

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Емельянова Ксения Львовна

**ТЕХНОЛОГИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СЛОЖНЫХ
СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ
ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

1.6.9 – Геофизика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель *Степанов Павел Юрьевич, кандидат физико-математических наук*

Официальные оппоненты *Гозоненков Георгий Николаевич, доктор технических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», Советник генерального директора*

Данько Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа НИУ имени И.М. Губкина», Кафедра разведочной геофизики и компьютерных систем, заместитель заведующего кафедрой, доцент

Смирнов Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физический факультет, Отделение геофизики, Кафедра физики Земли, Заведующий кафедрой

Защита диссертации состоится 30 мая 2023 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, геологический факультет, ауд 415.

E-mail: dmsu0403@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.6/2489>.

Автореферат разослан «__» апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Разведка нефтегазовых месторождений в каждом регионе сопровождается уникальной методикой, учитывающей особенности геологического строения разреза. Условия Восточной Сибири славятся неоднородностями ВЧР, которые на большинстве участков региона не позволяют получать данные удовлетворительного качества. Поиск перспективных нефтегазовых объектов для развития геологоразведочных работ (ГРР) в осложненных зонах Восточной Сибири при этом становится невозможным.

Развитие технологий и методик позволяет по-новому взглянуть на цикл сейсморазведочных работ в изучаемом регионе. Предлагаемые в работе технологии позволяют эффективно компенсировать неоднородности ВЧР и снизить их влияние на нижележащие горизонты, открывая возможности для получения сейсмических данных удовлетворительного качества, пригодных для дальнейшей интерпретации.

Степень разработанности

На сегодняшний день технологии кинематической обработки обладают высокой степенью изученности, однако исследования в области компенсации аномалий ВЧР в Восточной Сибири имеют не такое широкое распространение.

В настоящей работе рассматривается ряд методик компенсации ВЧР в условиях различной сложности. Особенности технологии FWI описаны в работах Коробкина В.С., Гадьлышина К.Г., Чеверды В.А., Твердохлебова Д.Н.¹, методика SWI (SWAMI) изучена менее детально, однако также упоминается в публикациях указанных выше авторов².

В числе авторов основополагающих работ в области изучения комплексного учета несейсмических методов геофизики следует отметить особый вклад Хмелевского В.К., Шевнина В.А., Шелохова И.А., Буддо И.В., а применительно к условиям Восточной Сибири: Мостового Д.В., Лыгина И.В., Твердохлебова Д.Н., Молчанова А.Б.^{3,4}

1. Гадьлышин К.Г., Чеверда В.А., Твердохлебов Д.Н. Восстановление ВЧР в сложных сейсмогеологических условиях Восточной Сибири на основе обращенного волнового поля с учетом топографии // ГеоЕвразия-2021. Том 1. С. 71–74.

2. Korobkin V, Burlakov A., Kudryavtsev K., Tverdokhlebov D. Application of SWI and FWI for Building Near-surface Velocity Model and Improving Seismic Image Quality // Saint Petersburg. Innovations in Geosciences — Time for Breakthrough. 2018.

Упоминания технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов встречаются в литературе у Козырева В.С., Короткова И.П., Жукова А.П., однако, вопроса применении технологии в Восточной Сибири касались только Милашин В.А. и Геништа А.Н.⁵ Стоит отметить, что ни в одном литературном источнике не упоминались особенности методологии: работа алгоритма, предпосылки для эффективного применения технологии, а также ограничения, накладываемые на исходные данные.

На текущий момент интерес представляет совместное использование указанных технологий с целью снижения влияния аномалий ВЧР, корректного расчета статических и кинематических поправок, а также общего повышения качества данных сейсморазведки при поиске месторождений нефти и газа в сложных условиях Восточной Сибири.

В работе также рассматриваются стандартные технологии компенсации аномалий ВЧР (рефракторная и томографическая на преломленных волнах), но, в первую очередь, для сравнительного анализа с результатами предлагаемых современных подходов.

Из других методов построения модели ВЧР и последующей корректировки данных статическими поправками можно отметить: томографию по отраженным волнам, применение информации о верхнем отражающем горизонте с восстановлением строения зоны малых скоростей (ЗМС) и ММП, метод параметрического продолжения волнового поля, динамический аналог вертикального годографа ВСП, пересчет кинематических параметров волнового поля и пр. Многие из методик были рассмотрены рядом авторов на территории Западной Сибири, но адаптация их на Восточную Сибирь не может быть эффективной в силу более сложного геологического строения ВЧР, а также более высокого соотношения сигнал/шум.

3. Шелохов И.А., Буддо И.В., Смирнов А.С. Подход к восстановлению скоростных характеристик верхней части разреза на основе данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. №2. 2018. С. 58–68

4. Молчанов А.Б., Лыгин И.В., Твердохлебов Д.Н., Мостовой Д.В. Комплексирование геофизических методов для 2D и 3D данных в ПО "Tomplex". Саратов // Приборы и системы разведочной геофизики. №3. 2021. С. 43–52

5. Геништа А.Н., Кириллов А.С., Косовцев В.И., Лаврик А.С. Искажающее влияние неоднородностей ВЧР на сейсмическое изображение геологической среды // Приборы и системы разведочной геофизики. 2014. №1. С. 15–19

Целью работы явилась разработка оптимальной методики компенсации неоднородностей ВЧР, не позволяющих уверенно проследивать целевые горизонты на сейсмических разрезах, а также определение условий применимости предлагаемой методики для данных, полученных в Восточной Сибири.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Определить наиболее эффективные методики компенсации неоднородностей ВЧР, применяемые при обработке сейсмических данных в условиях Восточной Сибири.

2. Адаптировать технологию коррекции остаточных кинематических сдвигов для компенсации аномалий в условиях Восточной Сибири.

3. Построить сейсмогеологические модели, имитирующие сложные условия Восточной Сибири, для опробования предлагаемой технологии.

4. Выявить условия применимости технологии (тип исходных данных, методические особенности, тип и характеристики образующих скоростные аномалии объектов) по результатам тестирования предлагаемого комплекса методов на модельных и реальных данных.

5. Оценить эффективность предложенной технологии по результатам проведения сравнительного анализа результатов обработки стандартным и оптимальным графами.

Объектом исследования настоящей работы является ВЧР как наиболее неоднородная часть геологического разреза, оказывающая сильное влияние на целевые горизонты в сейсмическом разрезе.

Предметом исследования являются аномалии ВЧР, компенсация которых необходима для восстановления отражающих горизонтов не только в верхней части сейсмического разреза, но и в зоне продуктивных горизонтов. Возможность компенсации аномалий ВЧР в осложненных регионах Восточной Сибири напрямую влияет на качество обработанных данных, а значит, и на потенциал лицензионного участка при составлении дальнейшей программы геологоразведочных работ.

Научная новизна работы

1. Впервые даны четкие методические рекомендации к выбору технологии построения моделей ВЧР при обработке сейсмических данных в условиях Восточной Сибири в зависимости от искажающих факторов в ВЧР.

2. Предложена технология коррекции остаточных кинематических сдвигов, наиболее приспособленная к сложным сейсмогеологическим условиям Восточной Сибири.

3. Разработан оптимальный граф обработки сейсмических данных, который, благодаря предложенным автором рекомендациям по вводу статических поправок за неоднородности верхней части разреза и технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов, позволяет существенно повысить качество корреляции целевых границ при значительных неоднородностях верхней части разреза.

Теоретическая и практическая значимость

Благодаря предлагаемой технологии открываются возможности для поиска месторождений нефти и газа на наиболее сложных участках Восточной Сибири (а таких участков порядка 50%, и они не менее перспективны, чем участки в более простых зонах). Участки в сложных зонах зачастую обладают меньшей аукционной стоимостью, т.к. пользуются меньшим спросом, их приобретение при эффективной разработке представляет ощутимую выгоду для компаний.

Предлагаемая технология уже применяется в производстве компанией ООО «РН-Эксплорейшн». Планирование нового цикла геологоразведочных работ выполняется с учетом последующей эффективной реализации предлагаемого комплекса методов.

Методология и методы исследования

В ходе работы автор использовал материалы компании ООО «РН-Эксплорейшн»: архивные и современные данные сейсморазведки 2D и 3D, данные ГИС и ВСП, данные несейсмических методов геофизики.

Материалы обрабатывались и анализировались с использованием специального ПО:

- построение сейсмогеологической модели, моделирование синтетических сейсмограмм – Tesserat Pro;
- обработка сейсмических данных – Paradigm Echos, пикировка первых вступлений, построение модели ВЧР, расчет статических поправок – Flatirons, GeoTOMO; визуализация финальных сейсмических разрезов, построение карт атрибутов – Petrel;
- комплексирование геофизических методов, коррекция модели ВЧР, расчет статических поправок – Tomplex (внутренняя разработка ООО «РН-Эксплорейшн»);

- контроль качества исходных/финальных сейсмограмм и суммарных разрезов – QCVision (внутренняя разработка ООО «РН-Эксплорейшн»).

Защищаемые положения

1. Предложенный расчет статических поправок на основе выбора алгоритма построения модели ВЧР в зависимости от особенностей ее строения является корректным и адаптированным к условиям Восточной Сибири.

2. Методика коррекции остаточных кинематических сдвигов позволяет скомпенсировать средне- и длиннопериодные скоростные аномалии ВЧР, учет и компенсацию которых невозможно выполнить на этапе ввода статических поправок.

3. Представленная в диссертации технология обработки сейсмических данных позволяет повысить качество сейсмических данных в области целевых отражений в условиях Восточной Сибири, осложненных неоднородностями ВЧР, в сравнении с результатами традиционной обработки

Степень достоверности. Апробация

Достоверность результатов демонстрируется на примере модельных и реальных данных. Полученные результаты не противоречат имеющейся априорной информации. В результате применения указанного комплекса методик были обнаружены перспективные объекты, на основании которых проектировалось бурение поисково-разведочных скважин (раздел 3.2.2).

Основные положения диссертационного исследования докладывались автором на международных конференциях:

1. «Технология восстановления верхней части разреза при помощи коррекции статических и кинематических поправок на основе сейсмогеологического моделирования в условиях Восточной Сибири», ГеоЕвразия – 2021, Емельянова К.Л., Арутюнянц И.В., Твердохлебов Д.Н.
2. «Восстановление скоростной модели ВЧР на основе сейсмогеологического моделирования в условиях Восточной Сибири», ГеоЕвразия – 2022, Емельянова К.Л., Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В., Степанов П.Ю.

Также указанные положения были представлены на внутренних конференциях ПАО «НК «Роснефть», работы ежегодно занимали призовые места с высокой оценкой эффективности предлагаемого комплекса методик.

1. «Эффективность применения сейсмогеологического моделирования для повышения надежности обработки

- сейсмических данных 2D в условиях Восточной Сибири», региональный, кустовой и межрегиональный этапы научно-технических конференций ПАО «НК «Роснефть», 2020г.
2. «Качественная обработка сейсмике – залог прироста ресурсной базы», региональный и кустовой этапы научно-технических конференций ПАО «НК «Роснефть», 2021г.
 3. «Как моделирование может повысить качество обработки сейсморазведки?», региональный, кустовой и межрегиональный этапы научно-технических конференций ПАО «НК «Роснефть», 2022г.

Личный вклад

Автор самостоятельно выполнял все этапы работ, рассмотренные в предыдущем разделе (от построения сейсмогеологических моделей до контроля качества сейсмических данных включительно). Модели по технологии FWI и SWI были построены совместно с коллегами из ИНГГ СО РАН и СЖЖ. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад соискателя состоит в построении сейсмогеологических моделей, тестировании процедур обработки, отработке метода коррекции остаточных кинематических сдвигов, а также в подготовке общего текста публикаций к выходу в научных журналах. В публикациях, где соискатель представлен первым автором, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Автор выражает благодарность коллективу компании ООО «РН-Эксплорейшн» и своему научному руководителю за экспертное мнение и консультации по вопросам моделирования, обработки и интерпретации полученных данных.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 научных статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, а также 4 публикации вышли в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение, список сокращений и список литературы из 105 наименований, состоит из 126 страниц текста, 87 иллюстраций, 4 таблицы и 17 формул.

Благодарности

Автор искренне благодарен своему научному руководителю Степанову П.Ю. за поддержку и доверие на каждом этапе научной работы.

Автор выражает огромную благодарность коллективам компаний ООО «РН-Эксплорейшн» и ООО «Энерджи Ресерч»: Твердохлебову Д.Н. за направление в развитии в области геофизики; Арутюнянцу И.В. за невероятный вклад в формирование ключевых навыков обработки, работы с сейсмическими данными, экспертное сопровождение всех этапов обработки и научной деятельности; Мостовому Д.В. и Лыгину И.В. за экспертное сопровождение всех этапов работы с несейсмическими методами и формирование знаний в этой области; Гайдуку А.В. за вдохновение и мотивацию на всех этапах научной работы в аспирантуре.

Необходимо отметить основополагающий вклад преподавательского состава отделения геофизики МГУ им. М.В. Ломоносова в развитие автора как специалиста в области сейсморазведки и геофизики в целом, за структурированную программу обучения в бакалавриате, магистратуре и аспирантуре, за невероятно познавательные учебные практики.

Отдельную благодарность автор выражает родителям, братьям и друзьям за поддержку, веру в достижение цели и мотивацию на всех этапах работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении изложены актуальность работы, степень разработанности, цели и задачи диссертационного исследования, указаны объект и предмет исследований, практическая значимость и научная новизна, методология и методы исследования, степень достоверности, личный вклад, информация о научных публикациях, а также сформированы основные защищаемые положения.

Глава 1. Сейсмогеологические условия Восточной Сибири^{6,7}

В главе 1 приведены общие сведения о геологии рассматриваемого района.

Раздел 1.1 первой главы поделен на 4 подраздела и содержит в себе информацию о физико-геологическом описании района, литолого-стратиграфических характеристиках разреза, продуктивных

6. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Воробьев В.Н. Непско-Ботуобинская антеклизы – новая перспективная область добычи нефти и газа на Востоке СССР // Наука. Новосибирск. 1986. 245 с.

7. Гайдук А.В., Митюков А.В., Филичев А.В., Петров А.Н., Мордвинцев М.А. Выявление перспективных и высокопродуктивных залежей УВ в древнем венд-раннекембрийском осадочном чехле Непско-Ботуобинской антеклизы на основании интерпретации современных геофизических данных // ГеоБайкал-2016. Иркутск

горизонтах, тектоническом строении, интрузивном магматизме и вулканизме.

Подраздел 1.1.2. включает описание геологического разреза Непско-Ботуобинской антеклизы который состоит из складчатого основания архейско-раннепротерозойского возраста и осадочного чехла, в основном состоящего из отложений венда и кембрия. Описываются характеристики каждой свиты, включая наличие нефтегазоносных горизонтов, известняков, ангидритов, солей и доломитов. Приводится подробное описание состава отложений каждой системы и их мощностей.

Подраздел 1.1.3 описывает тектоническое строение региона начиная с Вендского периода, результатом которого стало формирование мощных отложений на территории Непско-Ботуобинской антеклизы. Девонский период привел к образованию платформенных коренных горизонтов, а каменноугольный период - к рифтовым впадинам с отложениями каменноугольных и пермских систем. В триасовый период формировались рифтовые впадины с терригенными отложениями. История формирования чехла связана с рифтогенезом и интенсивным осадконакоплением в различные периоды геологической истории. Восточная часть Сибирской платформы продолжала осадконакопление до позднего девона, затем произошли деформации сжатия и формирование Патомского орогена. Дальнейшие деформации привели к размыву, выраженному в юрском несогласии.

Подраздел 1.1.4 посвящен интрузивному магматизму и вулканизму, описывая наличие трапповых интрузий и покровных вулканических слоев на территории, которые могут повлиять на результаты сейсморазведочных работ. Некоторые участки интрузий связаны с зонами расслоения и карстования, в результате чего покровные осадочные слои могут так же оказывать значительное влияние на качество получаемых данных. Также описывается наличие покровных эффузивных и эффузивно-осадочных слоев, которые являются помехой при проведении СРР.

Раздел 1.2 посвящен своду необходимой геофизической информации о регионе.

В подразделе 1.2.1. представлено описание сейсмогеологических характеристик среды на изучаемой территории, используя результаты интерпретации данных ВСП. В тексте приведены значения пластовых скоростей продольных волн для различных отложений на примере свит, представленных в разрезе. Также в разделе приведена карта районирования, на которой представлено разделение фрагмента восточной части Сибирской платформы на зоны согласно сложности

сейсмогеологических условий

В зонах III и IV классов преобладает наибольшее количество осложняющих факторов (рисунок 1), в результате влияния которых качество сейсмических данных заметно снижается, не позволяя выполнять надежную интерпретацию данных такого типа.

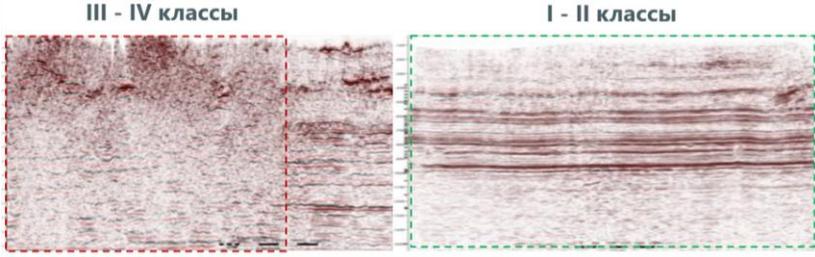


Рисунок 1. Пример качества сейсмических данных в зависимости от класса районирования⁸.

В подразделе 1.2.2. приведена априорная геофизическая информация по данным магниторазведки, гравиразведки и электроразведки, применение которой с целью повышения качества сейсмических данных будет описано в 3 главе.

В подразделе 1.2.3. описаны признаки перспективных объектов на сейсмических данных в пределах рассматриваемого региона. Выступы фундамента представляют собой ограниченные по размерам зоны, которые могут иметь повышенные ФЭС. Для появления такого выступа должна формироваться структура на уровне фундамента и вышележащих горизонтов. При идентификации объектов изучению подвергается кровля фундамента и ботуобинский горизонт. Выступы делятся на две категории: "лысый выступ" и "нелысый выступ". Выступы могут быть выявлены в плане как по карте изохрон, так и в атрибутном поле. Органогенные рифовые постройки на сейсмических данных имеют характерные признаки, такие как структуры типа облегания, ухудшение корреляции отражающих горизонтов и воздымание отражающих горизонтов.

Глава 2. Теоретические основы коррекции аномалий ВЧР

Во 2ой главе рассмотрены теоретические основы и особенности ввода статических поправок по рассчитанным моделям ВЧР, а также основы технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов для

8. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., Емельянова К.Л., Мельников Р.С. Построение модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества данных сейсморазведки // Геофизика. № 2. 2021. С. 27–37. RSCI. (0,68 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,43

дополнительной компенсации искажений, вызванных аномалиями в ВЧР.

Раздел 2.1 посвящен описанию влияния неоднородностей ВЧР на данные сейсморазведки. Короткопериодные аномалии могут приводить к искажениям скоростей суммирования и времен горизонтов на сейсмических разрезах. Среднепериодные аномалии могут ухудшать результаты процедур обработки, в то время как длиннопериодные компоненты не сказываются на качестве суммирования в процессе обработки, однако недоучет длиннопериодной составляющей может оказать влияние на геометрию крупных структур в разрезе. Также в разделе описываются различия в протяженности зон влияния аномалий и временных сдвигов на разрезах по ближним и дальним каналам.

В разделе 2.2 описаны теоретические основы всех опробованных в работе методик моделирования ВЧР с целью расчета априорных статических поправок. Результаты расчета поправок рассмотренными методиками на реальных данных приводятся в следующей главе.

В подразделе 2.2.1. представлены теоретические основы построения рефракторной модели. Для ее построения необходимо прослеживание первых вступлений на каждой сейсмограмме ОПВ, чтобы получить информацию о скоростях и глубинах залегания слоев в ВЧР. По полученным данным рассчитываются интервальная и эффективная скорости, а также глубинно-скоростная модель верхней части разреза. Контроль качества корреляции первых вступлений выполняется с помощью визуальной оценки, уточнения корреляции и получения гистограммы распределения ошибки пиков первых вступлений. Полученная глубинно-скоростная модель используется для расчета априорных статических поправок. Общая статическая поправка вводится в трассу как сумма поправок за ПП и ПВ для данной трассы.

В подразделе 2.2.2. описан процесс построения скоростной модели с помощью лучевой сейсмической томографии. Для этого необходимы входные данные – пикировки волн в первых вступлениях, а также стартовая модель для запуска итеративного расчета. Алгоритм решает задачу лучевой сейсмотомографии и определяет скоростные характеристики модели. Процесс расчета включает задание стартовой модели, расчет невязки, корректировку модели и запуск следующей итерации. Контроль качества выполняется по мониторингу невязки, промежуточных результатов и изменений в модели. Цикл корректировки модели прерывается при достижении заданного количества итераций или заданной невязки.

Подраздел 2.2.3 посвящен основам FWI – это метод обработки и интерпретации сейсмического сигнала, позволяющий получить высокоточный, многопараметрический разрез среды с разрешением до половины длины волны. Методика основана на минимизации различия между рассчитанным и зарегистрированным сейсмическим полем и является перспективным направлением развития геофизики. FWI использует рефрагированные волны и требует наличия мощных вычислительных центров для реализации. Для построения скоростной модели с помощью обратной задачи сейсмической инверсии используется многоитеративный процесс уточнения модели на различных частотах. Входными данными являются сейсмограммы ОПР после шумоподавления и стартовая скоростная модель. На каждой итерации выполняется конечно-разностное моделирование сейсмического поля. Оценка практических результатов показывает, что технология позволяет работать с инверсией в скоростной модели. Расчеты и тестирования выполнялись при помощи мощностей компаний СЖЖ-Восток и ИНГГ СО РАН.

Особенности методики SWI (SWAMI) представлены в подразделе 2.2.4. Эта технология использует поверхностные волны, которые несут информацию о скоростном строении земной коры на разных глубинах. Поверхностные волны, в основном волны Рэлея, образуются в результате взаимодействия S- и P-волн, и они имеют разные частоты и длины волн. Измеряя скорость волн с разными частотами, можно реконструировать глубинный профиль структуры земной коры. Однако, использование больших длин волн ограничивает разрешение итоговой модели, и поверхностные волны не дают четких изображений глубинных горизонтов, а скорее дают информацию о свойствах объема в данной области в заданном диапазоне глубин. Для измерения скоростей поверхностных волн необходимо проводить узкополосную фильтрацию сигналов и отслеживать максимумы или минимумы трасс. Групповая скорость определяется по времени прихода максимума огибающей отфильтрованного сигнала, а фазовая скорость – по разности фаз сигнала на двух приемниках. Алгоритм SWI для построения скоростных моделей поверхностных волн включает предварительную обработку данных, построение спектров в FK-области, автоматическую пикировку дисперсионных кривых, инверсию с получением скоростной модели S-волн и переход от S- к P-волнам. Максимальная глубина полученной модели составляет около 150 м, что достаточно для построения модели ВЧР. Полученные модели с хорошей точностью могут использоваться как основа для расчета априорных статических поправок.

Подраздел 2.2.5 содержит информацию о построении скоростной модели при помощи комплексирования геофизических методов. Для построения наиболее приближенной к реальности модели ВЧР при работе в особо сложных условиях не всегда достаточно данных сейсморазведки, и необходимо использовать различные методы геофизики с пониманием теоретических связей между ними. Особое внимание уделяется установлению корреляционных связей между данными разных методов, а также проверке выраженности аномалий в различных полях и разрезах. Эффективность проявления магматических тел в потенциальных полях и разрезах УЭС зависит от их размера, глубины залегания и степени аномальности физических свойств. Каждый участок исследования имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при выполнении комплексирования. Технология применения комплексирования для уточнения модели ВЧР состоит из следующих этапов: анализ качества сейсмических данных; построение модели ВЧР по данным сейсморазведки с локализацией неоднородностей по имеющимся исходным данным; анализ чувствительности несейсмических методов к неоднородностям в ВЧР; построение глубинно-скоростной модели с учетом имеющейся информации (первичный анализ основывается на данных магниторазведки, в которых наиболее явно выделяются магматические образования, по результатам анализа выполняется оконтуривание аномальных тел и подбор скоростей по данным потенциальных методов, далее результат уточняется по данным электроразведки, т.е. по зонам повышенного сопротивления); для контроля качества полученной модели рассчитываются модельные поля и сопоставляются с реальными данными, в случае несовпадения выполняется корректировка параметров аномальных тел в ВЧР. По результатам различных тестирований были составлены следующие таблицы: свойства интрузивных тел и вмещающих пород для условий Восточной Сибири, требования к данным геофизических методов, определение элементов интрузивного тела по данным геофизических методов.

В разделе 2.3 описаны теоретические основы технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов. В некоторых случаях статические и кинематические поправки не могут компенсировать аномалии в вертикальных скоростях, что приводит к негиперболичности годографа. Для улучшения корреляции отражений и компенсации ложных подтяжек горизонтов необходимо полное спрямление годографов ОГТ. Представленный в разделе метод позволяет доучесть средне- и длиннопериодные аномалии и повысить

вероятность обнаружения перспективных объектов в зоне поиска^{9,10}. На рисунке 2 показано теоретическое положение горизонтальных спектров в левой части. При ровном положении границы (рис. 2-а) спектр скорости также выглядит ровным. При наличии аномалий скорости или искривления границы спектр искажается в зависимости от времени пробега луча в + или в – сторону (рис. 2-б, 2-в). При наличии неоднородности в ВЧР в зоне под аномалией будут наблюдаться искажения геометрии границ (рис. 2-г), однако, в силу особенностей методики сейсмической съемки корреляция в ВЧР может быть нарушена (рис. 2-д), как следствие – весьма проблематично установить причину, вызвавшую искривления: это аномалия в ВЧР подтягивает горизонты ниже или таково естественное положение границ. По этой причине для грамотного применения описанной технологии необходимо удостовериться, что аномалии на сейсмическом разрезе вызваны высокоскоростными объектами в ВЧР, для этого необходимо учитывать особенности строения изучаемого региона, а также заручиться экспертным мнением интерпретаторов.

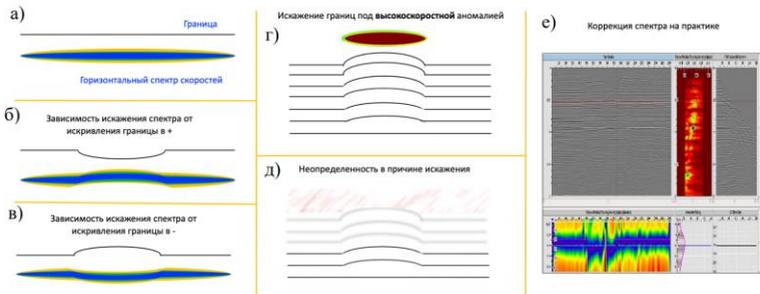


Рисунок 2. Теоретические положения горизонтальных спектров в зависимости от различных искажающих

Работа алгоритма реализуется следующим образом: выбор горизонта для расчета горизонтального спектра, расчет спектра, выбор аномальных зон для последующей корректировки, расчет подвижек в обозначенных зонах (для получения оптимального результата

9. Емельянова К.Л., Арутюнянц И.В., Твердохлебов Д.Н., Степанов П.Ю. Особенности кинематической обработки сейсмических данных в условиях Восточной Сибири // Геофизика. №3. 2022. С.23–31. RSCI (0,61 п.л., авторский вклад 60%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,43

10. Емельянова К.Л., Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В., Мостовой Д.В., Степанов П.Ю. Оптимальный подход к учету статических и кинематических поправок при обработке сейсмических данных в сложных сейсмогеологических условиях Восточной Сибири // Приборы и системы разведочной геофизики. №4 (71). 2021. С. 33–40. RSCI. (0,5 п.л., авторский вклад 65%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,083

необходимо вводить подвижки в несколько итераций с разной процентной долей), распределение полученных поправок на ПП и ПВ по сейсмограммам, суммирование по ОГТ и подбор оптимальных значений скоростей, удовлетворяющих разрезу после корректировок. Далее снова выполняется полный цикл от прослеживания горизонта до корректировки скоростей, количество итераций зависит от сложности сейсмогеологических условий и скорости спрямления годографов ОГТ. Оптимальный результат применения технологии – полная компенсация аномалий на временном сейсмическом разрезе.

Предпосылки к применению методики: негиперболические годографы, «подтяжки» горизонтов, явный недоучет статики, наличие заниженных интервальных скоростей в зоне под аномалией.

Факторы, учет которых, необходим для успешного применения технологии: наличие надежного прослеживания горизонта, по которому выполняется расчет спектра, расположение горизонта выше аномальной зоны, отсутствие инверсий скоростей в разрезе и серьезных искажающих факторов, таких как серия надвигов.

Глава 3. Применение технологии кинематической обработки к реальным сейсмическим данным.

Раздел 3.1 содержит описание опробованных методик, теоретические основы которых были приведены во 2 главе. Подраздел 3.1.1. описывает построение скоростных моделей ВЧР для расчета априорных статических поправок. Для начала приводятся результаты применения стандартных методик (*рефракторной и томографической*). Первая модель, полученная при помощи сейсмической томографии, обладает значительно большей детальностью, более широким диапазоном скоростей, однако имеет краевые эффекты. Разрез в результате расчета статики по томографии обладает заметно лучшей корреляцией отражающих горизонтов, однако в «слепых зонах» методика не дала прироста информации (рисунок 3). Во втором примере при расчете томографической модели была задана вероятность инверсии скоростей. Как результат – были обнаружены более четко локализованные аномалии, однако поправки в зонах непосредственного проявления аномалий не привели к приросту полезной информации. Важным выводом как по результатам проведенных экспериментов в работе, так и по многолетнему опыту работы в регионе Восточной Сибири является то, что результатом опробования рефракторной и томографической модели с целью восстановления отражений является восстановление горизонтов только в зонах, где есть достаточно сейсмической информации

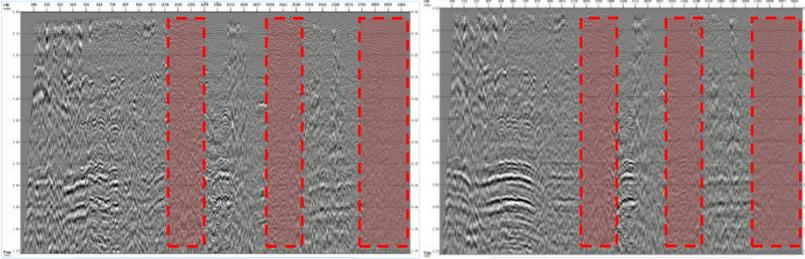


Рисунок 3. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по рефракторной (слева) и томографической (справа) моделям.

Далее будет описано несколько нестандартных методик построения модели ВЧР, которые будут сравниваться с результатами, полученными по стандартной методике сейсмической томографии.

Тестирование технологии *FWI* выполнялось на примере 3Д данных. По результатам опробования в различных условиях рассматриваемого региона эффективность *FWI* для компенсации аномалий ВЧР выше, чем у сейсмической томографии, однако, оногомого прироста информации все же не происходит (рисунок 4). Также необходимо отметить существенную трудоемкость и ресурсоемкость при расчете модели по *FWI* в сравнении со стандартными методиками.

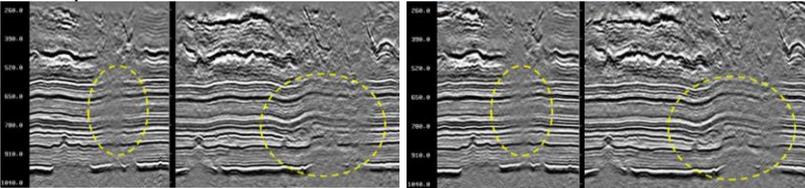


Рисунок 4. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по томографическим (слева) и *FWI* (справа) моделям

Далее в разделе рассматривается результат тестирования методики *SWI* для построения скоростной моделей на основе использования поверхностных волн. Результаты тестирования показали эффективность методики в зонах с более прослеживаемыми горизонтами и в случае инверсии скоростей в разрезе, однако снова существенного прироста информации не произошло.

Анализ результатов, полученных на одинаковых профилях в результате применения технологий *FWI* и *SWI* с целью компенсации аномалий ВЧР показал, что модель по *FWI* имеет большую глубинность

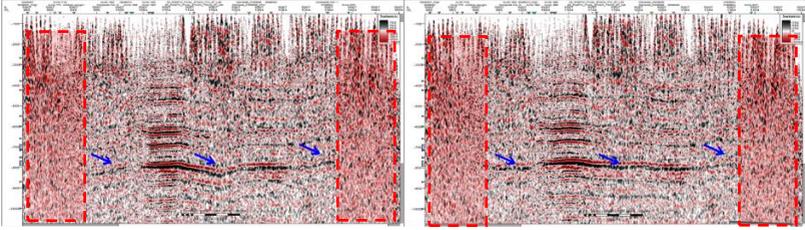


Рисунок 5. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по томографической (слева) и SWI (справа) моделям.

по сравнению с SWI, однако обе модели показали наличие инверсии скоростей в разрезе. Модель SWI выглядит более подробной, но присутствуют «негеологические» латеральные объекты. Суммарные разрезы, полученные с учетом априорной статистики указанными методами, показали, что поправки по модели SWI значительно хуже компенсируют скоростные и статические аномалии, а результат с применением FWI позволяет проследить и восстановить геометрию крутонаклонных границ. При необходимости выбора между этими двумя технологиями рекомендуется отдавать предпочтение FWI, но при отсутствии возможности проводить трудоемкие и ресурсоемкие тестирования рекомендуется обращаться к технологии SWI.

Далее в разделе приводятся результаты применения комплексного анализа геолого-геофизической информации. Для сужения неопределенности решения обратной задачи необходимо привлекать больше информации, включая данные магнито-, грави- и электроразведки. Технология выполнения комплексирования включает анализ корреляционных связей, оконтуривание аномальных объектов и подбор скоростной модели с учетом аномалий потенциальных методов и данных электроразведки. Контролем качества полученной модели является сопоставление результатов решения прямой и обратной задачи, а также оценка спрямленности отражений на сейсмическом разрезе. В целевом интервале на рисунке 6, подсвеченном пунктиром, заметно улучшается корреляция и прослеживаемость отражений, однако, далеко не на всех примерах в результате тестирования технологии был получен такой существенный прирост информации. В работе также приводятся значительно менее оптимистичные результаты экспериментов, в результате которых прироста информации на разрезе с применением комплексирования вовсе не произошло. Рассмотренная технология, однозначно, является весьма перспективной, однако требует определенной доработки для получения более устойчивого результата. Также важно отметить, что

комплексирование геофизических методов рекомендуется к применению только при наличии определенной точности априорной геофизической информации (см. раздел 2.2.5).

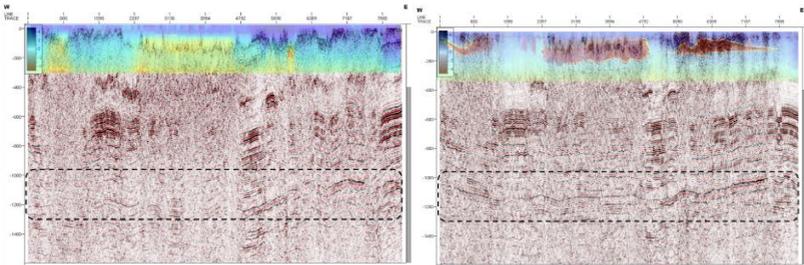


Рисунок 6. Сейсмические разрезы по результатам ввода априорных статических поправок, рассчитанных по сейсмотомографии (слева) и по результатам комплексирования (справа).

Подраздел 3.1.2. описывает опробование технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов на различных модельных данных, в результате которых были определены границы применимости методики.

Модель №1 построена с включением скоростных аномалий (надвиговая структура, соляные подушки, трапп), а также перспективных объектов (рифовые постройки и выступы фундамента). Сейсмический разрез показывает четкое выделение перспективных объектов в зонах без аномалий, однако, в зоне под надвигом возникает "соскок" оси синфазности. Как результат – корреляция отражающего горизонта нарушается, не позволяя выполнять его прослеживание для последующего корректного расчёта горизонтально спектра. В таких условиях проставленная технология не применима.

В модель №2 были заложены интрузивные объекты таким образом, чтобы симитировать наиболее сложные условия в ВЧР. В данном случае не удалось выполнить компенсацию аномалий в достаточной степени для восстановления непрерывности отражающих горизонтов, реализация технологии коррекции кинематических сдвигов не представляется возможной в таких сложных условиях.

В модель №3 были заложены интервалы развития многолетнемерзлых пород и зоны растепления. На сейсмическом разрезе в этой же зоне выделяется поднятие горизонтов, а на сейсмограммах отмечается характерное искривление годографа отраженных волн, что говорит о возможности коррекции сейсмического разреза методом остаточных кинематических сдвигов. Однако на практике реализовать методику не представилось возможным,

поскольку наличие протяженного слоя ММП в ВЧР существенно искажает скоростной закон, добавляя побочный максимум, который перетягивает далее по разрезу максимумы спектра.

В модель №4 были заложены как перспективные объекты, так и осложняющие факторы: пластовая интрузия и сложная надвиговая структура. Наличие непрерывного горизонта позволяет опробовать применение технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов. Визуальный анализ сейсмограмм с введенной кинематикой позволяет определить ключевые зоны, требующие корректировки по наличию несимметричных, искаженных и недоспрямленных годографов ОГТ. В результате многоитеративного применения технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов (9 итераций), был получен сейсмический разрез высокого качества (рисунок 7). Корреляция в зоне под выбранным для расчета поправок горизонтом улучшилась, скомпенсировались амплитудные среднепериодные аномалии, все заложенные в модель структуры «отрисовываются» на разрезе.

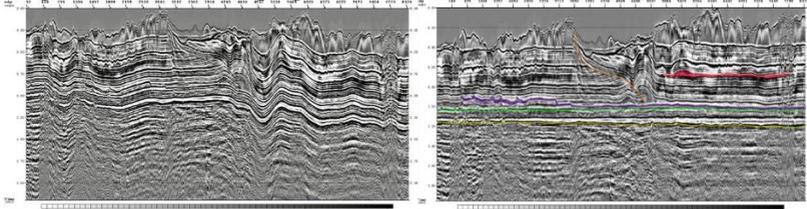


Рисунок 7. Синтетический сейсмический разрез, полученный до (слева) и после (справа) коррекции остаточных кинематических сдвигов по модели №4.

По итогам тестирования технологии на примере различных модельных и реальных данных были сделаны ключевые выводы, обозначающие зону применимости предлагаемой технологии. Наличие следующих факторов позволяет предположить высокую вероятность успешного ее применения:

- Искаженные, несимметричные, негиперболические годографы.
- Недоучет среднепериодных аномалий.
- Наличие «подтяжек» горизонтов, необоснованных геологическими причинами.
- Явный недоучет статики после применения оптимального комплекса методик.
- Наличие заниженных интервальных скоростей в зоне под аномалией.

Факторы, учет которых необходим для эффективной работы методики:

- Наличие надёжного прослеживания горизонта, по которому выполняется расчет горизонтального спектра и последующие корректировки. Горизонт должен располагаться над аномальной зоной целевого интервала, поскольку коррекция такой методикой позволяет вводить поправки только в горизонты, расположенные ниже.
- Отсутствие инверсии скоростей (в т.ч. мерзлоты) в разрезе.
- Серьезные искажения скоростной модели ВЧР, создающие сильные аномалии, которые методика не сможет скомпенсировать (например, серия надвигов).

Раздел 3.2 содержит описание результатов, полученных на примере реальных данных с применением полного цикла обработки по предлагаемому графу (рисунок 8) с включением описанных процедур статической и кинематической коррекции компенсации влияния ВЧР. В предлагаемом графе блоки кинематической и сигнальной обработки зациклены, поскольку после каждого этапа шумоподавления прослеживаемость горизонтов растет, что позволяет получить прирост информации от нового цикла остаточной статики и кинематики, а в силу особенностей настройки алгоритмов шумоподавления и балансировки амплитуд необходимо наличие точно выбранной кинематики.

- Ввод данных и создание базы данных;
- Контроль качества присвоения геометрии;
- Редакция шумящих трасс и исправление обратной полярности;
- Коррекция амплитуд за сферическое расхождение.
- **Расчет априорных статических поправок по скоростной модели ВЧР**
- Предварительный мьютинг;
- Скоростной анализ;
- Расчет остаточных статических поправок;
- **Коррекция остаточных кинематических сдвигов;**
- Получение и оценка контрольных сумм.
- Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд;
- Подавление амплитудных волн-помех;
- Подавление когерентных волн-помех;
- Поверхностно-согласованная дековолюция;
- Миграция;
- Обработка мигрированных временных разрезов.



Рисунок 8. Оптимальная последовательность процедур обработки сейсмических данных в осложненных условиях Восточной Сибири

Подраздел 3.2.1. описывает полный цикл обработки профиля с подробным описанием всех процедур от ввода полевых данных до постобработки суммарных разрезов. Для демонстрации эффективности предлагаемого графа обработки, ключевыми элементами которого для условий Восточной Сибири являются: выбор оптимальной модели ВЧР

и коррекция остаточных кинематических сдвигов, проводилось сравнение полученного результата с результатом стандартной обработки. Стандартная обработка выполнялась с применением тех же процедур и параметров за исключением коррекции остаточных кинематических сдвигов. Модель ВЧР для расчета априорных статических поправок в рамках стандартной методики была выбрана томографическая, а для более оптимальной обработки – комплексная (рисунок 9). По результатам обработки с использованием предлагаемого графа заметно улучшается корреляция отражений в целевом интервале, компенсируются среднепериодные аномалии, появляется возможность для непрерывной уверенной корреляции отражающих горизонтов. Вероятность обнаружения перспективных объектов повышается

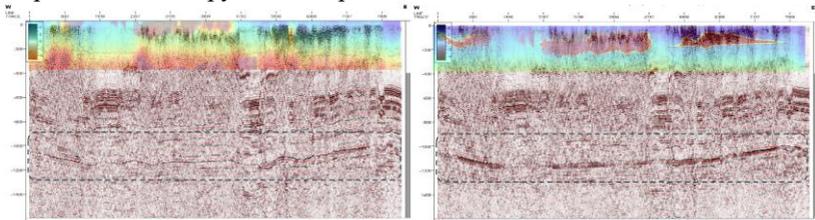


Рисунок 9. Сравнение результатов, полученных стандартной обработкой (слева) и обработкой, согласно предлагаемому графу (справа)

В подразделе 3.2.2. представлены примеры результатов, полученных с применением описанного подхода. В примере №1 рассмотрен 3Д проект, в рамках которого была успешно применена кинематическая коррекция в весьма непростых условиях – ВЧР осложнена надвиговой структурой. После многоитеративной коррекции удалось не только восстановить отражения, но и обнаружить перспективный объект (органогенную постройку) в зоне прямо под надвиговой структурой. В завершении проекта была пробурена скважина, подтвердившая нефтеносность обнаруженного объекта.

В примере №2 по результатам переобработки большого объема данных 3Д в зоне на стыке I и III классов, согласно предлагаемой оптимальной технологии, удалось значительно повысить качество данных. По результатам обработки согласно предложенной методике в центральной зоне значительно улучшилась прослеживаемость отражающих горизонтов. По результатам анализа карт когерентности в одном из интервалов по результатам неоптимальной обработки площадь зоны низкого качества составляла 590 км², однако после применения оптимального графа суммарная площадь таких зон уменьшилась более чем на 60% и составила 230 км².

В примере №3 по результатам переобработки с применением оптимального графа (в т.ч. благодаря коррекции остаточных кинематических сдвигов) удалось восстановить перспективные структуры в осложненной зоне – органогенные рифовые постройки. Предположительно, в ВЧР над перспективными объектами расположена надвиговая структура. Прирост ресурсной базы по одиночным рифовым постройкам составил 1.3 млн.т. нефти.

Пример №4 демонстрирует результаты переобработки предлагаемой методикой одного из участков, расположенного в зоне II класса сложности. Удалось значительно улучшить точность построение разломных нарушений за счет улучшения прослеживаемости горизонтов и повышения корреляции.

По результатам переобработки в примере №5 еще одного участка, расположенного во II зоне, удалось улучшить корреляцию отражений как в ВЧР, так и в целевом интервале. Перспективные объекты картируются более надежно и могут быть рекомендованы как целевые объекты для постановки скважины поисково-разведочного бурения. Обработка данных с применением оптимального комплекса методик включала построение модели по технологии FWI.

Пример 6 иллюстрирует последствия недоучета аномалии в результате обработки неоптимальным графом в зоне III-го класса сложности. По результатам архивной обработки был получен сейсмический разрез с неплохой корреляцией отражений на первый взгляд, однако, в процедуре обработки была применена автоматическая процедура TRIM-статика, благодаря которой был получен хороший результат в весьма непростых условиях. По результатам анализа архивных сейсмических разрезов была спроектирована и пробурена скважина в 2015г. в структурную ловушку, однако скважина оказалась «сухой», без признаков прогнозируемого притока нефти. Причиной такого результата стал недоучет среднепериодной аномалии и применение процедуры (не являющейся поверхностно-согласованной), которая искусственным образом дорисовала сейсмический разрез: улучшилась корреляция, протяженность и динамическая выраженность горизонтов. Структура, предполагавшаяся как перспективная, оказалась подтяжкой горизонтов из-за нескомпенсированной высокоскоростной интрузии долеритов в ВЧР, а разница между проектной и фактической глубиной опорного горизонта в этой точке составила 100м. Грамотная обработка позволила бы скомпенсировать аномалию, улучшить прослеживаемость горизонтов за счет оптимальных процедур, ввода статических и кинематических поправок согласно предлагаемому графу обработки, и избежать расходов на бурение «сухой» скважины. Этот

случай более показательный со стороны недоучтенных рисков, что, несомненно, играет важную роль в планировании программы ГРР.

Заключение

На текущий момент в сфере обработки сейсмических данных известно большое количество различных технологий, позволяющих в той или иной степени компенсировать неоднородности ВЧР. В данной работе представлен наиболее оптимальный подход к снижению влияния аномальных объектов в ВЧР на нижележащие продуктивные горизонты для условий Восточной Сибири, а также продемонстрированы преимущества и недостатки других технологий, применение которых в различных условиях может давать положительный результат.

По результатам различных тестирований как на модельных, так и на реальных данных, сформированы предложения по выбору модели ВЧР для последующего расчета априорных статических поправок в условиях Восточной Сибири: в отсутствие выходов интрузивных образований и инверсии скоростей – рефрагированная или томографическая модель; при наличии инверсии – технологии, использующие поверхностные волны, или полноволновую инверсию; в случае присутствия выходов интрузивных образований в приповерхностной зоне необходимо привлечение дополнительной информации для уточнения геометрии аномалообразующих тел.

С учетом обозначенной зоны применимости технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов методика позволяет компенсировать средне- и длиннопериодные скоростные аномалии, учет и компенсацию которых невозможно выполнить на этапе ввода статических поправок.

Результаты, полученные с применением описанного комплекса методик, позволяют осуществить качественную интерпретацию сейсмических данных, например: уточнить структурно-тектоническое строение территории; корректно выполнить корреляцию горизонтов как в ВЧР, так и в зоне целевых интервалов; оконтурить целевые объекты; повысить надежность динамической интерпретации за счет улучшения общего качества сейсмических данных. Представленные в работе результаты подтверждают эффективность предлагаемого графа обработки данных для условий Восточной Сибири.

В силу особенностей и ограничений предлагаемой методики, представленные алгоритмы рекомендуются к применению в любых других регионах. Аномалии в ВЧР могут иметь любую природу: интрузивные тела, соляные подушки, моренные отложения, техногенные объекты и т.д. Технология коррекции остаточных

кинематических сдвигов была опробована в применении в условиях Западной Сибири, на Таймыре, а также на примере морских сейсморазведочных данных в шельфовой зоне Каспийского моря. Предлагаемая методика является универсальной и рекомендована к применению в любых регионах, изучение которых осложнено аномалиями ВЧР. Дальнейшее усовершенствование технологии предполагает более детальную проработку описанных алгоритмов при возможности проведения тестирований на высоких производственных мощностях, а также включение в перечень рекомендаций более современных подходов к построению моделей ВЧР и кинематической коррекции, которые могут быть представлены геофизическому сообществу в будущем.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.9 Геофизика (технические науки)

1. Гуренцов Н.Е., Твердохлебов Д.Н., Мельников Р.С., Молчанов А.Б., Мостовой Д.В., **Емельянова К.Л.** Новые технологии – ключ к получению качественных данных сейсморазведки // Геофизика. №2.2021. С. 4–10. RSCI. (0,43 п.л., авторский вклад 20%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,43.

2. **Емельянова К.Л.**, Арутюнянц И.В., Твердохлебов Д.Н., Степанов П.Ю. Особенности кинематической обработки сейсмических данных в условиях Восточной Сибири // Геофизика. №3. 2022. С.23–31. RSCI (0,61 п.л., авторский вклад 60%). Импакт-фактор РИНЦ, 2021: 0,43.

3. **Емельянова К.Л.**, Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В., Мостовой Д.В., Степанов П.Ю. Оптимальный подход к учету статических и кинематических поправок при обработке сейсмических данных в сложных сейсмогеологических условиях Восточной Сибири // Приборы и системы разведочной геофизики. №4 (71). 2021. С. 33–40. ВАК/МГУ (0,5 п.л., авторский вклад 65%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,083

4. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., **Емельянова К.Л.**, Мельников Р.С. Построение модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества данных сейсморазведки // Геофизика. № 2. 2021. С. 27–37. RSCI. (0,68 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ, 2021: 0,43.