

На правах рукописи



АФОНИНА Евгения Владимировна

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ 2D-3С
ОТРАЖЕННЫХ PS-ВОЛН ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ИХ
РАСЩЕПЛЕНИЯ В АЗИМУТАЛЬНО-
АНИЗОТРОПНЫХ СЛОЯХ, ЗАЛЕГАЮЩИХ ВЫШЕ
ЦЕЛЕВОГО ИНТЕРВАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Горшкалев Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Фатьянов Алексей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, и.о. заведующего лабораторией;

Рыжков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени им. Губкина», заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт геофизических методов разведки» (АО «ВНИИГеофизика»).

Защита состоится 7 апреля 2016 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3;

Факс: (8-383) 330-28-07, (8-383) 333-25-13;

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/Afonina2015>

Автореферат разослан 16 февраля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент

Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – синтетические и экспериментальные трехкомпонентные волновые поля, зарегистрированные в системе наблюдений 2D-3С, в средах, содержащих азимутально-анизотропные слои.

Актуальность исследования

Горные породы в своем естественном залегании часто характеризуются азимутальной анизотропией, которая чаще всего связана с наличием в среде субвертикальной ориентированной трещиноватости (Starrin S.). При многокомпонентных профильных наблюдениях данный тип анизотропии легче всего определить по расщеплению поперечных либо обменных PS-волн, по анализу поляризации которых можно получить данные о преимущественном направлении трещин.

Если азимутально-анизотропный слой залегает выше целевого интервала исследований, то обменные волны, отраженные от всех горизонтов ниже этого слоя, расщепляются при прохождении через него, и на поверхности регистрируются интерференционные импульсы волн PS_1 и PS_2 . В том случае, когда свойства этого слоя существенно изменяются по латерали, форма этих импульсов может быстро изменяться в зависимости от координаты приемника и удаления источник-приемник. Поскольку все обрабатываемые процедуры, входящие в стандартные пакеты обработки, строятся на предположении о постоянстве формы импульса регулярной волны или на его постепенном изменении, то их эффективность значительно снижается, так как критерием успешного их применения является повышение когерентности сигнала. Резкое изменение формы импульса регулярных волн не позволяет, например, достоверно определять скорости суммирования и успешно корректировать статические поправки, необходимые для получения временных разрезов. Мало эффективными становятся процедуры пространственно-временной фильтрации и т.д. Всё это приводит к существенным трудностям даже при решении обратной кинематической задачи.

В настоящий момент требования к сейсморазведке значительно повысились, и они состоят не только в решении кинематической задачи, но и в изучении динамических особенностей волн. Расщепление PS-волн в азимутально-анизотропном слое делает невозможным проведение динамических оценок этих волн, включая изучение их поляризации в нижележащей анизотропной толще.

Существуют специальные процедуры, позволяющие скомпенсировать расщепление волн в анизотропном слое, разработанные как для проходящих, так и для отраженных поперечных и обменных волн. При ис-

пользовании этих процедур подразумевается субвертикальное распространение обменных волн в однородном анизотропном слое, и для компенсации используются единые параметры расщепления для сейсмограммы общей точки обмена (ОТО). В более сложных геологических средах, когда азимутально-анизотропный слой является неоднородным или лучи отраженных обменных волн в нем начитают существенно отклоняться от вертикали, эти процедуры компенсации расщепления оказываются неэффективными.

В связи с этим актуальной становится задача развития методики обработки многокомпонентных данных, позволяющей компенсировать расщепление отраженных обменных волн в азимутально-анизотропных слоях, залегающих выше целевого интервала исследований. Реализация такой методики позволит изучать динамические и кинематические особенности отраженных PS-волн, а также анизотропные свойства нижележащих целевых интервалов.

В России применение данной методики актуально прежде всего в Юрубчено-Тохомской зоне газонефтенакопления (ЮТЗ) и на прилегающих к ней территориях Восточной Сибири. Проведенные в этом районе многокомпонентные наблюдения показали, что отличительной особенностью геологического разреза является сильная азимутальная анизотропия верхней части разреза, параметры которой быстро меняется по латерали (Горшкалев С.Б. и др.). Основные запасы нефти и газа в ЮТЗ связаны с рифейскими карбонатными коллекторами, которые характеризуются каверновой пористостью и направленной субвертикальной трещиноватостью, последняя определяет проницаемость коллектора. Изучение анизотропных свойств рифейских коллекторов с помощью многокомпонентных наблюдений позволяет определить преимущественное направление трещиноватости и таким образом спрогнозировать направление максимальной проницаемости коллектора, которое необходимо учитывать при проектировании системы разработки месторождений.

Разработанная методика позволяет избавиться от эффекта расщепления PS-волн и делает корректными оценки как кинематических, так и динамических параметров этих волн.

Цель исследования

Повышение информативности и достоверности сейсмических методов изучения земной коры при проведении многоволновых исследований в средах, содержащих азимутально-анизотропные слои, посредством создания методики обработки данных 2D-3С с целью компенсации расщепления отраженных обменных волн в азимутально-анизотропных

слоях, расположенных выше целевого интервала глубин для увеличения корректности кинематических и динамических оценок этих волн и повышения качества построения сейсмических изображений среды.

Основные задачи исследования

1. Создать методику обработки профильных многокомпонентных данных с применением процедуры компенсации расщепления PS-волн в неоднородной азимутально-анизотропной верхней части разреза.

2. Разработать способ компенсации расщепления PS-волн в горизонтально-слоистой среде, содержащей однородные азимутально-анизотропные интервалы, учитывающий изменение временной задержки между расщепленными PS-волнами в зависимости от удаления источник-приемник.

Фактический материал и методы исследования

В процессе исследования обрабатывались экспериментальные сейсмические данные, полученные по договорам с ОАО «Енисейгеофизика» по трем профилям: Оморинский – 1, №101, №112, и данные ВСП по скважине Оморинская – 10. Также были использованы результаты математического моделирования волновых полей, проведенного в лаборатории численного моделирования геофизических полей ИНГГ СО РАН.

За основу разработанной методики взят метод компенсации расщепления отраженных PS-волн, предложенный в 2002 году в работе Горшкалева С.Б. с соавторами. В качестве методов поляризационного анализа отраженных обменных волн в методике использовались метод Гаррисона (Harrison M.P.) и метод максимума функции взаимной корреляции (ФВК), описанный в работах Оболенцевой И.Р. и Горшкалева С.Б. В процессе исследования тестировались различные методы обработки сейсмических данных, реализованные в стандартном обрабатывающем пакете ProMAX, и была разработана оптимальная методика обработки данных 2D-3C с целью компенсации расщепления отраженных обменных волн в азимутально-анизотропных слоях, залегающих выше целевого интервала исследований.

Степень достоверности результатов

Степень достоверности результатов оценивалась с помощью тестирования разработанной методики компенсации расщепления отраженных обменных волн на синтетических волновых полях и применения методики при обработке экспериментальных данных.

При обработке данных математического моделирования определенные с помощью защищаемого способа компенсации параметры расщепления отраженных PS-волн совпали с модельными параметрами.

При обработке реальных сейсмических данных по профилю Оморинский – 1 параметры расщепления, определенные с помощью предложенной методики, с хорошей точностью совпали с параметрами, определенными по данным ВСП на скважине Оморинская – 10, которая находится на профиле.

Параметры расщепления, полученные на двух пересекающихся профилях, в точке пересечения оказались одинаковыми с хорошей точностью и позволили корректно увязать данные.

Защищаемые научные результаты

1. Методика обработки профильных многокомпонентных данных с применением процедуры компенсации расщепления PS-волн в неоднородной азимутально-анизотропной верхней части разреза.

2. Способ компенсации расщепления PS-волн в горизонтально-слоистой среде, содержащей однородные азимутально-анизотропные интервалы, учитывающий изменение временной задержки между расщепленными PS-волнами в зависимости от удаления источник-приемник.

Научная новизна исследования

Основными новыми элементами методики компенсации расщепления отраженных обменных волн для профильных систем наблюдения в неоднородной азимутально – анизотропной верхней части разреза (ВЧР), где практически отсутствует зависимость временной задержки от удаления источник-приемник, являются:

- поляризационный анализ и определение параметров компенсации в каждой точке приема по суммотрассам общего пункта приема (ОПП) и применение этих параметров к данным до суммирования.

- скоростной анализ сейсмограмм ОПП отдельно по компонентам быстрой и медленной волны. Данные компоненты не осложнены взаимной интерференцией, что позволяет более корректно просуммировать сигналы этих волн и по ним провести поляризационный анализ для более точного определения параметров компенсации. При значительном отличии поляризации и временных задержек от первоначального результата производится еще одна итерация определения этих параметров.

- проведение дополнительной коррекции статических поправок и скоростей суммирования после проведения процедуры компенсации.

При наличии в среде существенных изменений временной задержки между расщепленными PS-волнами в зависимости от удаления источник-приемник эти задержки определяются как разность годографов отраженных PS-волн, полученных в результате скоростного анализа отдельно по сейсмограммам быстрой и медленной обменных волн. Предложен метод пересчета временных задержек, полученных для обменных волн от по-

дошвы верхнего анизотропного слоя, для компенсации расщепления в этом слое PS-волн, отраженных от любой из границ, путем нахождения на годографах точек с равными кажущимися скоростями.

Личный вклад автора

1. Определение области применимости различных процедур поляризованного анализа и их управляющих параметров для оптимальной обработки сейсмических данных с целью определения временных задержек и поляризации расщепленных отраженных обменных волн.

2. Тестирование на экспериментальных данных различных вариантов методики обработки для компенсации расщепления отраженных PS-волн в неоднородной азимутально-анизотропной ВЧР с целью выбора оптимального графа обработки.

3. Разработка способа компенсации расщепления PS-волн в горизонтально-слоистой среде, содержащей однородные азимутально-анизотропные интервалы, в которых временная задержка между расщепленными PS-волнами существенно зависит от удаления источник-приемник (совместно с Горшкалевым С.Б. и Карстеном В.В.). Тестирование процедуры компенсации на синтетических данных.

Практическая значимость и реализация результатов

Результаты имеют большое практическое значение для многоволновых исследований в ЮТЗ и на прилегающих к ней территориях. После применения предложенной в работе методики обработки многокомпонентных данных для компенсации расщепления отраженных обменных волн становятся корректными любые кинематические и динамические оценки PS-волн и улучшается качество построения сейсмических изображений. Применение разработанной методики компенсации позволяет корректно увязывать данные наблюдений PS-волн на пересекающихся профилях.

Методика обработки успешно опробована на экспериментальных данных и передана в эксплуатацию ОАО «Енисейгеофизика» в рамках договора №407-16 «Разработка специализированного модуля программ для обработки многоволновой сейсморазведки, совместимого со стандартным пакетом (ProMAX) и его апробация на экспериментальных данных 2D-3С». По договору с Сибирским Федеральным Университетом № 2078/11 «Разработка специализированного программного модуля, реализующего процедуру анализа анизотропии и проведение ее компенсации для отраженных обменных волн, совместимого с существующим пакетом ProMAX» в рамках разработки Технического предложения по созданию программно-технологического комплекса (ПТК) методика обработки опробовалась на данных по двум пересекающимся профилям.

Разработанная методика была внедрена в ОАО «Енисейгеофизика», о чем свидетельствует справка о внедрении.

Апробация работы

Основные результаты, представленные в работе, докладывались на: VII Международной научно-практической конференции «ГЕФИЗИКА – 2009», Санкт-Петербург, 2009 год; Международной конференции «Гео-модель 2009», Геленджик, 2009 год; Научно-практической конференции «Сейсмические исследования земной коры», Новосибирск, 2009 год; Научно-практическом семинаре «Методы прогнозирования залежей углеводородов на Сибирской платформе», Новосибирск, 2009 год; Конференции «Гольдинские чтения», Новосибирск, 2011 год; Научной конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Трофимукотские чтения – 2011»; 5-ой Международной конференции и выставке «Санкт-Петербург 2012. Науки о Земле: новые горизонты в освоении недр»; IX международной выставке-научном конгрессе "ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 2013 год; Всероссийской конференции «Геофизические методы исследования земной коры», посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва, Новосибирск, 2014 год.

Публикации

Основные положения диссертационной работы изложены в 20 публикациях, среди которых 3 – статьи в рецензируемых журналах и 3 – расширенные тезисы международных конференций.

Объем работы

Работа состоит из введения, 3 глав и заключения, содержит 149 страниц, в том числе 54 рисунка и 3 таблицы. Список литературы состоит из 111 источников на русском и английском языках.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.т.н. Горшкалеву С.Б. за помощь и поддержку на всех этапах подготовки диссертации. Автор признателен Вишневному Д.М. и Лисице В.В. за предоставленные данные математического моделирования. Автор благодарен Карстену В.В., Оболенцевой И.Р., Черверде В.А., Селезневу В.С., Еманову А.Ф., Колесникову Ю.И., Суворову В.Д., Нефедкиной Т.В. за ценные советы и рекомендации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна диссертационной работы, практическая значимость и основные защищаемые положения.

В **главе 1** приведен обзор работ, посвященных изучению анизотропии методами многоволновой сейсморазведки. Описаны основные мето-

ды разделения интерферирующих квазипоперечных волн, представленные в статьях Alford R., Оболенцевой И.Р. и Горшкалева С.Б., Naville С., Никольского А.А., Harrison M.P., MacBeth С. и др., а также способы изучения сред с меняющимися по глубине элементами симметрии, представленные в работах Winterstein D.F. and Meadows M.A., Brodov L.J. and Ryjkov V.I., Gorshkalev S.B. and Karsten W.V., Li X-Y. and MacBeth С., Thomsen L. et al., Gaiser J.E., Ross Haacke R. et al, и др.

В главе 2 представлена методика компенсации влияния анизотропии в средах с неоднородной азимутально-анизотропной ВЧР [1, 2, 4 – 9, 13].

ЮТЗ на Сибирской платформе характеризуется резко расчленённым рельефом местности с большими перепадами высот, что способствует развитию негидростатичного напряженного состояния в верхней части разреза, которое приводит к возникновению сильной азимутальной анизотропии ВЧР. При переходе от одной точки наблюдения к другой меняется направление поляризации быстрой волны θ и временная задержка между расщепленными обменными волнами Δt , как показано в работе Gorshkalev S.B. et al. 2007 года. В таких сложных условиях, когда параметры расщепления PS-волн ВЧР меняются в пределах длины расстановки, проведение суммирования обменных волн без компенсации их расщепления становится некорректным, т.к. переменная анизотропия в каждой точке приема искажает форму сигнала по-разному.

При наблюдениях на обменных волнах присутствие анизотропного слоя в ВЧР приводит к тому, что как на основной компоненте, направленной вдоль линии источник-приемник, так и на побочной, ортогональной ей, в общем случае, регистрируются интерференционные сигналы. Их форма меняется в зависимости от угла θ и временного сдвига Δt . Наличие низкоскоростных слоев в ВЧР приводит к тому, что лучи быстрой и медленной обменных волн, приходящие в одну точку приема, незначительно отклоняются от вертикали и становятся очень близкими, что дает возможность проводить поляризационный анализ только по горизонтальным компонентам.

Наблюдения на отраженных PS-волнах не позволяют найти упругие постоянные азимутально-анизотропного слоя, поскольку неизвестным остается конкретный интервал глубин, на котором происходит расщепление PS-волн. В такой ситуации надежно могут быть определены только интегральные параметры, описывающие расщепление обменных волн на субвертикальных лучах. Этих параметров будет достаточно для проведения процедуры компенсации расщепления PS-волн в верхнем слое.

За основу процедуры взят метод послышной компенсации, предложенный в работах Горшкалева С.Б. и др. 2002 и 2004 г. Сначала, из ана-

лиза обменных волн, отражённых от одного из верхних маркирующих горизонтов, необходимо найти параметры θ и Δt . Затем, с использованием определенных углов θ необходимо преобразовать систему координат регистрации путем поворота на направления естественной поляризации. В результате будут получены компоненты волн PS_1 и PS_2 , под которыми понимаются компоненты регистрации, параллельные горизонтальным проекциям векторов смещения быстрой и медленной обменных волн соответственно. Далее, в компоненту медленной волны необходимо ввести сдвиг на меньшие времена на величину Δt . Такая процедура имитирует одновременный приход волн PS_1 и PS_2 в точку регистрации, что компенсирует эффект расщепления поперечных волн в верхнем анизотропном слое. И наконец, произвести преобразование системы координат приема путем обратного разворота на направление профиля. В результате такой операции на основной компоненте должна восстановиться исходная форма сигнала, а на побочной компоненте сигнал должен обнулиться. После проведения такой процедуры по этим сейсмограммам можно корректно определять статические и кинематические поправки, а также анализировать динамические особенности отраженных PS-волн.

Впервые пример обработки профильных данных отраженных PS-волн в средах с неоднородной азимутально-анизотропной ВЧР был показан в работе Gorshkalev S.V. et al. 2007 года. Авторам удалось скомпенсировать расщепление по разрезам ОПП, однако при суммировании сейсмограмм ОТО побочная компонента PS-волн имела значащие амплитуды, что свидетельствует о неточном определении параметров компенсации. Именно эта работа показала необходимость создания новой более сложной методики обработки для успешного решения поставленной задачи.

Основная обработка производится в сортировке по ПП, что является нестандартным подходом, и значительно увеличивает объем работ, однако в таких сложных условиях это является оправданным. При обработке нельзя применять процедуры, искажающие соотношения амплитуд между X- и Y-компонентой, а также процедуры, искажающие форму сигнала, такие как деконволюция, поскольку это приводит к погрешностям при проведении поляризационного анализа и к неправильному определению параметров расщепления. В методике условно можно выделить четыре основных части.

1. Во-первых, поскольку свойства верхнего анизотропного слоя быстро меняются по латерали, в каждом пункте приёма должны быть получены свои параметры θ и Δt . Чтобы увеличить соотношение сигнал/помеха, определять параметры расщепления следует по суммотрассам ОПП, проводя поляризационный анализ по одному из верхних горизонтов.

2. На следующем этапе необходимо уточнить θ и Δt . Это становится возможным после проведения скоростного анализа отдельно по сейсмограммам волн PS_1 и PS_2 . Такой скоростной анализ позволяет учесть разницу скоростей и t_0 между быстрой и медленной обменными волнами, что дает возможность получить разрезы ОПП отдельно для быстрой и медленной волн при оптимальном суммировании.

3. На третьем шаге с использованием уточненных параметров производится компенсация расщепления по сейсмограммам ОПП до суммирования.

4. И заключительный этап – это уточнение статических и кинематических поправок после процедуры компенсации.

Результаты применения предложенной методики проиллюстрированы на примере обработки данных многокомпонентных профильных наблюдений в ЮТЗ (профили Оморинский – 1, №101 и №112).

На профиле Оморинский – 1 определение параметров расщепления в ВЧР проводилось по группе горизонтов в верхней части разрезов ОПП с $t_0 = 500$ – 650 мс, находящихся ниже подошвы анизотропной ВЧР. Правомерность процедуры компенсации подтверждается хорошим совпадением параметров Δt и θ , полученных по данным отраженных обменных волн и ВСП скв. Оморинская-10, расположенной на профиле. Азимут вектора смещения волны PS_1 составляет 50° , временная задержка – 14 мс.

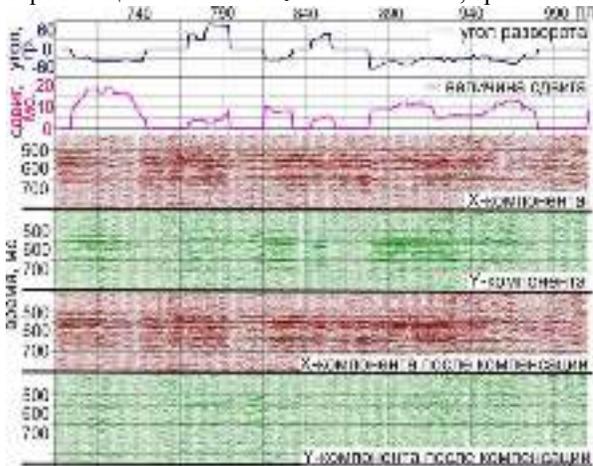


Рисунок 1 – Профиль Оморинский – 1. Фрагменты разрезов ОПП до и после компенсации расщепления PS-волн в ВЧР

Фрагменты разрезов ОПП до и после компенсации приведены на рисунке 1. На верхнем графике показано значение θ (синий), а на нижнем значение Δt (розовый). На участках профиля, где уровень сигнала на Y-компоненте незначительный, поляризационный анализ не проводился. Вероятнее всего, слабый сигнал на Y-компоненте связан

с тем, что ориентация плоскости симметрии в среде становится близкой к направлению линии наблюдений, поскольку до и после таких участков угол θ имеет разный знак. После проведения компенсации на суммарных разрезах ОПП на Y-компоненте регулярные отражения были устранены, что говорит о корректности процедуры, в то время как на компоненте X все отражения стали более интенсивными и когерентными по сравнению с исходной X-компонентой.

На сейсмограммах ОПП X-компоненты после проведения компенсации для всех отраженных обменных волн наблюдается значительное увеличение когерентности, пример такой сейсмограммы представлен на рисунке 2. Таким образом, процедура компенсации дает возможность более корректно определять кинематические характеристики отраженных PS-волн, а также делает правомерными дальнейшие динамические оценки этих волн.

На рисунке 3 приведены фрагменты временных разрезов ОТО обменных волн по профилю Оморинский – 1 до и после проведения компенсации. На разрезах после компенсации на X-компоненте наблюдается существенное увеличение соотношения сигнал/помеха. Компенсация

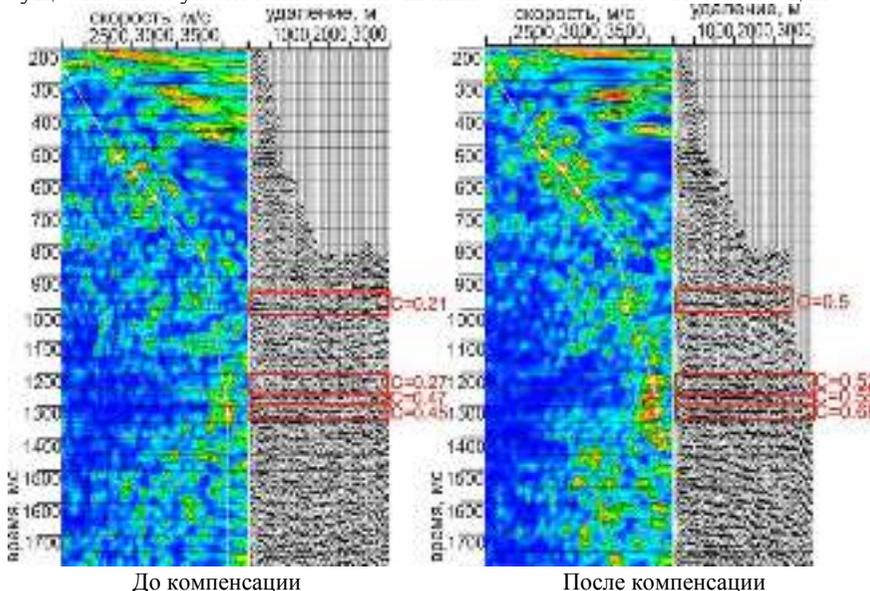


Рисунок 2 – Профиль Оморинский – 1, сейсмограмма ОПП № 900, X-компонента. Сравнение скоростных спектров и значений когерентности (C) до и после компенсации расщепления PS-волн в ВЧР

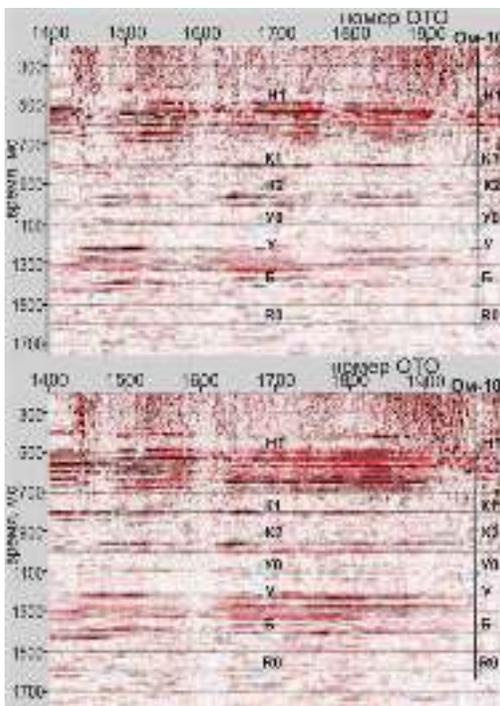


Рисунок 3 – Фрагмент временного разреза ОТО до (сверху) и после (снизу) компенсации расщепления PS-волн в ВЧР, X-компонента

33 мс. Азимут 101 профиля отличается от направления поляризации быстрой волны на 20° , поэтому на X-компоненте этого профиля быстрая волна будет преобладать. Поскольку профили пересекаются практически под прямым углом, то на X-компоненте 112 профиля будет преобладать медленная поперечная волна. Таким образом, так как анизотропный слой находится выше всех отражающих горизонтов, в точке пересечения профилей до проведения компенсации можно видеть временные невязки для всех горизонтов на разрезе (рисунок 4, слева). Применение процедуры компенсации позволяет избавиться от расщепления обменных волн в верхнем анизотропном слое. Времена пробега на обоих профилях будут соответствовать временам быстрой волны, а это приводит к тому, что невязка в точке пересечения профилей будет отсутствовать (рисунок 4, справа) [13].

расщепления обменных волн в ВЧР улучшает прослеживаемость не только верхних отражений, по которым производилось определение параметров расщепления, но и всех основных отражающих горизонтов. В диапазоне точек обмена 1600 – 2000 средняя энергия увеличивается в ≈ 1.5 раза.

Сопоставление временных разрезов ОТО по двум пересекающимся профилям №101 и №112 до и после компенсации демонстрируется на рисунке 4. В точке пересечения профилей, азимуты векторов смещения быстрой волны практически совпадают: 91° – на 112 профиле и 92° – на 101, а временные задержки составляют 30 и

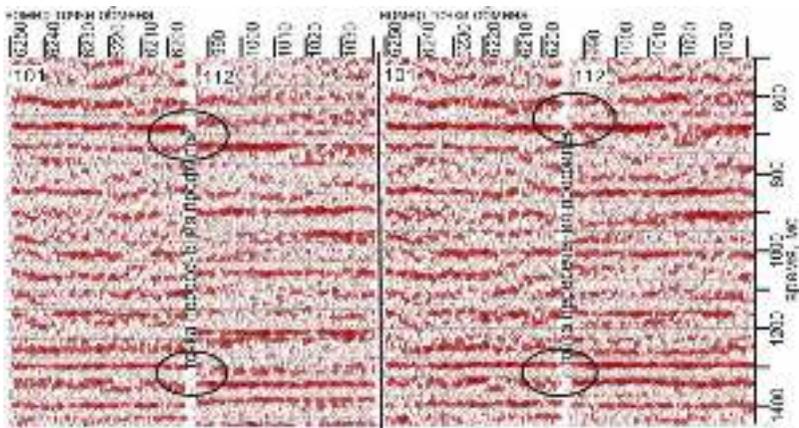


Рисунок 4 – Сопоставление временных разрезов общей точки обмена по профилю 112 и 101 до (слева) и после (справа) компенсации расщепления PS-волн в ВЧР

В главе 3 [3, 12] описан более сложный способ компенсации расщепления отраженных обменных волн, учитывающий зависимость временной задержки между расщепленными PS-волнами от удаления источник-приемник. Она возникает, если лучи отраженных обменных волн в азимутально-анизотропном слое существенно отклоняются от вертикали [10]. Этот граф разработан для произвольного количества анизотропных слоев, ниже приведен пример его применения в среде с двумя азимутально-анизотропными слоями. Способ предполагает последовательное снятие эффектов расщепления, сначала в верхнем слое, а затем в нижнем. Определение поляризации отраженных обменных волн и временных задержек производится по PS-волнам, отраженным от подошв этих слоев.

Сначала необходимо определить θ и $\Delta t(x)$ в верхнем слое. Направление поляризации θ и временную задержку на вертикали $\Delta t(0)$ предложено определять по суммотрассам ОПП. Зависящая от удаления временная задержка $\Delta t(x)$ рассчитывается как разность годографов быстрой и медленной обменных волн, определенных с помощью скоростного анализа отдельно по сейсмограммам этих волн в верхнем анизотропном слое. Далее с использованием полученных параметров производится компенсация расщепления в верхнем слое обменных волн, отраженных от его подошвы.

Поляризацию обменных волн в нижнем анизотропном слое предложено изучать с помощью поляризационного анализа PS-волн, отражен-

ных от его подошвы, т.е. так же, как и в верхнем анизотропном слое. Однако перед этим нужно скомпенсировать расщепление в верхнем анизотропном слое обменных волн, отраженных от подошвы нижнего анизотропного слоя. Для этих волн будет другая зависимость $\Delta t(x)$, по сравнению с PS-волнами, отраженными от подошвы верхнего анизотропного слоя, поскольку волны, от разных горизонтов пересекают верхний анизотропный слой под разными углами. Однако сдвиги, определённые в точках с равными углами подхода лучей, должны быть равны. Такие точки для PS-волн, отраженных от разных горизонтов, характеризуются равенством кажущихся скоростей вдоль линии наблюдения или проекций векторов медленности на направление профиля (p), определённых по графикам этих волн, и могут быть найдены по этому критерию.

Данный способ компенсации тестировался на синтетических данных по модели, параметры которой приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Четырёхслойная модель с двумя анизотропными слоями

Номер слоя	Номер границы	Глубина подошвы (м)	V_P (м/с)	V_S (м/с)	ρ (г/м ³)	Параметры Томсена			Азимут оси симметрии среды
						ϵ	δ	γ	
1		100	1000	450	1800	0	0	0	
2	1	600	3500	1750	2100	0.105	0.033	0.105	30°
3	2	1100	4000	2100	2400	0	0	0	
4	3	1600	5000	2450	2800	0.105	0.058	0.105	60°

В лаборатории численного моделирования геофизических полей ИНГГ СО РАН проведено математическое моделирование полного волнового поля способом, описанным в работе Lisitsa V., Vishnevskiy. D, 2010 года. Получена сейсмограмма ОТВ с источником типа центра расширения, который располагался в точке (0;0), приемники размещались вдоль профиля с азимутом 0°, с шагом 10 м до максимального удаления 2000 м [11]. Из рассчитанной сейсмограммы ОТВ формировались данные для фланговой системы наблюдений методом многократных перекрытий, размещённой вдоль профиля с азимутом 0°. Модель представляет собой горизонтально-слоистую среду с однородными анизотропными слоями, в которых индикатрисы всех волн симметричны относительно вертикальной оси второго порядка. В такой среде при взаимных наблюдениях лучи зеркально симметричны, поэтому в случае равного шага ПП и ПВ, сейсмограммы ОПП, ОТВ и ОСТ будут одинаковыми.

Для анализа поляризации в верхнем слое были выбраны обменные волны, отраженные от границы 3, поскольку они меньше осложнены интерференцией с другими волнами. Найденное направление поляризации позволяет получить сейсмограммы быстрой и медленной волн в верхнем

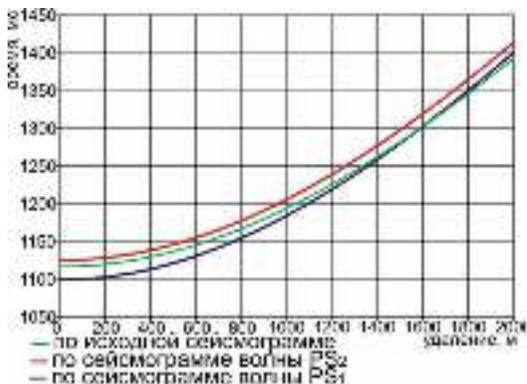


Рисунок 5 – Годографы PS-волн, отраженных от границы 3, полученные по данным скоростного анализа

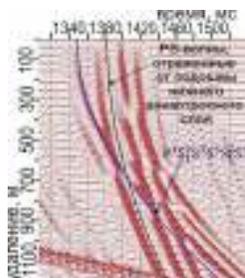
анизотропном слое, провести по ним скоростной анализ и определить годографы этих волн, которые показаны на рисунке 5 синим и красным. Скоростной анализ по сейсмограмме до разделения дает возможность получить только один годограф (показан на рисунке 5 зеленым), который не соответствует ни одной из волн. То есть, без разделения волн в верхнем слое и последующей компенсации невозможно получать до-

стоверные кинематические характеристики отраженных обменных волн.

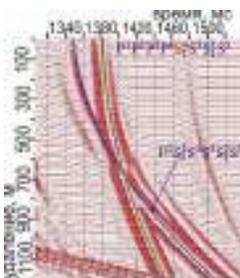
Зависящая от удаления временная задержка рассчитывается как разность годографов волн PS_1 и PS_2 . Она позволяет полностью скомпенсировать расщепление в верхнем анизотропном слое обменных волн, отраженных от кровли нижнего анизотропного слоя, что видно при сопоставлении сейсмограмм до и после компенсации.

Компенсация расщепления в верхнем анизотропном слое обменных волн, отраженных от его подошвы, позволяет провести поляризационный анализ PS-волн в нижнем слое. Его результаты хорошо соответствуют теоретическим значениям.

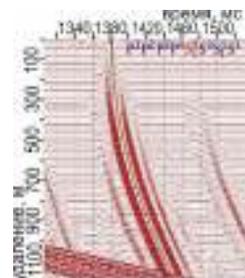
Найденное направление поляризации обменных волн в нижнем слое используется для получения сейсмограмм быстрой и медленной волн в этом анизотропном слое. Они представлены на рисунке 6 в сравнении с исходной сейсмограммой. Скоростной анализ по этим сейсмограммам позволяет получить годографы волн $P^1P^2P^3P^4S_1^4S^3S_1^2S^1$ и $P^1P^2P^3P^4S_2^4S^3S_2^2S^1$, а кроме того годограф интерферирующей с ними волны помехи $P^1S_1^2S^3S^3S_1^2S^1$. После ее подавления сейсмограммы могут быть использованы для динамического анализа, который невозможно сделать по исходной сейсмограмме до компенсации. В обозначении годографов верхний индекс — номер слоя, в котором распространяется волна, нижний индекс — тип поперечной волны (S_1 или S_2) в анизотропном слое.



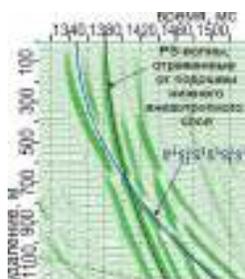
а) исходная X – компонента



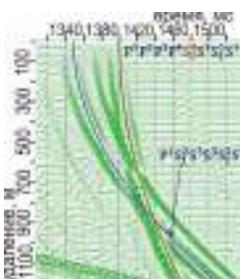
б) компонента PS₁ в слое 4 после компенсации расщепления в слое 2



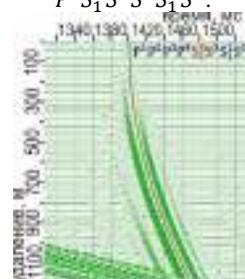
в) компонента PS₁ в слое 4 после компенсации расщепления в слое 2 и подавления волны $P^1S_1^2S^3S_1^2S_1^1$.



г) исходная Y – компонента



д) компонента PS₂ в слое 4 после компенсации расщепления в слое 2



е) компонента PS₂ в слое 4 после компенсации расщепления в слое 2 и подавления волны $P^1S_1^2S^3S_1^2S_1^1$.

Рисунок 6 – PS-волны, отраженные от границы 4, сравнение исходных X- и Y-компонент с компонентами PS₁ и PS₂ после компенсации расщепления PS-волн в слое 2. Линиями показаны гидрографы, определенные по данным скоростного анализа

Предложенный алгоритм даёт возможность определить временные задержки и провести компенсацию расщепления PS-волн, отраженных от любой из границ в модели. При компенсации временные задержки между расщепленными PS-волнами $\Delta t(x)$ используются как статический сдвиг для всей трассы сейсмограммы. Однако, $\Delta t(x)$ для обменных волн, отраженных от разных границ разные, поэтому при компенсации PS-волны, отраженной от одной из границ, для PS-волн от других границ она пройдет некорректно. Таким образом, компенсацию расщепления для волн от разных границ нужно проводить в соответствующем им временном окне.

На рисунке 7 показаны фрагменты временных разрезов для различных баз суммирования до и после проведения компенсации расщепления PS-волн. При сопоставлении суммарного разреза X-компоненты, где скомпенсировано расщепление во всех слоях для обменных волн, отраженных от всех границ (рисунок 7д), с исходным разрезом, можно видеть, что на разрезе после компенсации восстановился исходный импульс, который имеет меньшую длительность, тем самым удалось увеличить разрешенность разреза и улучшить сейсмическое изображение.

Заключение

Разработана методика компенсации расщепления отраженных PS-волн в неоднородной азимутально-анизотропной ВЧР. Поляризационный анализ по суммотрассам ОПП позволяет определить переменные по латерали параметры расщепления. Скоростной анализ отдельно по сейсмограммам PS₁ и PS₂ дает возможность более точно определить параметры расщепления. Применение методики при обработке экспериментальных данных в ЮТЗ и

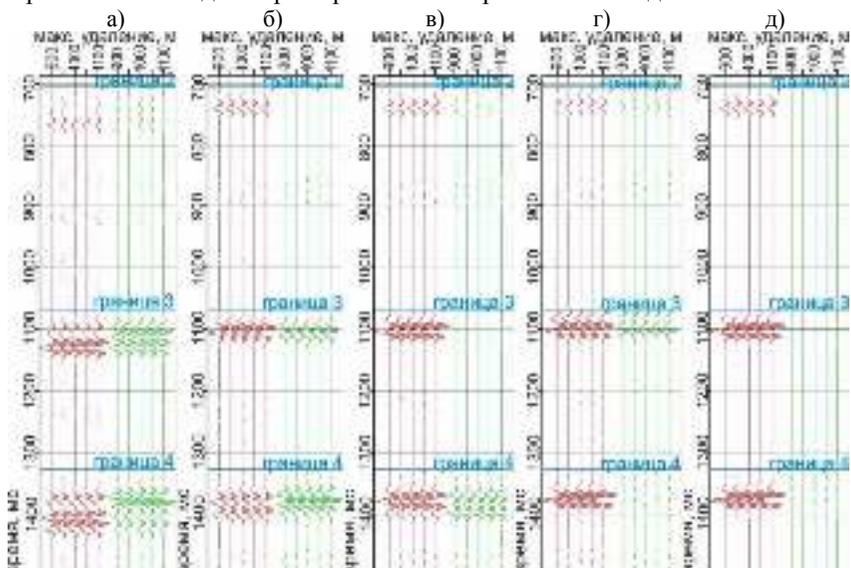


Рисунок 7 – Фрагменты временных разрезов для различных баз суммирования, X-компонента – коричневым, Y-компонента – зеленым: а) исходные; б) после компенсации расщепления в верхнем анизотропном слое PS-волн от границы 2; в) от границы 3; г) от границы 4 в верхнем и нижнем анизотропных слоях; д) составной временной разрез после полной компенсации расщепления всех отраженных PS-волн в своих временных окнах. Синими линиями показаны T_0 для быстрых обменных волн, отраженных от всех границ

на прилегающих к ней территориях позволяет увеличить точность кинематических и динамических оценок отраженных обменных волн и повысить качество построения сейсмических изображений.

Для случаев, когда временная задержка между быстрой и медленной волной существенно меняется в зависимости от удаления источник-приемник, был создан более сложный способ компенсации, описанный в главе 3. Согласно ему, для компенсации расщепления необходимо использовать переменную $\Delta t(x)$, которая определяется как разность годографов волн PS_1 и PS_2 , определенных по результатам скоростного анализа сейсмограмм разделенных обменных волн. Показана возможность пересчета временных задержек, полученных для обменных волн от подошвы верхнего анизотропного слоя, для компенсации расщепления в этом слое PS -волн, отраженных от любой из границ, исходя из критерия равенства кажущихся скоростей, определенных по годографам ОПП. Этот способ тестировался только на синтетических данных. Результаты обработки этих данных совпадают с заложенными в модели параметрами, и таким образом подтверждается достоверность получаемых результатов. В распоряжении автора не было экспериментальных данных, где были бы значительные изменения Δt в зависимости от удаления источник-приемник. Однако в ЮТЗ и на прилегающих к ней территориях кембрийский комплекс характеризуется горизонтально-слоистым строением, и если азимутально-анизотропные слои залегают не в ВЧР, а на больших глубинах, то описанный в главе 3 способ может быть успешно там применен.

Описанные способы компенсации подразумевают использование стандартных пакетов обработки, например, ProMAX (Landmark). Для специфических процедур, которые включены в граф обработки, применяются стандартные модули, имеющиеся в любом обрабатывающем пакете. Только параметры расщепления определялись с помощью технически усовершенствованного модуля поляризационного анализа, который позволяет определять θ и Δt в каждой точке наблюдения. Применение стандартных пакетов обработки значительно упрощает внедрение методики в сервисных геофизических организациях.

Таким образом, поставленные задачи успешно решены. Направлениями дальнейших исследований являются:

1. Создание алгоритма ввода переменных компенсационных сдвигов для PS -волн, отраженных от разных границ, не как статических для каждого отражения, а как переменных во времени, по аналогии с вводом кинематических поправок.

2. Создание алгоритма компенсации расщепления PS-волн в неоднородных азимутально-анизотропных средах для систем наблюдения 3D-3С.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.

1. Горшкалёв С.Б. Технология обработки многокомпонентных данных на Сибирской платформе с применением процедуры компенсации анизотропии верхней части разреза. / Горшкалёв С.Б., **Афонина Е.В.**, Карстен В.В., Корсунов И.В. // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 2. – С. 70-78.
2. Горшкалёв С.Б. Результаты изучения азимутальной анизотропии среды на Пеляткинской площади по данным многоволнового ВСП и сейсморазведки 3D. / Горшкалёв С.Б., Карстен В.В., **Афонина Е.В.**, Бекешко П.С., И.В. Корсунов И.В. // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 3. – С. 60-70.
3. Горшкалёв С.Б. Компенсация расщепления отраженных обменных волн с переменными параметрами, зависящими от удаления точки приема. / Горшкалёв С.Б., **Афонина Е.В.**, Карстен В.В. // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 2. – С. 24-33.

Публикации в трудах конференций и сборниках тезисов.

4. Горшкалёв С.Б. Технология обработки многокомпонентных данных в Восточной Сибири / Горшкалёв С.Б., **Афонина Е.В.**, Карстен В.В., Корсунов И.В. //Сборник докладов XI международной научно-практической конференции «Геомодель – 2009» (Геленджик, 7 – 10 сентября 2009 г.). – Геленджик, 2009. – С. 176–179.
5. Горшкалёв С.Б. Технология обработки многокомпонентных данных с применением процедуры компенсации анизотропии ВЧР. / Горшкалёв С.Б., Карстен В.В., **Афонина Е.В.**, Корсунов И.В. // Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Сейсмические исследования земной коры» (Новосибирск, 23-25 ноября 2009 г.). – Новосибирск, ИНГ СО РАН, 2009. – С. 106–109.
6. **Афонина Е.В.** Технология обработки многокомпонентных данных в Восточной Сибири с применением процедуры компенсации анизотропии ВЧР. / под ред. С.В. Аплонова, В.П. Кальварской, В.Н. Трояна. // Геофизические методы исследования Земли и ее недр: Материалы VII Международной науч.-практ. конкурс-конф. "Геофизика-2009" (Санкт-Петербург, 5-9 окт. 2009 г.). – СПб.: Соло, 2010. – С. 41–45.
7. Горшкалёв С.Б. Результаты изучения азимутальной анизотропии геологического разреза по данным ВСП одной из скважин Западной Сибири. / Горшкалёв С.Б., Карстен В.В., **Афонина Е.В.**, Бекешко П.С. // Сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса ГЕО-Сибирь-2011 (Новосибирск, 27-29 апр. 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 58–62.
8. Горшкалёв С.Б. Проблемы компенсации анизотропии ВЧР при трехкомпонентных профильных наблюдениях. / Горшкалёв С.Б., Карстен В.В., **Афонина Е.В.**, Путинцева Д.Д. // Материалы конференции, посвященной 75-летию

- со дня рождения академика РАН С.В. Гольдина (Новосибирск, 1-5 авг. 2011 г.). – Новосибирск, 2011. – С. 39–40.
9. **Афонина Е.В.** Результаты изучения азимутальной анизотропии геологического разреза по данным многоволнового ВСП и 3D наблюдениям на продольных волнах. / Афонина Е.В., Бекешко П.С. // Сборник тезисов VII Международного науч.-техн. конкурс-конф. молодых специалистов "Геофизика 2011" (Санкт-Петербург, 3-7 окт. 2011). – СПб., 2011. – С. 45–49.
 10. **Афонина Е.В.** Проблемы изучения многослойных азимутально-анизотропных сред. / Афонина Е.В. // Труды всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых, посвященной 100-летию академика А.А. Трофимука (Новосибирск, 17-22 окт. 2011 г.). – 2011. – Новосибирск: РИЦ НГУ. – С. 350–353.
 11. **Афонина Е.В.** Моделирование волновых процессов в анизотропных упругих средах. / Афонина Е.В., Вишневский Д.М., Горшкалев С.Б., Карстен В.В., Лисица В.В., Чеверда В.А. // Тезисы доклада на второй конференции и выставке "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли" (Москва, 6-8 декабря 2011 г.). – Москва, 2011. – [Электронный ресурс], http://www.hpc-oilgas.ru/hpc-oilgas/files/016_2011HPC_Woscow_Anisotropy_01.pdf.
 12. **Afonina E.V.** Layer-stripping with Offset Variable Parameters Compensating for the Reflected PS-waves Splitting in an Azimuthally Anisotropic Layer. / Afonina E.V., Gorshkalev S.B., Karsten W.V. // Тезисы 5-ой Международной конференции и выставки «Санкт-Петербург 2012. Науки о Земле: новые горизонты в освоении недр» (Санкт-Петербург, 2-5-апр. 2012 г.). – Санкт-Петербург, 2012 г. – В015.
 13. **Афонина Е.В.** Компенсация анизотропии ВЧР при обработке трехкомпонентных профильных данных в Восточной Сибири. / Афонина Е.В., Горшкалев С.Б., Карстен В.В. // Сборник материалов IX Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО–Сибирь–2013» (Новосибирск, 15-26 апр. 2013 г.). – 2013. – Т. 3. – Новосибирск: СГГА. – С. 209–214.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 21.01.2016

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1. Тираж 95. Зак. № 00

ИНГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3