s mch)
84.00		84.00		\$4.00
82.00		\$2.00		82.00
80.00	47.56- = 19.50 6 7.56- = 19.50	80.00	80,00	80.00
78.00	(C.ms mch)	78.00	78.00	78.00
76.00	72.00 176.10 173.20 77.00 75.16	76.00	76.00	76.00
74.00	73.00 - 74.00	74.00	74.00	74.00
72.00	75.00 72.16	72.00	72.00	72.00
70.00	Cms pd	70.00	70.00	70.00
68.00		68.00	68.00	68.00
66.00		66.00	66.00 81.00 66.00 C.m	s pd 66.00
64.00		64.00	64.00	64.00
62.00	55.00 62.00	62.00	62.00	62.00
60.00		<u> </u>	60.00	L 60.00
Bougers	canzinu 1-57/83 4 3		Новер созволовы 2 4	6
Абеол усты ск	ымт. отда. важитны, ы 147.00 147.00		Абсолют. отм. устья скляжним, м 147.00 147.00	147.30
Расс между скл	токлад 20 15		Расстояние 20	20

Абсезоват ота, уста сакавана, и теху сакавана, и техи сакавана, и т



Рис. 2. Инженерно-геологические разрезы площадки изысканий

ШИРОКОАЗИМУТАЛЬНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

Возможности восстановления параметров анизотропии по сейсмическим

ДАННЫМ

Анисимов Руслан Гурьевич Яндекс.Терра (ООО «Сейсмотек»), Москва

Требования к информативности сейсморазведки и точности глубинных построений возрастают. Если раньше от специалистов требовалось получить мигрированные данные во временном масштабе, то сегодня глубинная миграция стала почти стандартом. Самое важное отличие между ними заключается в том, что, при получении результата во временном масштабе, геофизиков главным образом интересует качество получаемого изображения. При этом его корректность остается за пределом поля интересов, так как эту задачу решают уже интерпретаторы путем привязки к данным скважин. С глубинной миграцией дело обстоит совсем иначе, ведь, переходя к расчётам в масштабе глубин, геофизик претендует не только на качество изображения среды, но также и на корректность глубинных построений, ведь от них будут зависеть не только сами глубинные построения как таковые, но в том числе и последующий учёт динамических параметров. И с этим обычно возникают проблемы, которые все решают по-разному. Основными причинами возникновения таких проблем являются недоучёт неоднородностей типа включений или градиента сейсмических скоростей, а также анизотропия реальных сред. Здесь мы сконцентрируем внимание на анизотропии скоростей.

Стандартный граф обработки сейсмических данных включает в себя гиперболический анализ скоростей суммирования. Обычно данные хорошо описываются гиперболами до тех пор, пока исследуемая среда устроена очень просто и в наличии нет данных с большими разносами и широким азимутом наблюдений, то есть, другими словами, когда у нас недостаточно данных для корректного решения обратной задачи. Проблему существенной негиперболичности годографов все решают по-разному, и зачастую она может быть связана с анизотропией реальной среды. Для её учёта очень часто используют приближённую формулу годографа для анизотропной горизонтально-слоистой среды. Описав таким образом поле данных, обычно дальше все сводят к построению первоначальной модели с последующей анизотропной томографией и попыткам спрямить мигрированные глубинные развёртки до суммирования. В данном случае критерием корректности глубинных данных и, соответственно, возможности выполнить проверку, данный подход является разумным. Но когда появляется скважинная информация, то в случае сложной среды, скорее всего, обнаружатся невязки.

На сегодняшний день промышленным стандартом описания анизотропных сред является модель Томсена. Эта модель описывает трансверсально-изотропные среды и определяется тремя параметрами: скоростью, эпсилон и дельта. При этом все также помнят, что важную роль играет ориентация оси симметрии и на основании этого выделяют четыре класса анизотропии: VTI, HTI, STI и TTI. С последней, как правило, никто не работает, на практике используя в основном VTI и HTI. Предположение об ориентации оси является хорошим приёмом при попытке описать и спрямить негиперболичный годограф. И. В действительности, этим стоило бы ограничиться. Но, тем не менее, зачастую полученные параметры такого годографа используются для получения параметров анизотропии и выполнения глубинных построений. В таком случае рассчитывать на корректность глубинных изображений не стоит, потому что даже при таком "сильном предположении" о вертикальности оси анизотропии, в рамках пластовой модели можно привести множество вариантов эквивалентных моделей горизонта, таких, что рассчитанные времена отраженных волн будут с достаточной точностью попадать в исходные данные. Данную неоднозначность можно попытаться разрешить благодаря привлечению априорной информации, под которой в рамках нашего исследования мы подразумеваем знание положения кровли и подошвы
анизотропного слоя. Использование информации о границе является вполне оправданным. Но даже точное знание отражающей границы не всегда может помочь в определении параметров анизотропии и выполнении корректных глубинных построений. Продемонстрируем этот факт на примере.

Рассмотрим простую трёхмерную модель, состоящую из трёх слоёв (рис. 1). Первый горизонт является изотропным и однородным, скорость в нём 2000 м/с. Второй горизонт является анизотропным со скоростью, равной 2500 м/с, эпсилон 0.15, дельта 0.0 и осью анизотропии, наклоненной вдоль направления оси X под углом 30 градусов от вертикали. Третья граница представляет собой образование типа «купол» со скоростью 3000 м/с в настилающей толще.



Рис. 1 Сечение исходной модели вдоль оси х

Как видно, ось анизотропии выбрана со значительным наклоном. Теперь сделаем предположение, что нам известны все параметры модели, кроме параметров анизотропии второго слоя. При этом положение всех отражающих границ мы также считаем известным. Зададимся, как это зачастую делают на практике, вертикальной осью анизотропии и определим такие параметры Томсена, которые позволят наилучшим образом отобразиться в наблюдённые времена отраженных волн от подошвы данного слоя. На рис. 2 представлен расчётный функционал, который использовался для определения искомых параметров анизотропии. Мы видим локализованный экстремум, который позволяет с полной уверенностью выбрать параметры эпсилон и дельта, равные 0.11 и 0.12 соответственно, что совершенно не соответствует исходным параметрам модели. При этом необходимо отметить, что среднее отклонение от расчётного годографа в исходной модели составляет меньше одной миллисекунды.



Рис. 2 Функционал качества попадания в данные

Произведём миграцию синтетических данных в исходной и полученной моделях. Как видно из рис. 3, качество миграции идентичное и изображение границ получено в правильном положении. Данное обстоятельство говорит нам о том, что мы получили эквивалентные модели с точки зрения отображения их в одни и те же данные, при этом параметры анизотропии второго слоя значительно отличаются, а самое главное, существенно отличается пространственная ориентация оси симметрии. На рис. 4 показана часть мигрированного купола в обеих моделях. Мы видим, что пренебрежение осью симметрии во второй модели привело нас к горизонтальному сносу данных. Размер сноса составляет порядка 50 метров при глубине горизонта, равной 2000 метров. Значительная ли это ошибка? Скорее всего, можно сказать, что нет. Но необходимо всегда иметь в виду данный факт. Более значительным является то обстоятельство, что, ограничив параметры анизотропии, лишь вертикальной осью симметрии, мы получили существенно иные значения этих параметров. Поэтому одним из главных выводов будет являться то, что интерпретировать такие параметры нужно с очень большой осторожностью.



Рис. 3 Пример глубинных сейсмограмм до суммирования в центральной части площади. Слева – в исходной модели, справа – в эквивалентной.



Рис. 4 Горизонтальный снос данных в процессе миграции. Слева - миграция в исходной модели, снос отсутствует. Справа – результат миграции в эквивалентной модели, произошёл горизонтальный снос данных на расстояние порядка 50 метров.

Список литературы

- 1. Глоговский В.М., Лангман С.Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. // Технологии сейсморазведки, 1/2009 Москва, 2009 10 с.
- 2. Лангман С.Л., Анисимов Р.Г. Построение пластовой глубинно-скоростной модели в сложных средах // Тезисы конференции «Тюмень-2015»
- Фиников Д.Б., Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Силаенков О.А., Шалашников А.В. Возможности расширения класса пластовых моделей при решении обратной кинематической задачи // 12-й семинар «Синтез современных геотехнологий – ключ к объективному познанию недр»
- 4. Анисимов Р.Г. Восстановление параметров анизотропии в локально однородной пластовой модели по кинематике отражённых волн // Тезисы конференции «Геомодель-2014»

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАССЕИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОЕНИЯ ИЗУЧАЕМЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.

О.3. Куретова (ООО «ПетроТрейс Глобал»), Е.М. Российская (ООО «ПетроТрейс Глобал»), К.А. Смирнов (ООО «ПетроТрейс Глобал»), В.И. Логовской (ОАО АНК «Башнефть»).

«Если мы хотим учесть морфологическое зна¬чение тех или других пород в формировании рельефа исследуемой территории, необходимо взвесить каждое из свойств и совокуп¬ное их выражение в условиях конкретной физико-географической обстановки» (И. С. Щукин).

Мелкомасштабные элементы среды, включающие малоамплитудные нарушения, трещиноватые зоны, проявления поверхностного и глубинного карста, элементы палеорельефа могут играть ключевую роль при построении геологических моделей для планирования бурения, подсчета запасов, разработки. Многие из них являются объектами, рассеивающими сейсмические волны, которые могут быть локализованы в пространстве с помощью применения специальных методик, направленных на разделение зеркальной и рассеянной компонент сейсмического волнового поля. В докладе приведены примеры применения подобных методик для одного из месторождений в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции с целью детализации его геологического строения.

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

Структура разрушения в области гидроразрыва газоносного пласта. Результаты тектонофизической реконструкции природных напряжений **Ребецкий Ю.Л.*, Чесноков Е.М.****

^{*} Институт физики Земли РАН, Москва, Россия, <u>reb@ifz.ru</u>; ^{**} Университет, Хьюстон, США, <u>emchesnokov@uh.edu</u>

В докладе представлены возможности современных методов тектонофизики в изучении напряженного состояния и глубинной структуры месторождений углеводородов. Приложением предлагаемого подхода является газовое месторождение, разрабатываемое компанией Девон в штате Оклахома. Данные о напряженном состоянии месторождения необходимы для прогноза характера разрывных нарушений, формирующихся в процессе гидроразрыва. Сами данные о гипоцентрах макро-трещин, образующихся в процессе создания гидроразрыва и фиксируемых по данным сейсмических наблюдений, обычно используют только для определения направления и объема разрушений в глубинном пласте. При этом локализация очагов микро-землетрясений позволяет выделить участки пониженной прочности в глубине горного массива – разломы, что важно для последующей эксплуатации месторождения. Нами показано, что данные о механизмах очагов микроземлетрясений, возникающих при гидроразрыве при обеспечении надежности этих определений, может существенно расширить возможности интерпретации глубинного состояния горного массива. Как далее будет показано, оценка параметров напряженного состояния массива, опирающаяся на эти данные, дает возможность идентифицировать плоскость макро-трещины микро-землетрясения и более надежно выделять крупные разрывные структуры месторождения.

В наших исследованиях обработка данных о механизмах очагов микро-землетрясений проводилась на основе метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА), созданного в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН. МКА следует рассматривать как продолжение теконофизических методов J. Angelier, J. Gephart, A. Michael, О.И. Гущенко, С.Л. Юнги. В МКА после первого этапа обработки данных о механизмах очагов землетрясений определяются три угла Эйлера, характеризующие ориентацию осей главных напряжений, и коэффициент Лоде - Надаи, определяющий вид эллипсоида напряжений. На втором этапе алгоритма на диаграмме Мора выполняется анализ напряжений, действующих на плоскости разрывов из однородной выборки [5]. При этом используются результаты экспериментов по хрупкому разрушению образцов горных пород (К. Mogy, W. Brace, J. Byerlee), показавшие, что катакластическое деформирование исходно трещиноватой геосреды на диаграмме Мора определяется полосой, заключенной между линией предела прочности и линий минимального сопротивления сухого трения. Это обобщение позволяет для каждой однородной выборки землетрясений определить редуцированные напряжения. Нормировка напряжений при этом осуществляется на неизвестное значение прочности сцепления массивов горных пород, которая является функцией масштаба усредняемых напряжений [6, 7, 8].

Для получения данных напряженном состоянии в глубине газового месторождения компании на скважине "Dollie Thorell A4" был осуществлен гидроразрыв в условиях наблюдения за характером глубинного разрушения. С этой целью в одну из рядом расположенных скважин был опущен измерительный комплекс в виде штанги-трубы,

состоящей из 12 цифровых широкополосных трехкомпонентных сейсмических станций. Штанга-труба была опущена в наблюдательную скважину на глубину около 7000 футов. Наблюдательная скважина отстояла от нагнетательной скважины, создававшей гидроразрыв, на расстояние около 1600 футов (рис. 1). Гидроразрыв породного массива осуществлялся на глубине 7000-7500 футов. В рамках сейсмологической части представляемых исследований, выполненных сейсмологами Университета Оклахомы, были разработаны алгоритмы и программы обработки цифровых записей трехкомпонентных станций для определения гипоцентров источников динамических событий – микро-землетрясений в сильно расслоенной среде. В результате обработки сейсмических записей процесса гидроразрыва удалось выделить более 1600 событий в магнитудном диапазоне -5 < M_w < 0.8. Этому диапазону микро-землетрясений отвечали трещины от первых десятков сантиметров до а область, охваченная активным трещинообразованием, десятков метров, имела геометрические размеры порядка 900*200*100 м.





Рис. 1. Эпицентры микро-землетрясений: в магнитудном диапазоне -5 $< M_w < 1$: Пятиугольник с голубого цвета – нагнетательная, а пятиугольник с желтого цвета – наблюдательная скважины

Рис. 2. Разрыв и вторичные (оперяющие) нарушения вблизи его концов по данным моделирования для [10]. Толстые линии – первичные трещины сдвига, тонкие – вторичные трещины отрыва

С позиции геомеханики первичным источником сейсмических сигналов при формировании хрупкого разрыва является сдвиговое смещение бортов трешины. возникающее из-за уменьшения силы трения [3, 4]. Данное заключение, однако, не отменяет возможность возникновения чистых отрывов как вторичных структур, сопровождающих формирование трещин сдвига (первичная струтура разрушения). Эти вторичные структуры разрушения появляются в концевых частях трещин сдвига в виде оперяющих трещин отрыва (рис. 2) [1, 2, 9]. Их формирование связано с возникновением локальных растягивающих напряжений в двух накрест лежащих концевых секторах трещины. Следует отметить, что протяженность этих вторичных трещин отрыва может превышать протяженность первичных трещин сдвига именно из-за малой прочности горных пород на растяжения и, следовательно, малой затрате энергии, идущей непосредственно на разрушение.

Опыт предыдущих реконструкций напряжений МКА по данным о механизмах очагов землетрясений с $M_w > 1$ показал, что наиболее оптимальным является использование каталогов землетрясений, в котором объединены события с диапазоном магнитуд не более 2.0-3.0. Это связано с тем фактом, что сами данные о механизмах очагов являются интегрантами напряженного состояния и они несут информацию о средних напряжениях разных масштабов усреднения. Поэтому по результатам анализа каталога механизмов очагов микро-землетрясений для расчета напряжений были созданы три каталога с разным диапазоном магнитуд: 1) от -3.0 до -1.0 – каталог механизмов слабых микро-землетрясений; 2) -2.0 – 0.0 – каталог механизмов среднесильных микро-землетрясений; 2) от -1.5 до 0.8 – каталог механизмов среднесильных и сильных микро-землетрясений. В каждом из каталогов насчитывалось соответственно по 127, 255, 989 событий.

Выполненная реконструкция параметров напряженного состояния опиралась на алгоритмы двух первых этапов МКА, т.е. определялись параметры эллипсоида напряжений и редуцированные значения эффективного давления и максимального касательного напряжения. Для каждого из трех каталогов механизмов очагов микро-землетрясений расчеты выполнялись в пределах мощности всего сейсмофокального объема. По данным этих каталогов выделяется четыре зоны разных режимов напряженного состояния: ближняя, расположенная в окрестности нагнетательной скважины (в радиусе около 3000 футов); две средние, граница между которыми расположена на расстоянии около 800-900 футов от нагнетательной скважины; дальняя, начинающаяся на расстоянии около 1400-1500 футов от нагнетательной скважины. Ближняя и дальняя зоны отделяются от средних зон узкими областями, для которых практически отсутствуют данные о напряжениях.

Сравнение результатов расчетов для этих каталогов по геодинамическому типу напряженного состояния (рис. 3, г) показывает, что вблизи нагнетательной скважины они все дают большое число участков с горизонтальным растяжением. Также уверенное представительство горизонтального растяжения дают каталоги высоких магнитуд в дальней зоне. В средних зонах наблюдаются режимы горизонтального сжатия и горизонтального сдвига. При этом обстановки горизонтального сжатия и сдвига в этих каталогах меняются местами. Каталог низких магнитуд дает больший разброс в типах геодинамических режимов в ближней и дальней зонах, что свидетельствует о большей фрагментируемости этих участков в сравнении с со средними зонами.



Г

Рис. 3. Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений: а) алгебраически максимальные (девиаторное растяжение); б) промежуточные; в) алгебраически минимальные

(максимальное сжатие); г) геодинамический тип напряженного состояния. Каталоги механизмов очагов землетрясений для магнитудных диапазонов: I) - -1.5 – 0.8; II) -2.0 – 0.0; III) -3.0 – -1.0

Анализ наиболее крупных трещин (10 событий) ориентировано субвертикально или с небольшим наклоном. Большая часть из них имеют субмеридиональное простирание, а для четырех трещин их простирания отклонены на северо-восток. Для всех этих трещин вторичные отрывы распространяются в латеральном направлении. Плоскости трех трещин ориентированы полого. Для них вторичные отрывы ориентированы субвертикально. На рис. 4 показано положение 2-х трещин сдвига для микро-землетрясений из каталога высоких магнитуд.

Знание положения в пространстве и ориентации плоскостей первичных трещин сдвига и вторичных отрывов помогает сделать прогноз о расположении зон повышенных коллекторских свойств. По этим данным можно также понять, произошел ли разрыв запирающей покрышки нефегазоносного пласта. В принципе, подобного типа данные позволяют осуществлять работы по блокированию таких разрывов. Важно отметить, что в случае проникновения через верхний запирающий слой субвертикально ориентированной вторичной трещины отрыва разрушение залежи может произойти, если эта трещина будет способна достаточно долго существовать в таком раскрытом состоянии. Однако подобная ситуация возможна только, когда такая вторичная трещина возникала вблизи скважины, подаваемый в заскваженное пространство параллельно с водной фазой, попав в такую трещину, зафиксирует ее раскрытие. В других случаях вторичная трещина отрыва долго в раскрытом состоянии не может оставаться из-за высокого тектонического давления и спадающего во времени давления флюида.



187, 4279, 0.3, 57, 68, -178, 0.8



533, 10910, 0.0, 231, 28, 153, 0.64

Рис. 4. Ориентация в глубине месторождения 2-х крупных первичных трещин сдвига – микро-землетрясения (светло-серая заливка) и вторичных трещин отрыва (красная заливка). По каждым рисунком для данного микро-землетрясения указаны: номер из общего каталога, время, магнитуда, азимут простирания реализованной нодальной плоскости (strike), угол ее погружения (dip) и угол направления скольжения висячего крыла относительно лежачего (rake). На рисунках показаны горизонтальные границы раздела слоев и вертикальные скважины (синяя – нагнетательная, желтая – наблюдательная)

Литература

- 1. Белоусов В.В. Основы структурной геологии. М.: Недра. 1985. 207 с.
- 2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 535 с.

- 3. Николя А. Основы деформации горных пород. М.: Мир. 1992. 167 с.
- 4. Райс Дж. Механика очага землетрясения. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир. 1982. 217 с.
- 5. Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. 2003. Т. 3, № 2. С. 237-241.
- 6. Ребецкий. Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений второй этап реконструкции по данным о разрывных смещений // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. Киев. С. 39-54.
- 7. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига. 2007. 406 с.
- 8. Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 70-84.
- 9. Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра. 1977. 144 с.
- Шамина О.Г. Модельные исследования физики очага землетрясений. М.: Наука. 1981.
 192 с.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСОМ РАЗЛИЧНЫХ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФРУСТУМАЦИОННОГО (КУСКОВАТОГО) ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МАССИВНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И СВЯЗАННОЙ С НИМ СИСТЕМ ПЕРВИЧНОЙ МИКРОТРЕЩИНОВАТОСТИ <u>Поваренных Михаил Юрьевич</u>¹⁾, Матвиенко Елена Николаевна²⁾

¹⁾Ин-т Истории естествознания и техники РАН (ИИЕТ РАН), Москва

²⁾Минералогический музей РАН им. А.Е. Ферсмана (ФММ РАН), Москва

Развитие в синергетическом смысле идей В.И. Драгунова и Д.В. Рундквиста об элементарных ячейках горных пород и академика М.А. Садовского о дискретности геофизической среды («естественной кусковатости») привело к установлению нового макроскопического горнопородного явления – первичной кусковатости, облечённой системой первичной субмикротрещиноватости, или фрустумации (от латинского «фрустум» - кусок), сначала для простых по минеральному составу и генезису, а затем и для полиминеральных и сложных по генезису горных пород. Предпосылки этого содержатся в работах С.М. Бескина, А.Г. Жабина, И.С. Делицина, А.Н. Никитина, О.А. Суставова, Н.З. Евзиковой, В.В. Индутного и М.Ю. Поваренных, а ещё ранее – в статье Д.С. Коржинского о локальном («мозаичном») равновесии в неравновесных геологических процессах и некоторых работах В.Ф. Левинсона-Лессинга [1, 2, 4-5, 7-8, 10-12, 25]. В отличие от феноменологически наблюдавшегося А.М. Садовским с сотрудниками явления дробления горных пород взрывом на дискретные гранулометрические фракции (и названного им «естественной кусковатостью» – блочностью), нами в неразрушенных горных породах визуализируется первичная кусковатость – скрытая текстура, существующая до разрушения и, возможно, регулирующая его [21-22].

Для выявления петрологической сущности фрустумации горных пород (от супертонкозернистых опалов до гигантозернистых кислых гранитных пегматитов и щелочных овоидофиров) проведён комплекс разномасштабных исследований (от нано- до дециметрового уровня) с использованием как традиционных минералого-петрографических методов, так и нейтронографического изучения текстур (метод малоуглового рассеяния нейтронов SANS), лазерно-ультразвуковой спектроскопии (Рис. 1), УЗИ-томографии (Рис. 2), УФ-люминесценции и сканирующей (Рис. 3) электронной микроскопии (Рис. 4-5) [13-20, 29].



Рис. 1. Визуализированная методом лазерной ультразвуковой эхоскопии картина фрустумации (или первичной кусковатости) мономинеральных горных пород (кибик-кордонского мелко-среднезернистого кальцит-доломитового мрамора, А; кыштымского мелко-среднезернистого гранулированного кварцита, В). Толщина образцов – 13 и 12 мм соответственно. Верхняя часть рисунка – исходная картина, нижняя – ретушированная.



Рис. 2. Визуализация фрустумационного внутреннего строения светло-серого мелкосреднезернистого гранита Мансуровского месторождения (Башкирия) с помощью томографического просвечивания с применением дефектоскопа УД-У2Н ΠM, предназначенного для измерения скорости распространения продольных волн с постоянной скоростью – 4000 м/с. Центральная частота датчиков – 100КГц. Обработка 625 замеров. Точки возбуждения и приёма располагались на противоположных сторонах образца размерами 10x10x9 см по равномерной сетке с квадратными ячейками со стороной 2 см. Отметим, что размер выявленных фрустумов (порядка 2.5÷3 см, показаны разным цветом согласно их акустической крепости) соизмерим с длиной излучаемой волны – 4 см. Кафедра сейсмометрии и геоакустики геофизического отделения геологического факультета МГУ. Аналитик Владов М.Л.



Рис. 3. А: Две генерации опала (обыкновенный, голубовато-серого цвета – ранняя и прожилок благородного, с иризацией в зеленовато-голубой гамме – поздняя) (см. также рис. 5). Образец КП-БО-3/13. Длина – 2.4 см. Кубер-Педи, Ю. Австралия. Сбор МЮП, август 2012 года. Фото А.А. Евсеева (Минералогический музей РАН). Б1–Б3: Фрустумация в искусственном благородном опале (Япония). Б1 – иризация в сине-зелёных тонах при естественном освещении; Б2 – ретушированные границы фрустумов в УФ-излучении (белые контуры); Б3 – фрустумы, выявленные в опалах при УФ-излучении. Длина образцов – 3 мм. Фото В.В. Морошкина (ФГУП «ВИМС»).



Рис. 4. Расположение глобул кремнезёма в разных фрустумах образца искусственного благородного опала (рис. 3 Б1), иризирующих синим и зелёным цветом: А – слева от границы II рода (в «синем» фрустуме). Размер монодисперсных слабо грануломорфных глобул кремнезёма, упакованных в «гексагональный» вариант квазиплотнейшей упаковки, составляет в среднем 242.5 нм. Расстояние между соседними интерстициями – 221 нм (в оптическом диапазоне соответствует синему цвету, λ=440–485 нм); Б – справа от границы II рода (в «зелёном» фрустуме). Расположение глобул кремнезёма с явно заметным «квадратным» мотивом искаженной кубической плотнейшей упаковки. Размер глобул составляет в среднем 230 нм. Расстояние между соседними интерстициями около 248 нм

(соответствует зелёному цвету, λ = 495–565 нм). Фото в отражённых электронах А.В. Кнотько (химический факультет МГУ).



Рис. 4. Характер фрустумации в искусственных и природных благородных и обыкновенных опалах: А - (3D-типа, «объёмная»), границы фрустумов ретушированы; Б1 и Б2 - (2D-типа, «слоевая») [3, 9].

Изучение разномасштабной трещиноватости проводилось в образцах разных горных пород на малоугловом нейтронном спектрометре ЮМО-реактора ИБР-2. В качестве дальнего детектора использовался новый позиционно-чувствительный детектор. Измерения проведены в стандартной геометрии. Образцы закреплялись в держателе, который помещался в бокс с контролируемой температурой. Обработка данных проведена с помощью пакета программ SAS. Рассеяние нейтронов проходило на пористо-трещиноватых структурах внутри вещества изученных образцов горных пород. Результаты свидетельствуют о наличии двух типов первичной субмикротрещиноватости: один - на размерном уровне апертуры трещин приблизительно от 4 нм (мы интерпретируем его как индукционные поверхности, растущих совместно и близодновременно зёрен минералов) и второй - на размерном уровне до 60 нм (мы интерпретируем его как некогерентные поверхности раздела между разрастающимися и входящими в соприкосновение первичными агрегатами минералов фрустумами [16-17, 19-20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б. Редкометальные гранитовые формации. Л.: Недра. 1979. 280 с.

2. Васильев В.И., Драгунов В.И., Рундквист Д.В. «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образований различных уровней организации // ЗВМО. 1972. Ч. СІ. Вып. 3. С. 281–289.

3. Высоцкий С.В., Курявый В.Г., Карабцов А.А. Наноструктура благородного опала месторождения Радужное (Северное Приморье, Россия) // ДАН. 2008. Т. 420. № 4. С. 516–519.

4. Делицин И.С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука. 1985. 191 с.

5. Делицин И.С. Элементарная ячейка горных пород и механизм их самоорганизации // Идея развития в геологии: Вещественный и структурный аспекты. Новосибирск. 1990. С. 273–280.

6. Денискина Н.Д., Калинин Д.В., Казанцева Л.К. Благородные опалы (природные и синтетические). Новосибирск: Наука. 1987. 173 с.

7. Евзикова Н.З. Общие принципы структурной организации геологических тел // Тр. Конгр. «Фундаментальные проблемы естествознания». Т. II. 2000. СПб. С. 24–38.

8. Жабин А.Г., Юшкин Н.П. Синтез и квантование пространства-времени в процессах природного минералообразования // ДАН. 1991. Т. 318. № 1. С. 164–168.

9. Калинин Н.С., Сердобинцева В.В. Генезис и поисковые критерии месторождений благородного опала // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 4. С. 340–347.

10. Коржинский Д.С. О равновесии при процессах минералообразования // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1965. № 2. С. 128–131.

11. Никитин А.Н. Образование пьезоэлектрических текстур в кварцсодержащих горных породах // Физ. Земли. 1996. № 10. С. 15–21.

12. Поваренных М.Ю. О пространственной регулярности («элементарной ячейке») горных пород. Труды конф. «Биохимические карбонаты антропогеновых озер и источников». Пермь. 1989. С. 138–151.

13. Поваренных М.Ю. К созданию естественной классификации горных пород на основе теоретико-системной концепции «элементарных ячеек». VIII Научный семинар «Система Планета Земля». М.: РОО «Гармония строения Земли и планет». 2000. С. 73–83.

14. Поваренных М.Ю. О фрустумации (свойстве первичной кусковатости, фрагментации) горных пород и её влиянии на их дробимость и возможность крупнокускового обогащения. Тр. Годичного собрания РМО. СПб. 2006. С. 168–176.

15. Поваренных М.Ю. Об установлении нового свойства горных пород – скрытой текстуры // Доклады РАН. 2008. Т. 419. № 2. С. 233–236.

16. Поваренных М.Ю., Бескин С.М. Применение современных технических и аналитических средств выявления первичной кусковатости (фрустумации или образования «элементарной ячейки») горных пород. Тр. I Всероссийского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск. 2006.С. 138–145.

17. Поваренных М.Ю., Жабин А.Г. Фрустумация (первичная кусковатость) горных пород как проявление квантования–зернистости горнопородного уровня простремени // Уральский геол. журнал. 2007. № 5 (59). С. 51–60.

18. Поваренных М.Ю., Загубный Д.Г., Корчуганова. Н.И. Поиски благородного опала в Южной Австралии с использованием дистанционных методов // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 31–40.

19. Поваренных М.Ю., Рассулов В.А., Матвиенко Е.Н. О скрытой текстуре (фрустумации) наиболее простых по минеральному составу и генезису горных пород // Мінерал. журн. (Ukraine). 2014. Т. 36. № 1. С. 88–100.

20. Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н. Развитие теории минералогии и петрографии. Теоретико-системное обоснование естественной классификации горных пород и построения Периодической Системы Минералов. Саарбрюккен. Изд-во LAP Lambert. 2014. 117 с.

21. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т.247. Вып. 4. С. 829-831.

22. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Препринт ИФЗ АН СССР. 1981. Вып. 1. С. 15–28.

23. Самойлович Л.А., Балакирев В.Г. и Самойлович С.М. Некоторые особенности микроструктуры синтетического и природного благородного А-опала // Разведка и охрана недр. 1995. № 3. С. 23–27.

24. Сердобинцева В.В., Калинин Д.В. и Восель С.В. Формы коллоидного кремнезёма, участвующие в образовании благородного опала, и механизм окремнения его гелевых кристаллов // Геология и геофизика. Т. 31. № 8. С. 1116–1120.

25. Суставов О.А. Структуры кристаллизации кварца в жильных полостях //Уральская минералогическая школа 2005. Екатеринбург. Изд-во УГГУ. 2005. 93 с.

26. Derjiagin B.V. & Landau L.D. Theory of stability of strongly charged lyophobic sols // Acta Physicochim. USSR. 1941. V. 14. P. 633–662.

27. Ingland, Jeremy. Dissipatio Ergo Sum // http://rusplt.ru/world/dissipatio-ergo-sum-7642.html?utm_source=smi2_russia&utm_ medium=cpc&utm_campaign= russia.

28. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J.Willey&Sons. 1977. 347 p.

29. Povarennykh M.Yu., Rassulov V.S., Lobzova R.V. Frustumation (fragmentation, lumpiness, «rock unit cells» formation) – the first discovery of the rock universal property. Proc. XI Int. Cong. Mathem. Geol. «Quantitative Geology from Multiple Sources»2. Liege. 2006. CD-ROM D/2006/0480/31.

30. Verwey F.I.W. & Overbeek J.Th. Theory of stability of lyophobic colloids. Amsterdam. 1948. 287 p.

Эффективное применения различных подходов рок-физики в петрофизической интерпретации для решения задач сейсмической инверсии

Некрасова Татьяна Владимировна, <u>Козлов Константин Дмитриевич</u>

CGG Geosoftware / ООО «СЖЖ Геосайенс ГмбХ»

Сейсмическая инверсия является одним из самых достоверных способов прогноза коллекторов и коллекторских свойств резервуара в межскважинном пространстве. Построение качественной петро-эластической модели лежит в основе успешной сейсмической инверсии. Так, основными задачами скважинной интерпретации, помимо получения количественных характеристик пластов-коллекторов, в комплексном сейсмическом проекте являются:

- анализ скважинных материалов для возможности их использования в сейсмической интерпретации;
- выбор типа сейсмической инверсии для прогноза свойств коллекторов;
- подготовка скважинных данных для проведения сейсмических инверсии.

В работе рассмотрены основные этапы обработки данных ГИС, которые позволяют решить эти задачи: коррекция данных в интервалах некачественной записи каротажа, интерпретация данных ГИС и моделирование упругих свойств на примере терригеннокарбонатных отложений одного из месторождений Самарской области. Объектами исследования являются песчано-глинистые отложения пласта В2, приуроченные к верхней части бобриковского горизонта, и доломитизированные известняки V1, приуроченные к верхней части отложений турнейского яруса.

Анализ и моделирование упругих свойств горных пород или рок-физика, является важным этапом при изучении физических свойств горных пород. Оно выполняет функции своеобразного «моста», который позволяет связать друг с другом петрофизические и сейсмические данные. Эта связь осуществляется через три основных параметра: Vp – скорость продольной волны, Vs – скорость поперечной волны, ρ – объемная плотность горных пород. Поэтому, акустическому и плотностному методу уделяется особое внимание.

На первом этапе анализируется исходная информация и отбираются скважины с максимальной записью вышеупомянутых методов.

Акустический и гамма-гамма плотностной каротаж обладают небольшим радиусом исследования, поэтому в интервалах размывов, вывалов и каверн показания методов будут скважинных искажены за счет различных условий. Так как при выполнении стратиграфической привязки сейсмических и скважинных данных контраст акустического импеданса на границах различных литотипов играет существенную роль, то некондиционные замеры в дальнейшем могут сказаться на ее качестве. На рисунке 1 показан пример привязки по исходному каротажу. Из-за недостатка данных синтезировать волновое поле и выполнить привязку не удалось. Поэтому важно получить непрерывную упругую характеристику пород не только в исследуемом интервале, но и значительно выше и ниже его. Для этого была выполнена нормализация и коррекция кривых плотностного и акустического каротажа в интервалах некачественной записи или её отсутствия. Коррекция осуществлялась с помощью эмпирических зависимостей на основе метода сопротивлений, нейтронного каротажа, уравнения Гарднера-Кастанья и т.д. Как видно из рисунка 2, по скорректированным данным удалось создаться синтетическое волновое поле, что позволило надёжно привязать сейсмические данные к данным ГИС, извлечь сейсмический импульс и построить низкочастотную модель.



Рисунок 1. Привязка сейсмических и скважинных данных по исходному каротажу скважины № М_60. а - исходные кривые акустического и плотностного каротажа, б – сейсмическое волновое поле, в – синтетическое волновое поле.



Рисунок 2. Привязка сейсмических и скважинных данных по скорректированному каротажу скважины № М_60. а - скорректированные кривые акустического и плотностного каротажа, б — сейсмическое волновое поле, в синтетическое волновое поле.

Вторым этапом работ является петрофизическая интерпретация данных ГИС, целью которой является получение объемной модели, которая включает в себя:

- объемную глинистость (полученную по палетке Ларионова с использованием двойного разностного параметра);
- объемное содержание компонент скелета породы известняка и доломита (по комплексной интерпретации нейтронного и плотностного методов);
- открытую пористость породы (оцененную по нейтронному каротажу традиционным способом двух опорных пластов, с введением поправки за глинистость и литологический состав), заполненную насыщающим флюидом (оценка насыщения осуществлялась по методике Дахнова-Арчи).

Данная объемная модель и количественные критерии, установленные при анализе керновых данных, были положены в основу выделения следующих литотипов:

- песчаник нефтенасыщенный;
- песчаник водонасыщенный;
- глинистый неколлектор;
- плотный неколлектор;
- коллектор известняк нефтенасыщенный;
- коллектор известняк водонасыщенный;
- известняк неколлектор;

Заключительным этапом было применение теоретического подхода рок-физики, основной целью которого являлось получение модельных, не искаженных различными скважинными условиями, кривых плотности (RHOB_MOD), интервального времени продольных (DT_MOD) и поперечных (DTs_MOD) волн, а также получение DTs в

скважинах, где данного метода не было получено путем интерпретации волновых картин. Он представляет собой основу для интерпретации упругих свойств, рассчитанных по сейсмическим данным, с целью получения прогнозируемых коллекторских свойств, таких как пористость, насыщение и, возможно, проницаемость. Входными данными являются объемная петрофизическая модель, исходные каротажные кривые и априорная информация о месторождении (температура, давление и т.д.). Моделирование упругих свойств носит итерационный характер, при этом важно соблюдать соответствие параметров, используемых на этапе интерпретации данных и параметров, используемых при моделировании. Существует множество возможных комбинаций методов и приемов, которые позволяют получить с некоторыми допущениями и определенной долей вероятности хорошее соответствие модельных кривых с измеренными данными. В связи с этим при моделировании особую важность приобретает выбор определенной теоретической модели описания среды, которая бы наиболее полно отражала априорную геологическую информацию. Для того чтобы ограничить область возможных решений, модель должна быть простой и согласованной по всем скважинам. После тестирования различных алгоритмов в данной работе была выбрана широко используемая на практике «самосогласованная модель», которая является частным случаем модели включений. Для прогнозирования скоростей продольной и поперечной волны при различном насыщении использовалась низкочастотная модель Био-Гассмана. По результатам моделирования были построены графики сопоставления упругих параметров (акустического импеданса – AI, сдвигового импеданса – SI, отношения скорости продольной волны к скорости поперечной – Vp/Vs). Наиболее четкое разделение литотипов в поле упругих параметров наблюдается на кроссплотах «Vp/Vs – AI» (рисунок 3), что дает предпосылки для выполнения геостатистической инверсии.



1. Рисунок 3. Сопоставление Vp/Vs и акустического импеданса для пластов B2 и V1.

Таким образом, в ходе работы были получены количественные характеристики пластовколлекторов, скорректированы данные плотностного и акустического методов в интервалах некачественной записи, получены неискаженные кривые DT, DTS и плотности по 14 скважинам, которые в дальнейшем использовались на этапе геостатистической сейсмической инверсии.

МЕТОДЫ ОЦЕНОК ВОЗМОЖНОЙ ГИДРАТОНАСЫЩЕННОСТИ МОРСКИХ ОСАДКОВ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Суетнова Елена Ивановна

ИФЗ РАН Москва

Сейсмические исследования морского дна являются одним из основных методов обнаружения потенциально гидратосодержащих зон в морском дне. Газовые гидраты - это льдо-подобные соединения, которые образуются из воды и газа (в основном метана), содержащихся в порах и трещинах в осадках [1]. Газовые гидраты стабильны в определенном интервале температуры и давления в осадках в морском дне (рис 1).



Рис.1. А. Термобарические условия стабильности газовых гидратов.

В. Принципиальная схема зоны стабильности газовых гидратов в морском дне.

Благоприятные для образования и стабильности термобарические условия широко распространены в морском дне [2]. Исследования процессов образования гидратных скоплений в морском дне показали, что уровень гидратонасыщенности, при достаточном объеме газа и соблюдении термобарических условий стабильности гидратов, зависит от истории формирования осадочного бассейна, то есть от скорости седиментации и свойств осадков. пористости, и реологических и фильтрационных свойств осадков [3].

Как правило, признаком присутствия газовых гидратов в морских осадках является наличие сейсмической границы BSR . BSR является сейсмической отражающей границей,

повторяющей рельеф морского дна и, возможно, секущей границы осадочных слоев и используется как индикатор наличия газовых гидратов в морском дне [2].

Сейсмическая граница BSR интерпретируется как нижняя граница устойчивости газовых гидратов в структурах морского дна, ниже которой изменение сейсмических скоростей определяется наличием свободного газа в осадках, а выше - присутствием гидратов [3]. Глубина BSR, обусловленной наличием границы между содержащими гидраты осадками и осадками, содержащими некоторое количество свободного газа, должна соответствовать глубине пересечения кривой термобарической стабильности газовых гидратов с геотермой в осадках в области распространения BSR.

Наличие гидрата в осадках непосредственно над границей устойчивости газовых гидратов и наличие некоторого количества свободного газа непосредственно ниже границы устойчивости и создает резкое изменение свойств среды осадков. Однако, выраженность этого изменения естественно должна зависеть от гидратонасыщенности и истории уплотнения и погружения осадков, приводящей к разложению гидратов и появлению свободного газа в порах в процессе погружения осадков ниже интервала глубин стабильности гидратов.

Заполнение части порового пространства гидратами и заполнение части порового пространства газом изменяют механические свойства осадков, и тем самым скорости распространения в них сейсмических волн. Это обстоятельство может быть использовано для оценки гидратонасыщенности путем сравнения механических свойств и скоростей сейсмических волн для гидратонасыщенных и свободных от гидратов осадков.

Измерения скоростей сейсмических волн в керне в экспериментах METI/MITI Exploratory Test Wells показали, что увеличение гидратонасыщенности на 10% приводит к повышению Vp на 140m/s и Vs на 110m/s, а для гидратонасыщенности 30% скорость Vp =2000m/s и Vs = 800m/s [4].

Однако важно отметить, что гидратонасыщенность изменяет скорости сейсмических волн (то есть упругие свойства), но почти не изменяет плотность гидратосодержащих осадков, в силу небольшой разницы плотностей гидрата и порового флюида, а также мало изменяет анизотропию и затухание.

Скорости и плотности осадков выше и ниже BSR определяются при применении методов интерпретации, как например AVO метод [5], но эти методы не дают оценок гидратонасыщенности.

Для оценки гидратонасыщенности осадков по сейсмическим скоростям над BSR используется модель вмещающей среды осадков (литология, плотность, пористость, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) и известные значения этих же свойств газовых гидратов для дальнейшего решения обратной задачи - вычислений величины гидратонасыщенности, которая с заданной точностью обеспечит полученные значения скоростей сейсмических волн. Однако методы, используемые для вычисления физических свойств осадков в зависимости от их гидратонасыщенности используются разные.

В работе [6] для оценки гидратонасыщенности использовалось сравнение значений скоростей сейсмических волн на глубине предполагаемого гидратонасыщенного слоя, с

скоростями на этой глубине для тех же пород но без гидратов. Вычислялись соответствующие значения пористости по закону «нормального уплотнения», и получавшееся различие в значениях пористости и определяло объем порового пространства, занятый гидратами.

В исследовании [4] для оценки гидратонасыщенности использовалось сравнение значений скоростей сейсмических волн на глубине предполагаемого гидратонасыщенного слоя с результатами лабораторных данных измерений скоростей образцов гидратонасыщенных кернов. Различные эмпирические соотношения используются часто, но их использование ограничено, как правило, конкретными геофизическими объектами, для которых эти соотношения получены [7].

Для определения гидратонасыщенности по сейсмическим данным также использовалась теория Френкеля-Гассмана, которая дала оценки гидратонасыщенности в Норвежском море, согласующиеся с оценками, полученными другими методами [8].

Для оценки гидратонасыщенности по сейсмическим данным также часто используются методы в рамках теории эффективных сред [9,10, 11, 12,13].

По результатам исследования [9] авторы делают вывод, что использование методики комбинированной SCA-DEM теории подходит для моделирования свойств гидратонасыщенных глинистых осадков, а EMTH теории [10] – для содержащих песчаник.

Следует отметить, что для повышения достоверности определения влияния гидратонасыщенности на скорости сейсмических волн с помощью методов теории эффективных сред требуется иметь обоснованные предположения о характере заполнения гидратами порового пространства, который зависит от микроструктуры осадков [11], но этот вопрос еще мало изучен [12]. Достоверность оценок гидратонасыщенности осадков, полученных по интерпретации сейсмических данных, должна проверяться сопоставлением с оценками, полученными другими геофизическими методами [13].

Список литературы

1. Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases. N-Y.: Marcel Dekker, 1997. 705 p.

2. Hyndman R.D., Davis E.E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom simulating reflectors by vertical fluid expulsion // J. Geophys. Res. 1992. V.97. N B5. P.6683–7041.

3. Суетнова Е.И. Накопление газгидратов и уплотнение накапливающихся осадков: проблема взаимовлияния процессов // Докл. РАН. 2007. Т. 415, № 6. С. 818–822.

4. Ai-Guo LI, Jia-Biao CHU. Feng-You LI, Xiang-Yun. AVO numerical simulation of gas hydrate reflectors beneath sea flow // CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS. 2006. Vol.49. No.6. P. 1665-1675.

5. Research Consortium on Developing Methane Hydrate Resources Comprehensive. Report of Research Results. 2008. Japan.

6. Wood W.T., P.L. Stoffa, T.H.Shipley. Quantitative detection of methane hydrate through high resolution seismic velocity analysis // J. Geoph. Res. 1994. V.99.B5. P. 9681-9695.

7. Lu Sh., G. A. McMechan. Estimation of gas hydrate and free gas saturation, concentration, and distribution from seismic data // GEOPHYSICS. 2002. VOL. 67. NO. 2. P. 582–593.

8. Zillmer M., T. Reston, T. Leythaeuser, and E. R. Flueh.Imaging and quantification of gas hydrate and free gas at the Storegga slide offshore Norway // GEOPHYS. RES. LETT. 2005. VOL. 32. L04308. doi:10.1029/2004GL021535.

9. Kalachand Sain, Ranjana Ghosh, Maheswar Ojha. Rock physics modeling for assessing gas hydrate and free gas:a case study in the Cascadia accretionary prism // Mar Geophys Res (2010) 31:109–119. DOI 10.1007/s11001-010-9086-9

10. Helgerud MB, Dvorkin J, Nur A (1999) Elastic-wave velocity in

marine sediments with gas hydrates: effective medium modeling.

Geophys Res Lett 26:2021-2024

11. Yun T. S., F. M. Francisca, J. C. Santamarina, and C. Ruppel. Compressional and shear wave velocities in uncemented sediment containing gas hydrate // GEOPHYS. RES. LETT. 2005. VOL. 32. L10609, doi:10.1029/2005GL022607.

12. Chand S, Minshull TA, Gei D, Carcione JM Elastic velocity

models for gas hydrate-bearing sediments-a comparison. Geophys. J. Int. 2004. 159:573-590.

13. Kumar Dh, et al. Methods of gas hydrate concentration estimation with field examples // GEOHORIZONS. 2009. December. 76.

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ В ИПФ РАН.

Авербах В.С., Коньков А.И., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И. В представленном докладе рассмотрена история и перспектива развития методов инженерной разведки в Институте прикладной физики РАН. Обращено внимание на особенности используемых сигналов и открывающиеся при этом возможности по нестандартным методам зондирования природных сред. Рассмотрены примеры решения двух задач инженерной геофизики: (1) профилирования при наличии границ со слабым контрастом параметров и (2) поиска неоднородностей слабого контраста.

Сейсмоакустические исследования в ИПФ РАН берут начало с середины 90-х годов, когда было предложено рассмотреть вопрос об использовании когерентных гидроакустических источников в геофизике (подробнее см. <u>http://www.iapras.ru/structure/lab_232/research2.html</u>). Исследования подтвердили перспективность идеи. Возможность долговременного накопления сигналов, обусловленная стабильностью сейсмоакустического излучения, позволяет реализовать методы зондирования, которые ранее были невозможны. Подробный обзор работ, выполненных до 2003 года, представлен в статье [1]. Выделим важные отличительные особенности. Во-первых, долговременная стабильность обеспечивает высокое отношение сигнал-шум, которое в стандартных реализациях возможно при использовании мощных взрывных или иных энергоемких источников. Во-вторых, открываются возможности по созданию синтезированных апертур по излучению и приему сейсмоакустических сигналов.

В качестве примера использования развиваемых нами методов сейсмоакустики рассмот-



Рис. 1. Геометрия эксперимента

рим метод фазового межскважинного профилирования [2] и модифицированный метод MASW [3]. На геофизическом полигоне ИПФ РАН имеется три скважины глубиной 18 метров, расстояние между ближайшими – 3 метра, расстояние до удаленной – 50 метров. Схема эксперимента с когерентным скважинным источником SH-волн показана на рис. 1. Здесь же отражено

строение среды, отвечающее геологическому анализу при бурении скважины под воду на расстоянии 500 метров от экспериментальной площадки.

Грунт характеризуется значительным фактором потерь ($\eta \cong 0.02$ -0.05) с максимумом поглощения в верхних (рыхлых) слоях. Рабочая полоса принимаемых частот сложного сигнала (ЛЧМ) когерентного излучателя определялась отношением сигнал/шум и составляла около 40 Гц в окрестности 120 Гц. Из-за сильного затухания сигнала при малом контрасте скоростей распространения сдвиговых волн в слоях оказалось невозможным выполнить профилирование стандартными методами. Поэтому было предложено использовать хорошо известный в радиолокации метод фазовых измерений. В этом случае для каждой из 15 глубин векторного геофона выполнялось стробирование сигнала во временном окне, отвечающем средней задержке распространения волны τ_0 . Затем с учетом малого контраста скорости сдвиговых волн на границах вычислялись поправки, связанные с фазовым запаздыванием для каждого положения геофона $\tau_n = \Delta \phi/\omega$, и решалась задача о распространении волн через пачку слоев. Суммарное запаздывание составляет $\tau_0+\tau_n$, что при известном расстоянии позволяет определить среднюю скорость распространения сдвиговой волны. В результате было получено распределение скоростей сдвиговых волн по глубине, представленное на рис. 2. Симво-



Рис. 2. Профиль скорости SH-волны. Дисперсия отвечает вариациям в полосе частот 100–140 Гц, где когерентность принятого сигнала максимальна.

лы на рис. 2 отвечают измеренным средним скоростям (величины отвечают оси абсцисс сверху на рис. 2). Серая линия представляет собой результат решения задачи о распространении волны через пачку слоев (величины отвечаю оси абсцисс снизу на рис. 2). Число слоев варьировалось, и было установлено, что их количество не превышает 6, что также хорошо видно по тому, как группируются данные для средних скоростей. Последний приповерхностный слой глубиной 0.5 метра (пунктирная линия на рис. 2) был добавлен по результатам измерения скорости распространения поверхностной волны Рэлея в той же области частот.

Нетрудно видеть, что использование фазового метода измерений позволило разрешить слои супеси, суглинка и глины в случае, когда стандартные методы профилирования оказались непригодны. При этом следует отметить удовлетворительное согласие местоположения границ с

данными отбора кернов при бурении скважины под воду (рис. 1). Незначительные расхождения глубин раздела на рис. 1 и 2 отвечают углам наклона слоев около 1 градуса.

Второй пример использования когерентной инженерной сейсморазведки связан с использованием поверхностных волн Рэлея. Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) хорошо известен в инженерной геофизике. Он основан на использовании дисперсии поверхностной волны, обусловленной зависимостью скорости сдвиговой волны от глубины. В стандартной реализации используются геофоны вертикальной поляризации, а пересчет скорости волны Рэлея к скорости сдвиговой волны выполняется в предположении заданного априори коэффициента Пуассона среды. Нами была предложена модификация метода MASW [3], учитывающая обе проекции вектора смещений дневной поверхности в волне Рэлея. При этом наряду с дисперсией скорости волны Рэлея анализируется частотная зави-



Рис. 3. Схема измерений по мониторингу насыщенности грунта водой.

симость отношения модулей проекций вектора смещения. Это позволило отказаться от априорного задания величины коэффициента Пуассона. Предложенная модификация позволяет не только оценивать вертикальный профиль скорости волны сдвига, но и профиль коэффициента Пуассона. Становится возможным определение, например, насыщенности верхних слоев жидкостью (оценка устойчивости грунта, решение экологических задач).

Эксперимент по дистанционному мониторингу насыщенности был проведен в 2013 году [4]. На контрольную область (заштрихована на рис. 3) выливался известный объем воды. Маленькие кружки и прямоугольники на рис. 3 отвечают положению геофонов вертикальной и горизонтальной поляризаций, большой кружок – положению излучателя. Для предотвращения растекания воды в стороны перед проведением эксперимента верхний слой почвы разрыхлялся на глубину порядка 5 см.

Результат реконструкции параметров среды представлен на рис. 4. Красному цвету

отвечает начальное состояние грунта, синему – в начале второго дня проведения измерений, черному – в конце второго дня. Синие линии отвечают выпадению 21 мм осадков, черные – практически полному насыщению, что соответствует 50 мм осадков или приблизительно месячной норме осадков в месте проведения измерений.

Сплошные линии на рис. 4 обозначают профили скорости сдвиговой волны в соответствующие стадии проведения эксперимента, пунктирные – профили скорости продольной волны.

Нетрудно видеть, что верхний почвенный слой мощностью 30 см равномерно насыщается жидкостью. При этом скорость волны сдвига уменьшается из-за ослабления связей между зер-



Рис. 4. Реконструированные величины скоростей объемных волн

нами, а скорость продольной волны растет из-за увеличения объемной жесткости пространства пор, заполненного жидкостью. Нижележащий слой до глубины 1.5 метра обнаруживает монотонное уменьшение обеих скоростей, что связывается с ослаблением связей в гранулированной среде. Уменьшение скорости продольной волны также указывает на фильтрацию жидкости в глубинные слои. И, наконец, характер изменения величин скоростей в третьем слое указывает на появление капиллярных сил сжатия зерен при просачивании жидкости сверху, что приводит к небольшому увеличению скоростей по мере насыщения.

Таким образом, показана возможность дистанционной диагностики свойств грунта при насыщении пространства пор жидкостью. Это представляет интерес, например, для оценки устойчивости грунта. Дистанционная диагностика просачивания жидкости может быть также использована для оценки степени загрязнения жидкими отходами, исследования миграции жидкости в гранулированной среде и т.п. Полученные результаты представляют интерес для инженерной геофизики и при решении экологических задач.

В 2014 году нами был выполнен ряд исследований, показавших перспективность развиваемого метода для оценки устойчивости склонов, диагностики протечки трубопроводов. Еще один интересный пример – это использование методов инженерной сейсморазведки для оконтуривания древних захоронений. Поисковая работа проводилась совместно с историческим факультетом ННГУ на месте археологических раскопок поселения IV-VI веков. Проблема использования геофизических методов в условиях Русской равнины заключается в слабом контрасте параметров грунта и представляющих интерес для археологов останков. Мы рассчитывали на высокую чувствительность нашего метода, поскольку по своей сути он фазовый, как и в рассмотренном выше примере межскважинного профилирования.



Рис. 5. Свойства волны Рэлея на месте археологических раскопок.

На рис. 5 в яркостном виде представлено распределение отношения проекций вектора смещения поверхности в волне Рэлея на площадке планируемых в 2015 году раскопок. Яркие пятна отвечают аномалиям коэффициента Пуассона. По мнению археологов, местоположение аномалий приблизительно соответствует их ожиданиям. Раскопки 2015 года должны либо подтвердить, либо опровергнуть эти предположения.

Таким образом, на основе опыта выполненных исследований мы пришли к выводу о целесообразности развития предложенной в середине 90-х годов идеи использования

когерентных источников сейсмоакустического излучения и соответствующих методов обработки данных. В представленном материале невозможно отразить все направления исследований, которые проводятся в ИПФ РАН в области инженерной сейсморазведки. В частности, мы не затронули важные, с нашей точки зрения, направления комплексных исследований, включающих совместную обработку данных натурных и лабораторных экспериментов. Ряд других, не менее интересных, примеров и полученные результаты представлены в научнопопулярной форме на нашей страничке www.iapras.ru/structure/lab_232/info.html.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 14-02-00695, 15-05-08196, 15-45-02450, 14-05-31249 мол_а, а также программы фундаментальных научных исследований «Фундаментальные основы акустической диагностики природных и искусственных сред».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лебедев А.В., Малеханов А.И. Когерентная сейсмоакустика // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 7. С. 579–597.

[2] Авербах В.С., Лебедев А.В., Манаков С.А., Таланов В.И. Фазовый метод межскважинного профилирования на когерентных SH-волнах // *Акустический Журнал*. 2012. Т. 58. № 5. С. 649–655.

[3] Konkov A.I., Lebedev A.V., Manakov S.A. Rayleigh wave dispersive properties of a vector displacement as a tool for P- and S-wave velocities near surface profiling // Handbook of Geomathematics. Springer, Heidelberg, second edition. 2014. P. 1–15.

[4] Коньков А.И., Лебедев А.В., Манаков С.А., Дистанционная диагностика состояния грунтов с использованием информации о поверхностной волне Рэлея / Труды всероссийской акустической конференции (06-09 октября 2014, Москва, Ленинский проспект, дом 32А), секция «Геоакустика», С.52–58.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<u>Попов Дмитрий Андреевич</u>, Мусин Марат Витальевич, Половков Вячеслав Владимирович, Рослов Юрий Викторович, Молодцов Дмитрий Михайлович, Кучеровский Глеб Алексеевич (ООО "Сейсмо-Шельф")

ООО «Сейсмо-Шельф», Санкт-Петербург

Физическое моделирование распространения сейсмических волн – это один из важнейших методов исследований в отрасли, нацеленный на повышение информативности сейсмических наблюдений, а также достоверности методов обработки и интерпретации их результатов. Наряду с математическим моделированием метод позволяет получать волновые поля от полностью контролируемых моделей с точно известным строением и акустическими свойствами. При этом результаты физического моделирования не зависят от степени изученности характера волновых процессов, не подвержены несовершенству уравнений описывающих распространение волн (их упрощениям, допущениям, аппроксимациям конечной точности и пр.) и применяемых программных алгоритмов, также имеющих свои ограничения и недостатки.

В процессе физического моделирования изучаемая среда с характерными размерами порядка единиц - десятков километров масштабируется до модели с размерами десятки сантиметров - первые метры. При этом для сохранения соотношений, обеспечивающих корректность получаемого результата, пропорционально увеличиваются частоты измерений. Наиболее часто используемый коэффициент подобия, выбираемый при исследованиях, составляет 1:10'000, т.е. реальный размер 1 км в модельном масштабе соответствует расстоянию 10 см, а частота 30 Гц - значению 300 кГц. При этом, наблюдаемые волновые эффекты (с учетом конечных размеров приемных и передающих преобразователей, ограничений их диаграммы направленности и т.д.) полностью соответствуют эффектам, регистрируемым в реальных средах [Хилтерман, 2010; Ивакин, 1969].

Использование современных материалов и технологий позволяет создавать сплошные объекты произвольной формы со скоростями продольных волн от 1000 до 4000 м/с, моделировать высокоскоростные включения и слои (скорости до 6000 м/с и более), трещиноватые и флюидонаполненные среды. Известны работы по созданию и моделированию сложнопостроенных структур (3D сверхдетальная съемка реалистичных моделей [Wu et al., 2014]), 9C и 4D - сейсморазведки [Sharma R., 2010; Wardhana R., 2001]. Используемая аппаратура и методические подходы позволяют определять параметры создаваемых моделей до долей процента [Di et al., 2006] и без потерь регистрировать сотни миллионов сейсмических трасс на каждой исследуемой модели [Di et al., 2006]. Эти возможности определяют новый уровень физического моделирования - способность решать уже не частные задачи распространения волн в простых средах, а моделирование реальных производственных систем наблюдений с использованием физических моделей, максимально приближенных к предполагаемому геологическому строению исследуемой площади.

В нашей стране на данный момент имеется значительное отставание технологий физического моделирования относительно лучших мировых лабораторий (Houston University, Beijing Petroleum University, University of Calgary и т.д.) [Evans et al., 2007], однако имеются серьезные практические и теоретические наработки по этой теме [Караев, 1991; Бобров и др., 1984; Кауров, 1995].

В рамках базового проекта № 7.4-11/13 «Создать электронный Атлас волновых полей типовых геологических моделей консолидированной земной коры (по результатам физического моделирования) как основу для интерпретации данных глубинных сейсмических исследований на опорных профилях» (заказчик – "Роснедра") перед коллективом ООО «Сейсмо-Шельф» была поставлена задача реализации аппаратно-программного комплекса для проведения физического сейсмического ультразвукового моделирования.

Созданный в 2014 году комплекс представляет собой компьютеризированную установку для излучения и регистрации ультразвуковых колебаний, а так же управления системой 2-D позиционирования (с ЧПУ) пьезокерамических датчиков на твердой исследуемой поверхности. Блок-схема аппаратного комплекса приведена на рисунке 1.



Рисунок 1. Блок-схема аппаратно-программного комплекса (слева) и лаборатория физического моделирования волновых полей (справа) в ООО «Сейсмо-Шельф»

Управление устройствами происходит посредством многофункциональной платы АЦП ADlink DAQ-2010, установленной в PCI-слот персонального компьютера. У платы задействованы 14 программируемых цифровых входа/выхода (управление шаговыми двигателями системы позиционирования, опрос концевых датчиков, управление импульсным генератором), цифровой триггер (синхронизация платы с генератором сигнала) и 1-4 аналоговых дифференциальных входа (запись принимаемого сигнала).

Импульсный генератор, управляемый платой АЦП, генерирует импульс фиксированной длительности, который, поступая на вход высоковольтного усилителя, усиливается до амплитуды 50-750 Вольт. Имеется возможность точной установки длительности импульса, а так же дополнения его вторым независимым импульсом для гашения остаточных колебаний преобразователя. Сигнал поступает на пьезокерамический преобразователь—источник и излучается в среду. Прием колебаний осуществляется аналогичным пьезокерамическим приемником, сигнал усиливается усилителем заряда с изменяемым коэффициентом усиления и встроенным фильтром высоких частот, а затем регистрируется платой АЦП.

Фотография оборудованной лаборатории физического моделирования волновых полей с аппаратным комплексом представлена на рисунке 1.

Используемая система позиционирования преобразователей представляет собой управляемое компьютером устройство, обеспечивающее независимое перемещение приемного и передающего преобразователя вдоль одной линии (2D система флангового

типа), а так же подъем и опускание датчиков. Система имеет размеры основания 50х100см и позволяет производить измерения на профиле длиной до 70 см с шагом перемещения порядка 0.075мм, что с учетом используемого коэффициента подобия 1:20'000 дает длину профиля 14км и шаг перемещения 1.5 метра.

Для излучения и регистрации ультразвуковых колебаний используются пьезокерамические преобразователи различной конструкции. Для излучения и приема продольных волн используются преобразователи стандартной конструкции на основе РZTэлементов диаметром 2-10мм и толщиной 0.8-5мм. Элементы задемпфированы при помощи эпоксидных компаундов с добавлением порошка карбида вольфрама, либо при помощи алюминиевых или медных стержней большой длины [Бобров и др., 1984].

Для регистрации обменных волн используются преобразователи с 4-мя независимыми активными элементами, работающими на сжатие (на основе конструкции Л.Д. Гика и Б.А. Боброва [Бобров и др., 1984]. При этом на каждой точке производится одновременная регистрация данных для 4 каналов (усилительные и фильтрующие тракты полностью аналогичны) и затем, в процессе обработки, путем комбинации процедур сложения и вычитания, получаются сейсмограммы X, Y и Z компонент.

Использование малошумящих усилителей сигнала, а так же накоплений при каждом измерений позволяет получать данные очень высокого качества фактически с отсутствием случайных шумов (пример получаемых сейсмограмм представлен на рисунке 2).

Одной из первых физических моделей, на которой было проведено моделирование, являлась однородная среда с 4-мя горизонтально расположенными телами протяженностью по профилю 880, 440, 320 и 180 метров и мощностью 60 метров (при используемом коэффициенте подобия 1:20'000). Радиус первой зоны Френеля на глубине залегания тел - 590м. Полученный сейсмический разрез (кратность - 140), мигрированный до суммирования, представлен на рисунке 3.

Выводы

Создан физического сейсмического аппаратно-программный комплекс для Комплекс систему ультразвукового моделирования. имеет автоматического позиционирования излучающего и принимающего преобразователей под управлением специализированного ПО. Комплекс позволяет выполнять полностью автоматическую 3 С съемку сложнопостроенных геологических структур, осуществляя значительный объем физического моделирования в короткие сроки (порядка 50'000 трасс в сутки при 100 накоплениях на каждой трассе).



Рисунок 2. Пример получаемых сейсмограмм



Рисунок 3. Пример сейсмического разреза, полученного с помощью физического моделирования

Список использованных источников

1. Бобров Б.А., Гик Л.Д., Держи Н.М., Орлов Ю.А. Программно-аппаратурный комплекс "ЭХО-1" для ультразвукового сейсмического моделирования: Методические рекомендации. – Новосибирск: Институт геологии и геофизики, 1984. – 124 с.

2. Ивакин Б.Н. Методы моделирования сейсмических волновых явлений. – Москва: Издательство "Наука", 1969. – 287 с.

3. Кауров В.В. Технология физического моделирования для обеспечения сейсморазведочных работ на нефть и газ в условиях Западной Сибири // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - ВНИИГеофизика, 1995. - 22 с.

4. Караев Н.А. Физическое моделирование в задачах сейсмики гетерогенных сред // Физика Земли. – 1991 г. - №9. С. 110-123.

5. Хилтерман Ф.Д. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. – Тверь: ООО "Издательство ГЕРС", 2010. – 256 с.

6. Di B., Wei J., Mou Y. Seismic Physical Modeling Technology and Its Applications // Petroleum Science 2006, 3(2), 39-46. – 2006

7. Evans B., McDonald J., French W. Seismic physical modelling of reservoirs, its past, present and future // ASEG 2007 - 19th International Geophysical Conference & Exhibition. – 2007.

8. Sharma R., Ferguson R. 9C-3D Seismic Modeling for VTI media. – CREWES Research Report, 22, 2010.

9. Wardhana R. Analysis of Time-Lapse Seismic Technology Using a Physical Model of a Porous Channel Sand // A Thesis In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. – Unicersity of Houston, 2001. – 106 p.

10. Wu M., Di B., Wei J., Jia Z., Kong Z., Zhang Q., Zhang Y. Large, Complex Structure Seismic Physical Modeling Construction and Experiment Precision Analysis // 76th EAGE Conference & Exhibition, 16-19 June 2014, Amsterdam.

Ультразвуковые и акустические лабораторные измерения на моделях неконсолидированных придонных осадков.

Авторы: <u>Владов М.Л.,</u> Шалаева Н.В., Стручков В.А., Токарев М.Ю., Бричева С.С.

Результаты анализа современного состояния проблем измерений акустических свойств неконсолидированных осадков, позволяют обосновать задачу конкретных измерений.

Необходимость (актуальность) проведения физического моделирования по проблеме измерения акустических свойств в неконсолидированных осадках обусловлена следующими факторами.

Во-первых, огромным разнообразием сведений о значениях скоростей упругих волн, параметров поглощения и признаках нелинейного поведения этих осадков даже при воздействии акустической измерительной техники. И это разнообразие сведений относится к широко распространенным и хорошо изученным по другим позициям осадкам.

Во- вторых, отсутствие сколько-нибудь стандартизованной аппаратуры и методики измерений акустических свойств в лабораториях и отсутствие стандартизованных методик доставки образца неконсолидированного осадка в лабораторию, хотя бы набортную, не говоря уже о качественной консервации для доставки в лаборатории стационарные. При этом, существует несколько распространенных аппаратов и приемов измерений. Однако, анализ показывает, что они нередко приводят к разным значениям акустических параметров для осадков или моделей осадка с близкими параметрами литологии, гранулометрии, водонасыщения и статического давления.

В-третьих, желанием реализовать в этой области акустических измерений многоволновой подход, который в других областях сейсморазведки и сейсмоакустики зарекомендовал себя как мощное средство повышения эффективности таких измерений для понимания устройства сложнопостроенной среды и способа распространения упругих волн в ней.

В-четвертых, необходимостью опробовать разные аппаратно-методические средства измерений в лаборатории и сравнить эффективность их использования.

На этом основании и поставлены конкретные эксперименты представленные в сообщении.

Новые методы сейсмоакустического мониторинга в условиях Северного ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА.

Шуруп Андрей Сергеевич, Преснов Дмитрий Александрович, Жостков Руслан Александрович, Гусев Владимир Андреевич, Собисевич Алексей Леонидович.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук/ИФЗ РАН/Москва

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Физический факультет, Кафедра акустики/МГУ им. Ломоносова/Москва

Сегодня Северного минерально-сырьевые ресурсы континентального шельфа Ледовитого океана представляют собой весомую часть стратегического потенциала Российской Федерации. Мы приступили к промышленному освоению уже разведанных богатств, вводятся в эксплуатацию современные буровые платформы, в северные территории государство вкладывает значительные финансовые средства. Сформулированы основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 г. и на дальнейшую перспективу. Они определяют масштабы геолого-геофизических работ на шельфе, гидрографических и картографических исследований, обеспечивающих подготовку неопровержимых доказательств по обоснованию внешней границы Арктической зоны Российской Федерации и защиты наших национальных интересов в Организации Объединенных Наций (ООН). Эти работы успешно проводится с использованием научноисследовательских судов. Однако промежуток времени, когда можно выполнять все виды поисковых исследований с надводных судов на шельфе Северных морей, составляет от двух до трех летних месяцев.

Характеризуя сложившуюся обстановку необходимо принимать во внимание, что наши вероятные конкуренты в течение последних 10 лет развернули специализированные работы по созданию нового поколения морских информационно-измерительных систем, способных функционировать в сложных ледовых условиях. Здесь в первую очередь следует выделить вмороженные гидрофизические буи, которые оснащены различными измерительными системами, позволяющими получать данные об аномалиях уровня моря, о температуре верхней части океана и о солености, а так же аппаратурой УКВ и космической связи.

Таким образом, проблема критического увеличения стоимости и сложности реализации геологоразведочных работ в условиях ледового покрова требует разработки новых технологий мониторинга акваторий Северного ледовитого океана с целью поиска запасов углеводородов, а так же для обнаружения протяженных малошумящих подводных объектов.

Простейшей математической моделью [1-3] шельфовой зоны Северного ледовитого океана, позволяющей описывать сейсмические и акустические поля, является вертикально слоистая среда, состоящая ИЗ: упругого полупространства, моделирующего Землю. жидкого слоя (моря) и слоя льда, с упругими свойствами (рис. 1). Все среды считаются однородными в горизонтальной плоскости и изотропными.



Рис. 1. Геометрия слоистой среды.

В рамках соотношений теории упругости и механики сплошных сред для такой среды получено и численно исследовано дисперсионное уравнение [4], что позволило выделить важные закономерности распространения упругих волн, в условиях моря покрытого льдом.

Вид дисперсионных кривых сильно зависит от параметров контактирующих слоев: толщин, плотностей, параметров упругости (или скоростей объемных волн). На рис. 2 представлены характерные зависимости фазовых скоростей от частоты.



Рис. 2. Дисперсионные зависимости упругих волн в системе Земля-море-лед при $c_t < c_0 < c_l$. Сплошными линиями обозначены: І – изгибная волна, ІІ – "фундаментальная" мода, ІІІ – нормальные волны ледяного слоя как волновода, IV – гидроакустические моды, V – "квазипродольная" волна. Пунктирные линии соответствуют асимптотикам: c'_R и c_R – скорости рэлеевских волн, распространяющихся вдоль границы упругого полупространства и льда, соответственно; c'_s и c_s – скорости волн Стоунли–Шолтэ на границе "жидкость – твердое полупространство" и "жидкость – упругий слой", соответственно; c'_t и c_t – скорости поперечных волн во льду и в дне, c_0 – скорость продольных волн в водном слое. Штрихпунктирная линия (обозначена как Г) обозначает дисперсионную кривую изгибногравитационной волны.

Важным вопросом, определяющим возможность использования дисперсионных кривых при обработке экспериментальных данных, является их чувствительность к изменению параметров среды. Наиболее важными для практического применения являются толщина льда и характеристики дна. В качестве основного источника информации о характеристиках льда используют изгибные моды, в то время как параметры дна оказывают наибольшее влияние на фундаментальную моду. При этом для оценки глубинной структуры дна рассматриваются низкие частоты ~ 10 Гц. Из рис. 2 следует, что на частотах 0.5 – 10 Гц, которые могут представлять практический интерес, изгибная и фундаментальная моды присутствуют в сейсмоакустическом поле одновременно. В связи с этим возникает вопрос о возможности выделения в принимаемом сигнале этих двух мод с последующей раздельной оценкой параметров льда и дна. Поскольку изгибная и фундаментальная моды имеют заметно различающиеся скорости распространения, то в условиях эксперимента эти волны могут быть разделены по временам приходов. Кроме того, как показал анализ динамических характеристик, изгибная мода дает основной вклад в поле, принимаемое вблизи поверхности

льда, в то время как вклад фундаментальной моды на низких частотах существенен вблизи дна. Возможное решение задачи разделения в принимаемом сигнале мод указанных типов может быть основано на пространственно-временном анализе принимаемых полей при соответствующем выборе частотного диапазона.

Силами лаборатории 703 ИФЗ РАН в конце 2014 была проведена первая экспериментальная апробация представленных результатов на льду Умбозера (Мурманская область, г. Апатиты). Для регистрации искусственных сигналов (взрыв, удар кувалдой) использовались сейсмоприемник СМ-ЗОС, электронно-молекулярный датчик – Хемотрон, ненаправленный микрофон В&К и гидрофон. Схема эксперимента приведена на рис. 4а. На рис. 4 приведена запись ударов о лед кувалдой. Ожидалось, что принимаемый сигнал в основном сформирован изгибной модой.



В подтверждение этой гипотезы на рис. 4б приведена спектрограмма одного из пяти сигналов, представленных на рис. 3. Отчетливо видна зависимость скорости прихода сигналов от частоты. Тонкая белая линия на рис. 4б представляет дисперсионную зависимость групповой скорости изгибной моды, рассчитанную на основе полученного уравнения. Видно, что теоретическая кривая удовлетворительно описывают экспериментальные данные.



Рис. 4. а – схема полевого эксперимента, б – спектрограмма сейсмической записи, полученной на льду.

Следующим этапом исследований является переход к пассивным инструментам зондирования неоднородностей морского дна. Такой переход возможно осуществить на основе функции взаимной корреляции сигналов записанных двумя сейсмоприемниками [5]. Анализ корреляционной функции позволяет получить время распространения шумового сигнала от одного датчика до другого, как если бы один из них был источником, а другой приемником, следовательно, можно получить экспериментальную дисперсионную

зависимость. Тут встает задача фильтрации локализованных источников сигналов и отбеливания спектра, для получения изотропного шумового сигнала. Экспериментальная проверка пассивного метода запланирована на 2015 год.

неоднородности пространстве Для локализации В необходимо применять томографические методы, например основанные на разложении неоднородности скорости поверхностных волн по базисным функциям [6]. Тогда решение задачи сейсмоакустической томографии сводится к решению системы линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения восстанавливаемых неоднородностей по используемым базисам (на каждой частоте, т.е. для каждой глубины, отдельно). Предложенная схема сейсмоакустической томографии на поверхностных волнах прошла проверку на синтетических данных, полученных при помощи численного моделирования среды, состоящей из нескольких слоев.

Подводя итог, охарактеризуем перспективную ледовую антенную систему для круглогодичного мониторинга сейсмических и акустических полей в условиях Северного ледовитого океана. Элемент антенной системы представляет собой гидрофизический буй, в котором установлен сейсмоприёмник с вертикальным измерительным каналом, а в водную среду на поводке опущен гидрофон. Буй может быть дополнен донной сейсмической станцией. Для задачи локализации неоднородности буи разносятся по площади дрейфующего ледового покрова. Расположение системы на поверхности позволяет использовать канал ГЛОНАСС для передачи данных в реальном времени с регистратора в любую точку мира. Предлагаемая система позволит решать задачи разведки полезных ископаемых и контроля подводной обстановки в пассивном режиме, на основе измеряемых характеристик поверхностных волн, сформированных постоянным шумовым полем.

Работа проводится при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-05-00762 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

- 1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
- 2. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
- 3. Собисевич А.Л., Разин А.В. Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ РАН. 2012. 210 с.
- 4. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С.* Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. N 4. C. 426–436.
- 5. Буров В.А., Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Муханов П.Ю., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Выделение мод из шумового поля мелкого моря одиночными донными гидрофонами для целей пассивной томографии. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. N. 6. С. 611–622.
- 6. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Трехмерная модель томографического восстановления океанических неоднородностей при неизвестном расположении антенн. // Акуст. журн. 2011. Т. 57. N 3. C. 348–363.

Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических исследований на акваториях.

<u>Гайнанов Валерий Гарифьянович¹</u>, Токарев Михаил Юрьевич², Шматков Алексей Алексеевич³.

1-кафедра сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, 2- ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В.Ломоносова», 3- ООО «МГ-Сервис».

В нефтегазовой сейсморазведке морские 3D наблюдения стали уже массовым явлением. Комплексы оборудования для таких наблюдений производится компаниями Sercel (sercel.com) и InputOutput (iongeo.com). Технология в целом заключается в буксировке набора многоканальных кос за кормой судна, глубина буксировки и отвод кос от центральной линии задаются специальными «птичками». В них же устанавливаются приборы контроля глубин и координат. Косы буксируются на глубинах 5 -10 м, расстояние между косами составляет десятки метров.

Известны 3D системы для работы в сейсмоакустическом и акустическом диапазонах частот. Так как здесь расстояния между приемниками и глубины буксировки составляют всего несколько метров, или даже сантиметров, то конструкции таких систем уже другие.

В работе (Thomas et al., 2012) перечислено 8 таких систем, упорядоченных по разрешающей способности и глубинности исследований. Нам известно еще 5 таких систем, однако в рамках тезисов невозможно привести даже краткое описание всех 13 систем. Поэтому рассмотрим лишь 4 примера из разных частотных диапазонов:

Система [разработчик]	Источник, частотный диапазон	Число кос, приемников в косе, шаг наблюдений	Вертикальное разрешение	Площадь и глубинность исследований
Chirp3D [1]	Пьезокерамика [×4] 1.5 – 13 кГц	10 @ 25 см 6 @ 25 см	менее 10 см	менее км ² 10 м
Opus 3D [2]	Бумер 2 кГц	8 @ 2 м 2 @ 2 м	20 см	менее км ² 10 м
МГУ [3]	Спаркер 750 Гц	2 @ 12 м 16 @ 2 м	40 см	менее км ² 100 м
P-Cable 3D [4]	Пневмопушки 125 Гц	12-24 @ 12.5 м 8-48 @ 3.125 м	4 м	десятки км ² 100 м

Chirp3D

Система Chirp3D, разработанная в Национальном океанографическом центре (Саутгемптон, Великобритания) одна из наиболее высокочастотных систем, описанных в литературе.
Система представляет собой жесткую решетку размером 2 × 2.5 метра, в центре которой установлены 4 пьезокерамических источника, смонтированных в форме мальтийского креста (рис.1). Источники генерируют ЛЧМ-сигнал, форму которого можно задать со станции сбора данных, в частотном диапазоне от 1.5 до 13 кГц. Вокруг источника установлено 60 групп приемников (по 4 гидрофона в группе) на расстоянии 25 см друг от друга. Регистрация осуществляется 60-канальной сейсмической станцией. В связи с необходимостью высокоточной привязки на углах рамы установлено 4 дифференциальных ГНСС-приемника, что позволяет достичь среднеквадратичной точности не менее 2.6 см по вертикали и 2 см по горизонтали. Оптимальная скорость буксировки системы составляет 2 узла (Gutowski et al., 2008).



Рис. 4: Система Chirp3D. Схема устройства (сверху) и проведение полевых наблюдений (Gutowski et al., 2008)

Opus3D

Система Opus3D разработана в университете Гента (Бельгия). В качестве источника используется излучатель типа "бумер" с центральной частотой около 1 кГц и полосой частот до 3 кГц. Приемный массив состоит из 8 двухканальных кос (по 2 гидрофона на канал на расстоянии 25 см), которые буксируются на трех надувных модулях, закрепленных на лодке, которая также является носителем источника (рис.2). Расстояние между косами составляет 2 метра. Расстояние между каналами также составляет 2 метра. Позиционирование осуществляется с использованием DGPS-приемников в режиме кинематики в реальном времени. Система может использоваться как самостоятельно – в этом случае лодка является носителем, так и в буксируемом варианте (Missiaen et al., 2002).

Система, разработанная в МГУ.

На кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова была разработана и опробована летом 2014 года на акватории Белого моря

относительно простая система для трехмерных сейсмоакустических наблюдений (Шматков, Токарев, 2014).

Приёмная часть системы состоит из двух 16-канальных аналоговых сейсмических кос, буксируемых с двух выстрелов длиной около 4.5 метров, расположенных по бортам судна. Это обеспечивает разнос первых каналов сейсмических кос на 12 метров друг от друга. Для получения необходимой формы приёмной системы хвостовые части кос соединяются вместе (рис.3). Для возбуждения упругих колебаний используется излучатель типа «спаркер».





Рис. 2. Схема (вверху) и внешний вид (внизу) системы Opus3D (по Missiaen et al., 2005).



Рис.3. Схема проведения трёхмерных сейсмоакустических наблюдений с двумя многоканальными косами на мелководных акваториях (Шматков, Токарев, 2014).

P-Cable 3D

Система была разработана компанией Volcanic Basin Petroleum Research при участии университета Тромсе (Норвегия) и Национального Океанографического центра Саутгемптона (Великобритания) (Planke et al., 2009).

Основой системы P-Cable 3D является так называемый перпендикулярный кабель, буксируемый за судном. Кабель растягивается двумя параванами и к нему подключается от 12 до 24 сейсмических кос (рис.4). В качестве приемных элементов используются цифровые твердотельные сейсмические косы. В стандартной конфигурации каждая коса содержит в себе 8 каналов с шагом 3.125 метра, однако на практике могут применяться более длинные косы – до 200 метров. В качестве источника используются группы пневматических пушек Mini G.I. с центральной частотой от 100 до 250 Гц и полосой частот до 1000 Гц. Также проводились работы с использованием группы излучателей типа «бумер». Позиционирование системы осуществляется дифференциальными ГНСС-приемниками, закрепленными на пушке, параванах и судне.



Рис.4. Схема системы P-Cable: вид сверху (А) и сзади (Б) (Planke et al., 2009).

Литература.

Шматков А.А., Токарев М.Ю. Новая методика трёхмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях // Экспозиция Нефть Газ.-2014.-№6.-с. 39-42.

Gutowski M., Bull J.M., Dix J.K., Henstock T.J., Hogarth P., Hiller T., Leighton T.G., White P.R., 2008, 3D high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed, Applied Acoustics, Volume 69, pp. 412–421.

Missiaen T., Versteeg W. and Henriet J.-P., 2002, A new 3D seismic acquisition system for very high and ultra high resolution shallow water studies, First Break, Volume 20, Issue 4, pp. 227–232.

Planke S., Eriksen F., Berndt C., Mienert J. and Masson D., 2009, P-Cable High-Resolution Seismic, Oceanography, Volume 22, Issue 1, p. 85.

Thomas Y., Marsset B., Westbrook G.K., Grall C., Géli L., Henry P., Çifçi 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, Issue 10, pp. 291-301.

Когерентные методы сейсмоакустического зондирования морского дна **В.А. Лазарев¹**, <u>А.И. Малеханов¹</u>, Л.Р. Мерклин², В.И. Романова¹,

В.И. Таланов¹, А.И. Хилько¹

¹Институт прикладной физики РАН

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

E-mail: almal@appl.sci-nnov.ru

Как известно, стандартный для современной практики морской сейсморазведки подход к решению задачи профилирования неоднородной донной структуры, содержащей многочисленные отражающие слои, состоит в использовании некогерентных импульсных источников (как правило, пневмопушек или искровых разрядников – спаркеров) и протяженных приемных антенных систем (сейсмокос). К примеру, современные пневмопушки обеспечивают уровень сигнала в низкочастотном диапазоне до ~100 Гц, достаточный для достижения глубин сейсморазведки до нескольких километров. Вместе с тем, этот подход имеет серьезные технические ограничения эффективности, связанные, прежде всего, с самим характером излучаемого сигнала и определяемым им ограничениями пространственной разрешающей способности. Единственным способом увеличения пространственного разрешения при использовании подобных источников ударного типа является уменьшение длительности излучаемого импульса, которая ограничена снизу конструктивными особенностями и составляет не менее ~10 мс, что при характерных значениях скорости звуковых волн в донных породах обеспечивает разрешающую способность на уровне десятков метров. Помимо этого, важнейшей проблемой является создаваемая при таких режимах излучения мощная низкочастотная акустическая нагрузка на исследуемую акваторию и тот экологический урон, который при таком воздействии

147

оказывается неизбежным (воздействие на морских млекопитающих, промысловых рыб и т.п.).

Таким образом, несмотря на выдающиеся достижения современной морской сейсморазведки, актуальной остается проблема поиска и разработки альтернативных методов и технологий, обладающих как высоким потенциалом по пространственному разрешению разреза, так и удовлетворяющих требованиям экологической безопасности. В докладе обсуждается один из таких подходов, основанный на применении когерентных широкополосных сигналов.

Применение сейсмоакустических когерентных методов В исследованиях потенциально обладает целым рядом важных преимуществ [1,2]. Наибольший интерес для практического использования представляют в данном случае т.н. сложные сигналы широкополосные модулированные сигналы с большой базой (произведением длительности импульса Т на полосу его спектра F). Такие сигналы, как известно, обладают «игольчатыми» главного функциями автокорреляции, при ЭТОМ характерная ширина лепестка автокорреляционной функции оказывается значительно меньше длительности самого сигнального импульса (в число раз, равное величине базы FT >> 1). Это означает, что при корреляционной свертке принятого сигнала с опорным практически вся его мощность «фокусируется» в узком пике корреляционной функции, а сам этот пик физически эквивалентен (в смысле пространственного разрешения) одиночному видеоимпульсу такого же «игольчатого» вида, но значительно большей излучаемой мощности (в то же число раз). Кроме того, при обеспечении высокой воспроизводимости таких сигналов появляется дополнительная возможность значительного увеличения помехоустойчивости (следовательно, глубины проникновения) путем когерентного накопления длинной последовательности принятых сигналов, при ЭТОМ число импульсов В этой последовательности дает энергетический выигрыш, пропорциональный эквивалентной мощности одиночного «взрывного» сигнала. В результате уровень излучаемой мощности может быть понижен на несколько порядков при условии достижения тех же параметров эффективности зондирования – глубины и (или) контраста реконструируемой структуры отражающих донных слоев (что определяется выходным отношением сигнал/шум (ОСШ)) и ее пространственного разрешения (что определяется длительностью «сжатого» импульса в результате свертки). Более того, столь значительный энергетический выигрыш позволяет рассматривать практические возможности работы с более высокочастотными (до сотен Гц) сигналами, которые потенциально обладают более высоким разрешением, допускают

148

использование более компактных излучателей и облегчают техническую реализацию приемно-излучающего комплекса в целом.

Отмеченные преимущества когерентного подхода к решению задач морской сейсморазведки на базе сложных сигналов не являются специфическими именно для этой области приложений – они хорошо известны и используются, например, в радио- и гидролокации. Типичные и хорошо известные варианты выбора таких сигналов – сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазоманипулированные (т.н. псевдослучайные) сигналы. Эти сигналы обладают примерно одинаковыми возможностями по разрешающей способности, и при использовании излучателей, управляемых программируемым образом от компьютера, выбор тех или иных режимов формирования сигналов не представляет технических проблем. По существу, основная проблема заключается скорее в том, что в морской сейсморазведке практически отсутствуют на сегодняшний день источники с тем «потенциальных преимуществ (в отличие, к примеру, от полевой сейсмоакустики и инженерной геофизики [1]).

Вместе с тем, в связи с имеющимся в ИПФ РАН опытом разработки и использования целого «семейства» мощных гидроакустических источников в диапазонах частот от первых сотен Гц до единиц кГц, способных излучать высокостабильные и хорошо управляемые сигналы, в том числе, широкополосные сложные сигналы, возможность разработки когерентных методов морской сейсморазведки высокого разрешения представляется Подобные источники, ранее разработанные для решения различных задач реальной. зондирования водной толщи океана, могут рассматриваться как перспективный инструмент морской сейсмоакустики. Благодаря полностью электронному управлению режимами их излучения могут быть реализованы все принципиальные возможности когерентного подхода к сейсмоакустическому зондированию – согласованная фильтрация и свертка с опорным сигналом, длительное накопление сигнальной последовательности, синтез протяженной апертуры одиночным приемником (накопление сигналов по пространственной координате) и соответствующие возможности формирования ее направленных свойств. Отмеченные возможности были ранее экспериментально реализованы сотрудниками ИПФ РАН в серии полевых экспериментов, в которых использовались разработанные в институте оригинальные излучатели [1]. По существу, все эти возможности практически недоступны при использовании рутинных методов зондирования морского дна на основе «взрывных» источников.

149

Вслед за первыми экспериментами в этом направлении [2], ставившими своей целью продемонстрировать возможности когерентных методов морской сейсмоакустики, недавно сотрудниками ИПФ РАН и ИО РАН был выполнен совместный эксперимент на акватории Каспийского моря [3-5]. При его проведении использовался гидроакустический излучатель, генерирующий синхронизированные последовательности импульсных ЛЧМ сигналов в различных частотных полосах ~50...100 Гц в пределах широкого диапазона ~100 – 1000 Гц (наибольшая мощность излучения ~ 130 Вт отвечала полосе 180 – 230 Гц). В качестве приемной системы использовалась небольшая сейсмокоса, состоящая из 25 синфазных гидрофонов. На рис. 1 показана схема проведения экспериментов, которая является по сути стандартной схемой морской сейсморазведки с буксируемым приемно-излучающим комплексом.

Процедуры когерентной обработки принимаемых (отраженных от донных слоев) сигналов включали согласованную фильтрацию отдельных импульсов (свертку с опорным сигналом) и последовательное импульсное накопление в пределах «длины когерентности» вдоль трассы протяжки, величина которой ограничивалась главным образом вариациями глубины погружения самого излучателя, а также наклонами или искривлениями отдельных слоев. При буксировке гидроакустического излучателя со скоростью 3 узла в конкретных экспериментальных условиях возможность когерентного накопления последовательности отраженных от донных слоев импульсов была ограничена временным интервалом ~100...200 сек, что позволяло осуществлять эффективное накопление до нескольких десятков (~30) импульсов. В целях повышения качества реконструкции донной структуры был разработан метод послойного траекторного накопления импульсов с учетом наклонов отдельных отражающих слоев, который позволил не только увеличить число импульсов в когерентной последовательности (практически, до ~100), но и адаптивно оценить эти наклоны. Подчеркнем, что большинство принятых сигналов имели низкую помехоустойчивость (уровень входного ОСШ составлял не более 0 – 5 дБ), однако, результирующий выигрыш выходного ОСШ достигал величины 30 дБ, что позволило реконструировать структуру донных слоев в интервале глубин до ~1000 метров, при этом слои в интервале глубин свыше ~300-500 метров были полностью маскированы шумами без использования предложенных процедур обработки.



Осадочные структуры

Рис. 1. Схема экспериментов на акватории Каспийского моря (в качестве буксировщика использовалось НИС «Рифт»).

На рис. 2, 3 показаны результаты реконструкции донной структуры вдоль одной из трасс протяжки, демонстрирующие высокую эффективность предложенного метода. Фрагменты структуры, содержащие слабоконтрастные слои, отчетливо «проявились» в результате накопления длинной серии импульсов, в то время как только автокорреляционное сжатие отдельных импульсов на выходе согласованного фильтра не обеспечивало скольконибудь заметного контраста в условиях относительно небольшого (~10) значения базы используемых ЛЧМ сигналов. Для сравнения на рис. 3 показан также фрагмент реконструкции с использованием стандартного импульсного некогерентного источника (спаркера) при сравнимой с когерентным источником мощности. Видно, что этот источник не позволил провести реконструкцию слоистой структуры на сравнимых глубинах свыше ~300 м.



Рис. 2. Фрагменты сейсмограммы, отвечающие отдельному донному слою, полученные без применения процедуры когерентного накопления серии импульсов (слева) и с накоплением серии 32 импульсов (справа). Показанный интервал временных задержек 0 – 1000 мс отвечает глубинам до ~1000 м.



Рис. 3. Сейсмограммы, полученные по результатам донного зондирования с помощью ЛЧМ сигналов в полосе 180 – 230 Гц: справа вверху – без использования импульсного накопления, справа внизу – с использованием процедуры адаптивного траекторного накопления серии до

100 импульсов. Слева внизу показан фрагмент сейсмограммы, полученной с помощью некогерентного излучателя – спаркера.

Таким образом, выполненные эксперименты позволили продемонстрировать, что сейсмоакустическое зондирование структуры морского дна на глубинах до ~1000 метров с высоким пространственным разрешением может быть реализовано при использовании относительно маломощных (на уровне ~100 Вт) и высокочастотных (в диапазоне сотен Гц) когерентных гидроакустических источников, обладающих высоким разрешением и удовлетворяющих требованиям существенного ослабления вредного акустического воздействия на морскую экосистему. Перспективы дальнейших исследований и разработок излучателей связаны с совершенствованием когерентных И выполнением экспериментальных натурных исследований в различных акваториях в целях детального выяснения практических возможностей предлагаемого подхода.

Исследование выполнено при частичной поддержке со стороны программы фундаментальных исследований Президиума РАН ««Мировой океан – многофазность, многомасштабность, многокомпонентность» и РФФИ по гранту № 14-02-00695.

Публикации

- 1. Лебедев А.В., Малеханов А.И. Когерентная сейсмоакустика // Изв. вузов Радиофизика 2003, т. 46, № 7, с. 579-597.
- Авербах В.С. и др. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // Фундаментальные исследования океанов и морей / Под ред. Н.П. Лавёрова. – М.: Наука, 2006, 500-520.
- В.А. Лазарев, А.И. Малеханов, Л.Р. Мерклин, В.И. Романова, А.И. Хилько. Когерентное сейсмоакустическое зондирование морского дна // В кн.: Современные методы и средства океанологических исследований / Материалы XII Международной научнотехнической конференции «МСОИ 2011». Т. 1. – М. 2011, с. 113-122.
- В.А. Лазарев, А.И. Малеханов, Л.Р. Мерклин, В.И. Романова, А.А. Стромков, В.И. Таланов, А.И. Хилько. Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // Акустический журнал 2012, т. 58, №2, с. 227-236.
- 5. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна с использованием широкополосных сигналов // Океанология 2013, т. 53, № 6, с. 843-850.



Рис. 3. Сейсмограммы, полученные по результатам донного зондирования с помощью ЛЧМ сигналов в полосе 180 – 230 Гц: справа вверху – без использования импульсного накопления, справа внизу – с использованием процедуры адаптивного траекторного накопления серии до 100 импульсов. Слева внизу показан фрагмент сейсмограммы, полученной с помощью некогерентного излучателя – спаркера.

Таким образом, выполненные эксперименты позволили продемонстрировать, что сейсмоакустическое зондирование структуры морского дна на глубинах до ~1000 метров с высоким пространственным разрешением может быть реализовано при использовании относительно маломощных (на уровне ~100 Вт) и высокочастотных (в диапазоне сотен Гц) когерентных гидроакустических источников, обладающих высоким разрешением и удовлетворяющих требованиям существенного ослабления вредного акустического воздействия на морскую экосистему. Перспективы дальнейших исследований и разработок связаны с совершенствованием когерентных излучателей И выполнением экспериментальных натурных исследований в различных акваториях в целях детального выяснения практических возможностей предлагаемого подхода.

Исследование выполнено при частичной поддержке со стороны программы фундаментальных исследований Президиума РАН ««Мировой океан – многофазность, многомасштабность, многокомпонентность» и РФФИ по гранту № 14-02-00695.

Публикации

- 1. Лебедев А.В., Малеханов А.И. Когерентная сейсмоакустика // Изв. вузов Радиофизика 2003, т. 46, № 7, с. 579-597.
- Авербах В.С. и др. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // Фундаментальные исследования океанов и морей / Под ред. Н.П. Лавёрова. – М.: Наука, 2006, 500-520.

- В.А. Лазарев, А.И. Малеханов, Л.Р. Мерклин, В.И. Романова, А.И. Хилько. Когерентное сейсмоакустическое зондирование морского дна // В кн.: Современные методы и средства океанологических исследований / Материалы XII Международной научнотехнической конференции «МСОИ 2011». Т. 1. – М. 2011, с. 113-122.
- В.А. Лазарев, А.И. Малеханов, Л.Р. Мерклин, В.И. Романова, А.А. Стромков, В.И. Таланов, А.И. Хилько. Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // Акустический журнал 2012, т. 58, №2, с. 227-236.
- 5. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна с использованием широкополосных сигналов // Океанология 2013, т. 53, № 6, с. 843-850.

www.seismictechnologies.ru