

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Гриневский Антон Сергеевич

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ
ИЗУЧЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД,
ВЫЗВАННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТЬЮ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в Управлении сейсмических исследований
Общества с ограниченной ответственностью «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»

Научный руководитель *Керусов Игорь Николаевич*, кандидат
геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты *Тихоцкий Сергей Андреевич*, доктор физико-
математических наук, член-корреспондент
РАН, ФГБУН Институт физики Земли им.
О. Ю. Шмидта РАН, директор

Птецов Сергей Николаевич, доктор
технических наук, ООО «ГеоПрайм», отдел
региональной геологии, главный геофизик

Дучков Антон Альбертович, кандидат
физико-математических наук, ФГБУН
Институт нефтегазовой геологии и
геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
лаборатория динамических проблем сейсмики,
ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 21 апреля 2021 г. в 14:30 на
заседании диссертационного совета МГУ.04.03 Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу:
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет,
ауд. 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций
научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский
просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с
диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте
ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/353440970/>.

Автореферат разослан «__» марта 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук

В.А. Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Перед интерпретацией сейсморазведочных данных ставится множество разносторонних задач. В числе таких задач – поиск и исследование коллекторов трещинного типа.

Трещиноватые резервуары ввиду улучшенных фильтрационных качеств традиционно представляют собой особый интерес для разработки. В связи с этим, задачи локализации зон повышенной трещиноватости горных пород и изучения свойств трещин сейсмическими методами становятся крайне актуальны.

В процессе исследования трещиноватых коллекторов важным этапом является анализ зависимости сейсмических амплитуд от азимута падения волны. Характер этой зависимости несет в себе принципиально новую информацию, недоступную никакими другими методами исследования. Эта дополнительная информация об упругих свойствах и параметрах трещиноватости горных пород актуальна для задач поиска перспективных объектов и мониторинга разработки месторождений.

Степень разработанности

Среди авторов основополагающих работ по изучению упругих и анизотропных свойств трещиноватых пород, необходимо отметить особенный вклад Thomsen L., Crampin S., Schoenberg M., Hudson J., Sayers C., Cheng C., И.О. Баяк. Исследования параметров сейсмической записи в контексте прямых и обратных задач для анизотропных и трещиноватых горных пород рассматривалась в работах авторов Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I., Rüger A., Downton J., Mesdag P., Lynn H., Г.И. Петрашеня, К.Д. Клем-Мусатова, И.Р. Оболенцевой, Т.В. Нефедкиной. Этот список не является исчерпывающим.

В настоящее время интерес представляет разработка методов включения данных о трещиноватости в трехмерные геологические и гидродинамические модели с учетом информации по сейсмическим данным. Перспективное направление – решение задачи синхронной азимутальной инверсии для исследования упругих параметров горных пород на количественном уровне. Остается актуальным расширение класса рассматриваемых моделей до орторомбических и более сложных.

Цель работы заключается в совершенствовании методов решения прямых и обратных задач сейсморазведки и их практическом

применении для изучения анизотропии горных пород, вызванной трещиноватостью.

Для достижения цели диссертационной работы решались следующие **задачи**.

1. Выполнить обзор и составить классификацию современных методов моделирования и динамического анализа сейсмических данных для исследования анизотропии и трещиноватости горных пород.
2. Изучить характер влияния трещиноватости, зарегистрированной по данным ГИС, на упругие свойства горных пород (в рамках теории эффективных сред) и на сейсмическое волновое поле.
3. Адаптировать параметры трещиноватости для включения ее в модель для расчета волнового поля сеточно-характеристическим методом.
4. Исследовать характер влияния помех на восстановление параметров анизотропии по азимутальным атрибутам волнового поля с учетом реальных данных о трещиноватости.
5. Реализовать алгоритмически и применить метод азимутальной упругой инверсии к модельным данным, оценить возможности метода.
6. Разработать и применить на модельных и реальных данных способ повышения устойчивости азимутальной инверсии на основе уравнения Рюгера.
7. Проанализировать эффективность азимутальной упругой инверсии на реальных данных, оценить информативность результатов с геологической точки зрения.

Объектом исследования настоящей работы являются трещиноватые и анизотропные геологические среды, а также методы их изучения по данным широкоазимутальной сейсморазведки.

Научная новизна

1. Впервые установлена связь между характером трещиноватости и азимутальными сейсмическими атрибутами волнового поля в интервале верхнедевонских карбонатных построек Тимано-Печорского региона.
2. Количественные оценки трещиноватости впервые в данных сейсмогеологических условиях были адаптированы для включения в модель для сеточно-характеристического метода расчета волнового поля.

3. По результатам моделирования оценены минимальные значения отношения «сигнал/помеха» для изучения трещиноватости верхнедевонских рифов Тимано-Печорской провинции по азимутальным AVO-атрибутам.
4. Предложен, опробован на модельных данных и применен к реальным материалам алгоритм стабилизации азимутальной упругой инверсии с помощью приведения данных к уравнению Рюгера перед инверсией.
5. На основе азимутальной упругой инверсии получены новые данные об анизотропных свойствах отложений рассматриваемых месторождений Западно-Сибирской и Тимано-Печорской нефтегазоносных провинций.

Защищаемые положения

1. Данные скважинного микроимиджера и кросс-дипольного акустического каротажа могут быть использованы для моделирования сейсмического отклика от трещиноватого анизотропного пласта. Это позволяет оценивать информативность азимутальных AVO-атрибутов в зависимости от степени трещиноватости и качества сейсмических данных.
2. Предложенный алгоритм предобработки сейсмических данных с регуляризацией на основе уравнения Рюгера позволяет повысить устойчивость азимутальной AVA инверсии в условиях наличия нерегулярных помех и неоптимальной геометрии входных данных.
3. Представленная методика азимутальной AVA инверсии эффективна для локализации зон повышенной азимутальной анизотропии, что подтверждается результатами моделирования и исследованиями на реальных данных.

Практическая значимость

Рассмотренные в работе методы анализа сейсмических данных направлены на исследование трещиноватости в горных породах. Трещиноватость является их важным фильтрационно-емкостным свойством и напрямую влияет на эффективность разработки месторождений углеводородов.

Сформулированные в диссертационном исследовании подходы к сейсмическому моделированию и решению обратной задачи методом азимутальной инверсии данных сейсморазведки повышают достоверность определения количественных параметров трещиноватости горных пород.

Применение рассмотренных в работе методов анализа сейсмических данных позволяет оптимизировать геологоразведочные работы и схемы разработки месторождений нефти и газа.

Моделирование сейсмических данных на основе исследований направленной трещиноватости в скважинах имеет практическую значимость для планирования сейсморазведочных работ, последующих обработки и интерпретации данных.

Степень достоверности. Апробация

Достоверность результатов демонстрируется на синтетических и реальных данных. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в независимых литературных источниках по данной тематике, а также с материалами других геофизических методов.

Основные положения диссертационного исследования докладывались автором на всероссийских и международных конференциях:

- В 2016 и 2017 годах на конференции «Сейсмические технологии» Москва, Россия.
- В 2018 году на международной геолого-геофизической конференции и выставке «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии – ГеоЕвразия», Москва, Россия.
- В 2018 году на международной конференции «EAGE Saint Petersburg 2018 Conference And Exhibition "Innovations in Geosciences – Time for Breakthrough»», Санкт-Петербург, Россия.
- В 2017 году на конференции International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, KES2017, Марсель, Франция (в соавторстве).

По теме работы опубликовано 7 печатных работ в научных журналах из списков Web of Science (WoS), Scopus, RSCI, перечня изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, и сборниках трудов всероссийских и международных конференций. Методы и результаты, представленные в работе, были апробированы в ряде исследований, в том числе при картировании трещиноватых зон для размещения поисково-оценочного и разведочного бурения на различных месторождениях компании «ЛУКОЙЛ».

Материалы и методы исследования

В ходе работы автор использовал материалы по различным проектам компании «ЛУКОЙЛ», включая данные ГИС и 3D-сейсморазведки.

Материалы обрабатывались и анализировались в специализированном ПО:

- для выполнения упругой инверсии, расчета AVOAz-атрибутов, моделирования синтетических сейсмограмм, дообработки сейсмических данных использовался программный пакет Hampson-Russell;
- для трехмерной визуализации и сопоставления результатов исследований с данными микросейсмического мониторинга применялся комплекс Petrel;
- численное моделирование упругих свойств трещиноватых пород методом конечных элементов проводилось в системе CAE Fidesys.

Статистический анализ влияния помех на AVOAz-атрибуты, линейная инверсия параметров анизотропии, обобщение и визуализация результатов моделирования, а также другие процедуры выполнялись по составленным автором алгоритмам с использованием языка программирования Python и его доступных библиотек с открытым исходным кодом (SciPy, NumPy, Matplotlib, ObsPy и др.).

Личный вклад

Материалы для диссертационной работы были получены в ходе научно-производственных проектов при непосредственном участии автора. Автор лично выполнял расчеты инверсий и атрибутов, рассматриваемых в работе. Непосредственно автором выполнено моделирование эффективных упругих свойств и синтезирование 1D сейсмических данных для трещиноватого коллектора. Методика восстановления данных по азимутальным атрибутам для повышения устойчивости AVOAz-инверсии предложена и протестирована на модельных данных, а затем применена к реальным материалам лично автором.

Автором создан и применен набор программ и алгоритмов для:

- Петроупругого моделирования в рамках теорий Хадсона и Шёнберга на основе данных FMI и кросс-дипольного АК;
- Расчета синтетических угловых/азимутальных сейсмограмм в рамках аппроксимации Рюгера;
- Анализа результатов азимутальной инверсии в рамках модели НТИ.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, три главы, заключение, список сокращений и список литературы из 148 наименований, состоит из 161 страницы текста, 59 иллюстраций и 3-х таблиц.

Благодарности

Автор искренне благодарен научному руководителю Игорю Николаевичу Керусову за оказываемое доверие и возможность проводить научные исследования в производственном процессе. Под его руководством автор постоянно погружается в нетривиальные задачи и с интересом расширяет свои знания и навыки в области геофизики, часть которых нашла свое отражение в этой диссертации. Своим примером и поддержкой Игорь Николаевич не дает расслабиться, инициируя научные эксперименты и вселяя в окружающих исследовательский интерес.

Автор бесконечно благодарен научному руководителю в аспирантуре МГУ Наталии Владимировне Шалаевой за ценные советы и замечания по структуре и тексту диссертации, оригинальные идеи и многократную помощь при любых затруднениях, мотивирующие слова и позитивный исследовательский настрой.

Автор хотел бы отметить неоценимый вклад, который научные руководители внесли в эту диссертацию. Спасибо за терпение, наставничество и за то, что не давали опустить руки.

Автор выражает благодарность компании «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» за предоставленные данные и возможности для научно-исследовательской работы.

Автор благодарит своих коллег – коллектив Центра сейсмических исследований ЛУКОЙЛ-Инжиниринг – команду талантливых и интересных людей, всегда готовых делиться знаниями и опытом. Особенно автор признателен к.ф.-м.н. Дмитрию Евгеньевичу Мирошниченко за консультации по всем возникавшим в процессе работы теоретическим и прикладным вопросам, за оригинальные пути решения сложных задач и остроумные замечания.

Автор благодарит сотрудников Московского физико-технического института д.ф.-м.н. Алену Владимировну Фаворскую и д.ф.-м.н. Игоря Борисовича Петрова за обмен опытом и совместные исследования.

Автор признателен коллективу московского офиса компании «СЖЖ Восток» и лично Зинаиде Игнатьевне Газарян за приглашения на научно-практические семинары. Полученные в процессе знания

очень помогли в выполнении расчетов для моделей анизотропных сред.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ за внимание и интерес, проявленные к диссертации. Замечания и советы, озвученные на ее предварительном рассмотрении, позволили значительно улучшить и дополнить работу.

Автор сердечно благодарит преподавательский коллектив отделения геофизики геологического факультета МГУ за незабываемое время учебы в университете и полученные знания в области геофизики. С особенным теплом автор хотел бы отметить преподавателей и организаторов учебных геофизических практик в Крыму, в Александровке, на Белом море, за то, что передали не только знания и умения, но и любовь к своему делу. Энтузиазм и творческая атмосфера, которыми вы наполняете процесс учебы и научной работы, бесценны.

Спасибо моим родителям, друзьям и Ане за то, что они всегда рядом и верят в меня.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** рассмотрена область исследований, современное состояние проблемы изучения трещиноватых сред сейсмическими методами. Изложены актуальность работы, цели и задачи диссертационного исследования, его практическая значимость и научная новизна, сформулированы основные защищаемые положения.

Глава 1. Особенности динамического анализа в азимутально-анизотропных средах

Глава 1 представляет собой обзор научных материалов и публикаций по теме диссертации. Рассмотрены свойства анизотропных сред и особенности анизотропных моделей в рок-физике, ГИС, сейсморазведке. Наибольшее внимание уделено динамическому анализу сейсмических данных для исследования сред типа НТИ.

В *разделах 1.1 и 1.2* изложены основные понятия, применяемые в сейсморазведке для описания анизотропии упругих свойств горных пород. Приведен авторский обзор классов анизотропных сред и их практической значимости. Даны определения параметров анизотропии

Томсена ¹ для поперечно-изотропных сред с вертикальной и горизонтальной осью симметрии.

Раздел 1.3 содержит обзор геологических причин анизотропии упругих свойств горных пород. Среди факторов, влияющих на азимутальную анизотропию, фигурирует трещиноватость – параметр, который напрямую связан с проницаемостью горных пород и влияет на эффективность разработки месторождений углеводородов. Поэтому влияние трещин на упругие свойства подробно рассматривается в следующих разделах.

Раздел 1.4 касается методов изучения анизотропии. Кратко описаны возможности керновых исследований, методов ГИС и ВСП. Среди сейсмических методов рассмотрены кинематический (VVAz) и динамический (AVOAz) методы анализа азимутальной анизотропии. Аномалии азимутальных AVO-атрибутов зачастую интерпретируются как области повышенной трещиноватости. Для их верификации сопоставляют результаты сейсмических методов с независимыми данными о трещиноватости.

В *разделе 1.5* описан характер влияния анизотропии на амплитуды сейсмической записи. Основной акцент сделан на уравнении Рюгера ²:

$$R_{PP}(\phi, \theta) = A_{iso} + (B_{iso} + B_{ani} \cos^2(\phi - \phi_{sym})) \sin^2 \theta + \left(C_{iso} + \frac{1}{2} (\Delta \varepsilon^{(v)} \sin^2(\phi - \phi_{sym}) + \Delta \delta^{(v)} \cos^2(\phi - \phi_{sym})) \sin^2(\phi - \phi_{sym}) \right) \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \theta, \quad (1)$$

Необходимо отметить, что уравнение Рюгера (1) является линеаризацией зависимости $R_{PP}(\phi, \theta)$ относительно скачков параметров анизотропии на границе сред, основанной на определенных предположениях, которые в реальных условиях выполняются не всегда. Этот вопрос лежит за рамками данного исследования и рассматривается во множестве научных публикаций.

В *разделе 1.6* перечислены основные методы азимутального анализа амплитуд. Рассмотрены азимутальный AVO-анализ с использованием уравнения Рюгера (1) и азимутальных коэффициентов Фурье, а также азимутальная AVA инверсия (AVOAz-инверсия).

В настоящей работе азимутальной AVA инверсии уделено значительное внимание, поэтому детально рассмотрены теоретические

¹ Thomsen L. Weak elastic anisotropy / L. Thomsen // Geophysics – 1986. – Т. 51 – № 10 – С. 1954–1966.

² Rüger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media / A. Rüger // Geophysics – 1998. – Т. 63 – № 3 – С. 935–947

предпосылки ее выполнения, в соответствии с работой ³. В основе метода лежит утверждение, что при расчете зависимости амплитуд отраженной волны от угла падения и азимута $R_{pp}(\varphi, \theta)$ можно пользоваться не уравнением Рюгера (1), а уравнением Аки-Ричардса для изотропного случая. Но для этого необходимо, чтобы упругие свойства изменялись в зависимости от азимута наблюдения и азимута и интенсивности анизотропии по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} Z_S(\varphi) &= Z_{S0} \cdot \left(\gamma_r \sqrt{\delta_r^{(v)}} \right)^{-\cos^2(\varphi - \varphi_0)} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r^{(v)}}{\delta_r^{(v)}} \right)^{\frac{1-4K}{8K} \cos^4(\varphi - \varphi_0)}, \\ \rho(\varphi) &= \rho_0 \cdot \left(\delta_r^{(v)} \right)^{-\cos^2(\varphi - \varphi_0)} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r^{(v)}}{\delta_r^{(v)}} \right)^{-\cos^4(\varphi - \varphi_0)}, \\ Z_P(\varphi) &= \rho_0 \cdot V_{P0}. \end{aligned} \quad (2)$$

На основе этих формул также предлагается проводить решение обратной задачи. Азимутальная инверсия сводится к серии независимых «изотропных» синхронных инверсий для данных с различными азимутами отражения. Затем по зависимостям $Z_S(\varphi)$, $\rho(\varphi)$, полученным в результате серии инверсий в «изотропной» постановке, производится восстановление упругих модулей и параметров Томсена. В тексте диссертации приведено подробное описание последовательности расчета, продемонстрированы определяющие системы уравнений.

Раздел 1.7 включает обзор методов исследования трещиноватости с помощью сейсморазведки. Также в этом разделе освещены подходы к моделированию сейсмического отклика от системы трещин. *Раздел 1.8* содержит краткое изложение основных соотношений, следующих из теории линейного проскальзывания⁴ и модели Хадсона⁵. Рассмотрены методы расчета коэффициентов анизотропии эффективной среды на основе параметров трещин.

³ Mesdag P. Quantitative inversion of azimuthal anisotropy parameters from isotropic techniques / P. Mesdag, L. Quevedo // The Leading Edge – 2017. – Т. 36 – № 11 – С. 916–923.

⁴ Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces / M. Schoenberg // Journal of the Acoustical Society of America – 1980. – Т. 68 – № 5 – С. 1516–1521.

⁵ Hudson J.A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks / J. A. Hudson // Geophys. J. R. Astron. Soc. – 1981. – Т. 64 – № 1 – С. 133–150.

Глава 2. Моделирование влияния трещин на атрибуты сейсмической записи на примере верхнефранского карбонатного коллектора в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции

В главе 2 рассматривается прямая задача расчета сейсмического отклика от трещиноватого пласта. Поводом для постановки такой задачи стало влияние трещиноватости на дебиты нефти в одной из скважин Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции и, вследствие этого, намерение исследовать геометрию трещиноватой зоны по сейсмическим данным. Для этого необходимо было изучить, как трещиноватость (зарегистрированная методами ГИС) влияет на упругие свойства пород и сейсмическую волновую картину.

Для анализа степени трещиноватости целевых отложений были использованы данные пластового электрического микроимиджера (FMI) и кросс-дипольного акустического каротажа. Этот комплекс данных позволяет выполнить дальнейшие расчеты в рамках петроупругих моделей трещиноватых сред.

В *разделе 2.1* приведены основные шаги петроупругого моделирования в рамках моделей Хадсона и Шёнберга, обоснованы предположения. Последовательность анализа данных аналогична представленной в работе ⁶.

Для параметризации трещин можно пользоваться безразмерными величинами ослабленности породы δ_T и δ_N , введенными в работе ⁷. Связать эти параметры со свойствами реальных трещин (трещинной пористостью, плотностью трещин, их аспектным отношением, флюидонаполнением) позволяет теория Хадсона. При определенных предположениях о свойствах трещин, эффективная среда относится к классу горизонтально-поперечно-изотропных (HTI).

Анизотропия скоростей S-волн, регистрируемая кросс-дипольным акустическим каротажем, соответствует параметру ослабленности δ_T . Благодаря модели Хадсона и некоторым дополнительным предположениям о строении системы трещин, удастся определить все элементы матрицы упругости, отделить влияние трещин от модулей исходной породы, а также получить некоторые дополнительные сведения, такие как аспектное отношение трещин (отношение длины к раскрытости).

⁶ Downton J. P-wave AVAz Modeling: A Haynesville case study / J. Downton // GeoConvention. – 2014. – С. 1–7.

⁷ Hsu C.-J. Elastic waves through a simulated fractured medium / C.-J. Hsu, M. Schoenberg // Geophysics – 1993. – Т. 58 – № 7 – С. 964.

Вначале были определены упругие модули исходной породы, не нарушенной трещинами. Установлено, что изменения V_p из-за влияния трещин в среднем составляют 100 м/с (около 1,7%), а V_s – 350 м/с (около 10%). Затем было рассмотрено 8 различных сценарных моделей, каждая из которых характеризуется своим значением параметра ζ (плотность трещин), от 0 (отсутствие трещиноватости) до 0,084 (наибольшая плотность трещин, зарегистрированная в скважине). Показано, что по мере увеличения плотности трещин ζ , параметры Томсена относительно вертикали возрастают по абсолютной величине от 0 до приблизительно -0,1.

Чтобы проанализировать влияние трещин на амплитуды отраженных волн, для каждой из 8 моделей была рассчитана синтетическая угловая сейсмограмма в рамках сверточной модели сейсмотрассы. В *разделе 2.2* рассматривается случай узкоазимутальных данных, т.е. исследуются только «изотропные» AVO-атрибуты синтетических данных, не учитывающие зависимость амплитуд от азимута. По мере увеличения эффективной плотности трещин для отражения от кровли исследуемого пласта отмечаются незначительное уменьшение интерсепта и увеличение градиента. Однако, предположительно, направленная трещиноватость должна более явно проявиться в значениях азимутальных AVO-атрибутов.

В *разделе 2.3* рассматривается такая ситуация (лишь на уровне моделирования, т.к. реальные сейсмические данные на этой площади не пригодны для азимутального динамического анализа). Синтетические данные были рассчитаны сверточным методом с использованием уравнения Рюгера (1).

По синтетическим сейсмограммам были рассчитаны азимутальные AVO-атрибуты. Зависимости основных AVOAz-атрибутов от плотности трещин приведены на Рисунке 1 зелеными линиями. В отсутствии помех они совпадают с исходными данными, заложенными в модель. Однако важно также то, насколько устойчивы к помехам эти атрибуты и можно ли их уверенно использовать на практике.

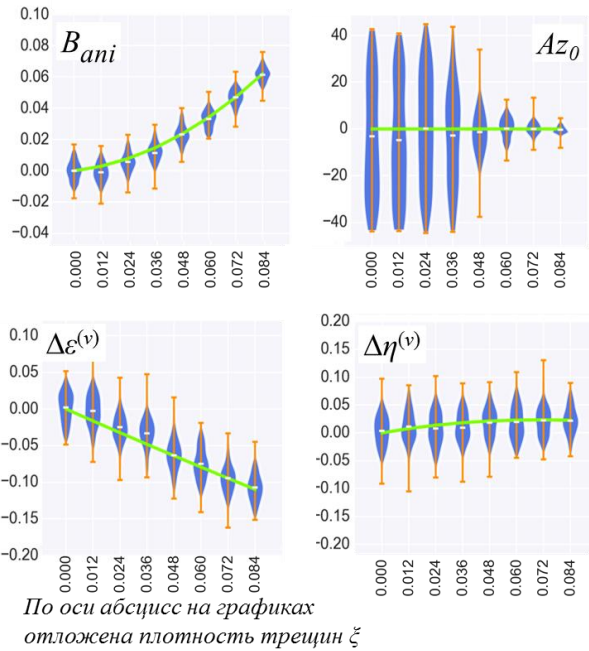


Рисунок 1. Скрипичная диаграмма, отражающая зависимости основных AVOAz-атрибутов от плотности трещин для уровня шума 10%

Для оценки корректности полученных зависимостей в синтетические данные искусственно введен аддитивный случайный шум (по 100 реализаций помех амплитудой от 5% до 40 %), после чего расчёт атрибутов выполнен повторно по зашумленным данным. Плотность распределения значений AVOAz-атрибутов на основе 100 реализаций зашумленных данных приведена на Рисунке 1 синим цветом, а оранжевые линии показывают разброс между минимальным и максимальным значениями.

В разделе 2.4 по итогам расчетов сделаны выводы, что для рассматриваемой модели наиболее чувствительны к плотности трещин анизотропный градиент B_{ani} и скачок параметра Томсена $\Delta\epsilon^{(v)}$. Атрибуты, основанные на эффекте AVO (интерсепт A, градиент B, кривизна C), не столь явно реагируют на изменение плотности трещин. Параметр $\Delta\eta^{(v)}$ наименее стабилен и уже при уровне шума в 10% полностью теряет информативность. Азимут анизотропии определяется тем устойчивее, чем больше плотность трещин.

Основные выводы этого раздела отражены в работах ^{8, 9}. Сформулированы критерии качества сейсмических данных (требуемый уровень соотношения «сигнал/помеха», удаление «источник-приемник»), соответствие которым необходимо для исследования трещиноватости по AVOAz-атрибутам в данных сейсмогеологических условиях.

В *разделе 2.5* показано, как исследуемая модель трещиноватого пласта может быть адаптирована для расчета эффективных упругих параметров с помощью системы прочностного анализа методом конечных элементов ¹⁰. Этот метод позволяет, при необходимости, учитывать более сложные и неоднородные модели. Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных значений упругих свойств, полученных для модели эллипсоидальных трещин.

В развитие темы более детального изучения сложных трещиноватых систем, *раздел 2.6* посвящен сеточно-характеристическому моделированию полного волнового поля на неструктурированной сетке. Автором работы была проведена адаптация параметров исследуемой системы трещин для того, чтобы включить в модель локальные неоднородности с параметрами, отражающими реальное распределение трещин в пласте ¹¹. Целью расчетов было показать, что рассматриваемый объект может быть исследован также вне аппроксимаций теории эффективных сред.

Для построенной упрощенной модели трещиноватого пласта было выполнено решение прямой задачи. Были синтезированы двумерные волновые поля для P- и SV-волн, падающих на заданную систему трещин. Примеры результирующих волновых полей отражают

⁸ Гриневский А.С. Моделирование и анализ сейсмического отклика от трещиноватого коллектора с помощью теории эффективных сред и азимутальных AVO-атрибутов / А. С. Гриневский // Технологии сейсморазведки – 2017 – Т. 4 – С. 37–50.

⁹ Grinevskiy A. Azimuthal AVO Modeling for Fractured Zones Identification – a Feasibility Case Study / A. Grinevskiy // Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences - Time for Breakthrough – 2018. – С.1–5.

¹⁰ Levin V.A. Numerical analysis of effective mechanical properties of rubber-cord composites under finite strains / V. A. Levin, K. M. Zingerman, A. V. Vershinin, M. Y. Yakovlev // Compos. Struct. – 2015. – Т. 131 – С. 25–36.

¹¹ Favorskaya A. Numerical simulation of fracturing in geological medium / A. Favorskaya, I. Petrov, A. Grinevskiy // Procedia Computer Science – 2017. – Т. 112 – С. 1216–1224.

сложный интерференционный характер волновой картины, содержащей как зеркальную, так и рассеянную составляющие волнового поля. Это подтверждает, что рассмотренный подход к моделированию отражает характер трещиноватости в распределении амплитуд.

Подобные расчеты в дальнейшем могут быть применены для независимого контроля результатов, полученных с использованием теории эффективных сред. Обобщение алгоритма на трехмерный объем позволит установить их зависимость от азимута. Кроме того, этот метод позволяет моделировать и дифрагированные волны, потенциально являющиеся индикатором трещиноватости.

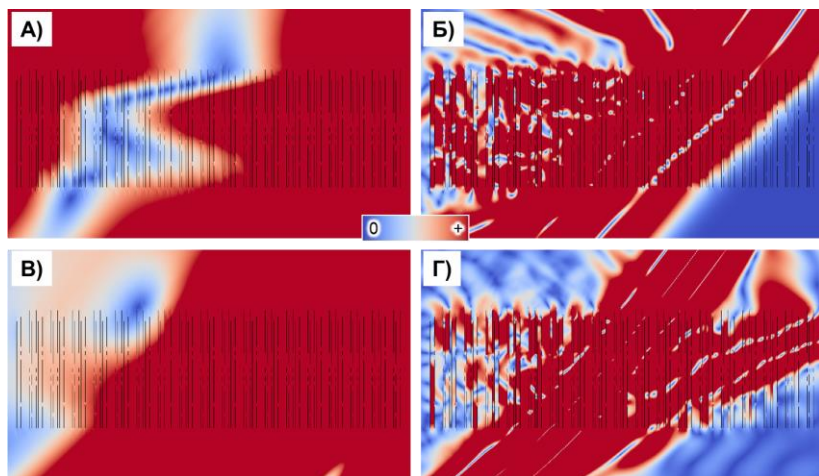


Рисунок 2. Отклик Р-волн (А, Б) и S-волн (В, Г) от системы трещин для различных частот зондирующего импульса: 120 Гц (А, В), 1200 Гц (Б, Г).

Таким образом, с помощью материалов, изложенных в главе 2, доказано **защищаемое положение № 1**.

Глава 3. Изучение анизотропии горных пород по сейсмическим данным методом азимутальной AVA инверсии

В разделах этой главы рассмотрены методические аспекты азимутальной инверсии и особенности её применения на практике. Для этого вначале метод детально рассмотрен на модельных данных: исследовано влияние случайных помех и неполноты входных данных на результат, а также предложен способ регуляризации данных и подавления случайных помех для стабилизации решения. Затем

рассмотрено применение азимутальной AVA инверсии на примере реальных 3D сейсмических данных с двух месторождений. Расчет инверсий по азимутам выполнялся с использованием коммерческого программного продукта, а для анализа зависимостей полученных упругих свойств от азимута автором был создан и применен ряд компьютерных программ.

В *разделе 3.1* перечислены и прокомментированы методические особенности азимутальной AVA инверсии, требования к сейсмическим данным, нюансы интерпретации. Рассматриваемый метод подразумевает, что инверсия данных выполняется независимо для данных, зарегистрированных под различными азимутами «источник-приемник». По этой причине результат может стать недостоверным из-за помех или отсутствия части данных. Чтобы минимизировать недостатки такого подхода, в работе ¹² предложен подход к регуляризации данных перед инверсией на основе уравнения Рюгера (рассмотрен в *разделе 3.2*). Рекомендуется перед расчетом азимутальной инверсии вначале рассчитать азимутальные AVO-атрибуты, а затем на основе этих атрибутов создать набор синтетических сейсмотрасс для произвольного набора угла падения и азимута (эти данные будут регулярными и лишенными помех). Таким образом, амплитуды перед инверсией приводятся к формуле Рюгера, и это связывает между собой формально независимые инверсии по разным азимутам.

В *разделе 3.3* при помощи модельного примера демонстрируется состоятельность авторских алгоритмов, а также доказывается положительное влияние представленного способа стабилизации решения на результат. На Рисунке 3, А приведен результат азимутальной AVA инверсии по данным без помех, и он практически полностью совпадает с исходной моделью. Помехи и отсутствие данных на трассах ближних углов падения значительно искажают результат инверсии (Б), но благодаря предложенному в работе алгоритму стабилизации удастся повысить достоверность восстановления параметров анизотропии по итогам инверсии (В). Таким образом, алгоритм азимутальной инверсии действительно позволяет восстанавливать анизотропию упругих свойств горных

¹² Гриневский А.С. Методические особенности азимутальной AVA инверсии на примере месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / А. С. Гриневский, Д. Е. Мирошниченко, И. Н. Керусов, Н. В. Шалаева // Геофизика – 2019. – № 4 – С. 22 – 29

пород, а предложенный способ стабилизации решения делает результат более достоверным в присутствии нерегулярных помех.

Раздел 3.4 посвящен приближенной оценке параметров анизотропии при инверсии трасс близких углов падения. Показано, что зависимость сдвигового импеданса от азимута наблюдения может быть представлена в виде синусоидальной функции с амплитудой $K_{\text{ani}}^{Zs} \approx 0,51\delta^{(v)} - 1,25\gamma^{(v)}$, имеющей смысл коэффициента анизотропии сдвигового импеданса, как показано в работе¹³.

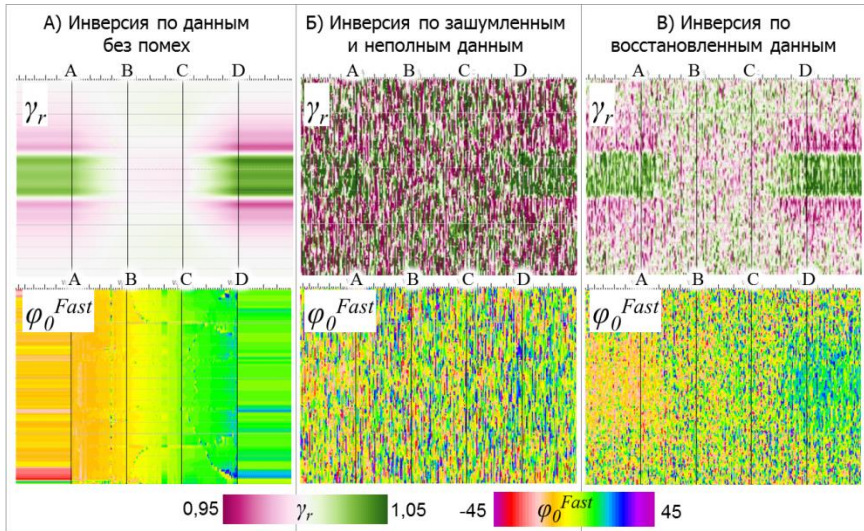


Рисунок 3. Примеры расчёта азимутальной AVA инверсии по синтетическим данным без помех (А), неполным данным с помехами (Б) и восстановленным данным (В).

В разделе 3.5 описывается использование азимутальной AVA инверсии для прогноза трещиноватости по широкоазимутальным данным на одном из месторождений Западной Сибири. В наличии имелись данные микросейсмического мониторинга (МСМ) ГРП, выполненного в двух скважинах. Поскольку ГРП был выполнен после проведения сейсмической съемки 3D, предполагалось обнаружить в сейсмических атрибутах, в том числе, по результатам азимутальной

¹³ Гриневский А.С. Особенности применения азимутальной AVA инверсии для анализа сейсмической анизотропии / А. С. Гриневский, Д. Е. Мирошниченко // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии- 2017»: Полипресс, 2017 – 209–212с.

AVA инверсии, области наиболее вероятного развития естественных трещин. Сами же данные МСМ ГРП, таким образом, служат для независимой верификации прогнозов.

Особенностью исходных данных в данном примере было значительное искажение амплитуд трасс ближних углов падения и нерегулярное распределение трасс в подборках общего азимута и угла падения. Поэтому был применен рассмотренный в разделе 3.2 способ подготовки данных. Затем по «восстановленным» данным был рассчитан набор упругих инверсий (независимо для каждого азимута), а затем результаты этих инверсий были использованы для анализа анизотропии. Сопоставление анизотропных параметров показало, что γ_r и $\varepsilon_r^{(v)}$ определяются независимо, а $\delta_r^{(v)}$ существенно коррелируется с γ_r , видимо, из-за недостатков в исходных данных.

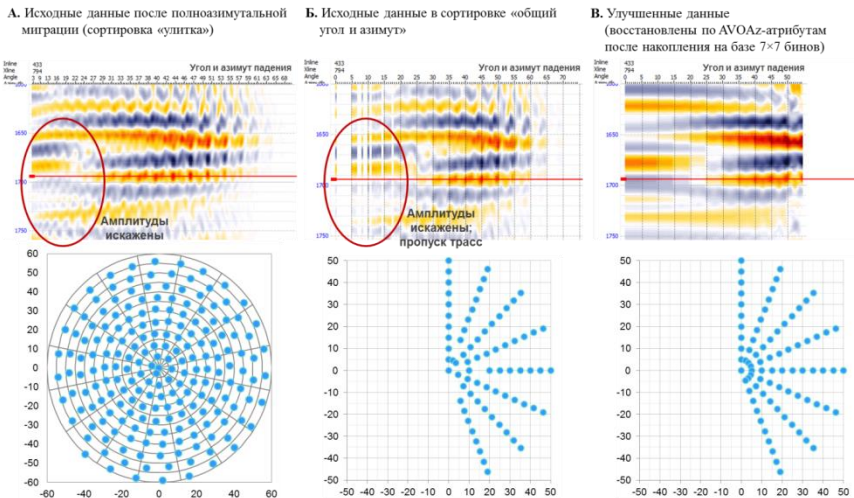


Рисунок 4. Пример подготовки данных к азимутальной инверсии. Показаны фрагменты сейсмограмм и распределение сеймотрасс по углам и азимутам. А – сейсмограммы после миграции, Б – после группировки по общему углу и азимуту, В – восстановленные данные.

МСМ ГРП проводился в 2 горизонтальных скважинах, и амплитуды микросейсмических событий были сопоставлены с инвертированными параметрами анизотропии. В данном случае было установлено отсутствие устойчивой статистической связи между ними. Можно сделать вывод, что, по-видимому, для прогноза таких многофакторных процессов, как развитие трещин при гидроразрыве пласта, анизотропные свойства пород являются вторичным фактором.

В разделе 3.6 рассмотрена азимутальная AVA инверсия данных на одной из площадей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Целевым объектом на данной площади являются карбонатные отложения верхнего отдела девонской системы. Направленная трещиноватость в низкопористых карбонатных породах может иметь определяющее влияние на проницаемость и, следовательно, перспективность отложений. Таким образом, зоны повышенной азимутальной анизотропии необходимо учитывать при планировании разведки и разработки месторождения. Этот факт послужил обоснованием для выполнения азимутальной инверсии. Параметры анизотропии рассчитывались по сейсмограммам ОГТ, полученным в результате азимутальной глубинной миграции до суммирования. Номинальная кратность данных 3D равнялась 100, коэффициент азимутальности составил 0,66. Для расчета и анализа азимутальных атрибутов эти значения ниже упоминаемых в литературе минимальных требований для количественных оценок. Поэтому предложенная в данной работе стабилизация алгоритма азимутальной инверсии становится особенно актуальной. В данном примере AVOAz-инверсия была выполнена как по нерегулярным данным, так и по «восстановленным». Это позволяет сравнить результаты расчетов и показать преимущества авторского алгоритма подготовки данных к AVOAz инверсии.

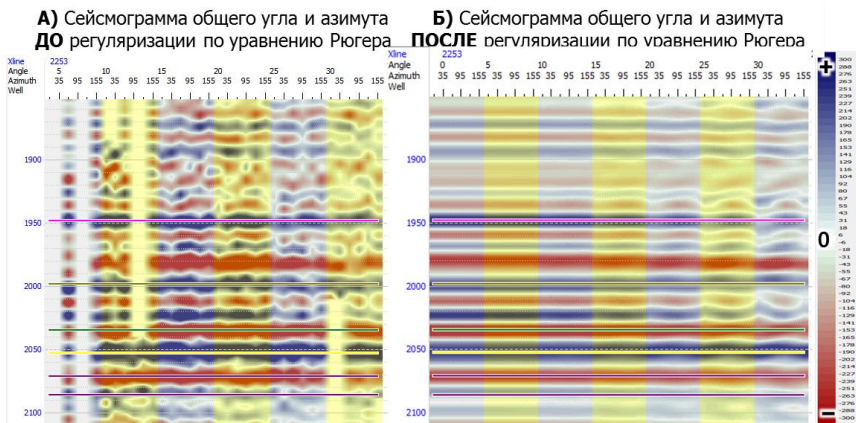


Рисунок 5. Регуляризация амплитуд с использованием уравнения Рюгера перед азимутальной инверсией

Для анализа анизотропных свойств была применена схема, описанная в разделе 3.4: в процессе инверсии плотность не

рассчитывалась, а главным результатом азимутальной инверсии служили коэффициент анизотропии сдвигового импеданса K_{ani} и азимут плоскости изотропии Az_0 . В итоге инверсии было получено по 6 пар кубов продольного и сдвигового импеданса для исходных и регуляризованных данных.

На Рисунке 6 приведено сопоставление результатов расчета азимутальной инверсии со стабилизацией и без нее. Отличия наиболее явно проявляются в области, отмеченной черным овалом. На фрагменте А) наблюдаются аномалии повышенных значений анизотропного градиента, приуроченные как к кровле, так и к подошве пласта. Азимутальная инверсия, выполненная по исходным данным без стабилизации, не позволяет обнаружить анизотропию в рассматриваемой области (фрагмент Б). Благодаря стабилизации, удастся повысить качество исходных данных и адаптировать их под алгоритм азимутальной инверсии, что подтверждается фрагментом В). Действительно, максимумы коэффициента анизотропии расположены в пределах рассматриваемого пласта, и соответствуют наблюдаемым аномалиям амплитуд.

Таким образом, предлагаемый метод стабилизации азимутальной AVA инверсии позволяет повысить устойчивость оценки параметров анизотропии горных пород по сейсмическим амплитудам и адаптировать эту процедуру к нерегулярным данным.

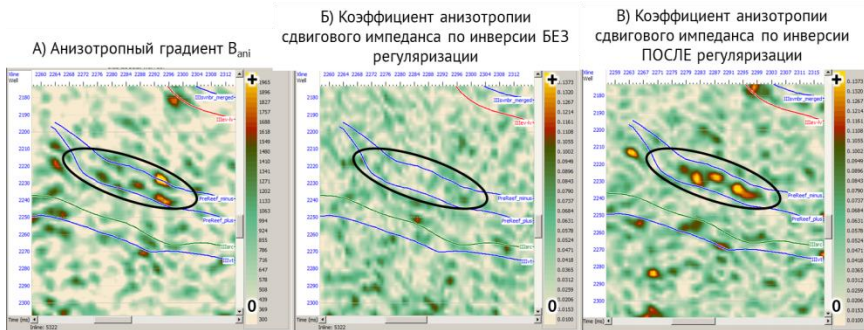


Рисунок 6. Влияние стабилизации на результат азимутальной инверсии

Срезы коэффициента анизотропии отображают информацию о зонах развития направленной трещиноватости, особенно в сочетании с атрибутами когерентности и структурными особенностями геометрии горизонтов. Так, коэффициент анизотропии для отложений сирачойского горизонта верхнего девона характеризуется повышенными значениями в зонах перегиба, связанных с развитием органогенных построек (Рисунок 7).

Благодаря выполненным расчетам, доказан факт наличия азимутальной анизотропии (НТИ) в целевых отложениях. Выделенная анизотропия, по-видимому, связана с трещиноватостью карбонатных отложений, но это лишь предположение и оно требует дополнительных подтверждений скважинными данными.

Таким образом, с помощью материалов, изложенных в главе 3, доказаны **защищаемые положения № 2 и № 3.**

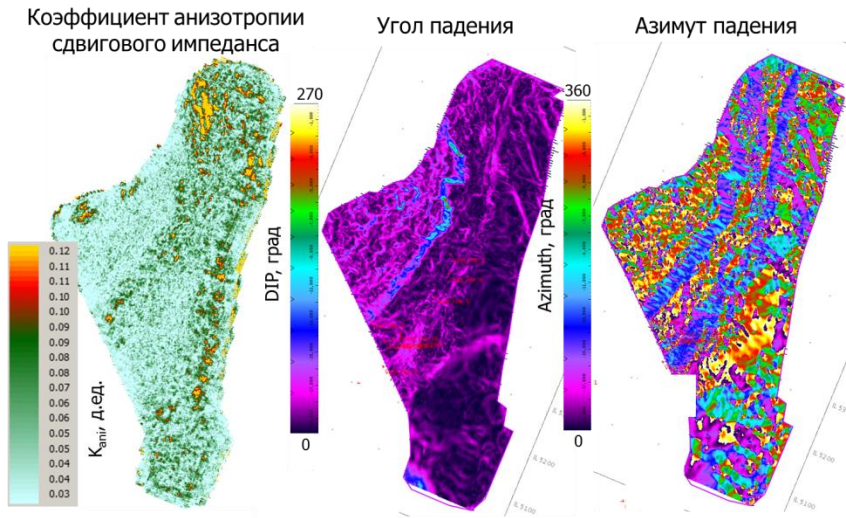


Рисунок 7. Сопоставление атрибута азимутальной AVA инверсии K_{ani} с геометрическими характеристиками ОГ IIIsrc.

Заключение

Представленное диссертационное исследование состоит из трех смысловых частей, объединенных общей темой. Первая часть относится, главным образом, к прямой задаче сейсморазведки: по известным геометрическим свойствам системы трещин и анизотропии упругих свойств на уровне ГИС было проведено моделирование сейсмических данных. Для этого был успешно решен набор исследовательских задач с применением различных подходов и инструментов на основе реальных данных измерений в скважине.

Во-первых, на основе теории эффективных сред была построена модель исследуемого интервала разреза как анизотропного пласта. Во-вторых, для различных сценариев трещиноватости смоделированы сейсмограммы и оценены возможности динамического анализа для восстановления параметров модели в присутствии случайного шума. В

работе обоснован допустимый диапазон уровня нерегулярных помех для успешного исследования данной системы трещин методом азимутального AVO-анализа. В-третьих, имеющиеся скважинные данные о трещиноватости были адаптированы к включению в двумерную модель для расчета волнового поля сеточно-характеристическим методом. Таким образом, на примере конкретной системы трещин в карбонатном коллекторе рассмотрены и успешно применены различные подходы к ее изучению сейсмическими методами. Примененная методика с включением авторских программ показала свою результативность для анализа связи между данными ГИС, моделями эффективных анизотропных сред, атрибутами сейсмических волновых полей и требованиями к качеству данных, в результате применения к реальным материалам в конкретном регионе.

Вторая смысловая часть диссертации посвящена усовершенствованию методики азимутальной AVA инверсии как обратной задачи сейсморазведки. В работе реализован и применен алгоритм расчета относительных параметров анизотропии из серии инверсий по набору азимутов. Предложен способ повышения устойчивости решения и регуляризации данных на основе уравнения Рюгера. Помимо этого, проведены исследования, направленные на стабилизацию алгоритма азимутальной AVA инверсии, борьбу с помехами, использование зависимости инвертированного сдвигового импеданса от азимута при работе с малыми углами падения.

Третья часть диссертации касается применения первых двух в практике сейсморазведки на реальных данных для реальных задач. Рассмотренные методы моделирования упругих свойств и волнового поля, а также расчета азимутальной инверсии требовали адаптации и модификации для их использования на практике. Это касается как методических аспектов (таких, как борьба с помехами, предположения о величине неизвестных констант, порядок выполнения расчетов, сопоставление результатов с независимыми данными других методов), так и технических деталей.

По итогам исследования опробованы и усовершенствованы различные подходы к решению прямых и обратных задач сейсморазведки для горизонтально-поперечно-изотропных и трещиноватых сред. В ходе работы создан пакет компьютерных программ и алгоритмов по моделированию упругих свойств и анализу сейсмических данных в анизотропных средах. Все проведенные исследования вошли в состав производственных отчетов и внесли вклад в планы по геологоразведке и разработке на этих месторождениях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Гриневский А.С.** Моделирование и анализ сейсмического отклика от трещиноватого коллектора с помощью теории эффективных сред и азимутальных AVO-атрибутов / А. С. Гриневский // Технологии сейсморазведки – 2017 – Т. 4 – С. 37–50. (0,88 п.л.). Импакт-фактор РИНЦ 2017: 0,351.

2. Favorskaya A. Numerical simulation of fracturing in geological medium / A. Favorskaya, I. Petrov, **A. Grinevskiy** // Procedia Computer Science – 2017. – Vol. 112 – p. 1216–1224. (0,56 п.л., авторский вклад – 25%). Импакт-фактор SJR: 0,258.

3. **Гриневский А.С.** Методические особенности азимутальной AVA инверсии на примере месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / А. С. Гриневский, Д. Е. Мирошниченко, И. Н. Керусов, Н. В. Шалаева // Геофизика – 2019. – № 4 – С. 22 – 29. (0,5 п.л., авторский вклад – 70%). Импакт-фактор РИНЦ 2018: 0,353.

Иные научные публикации

1. **Гриневский А. С.** Азимутальная упругая AVA инверсия сейсмического волнового поля на примере одного из месторождений Западной Сибири / А.С. Гриневский, Д.Е. Мирошниченко, И.Н. Керусов и др. // Сейсмические технологии 2016: науч. практ. конференция – 2016. – С. 233–236 (0,25 п.л., авторский вклад – 50%)

2. **Гриневский А. С.** Особенности применения азимутальной AVA инверсии для анализа сейсмической анизотропии / А. С. Гриневский, Д. Е. Мирошниченко // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2017»: ООО «Издательство Полипресс» – 2017. – С. 209–212. (0,25 п.л., авторский вклад – 50%)

3. **Grinevskiy A.** Azimuthal AVO Modeling for Fractured Zones Identification – a Feasibility Case Study / A. Grinevskiy // Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences – Time for Breakthrough – 2018. – С.1–5. (0,31 п.л.)

4. **Гриневский А. С.** Моделирование AVOAz-атрибутов на примере данных о трещиноватости в карбонатных отложениях / А.С.Гриневский // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». – ПолиПРЕСС Тверь, 2018. — С. 273–277 (0,31 п.л.)