

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
ИМЕНИ И. М. ГУБКИНА

На правах рукописи

ШУБИН АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ПРИРОДНЫХ
РЕЗЕРВУАРОВ НА ОСНОВЕ ПЕТРОУПРУГОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ИНВЕРСИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2014

Работа выполнена на кафедре Разведочной геофизики и
компьютерных систем Российского государственного университета нефти и
газа имени И.М. Губкина

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Рыжков Валерий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
начальник лаборатории геофизики
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
Крылов Дмитрий Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук,
начальник центра сейсмических исследований
ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
Керусов Игорь Николаевич

Ведущая организация: ООО «Газпромнефть Научно-Технический
Центр», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится ____ 2014г. в ____:____, в ауд. ____,
на заседании ученого совета Д.212.200.05 при Российском Государственном
Университете нефти и газа имени И. М. Губкина по адресу: Москва, В-296,
ГСП-1, 119991, Ленинский проспект, 65, корп.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государ-
ственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина.

Автореферат разослан ____ 2014г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат геолого-минералогических наук

М.С. Хохлова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

С каждым годом задачи, возникающие перед нефтяной сейсморазведкой, становятся сложнее и требуют внедрения новых технологий и интеграции различных дисциплин. Последние достижения в области полевых сейсмических работ, обработки данных и построения сейсмических изображений оказали значительное влияние на интерпретацию сейсмических материалов. В настоящее время, качество сейсмических данных позволяет проводить прогноз литологии [Avseth et al., 2005] и трещиноватости [Ruger and Tsvankin, 1995; Sava et al., 2002], определять тип пластового флюида [Fatti et al., 1994; Avseth, 2002], оценивать пористость и давление [Dvorkin and Alkhater, 2004; Sayers, 2010]. Эти успехи, прежде всего, связаны с достижениями в области решения обратных задач (инверсия сейсмических данных) и петроупругого моделирования (rock physics modeling) [Mavko et al., 2009; Avseth et al., 2005]. Развитию этих направлений посвящена данная работа. Мы считаем, что они продолжают активно совершенствоваться в связи с ростом интереса к нетрадиционным запасам углеводородов.

В современных комплексных проектах по разведке и разработке нефтегазовых месторождений используют сейсмические атрибуты, которые связаны с тремя ключевыми свойствами: V_p , V_s , ρ (скорость продольных волн, скорость поперечных волн, объемная плотность). К таким атрибутам относятся AVO-атрибуты R (интерсепт) и G (градиент), которые характеризуют границу раздела упругих свойств [Hilterman, 2001; Castagna and Backus, 1999], и пластовые атрибуты - импедансы, как результат амплитудной сейсмической инверсии. Преобразование сейсмических волновых полей в разрезы и кубы импедансов является одним из ключевых этапов динамической интерпретации. Значительные усилия специалистов направлены на подготовку сейсмических и скважинных данных для выполнения инверсии и разработку методов ее интерпретации.

Отметим основные преимущества сейсмической инверсии по сравнению с использованием атрибутного анализа [Latimer, 2000]: 1) результаты сейсмической инверсии являются количественной характеристикой и представляют произведение скорости на плотность: $V_p \cdot \rho$ - акустический импеданс (I_p), $V_s \cdot \rho$ - сдвиговый импеданс (I_s). 2) импеданс - это свойство горной породы, и он может быть получен из различных источников: сейсмические наблюдения, ГИС, лабораторные измерения. 3) разрезы и кубы импедансов - объект междисциплинарного изучения для специалистов из разных областей геонаук: геофизиков, геологов, петрофизиков, инженеров-разработчиков.

Задачу инверсии сейсмических данных можно рассматривать как детерминистическую или стохастическую. Результатом любой детерминистической инверсии является единственная модель упругих свойств, которая удовлетворяет сейсмическим данным и априорным ограничениям. Данный вид инверсии уже давно является производственным стандартом и обязательно используется в проектах по прогнозу коллекторских свойств. Но детерминистические методы не позволяют вероятностно оценить величину неоднозначности решения обратной задачи, что может отразиться на результатах интерпретации. Для снижения геологических рисков используют различные методы верификации полученных результатов: кросс-валидация (использование части скважин в качестве контрольных), привлечение априорной геологической информации и т.д. С этой точки зрения, важным является разработка методики комплексирования качественной (атрибутный анализ, спектральное разложение и др.) и количественной (сейсмическая инверсия) интерпретации сейсмических данных.

Другой подход для прогноза коллекторских свойств связан с применением геостатистических методов прогноза [Dubrule, 2003], в том числе и стохастической инверсии. Первые примеры использования геостатистики в нефтяной промышленности можно отнести к 80-м годам XXв. Но по-настоящему производственной технологией геостатистика начинает становиться только сейчас. Под стохастической геостатистикой понимают группу методов, результатом

работы которых является множество реализации (симуляций) свойств изучаемого объекта, так в частности, цель геостатистической инверсии заключается в создании множества реализаций акустического импеданса, обусловленных сейсмическими и скважинными данными. Для стохастической инверсии подбирается и используется ряд статистических параметров, которые не требуются для детерминистической инверсии, прежде всего это вариограммы: горизонтальные и вертикальные, которые позволяют учесть пространственную связанность упругих свойств. Результатом работы стохастической инверсии является множество реализаций импедансов высокого разрешения. К основным преимуществам геостатистических методов можно отнести возможность получать результаты в масштабе данных ГИС, рассчитав при этом вероятностную оценку прогнозных свойств. Геостатистический подход позволяет объединить информацию разных масштабов (геология, сейсмика, ГИС) в виде единой 3D цифровой геологической модели.

При всех положительных сторонах сейсмической инверсии, восстановленный импеданс зависит от многих геологических параметров: толщины пластов, литологии, пористости, эффективного давления, типа порового флюида. Определяющими для количественной сейсмической интерпретации в конкретных геологических условиях будут являться обоснованные методы и алгоритмы работы с упругими свойствами. Кроме того привлечение априорной геологической информации повышает надежность прогноза и вносит геологический смысл. Упругие свойства, полученные в результате сейсмической инверсии, используют для оценки и прогноза всевозможных свойств, начиная от пористости терригенных коллекторов и заканчивая геомеханическими свойствами битуминозных глин и трещиноватых карбонатов. Связь между упругими атрибутами и прогнозными параметрами может быть установлена только методами петроупругого моделирования (rock physics modeling), которые в настоящее время становятся очень актуальными. Петроупругое моделирование можно определить как исследование связей между петрофизическими свойствами горных пород (литология, пористость, проницаемость, тип насыщения, поровое

давление, анизотропия, трещиноватость, и.т.д) и скоростями продольных, поперечных волн, а также их поглощающими свойствами, полученными из сейсмических наблюдений, ГИС и лабораторных измерений. Петроупругое моделирование является быстро развивающейся областью геофизики со множеством направлений и сфер исследований: от изучения фильтрации флюида в масштабе пор до прогноза сейсмического отклика сложнопостроенных коллекторов. Пионерскими работами в этой области были исследования, проведенные в лаборатории физики горных пород Стенфордского Университета под руководством А. Нура и Г. Мавко. Однако, применение простых моделей, которые не отвечают сложности геологических объектов, может привести к недостоверным результатам и ошибочным прогнозам. Поэтому разработка моделей учитывающих сложную микроструктуру пород коллекторов является актуальным направлением работ.

При этом следует учитывать, что количество входных петрофизических свойств для таких моделей, как правило больше, чем выходных упругих параметров, что делает задачу прогноза коллекторских свойств по сейсмическим данным недоопределенной, поэтому прогноз коллекторских свойств с использованием петроупругого моделирования следует дополнить статистическими методами, которые позволяют учесть не только недоопределенность поставленной задачи, но и литологическую изменчивость пород-коллекторов, а также неоднозначность результатов детерминистической инверсии.

Объектами исследования данной работы являются: неоднородные терригенные коллектора средне юрского возраста, формирующие неструктурные ловушки углеводородов в Западной Сибири; песчаные коллектора в Восточной Сибири вендского возраста, поровое пространство которых заполнено солью; низкопористые карбонатные коллектора со сложной микроструктурой порового пространства.

Цель работы

Целью настоящей работы является повышение эффективности существующих и разработка новых методов изучения сложнопостроенных терриген-

ных и карбонатных коллекторов на основе комплексирования разномасштабных геолого-геофизических исследований.

Задачи исследования

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- Анализ основных методов решения обратных динамических задач (сейсмическая инверсия) и петроупругого моделирования.
- Исследование возможности комплексирования качественной и количественной интерпретации сейсмических данных при изучении неструктурных ловушек.
- Математическое моделирование упругих свойств засоленных песчаников и низкопористых карбонатов.
- Количественный прогноз коллекторских свойств в неоднородных терригенных и карбонатных коллекторах на основе комплексирования разномасштабных геолого-геофизических исследований.

Методика исследования

К методам исследования относятся:

- Математическое моделирование для установления связи упругих и петрофизических свойств сложнопостроенных коллекторов.
- Обработка и интерпретация экспериментальных данных, полученных на эталонных месторождениях в Западной и Восточной Сибири.
- Разработка программных средств для решения поставленных задач.

Научная новизна

- Выполнен анализ петроупругих свойств и разработана методика количественного прогноза коллекторских свойств пласта Ю₂ в Западной Сибири по сейсмическим данным.
- Разработана петроупругая модель терригенного коллектора с эффектом засоления пор в Восточной Сибири и методика его измерения по сейсмическим данным.

- Разработан способ прогноза структуры порового пространства карбонатного коллектора по данным сейсморазведки и ГИС.

Защищаемые результаты и положения

- Предложена математическая модель, связывающая упругие и петрофизические свойства засоленных песчаников и методика изучения засоления по сейсмическим данным

- Разработан способ прогноза микроструктуры порового пространства пород коллекторов по сейсмическим данным на основании геостатистического алгоритма и теории эффективных сред.

- Разработана и опробована технология, основанная на комплексировании методов качественной и количественной интерпретации сейсмических данных, позволяющая повысить качество построения геологической литолого-фациальной модели пласта Ю₂ в Западной Сибири.

Практическое значения работы и личный вклад автора

Предложенная методика и подходы к интерпретации сейсмических данных позволяют получить надежную количественную оценку коллекторских свойств неоднородных терригенных и карбонатных коллекторов. Методика может быть адаптирована для изучения нетрадиционных коллекторов нефти и газа.

Результаты применения разработанной автором методики позволили уточнить геологическое строение нефтегазоносных объектов на территории Западной и Восточной Сибири. Исследования, проведенные за время работы над диссертацией, легли в основу учебного курса: “Физика горных пород. Прогноз коллекторов по сейсмическим данным”, читаемого автором в РГУ нефти и газа им. Губкина.

Диссертация основана на исследованиях выполненных автором лично, либо при его непосредственном участии в РГУ нефти и газа им. Губкина.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных конференциях: 73th EAGE Conference, Vienna, Austria, 2011; 74th EAGE Conference, Copenhagen, Denmark, 2012, 75th

EAGE Conference, London, United Kingdom, 2013, а также на семинарах секции разведочной геофизики РАН, Москва, 2012 г.

Публикации

Результаты исследований по теме диссертации изложены в 7 опубликованных работах. Из них 3 статьи – в рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией, 3 работы – тезисы докладов на международных конференциях, а также 1 монография.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 134 наименований. Основной материал изложен на 146 страницах, включая 7 таблиц и 87 рисунков.

Благодарности

Автор выражает признательность научному руководителю д.т.н., профессору Рыжкову В.И. за внимание и поддержку на всех этапах работы. Автор благодарит сотрудников кафедр разведочной геофизики и геоинформационных систем РГУ нефти и газа им. Губкина за совместную работу и ценные дискуссии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ показана актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы.

ГЛАВА 1. МЕТОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ

Обратная задача (инверсия) в рассматриваемой области исследования это преобразование геофизических данных в физические свойства Земли (акустические, электрические, и др.). Основная цель инверсии сейсмических данных восстановление упругих свойств горных пород, которые связаны с геологическими свойствами (литология, пористость, тип пластового флюида) или с физическими условиями (давление, температура) при которых они находятся. В на-

стоящее время по сейсмическим данным возможно восстановление следующих атрибутов: акустического импеданса, сдвигового импеданса и плотности.

Инверсия может рассматриваться как детерминистическая или стохастическая задача и может выполняться по данным до или после суммирования.

В первой главе рассмотрены математические методы, применяемые для решения задач инверсии [Oldenburg et al., 1983; Ma, 2002; Sen, 2006], и дана классификация способов сейсмической инверсии.

Неоднозначность восстановления акустических и упругих параметров в результате инверсии может отразиться на результатах геологической интерпретации, поэтому ключевую роль при анализе результатов сейсмической инверсии должны играть: петроупругое моделирование, а также использование разномасштабной геологической и петрофизической информации. Результаты наших исследований по этим направлениям приведены в главах 2 и 3.

Другой подход, приводящий к уменьшению неоднозначности, и связанный с применением геостатистических методов прогноза, в том числе и геостатистической (стохастической) инверсии, рассмотрим в главе 4.

ГЛАВА 2. ПРОГНОЗ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК В НЕОДНОРОДНЫХ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Прогноз коллекторских свойств среднеюрских отложений тюменской свиты Западной Сибири является перспективным направлением работ, с которым связано восполнение ресурсной базы основного нефтегазодобывающего региона России. Объектом наших исследований являлось месторождение, расположенное в Среднеобской нефтегазоносной области Западной Сибири. Осадконакопление изучаемых пластов на данном участке происходило в прибрежных условиях, что объясняет сложное строение коллекторов и делает малоэффективным изучение этих объектов с помощью традиционных подходов. Цель исследования: 1) повысить надежность прогноза используя геологическую информацию об обстановках осадконакопления и пространственном изменении свойств, поскольку упругие свойства пород зависят от многих седиментологи-

ческих параметров: коэффициента песчаности, сортировки зерен, типа глинистости, цементации; 2) на основе комплексирования априорной информации различных масштабов выполнить прогноз коллекторских свойств на эталонном месторождении в Западной Сибири и объяснить результаты проведенного бурения.

В *первом разделе* главы рассмотрена геологическая обстановка исследуемого объекта – среднеюрских отложений тюменской свиты (пласт Ю₂). По результатам разбуривания двух положительных структур на изучаемой площади получено, что песчаники, вскрытые на первой структуре (№1), глинистые и обладают невысокими коллекторскими свойствами, в отличие от пористых песчаников, вскрытых на другой структуре (№2). Во *втором разделе* проведен анализ разномасштабной информации: сейсмических данных и кернового материала. По сейсмическим данным с использованием метода спектрального разложения [Liner, 2012] выполнено картирование некоторых элементов прибрежно – дельтовой обстановки осадконакопления. Полученная карта сопоставлена с результатами исследования кернового материала и выделено 5 литофаций, а также предложены возможные зоны их распространения. В *третьем разделе* изучены упругие и петрофизические свойства юрских песчаников по данным ГИС. Диагностика петрофизических свойств проведена с использованием модели Томаса-Стайбера, и установлено, что преобладающий тип глинистости – слоистая. Анализ упругих свойств мы выполнили, применив гранулярные модели контактов, и заключили, что для прогноза коэффициента песчаности необходимо использовать информацию о скорости поперечных волн, а также учитывать тип глинистости (рис. 1). В заключении раздела предложена стратегия прогноза коэффициента песчаности по сейсмическим данным для данного типа коллектора, в соответствии с которой в координатах упругих свойств (I_p, I_s) рассчитаны модели песчаников и глинистых песчаников, а коэффициент песчаности определен линейной интерполяцией между двумя моделями (рис. 2)

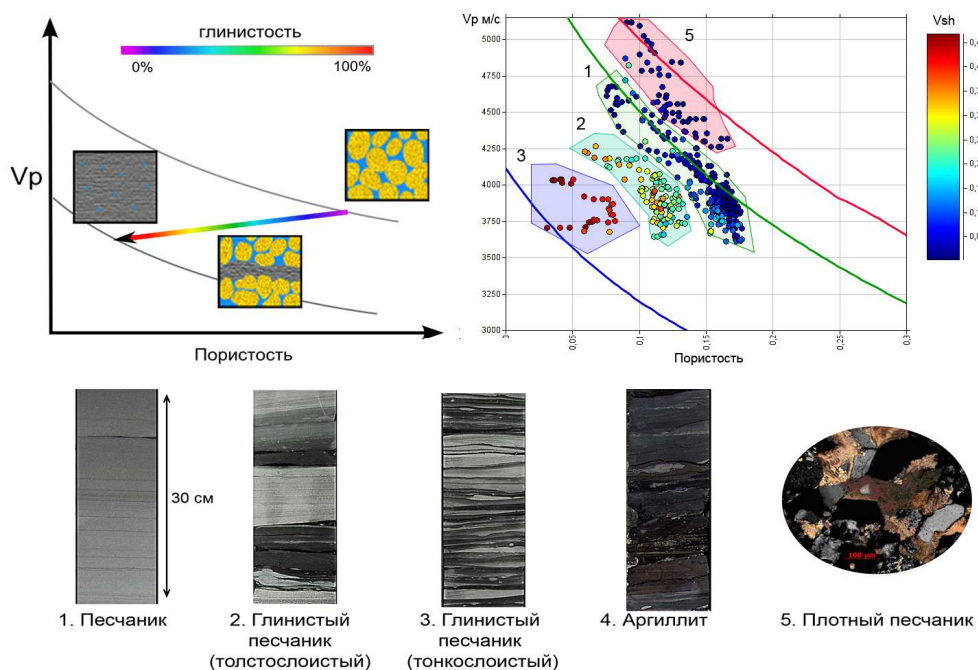


Рисунок 1. Графики скорость продольных волн - пористость. Модель изменения акустических свойств при слоистом типе глинистости (слева), данные ГИС (справа), цифры указывают на номер литофации (внизу)

В четвертом разделе проведено исследование влияния количества цемента и сортировки зерен песчаника, полученных в результате анализа кернового материала, на упругие свойства и установлено, что ухудшение сортировки зерен песчаника значительно влияет на коллекторские свойства: уменьшает пористость, а также объясняет пологий тренд в координатах скорость - пористость. Наличие даже небольшого количества цемента увеличивает скорость продольных волн и делает породу более жесткой, но при этом сохраняется относительно высокая пористость. Влияние цементации и сортировки зерен может существенно менять наклон линейной зависимости между скоростью продольных волн (акустическим импедансом) и пористостью, что необходимо учитывать при прогнозе по сейсмическим данным. Для этой цели мы применили осреднение акустических свойств (Backus upscaling), и определили направление изменения акустического импеданса и пористости в сейсмическом диапазоне частот. Это дало нам основание положительно оценить перспективы прогноза пористости по сейсмическим данным.

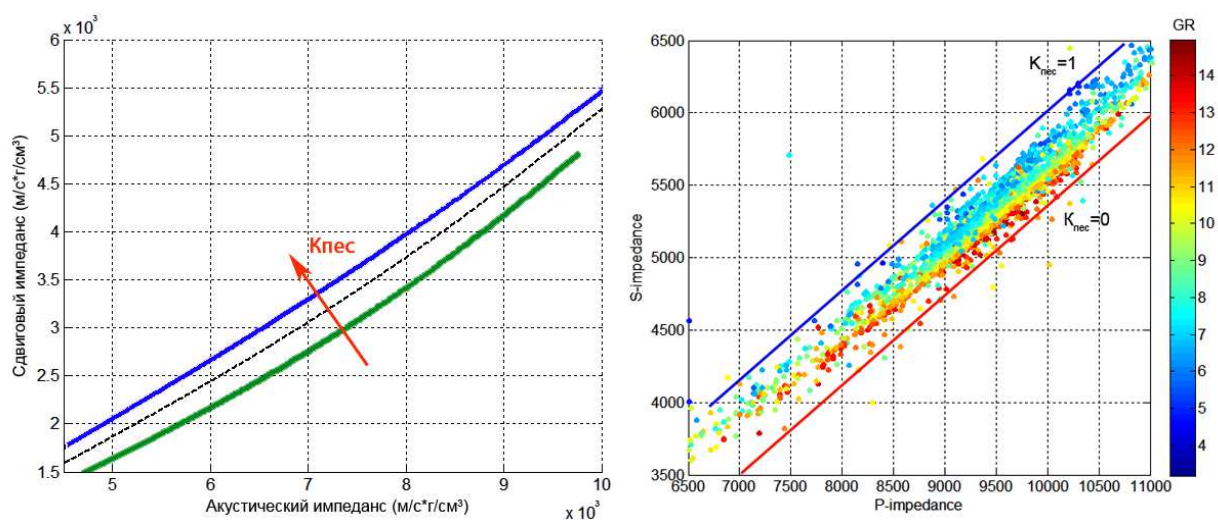


Рисунок 2. График акустический импеданс - сдвиговый импеданс. Модель чистого песчаника - синяя, глинистого песчаника - зеленая (слева). Данные ГИС (справа), цветом значения ГК

В пятом разделе приведены результаты качественной и количественной интерпретации сейсмических данных. Предварительно, мы, на основании изучения упругих свойств в сейсмическом диапазоне частот, выделили три сейсмофации: песчаник, глинистый песчаник, плотный песчаник. А затем выполнили качественную классификацию результатов синхронной инверсии.

Для количественной интерпретации результатов инверсии мы преобразовали карты I_p, I_s для пласта Ю₂, как было показано выше, в карту коэффициента песчаности. В результате прогноза области высокой песчаности соответствуют баровым телам, руслам и устью реки, что согласуется с седиментологическими предположениями. Зона глинизации находится в районе поймы. Затем мы выполнили прогноз пористости для зон с высоким коэффициентом песчаности (>0.7). Получено, что лучшие коллектора связаны с песчаным баром, где находится структура (№2). Скважины структуры (№1) вскрывают отложения поймы, хорошие коллектора здесь отсутствуют. Перспективной областью является юго-восточный склон структуры (№2), где песчаные коллектора связаны с устьем реки и возможно наличие стратиграфических ловушек.

Совместное использование результатов количественной интерпретации синхронной инверсии сейсмических данных и анализа обстановок осадконакопления позволили выполнить прогноз коллекторских свойств пласта Ю₂. Меж-

дисциплинарный подход, заключающийся в интегрировании геофизической и геологической информации разных масштабов рекомендуется для уменьшения рисков и успешного бурения новых скважин на пласт Ю₂ в условиях Западной Сибири.

ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗАСОЛОНЕНИЯ ПОР ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ

В данной главе представлена методология комплексной интерпретации сейсмических данных, включающая анализ керна и шлифов, петрофизические исследования, разработку петроупругой модели коллектора с целью изучения проблемы засоления терригенных пластов Восточной Сибири. Галитизация оказала значительное влияние на венд-кембрийские коллекторы подсолевого комплекса, с которым связаны основные перспективы нефтегазоносности. Присутствие галита в поровом пространстве - одна из главных причин неоднородности коллекторских свойств горизонтов, поскольку его вымывание из образцов керна приводит к повышению их пористости в 2 - 2.5 раза и увеличению проницаемости в сотни раз, что необходимо учитывать при составлении технологической схемы разработки месторождения.

В проведенном исследовании особое внимание было уделено петроупругому моделированию, потому что модель, связывающая упругие и петрофизические свойства засоленного песчаника, отсутствует.

В *первом разделе* проведен обзор теории флюидонасыщенных пород Гассмана, где рассмотрены теоретические аспекты уравнения Гассмана и его модификаций [Mavko et al., 2009; Wang, 2001], приведено обобщение лабораторных измерений, а также результаты практического применения теории в случаях значимых для интерпретации сейсмических данных. Теория Гассмана имеет особое значение для динамической интерпретации сейсмических данных, так как позволяет оценить скорости флюидонасыщенных пород при низких сейсмических частотах. Во *втором разделе* рассмотрена одна из возможных причин засоления верхнечонских песчаных пластов, связанная с тепловым воздейст-

вием трапповых интрузий и конвективным массопереносом галита подземными рассолами из соленосных отложений. Исходя из предложенной гипотезы следует, что кристаллическая соль может присутствовать только в порах породы, и никак не может участвовать в формировании скелета. Следовательно, коэффициент засоления пород, следует рассматривать как долю объема порового пространства, занятую кристаллической солью. В этом случае можно применить обобщенную теорию Гассмана [Ciz and Shapiro, 2007] для прогноза скоростей продольных и поперечных волн в засоленных песчаниках. Для этого были исследованы и определены упругие модули зерен, сухой породы и порозаполнителя. Упругие модули зерен были рассчитаны по закону смешивания Войгт-Реусс-Хилл для смеси 80% кварца и 20% глины.

Для определения упругих модулей сухой породы мы использовали одну из моделей эффективных сред - модель контактов для сцементированного песчаника. На первом этапе, согласно теории Герца-Миндлина, были определены упругие модули песчаника при критической пористости 40% и эффективном давлении 15 МПа. На втором этапе была проведена интерполяция упругих модулей от значения при критической пористости до значения зерен скелета согласно модифицированной верхней границе Хашина-Штрикмана. Для верификации полученной модели мы провели замещение водой согласно уравнению Гассмана, и сопоставили модель водонасыщенного песчаника с данным ГИС и получили хорошее соответствие.

Далее мы установили, что свойства водосоляной смеси зависят не только от упругих свойств компонент, но и от характера заполнения солью порового пространства, который связан со степенью смачиваемости горных пород. Мы рассмотрели три типа пород: гидрофильные, гидрофобные и смешанного типа (рис. 3).

Для гидрофильных коллекторов предельная величина коэффициента засоления ограничивается остаточной водонасыщенностью пород, исходя из предположения, что активная, несущая электрический заряд поверхность гидрофильного коллектора всегда будет занята водой, препятствующей формиро-

ванию зародышей кристаллов галита на поверхности пор. В этом случае в поровом пространстве формируются кристаллы или комочки соли, плавающие в поровом флюиде.

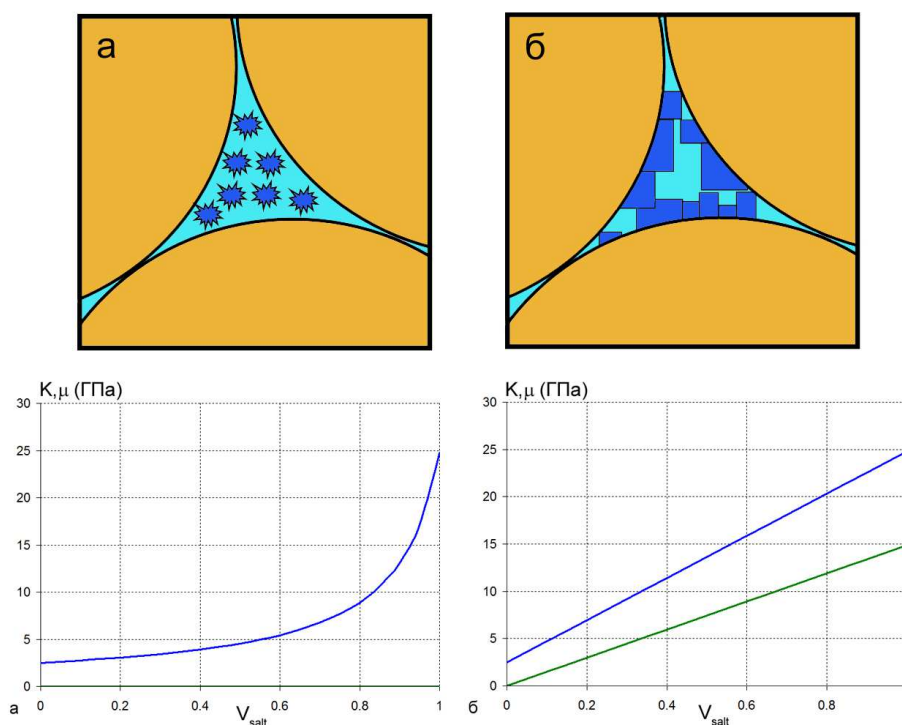


Рисунок 3. Характер заполнения пор солью в случае гидрофильных (а) и гидрофобных (б) пород (вверху). Упругие свойства водосоляной смеси для гидрофильного (а) и гидрофобного коллектора (б) в зависимости от объема соли (V_{salt}). Объемный модуль синяя линия, сдвиговый модуль - зеленая (внизу)

Реальные коллекторы нефти и газа в пластовых условиях нередко бывают гидрофобными. Это значит, что кристаллы соли формируются на поверхности поровых каналов и могут полностью запечатывать поровое пространство.

При смешанном типе смачиваемости пород предполагается смешанная модель засолонения порового пространства двух предыдущих типов.

Химический анализ глубинных проб воды из целевого пласта показывает высокую минерализацию пластовой воды, тип воды - хлоридная магниевая, кальциевая. В таких условиях вероятность прорыва водной пленки и гидрофобизация коллектора возрастает. Следует ожидать, для исследуемой площади работ, преобладание коллектора гидрофобного, а также смешанного типа. Данный вывод подтверждается лабораторными исследованиями смачиваемости,

проведенными в Тюменском нефтяном научном центре (ТННЦ), для 8 скважин в пределах изучаемой площади.

Для оценки упругих модулей водосоляной смеси для гидрофильного коллектора мы использовали границу Реусса в соответствии с которой твердые кристаллы (комочки) соли окружены жидкостью (водой) с низким объемным модулем. Сдвиговый модуль такой смеси равен 0 (рис. 3).

В случае гидрофобного коллектора кристаллы соли находятся на поверхности зерен, а жидкость заполняет внутреннее пространство. Согласно такой геометрии, для оценки упругих модулей водосоляной смеси мы применили границу Войгта (рис. 3).

После того как свойства всех компонент были определены, мы рассчитали модели различной степени засоления для гидрофобного коллектора, применив обобщенное уравнение Гассмана. На рисунке 4 представлены модели засоленного песчаника в координатах скорость продольных волн - пористость, а также в координатах V_p/V_s - акустический импеданс (I_p).

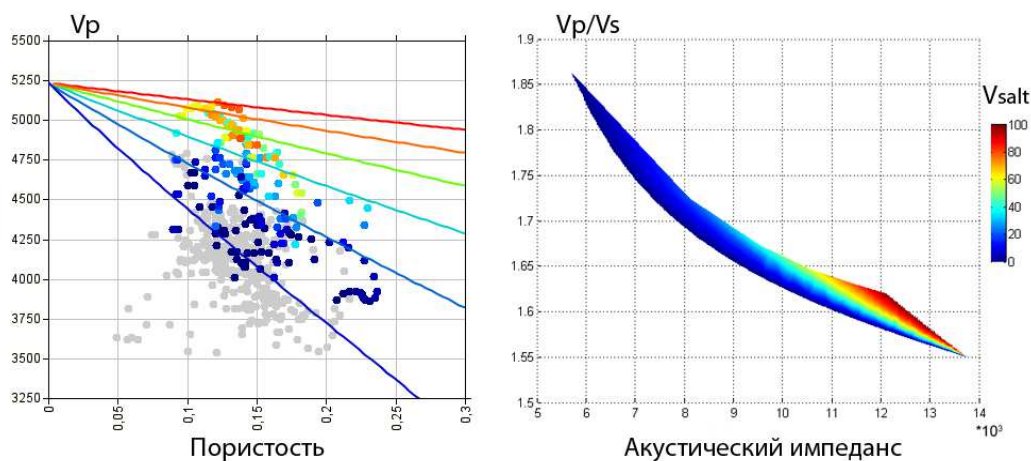


Рисунок 4. Петроупругие модели засоления гидрофобного песчаника в координатах скорость продольных волн - пористость (слева), V_p/V_s - акустический импеданс (справа). Цветные точки - данные ГИС для гидрофобного коллектора. Цветом показан объем соли

Как показали лабораторные исследования смачиваемости песчаников, гидрофильный тип коллектора отсутствует для анализируемых скважин, можно лишь отметить наличие переходного типа смачиваемости. Засоление данного

типа коллектора меньше по объему и оказывает более слабое влияние на скорости. Используя ранее полученные упругие модули, можно рассчитать модель засоления для гидрофильного типа коллектора, при этом обобщенное уравнение Гассмана сводится к классическому.

В *третьем разделе* приведены результаты исследования и показана последовательность выполнения работ с реальными сейсмическими и скважинными данными с целью получения прогноза засоления. На первом этапе, были проанализированы упругие свойства по данным ГИС, получено, что реальные данные о засолении песчаника согласуются с предложенной теоретической моделью. Затем мы определили литофации (классы), которые будут использованы для последующей вероятностной классификации. Критерием разделения данных на классы прежде всего является объем соли в порах. Для граничного значения засоления был принят объем соли в порах 40%: 1 класс - песчаник засоленный ($V_{salt} > 40\%$), 2 класс - песчаник ($V_{salt} < 40\%$). Далее для каждого класса были построены непараметрические функции плотности вероятности в координатах упругих атрибутов: V_p / V_s - акустический импеданс (I_p), упругий импеданс (EI) - акустический импеданс (I_p), используя которые можно осуществить прогноз наиболее вероятных свойств исследуемого объекта а также оценить ошибки такого прогноза.

Далее на основе байесовского подхода и теории информации определен вклад сейсмических атрибутов и их пар при прогнозе засоления [Avseth et al., 2005]. Установлено, что акустический импеданс является наиболее информативным атрибутом для разделения классов, добавление второго атрибута, включающего скорость поперечных волн уменьшает байесовскую ошибку и повышает надежность прогноза. Поэтому, целесообразно провести разделение на классы в координатах двух атрибутов.

На финальном этапе выполнена акустическая и упругая инверсия сейсмических данных и проведена вероятностная классификация, которая позволила выделить зоны засоления песчаных коллекторов (рис. 5). Для верификации

карты засоления пласта мы определили параметр засоления коллекторов по данным ГИС. Этот параметр отражает относительную долю объема порового пространства коллекторов, занятого кристаллизованным галитом, от объема общей пористости коллекторов, отмытых от солей. Значения параметра засоления хорошо согласуются с прогнозной картой засоления.

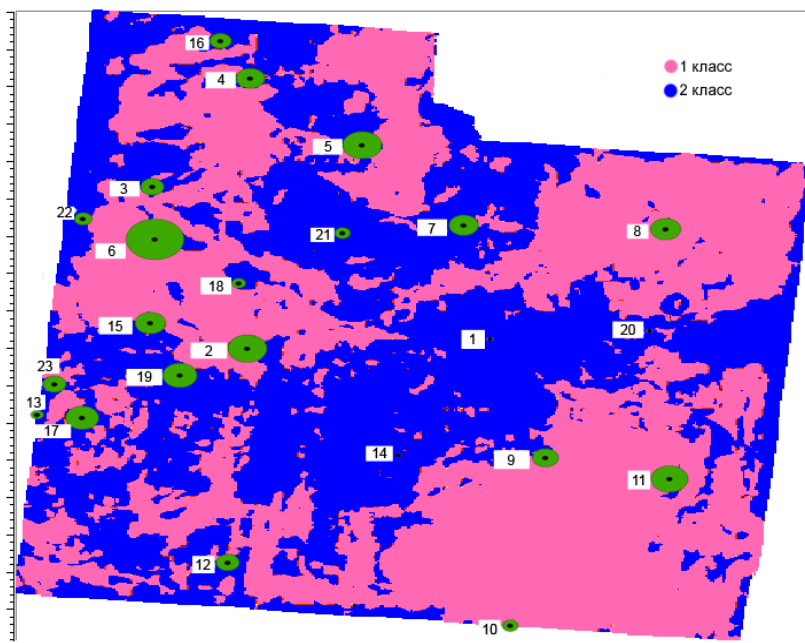


Рисунок 5. Карта классов для терригенного пласта. 1 класс: песчаник с высоким содержанием соли, 2 класс: чистый песчаник или песчаник с низким содержанием соли. Радиус окружности соответствует величине параметра засоления в скважине

Предложенная нами петроупругая модель и методика прогноза засоления по сейсмическим данным может быть использована при изучении терригенных коллекторов в условиях Восточной Сибири.

ГЛАВА 4. МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

В карбонатных породах-коллекторах сосредоточено более 50% мировых запасов нефти и газа, однако изучение коллекторских свойств карбонатных пород по сейсмическим данным серьезно осложнено по ряду причин:

- Нелинейная связь пористости и упругих параметров, обусловленная влиянием геометрии порового пространства карбонатных пород.

- Незначительное влияние типа флюида на скорости волн, связанное с высокой жесткостью скелета.
- Качество карбонатного коллектора не всегда обусловлено высокой пористостью. На проницаемость и фильтрацию флюида в коллекторе влияет наличие трещин.
- Совместное использование скоростей продольных и поперечных волн здесь не так эффективно как для терригенных пород. Коэффициент Пуассона, как правило, меняется незначительно.

В настоящей главе предлагается способ прогноза общей пористости и аспектного отношения порового пространства карбонатных пород, который базируется на теории эффективных сред и на геостатистическом алгоритме - преобразовании облака точек (cloud transform method) [Bashore et al., 1994]. Опробование методики проведено на модельных и реальных геофизических данных.

В *первом разделе* главы приведена классификация карбонатных пород П. Чокетта и Л. Прея [Choquette and Pray, 1970]. Главным признаком данной классификации является устройство порового пространства карбонатных пород, которое объединяет в себе четыре характеристики пустотного пространства и 15 основных типов пористости.

Во *втором разделе* рассмотрено влияние петрофизических и геологических факторов, таких как минералогический состав, пористость, механическое уплотнение и тип цемента на упругие свойства карбонатных пород. Главный вывод состоит в том, что форма пор является ключевым фактором влияющим на упругие свойств карбонатных пород, что позволяет осуществить прогноз геометрии порового пространства, и это важно для оценки качества коллектора.

В *третьем разделе* приводится обзор основных моделей теории эффективных сред: модели Кустера-Токсоза, дифференциальной эффективной модели (ДЭМ), самосогласованной модели (ССМ) [Mavko, 2009], а также проведено исследование этих моделей. Базовые модели сопоставлялись с различными видами измерений упругих свойств: численным моделированием, лабораторными измерениями композитных материалов и керновых данных, скважинными из-

мерениями. Сделан вывод, что не существует универсальной модели. Выбор эффективной модели зависит от многих факторов, главным из которых является микроструктура карбонатных пород.

В *четвертом разделе* приводится описание предложенного геостатистического алгоритма прогноза общей пористости и аспектного отношения (рис. 6). На вход подается поле значений данных ГИС в координатах акустический импеданс - пористость, затем значения акустического импеданса делятся на бины, для каждого бина строится интегральная функция плотности вероятности (CDF), которая формирует карту. Карта CDF используется для определения пористости по входному значению акустического импеданса: для каждого бина выбирается случайное число из равномерного распределения от 0 до 1, которое преобразуется в значение пористости согласно CDF функции. Таким способом, для каждого значения акустического импеданса проводится множество симуляций пористости, причем статистические параметры каждой реализации пористости (среднее, стандартное отклонение и вариограмма) будут соответствовать входной выборке. После каждой симуляции кривой пористости аспектное отношение пор определяется методом бисекции для каждой найденной пары акустический импеданс - пористость, согласно калиброванной модели эффективной среды.

Большое количество реализаций пористости и аспектного отношения требуют дальнейшей статистической обработки. Здесь возможно два варианта:

- Определить математическое ожидание выборки и стандартное отклонение, а также квантили P10, P90, т.е. значения которые не будут превышены с 10% и с 90% вероятностью соответственно.
- Вычислить вероятность появления параметра выше или ниже некоторого порога.

Предложенный метод требует достаточного количества данных, необходимых для построения достоверной интегральной функции плотности вероятности, калибровки петроупругой модели включений с использованием данных ядра и FMI, а также верификации и кросс-валидации полученных результатов.

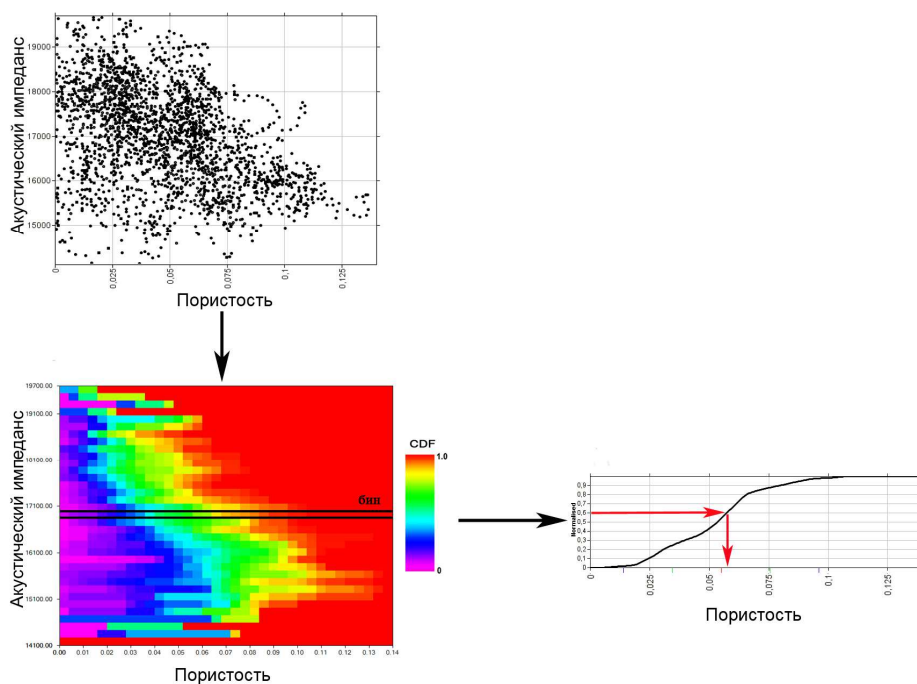


Рисунок 6. Алгоритм метода преобразования облака точек. Поле значений акустический импеданс - пористость (вверху), карта интегральной функции плотности вероятности для всех бинов (внизу), интегральная функция плотности вероятности для одного бина (справа)

В заключении главы работа предложенного метода продемонстрирована на модельных, а также реальных каротажных и сейсмических данных.

На рисунке 7 показан пример прогноза пористости и аспектного отношения карбонатного интервала для одной из скважин в Восточной Сибири. Прогнозная кривая пористости (среднее 50 реализаций) сопоставлена с пористостью, полученной по комплексу ГИС (черная). Среднеквадратическая ошибка составляет менее 0.015 для всего интервала. Прогнозная кривая аспектного отношения (красная) сопоставлена с кривой аспектного отношения (зеленая), рассчитанной из известной пористости при минимизации разности между измеренной скоростью продольной волны и рассчитанной из ДЭМ. Обработка многих реализаций позволяет оценить вероятность прогноза. На рисунке 8 представлена вероятность появления пористости более 0.07. Данная кривая повышает надежность прогноза хороших коллекторов, там где средняя пористость не восстанавливает истинные значения.

Предложенный метод был применен ко многим реализациям акустической стохастической инверсии сейсмических данных. В результате было получено пространственное изменение средней пористости и аспектного отношения.

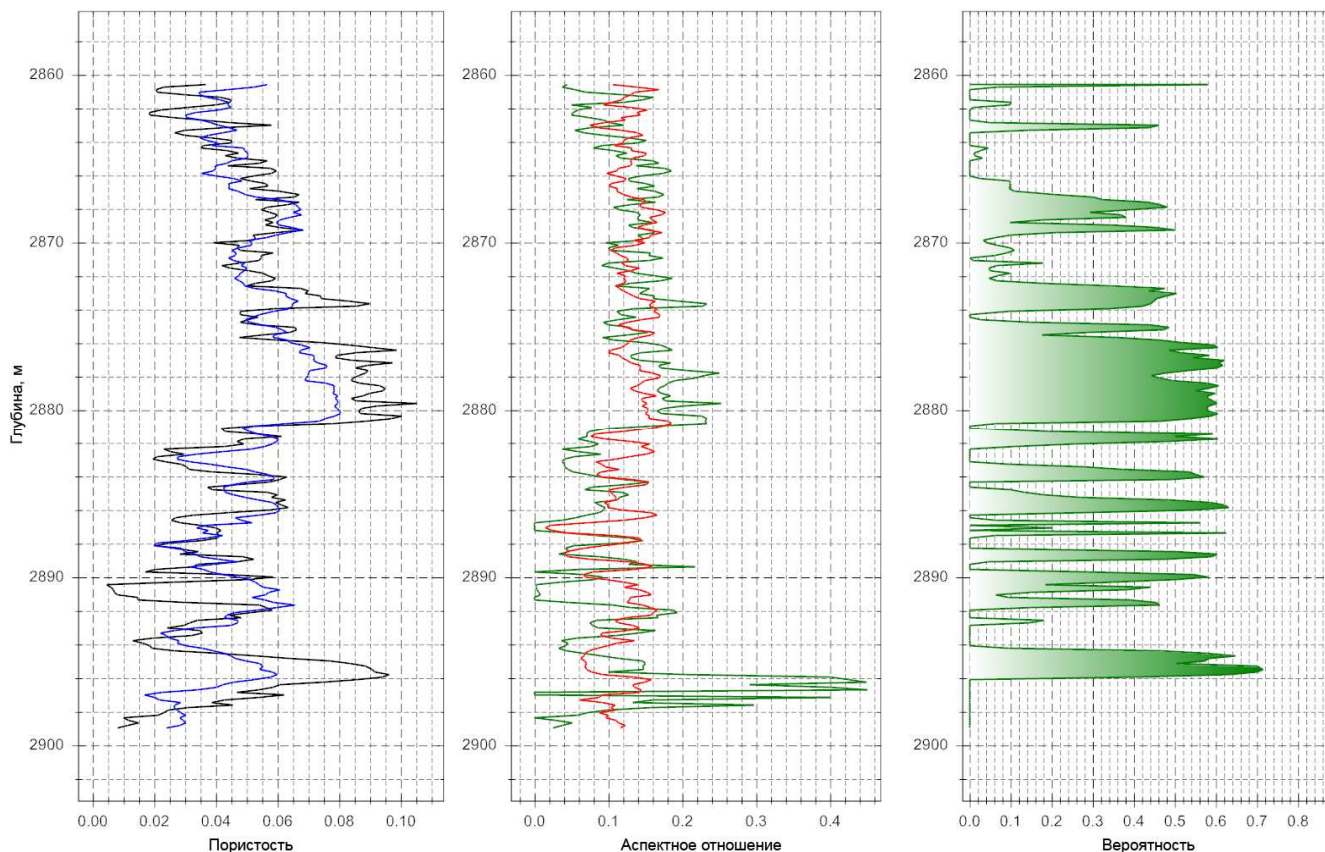


Рисунок 7. Пример прогноза пористости и аспектного отношения по данным ГИС. Прогнозная пористость - синяя кривая, пористость по данным ГИС - черная. Прогнозная кривая аспектного отношения - красная кривая, аспектное отношение, рассчитанное из известной скорости и пористости с использованием ДЭМ - зеленая. Вероятность появления пористости более 0.07

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные выводы диссертационного исследования:

1. Проанализированы основные методы решения обратных динамических задач и петроупругого моделирования, разработана методика их комплексирования, которая опробована при исследовании и прогнозе свойств сложнопостроенных коллекторов, что позволило уточнить геологическую

модель и скорректировать схему разработки эталонного месторождения в Западной Сибири.

2. Выполнено математическое моделирование упругих свойств засоленных песчаников и осуществлен прогноз областей засоления песчаного пласта по сейсмическим данным. Полученные результаты переданы компании-недропользователю для их использования при заложении новых скважин, а также при выборе системы вытеснения нефти с поддержанием пластового давления.
3. На основе геостатистического алгоритма - cloud transform и теории эффективных сред разработан способ прогноза коллекторских свойств карбонатных пород, который был опробован на реальном объекте в Восточной Сибири.

Представленная работа является необходимым шагом при переходе от простых интерпретационных моделей к сложным, что связано с необходимостью изучения по сейсмическим данным сложнопостроенных пород-коллекторов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в ведущих изданиях согласно перечню ВАК

1. Шубин А.В. Теория Гассмана как основа количественной интерпретации сейсмических данных // Геофизика. 2012. № 1. С. 16-19.
2. Шубин А.В., Рыжков В.И. Изучение эффекта засоления порового пространства терригенного коллектора по сейсмическим данным // Геофизика. 2013. №5. С. 17-25.
3. Скрынникова А., Шубин А., Фомин А., Барс Ф., Рыжков В. Изучение фациальных комплексов средней юры Западной Сибири по 3D сейсмическим данным // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2011. № 3. с. 18-27.

Публикации в других изданиях

4. Кондратьев И.К., Рыжков В.И., Киссин Ю.М., Шубин А.В. Способы реализации и оценка эффективности сейсмической инверсии. - М.: ИЦ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011, 62 с.
5. Shubin A., Ryzhkov V. Seismic study of carbonate reservoir salinization / 73th EAGE Annual Meeting, Expanded Abstracts, 2011.
6. Shubin A., Ryzhkov V., Gorodnov A. Rock physics model of sandstone with pore-filling salt / 74th EAGE Annual Meeting, Expanded Abstracts, 2012.
7. Shubin A., Mitin A., Danko D., Ryzhkov V. Estimation of the Porosity and Pore Aspect Ratio of Carbonates Using Cloud Transform Method / 75th EAGE Annual Meeting, Expanded Abstracts, 2013.