

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Емельянова Ксения Львовна

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

1.6.9 – Геофизика (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Степанов Павел Юрьевич

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ.....	11
1.1. Геологическое строение района	11
1.1.1. Краткий физико-геологический очерк	11
1.1.2. Литолого-стратиграфическая характеристика разреза и продуктивные горизонты .	12
1.1.3. Тектоническое строение	18
1.1.4. Интрузивный магматизм и вулканизм	22
1.2. Геофизические данные	24
1.2.1. Сейсмогеологическая характеристика района и районирование	24
1.2.2. Априорная геофизическая информация.....	27
1.2.3. Признаки перспективных объектов на сейсмических разрезах	29
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОРРЕКЦИИ АНОМАЛИЙ ВЧР	34
2.1. Неоднородности ВЧР и их влияние на сейсмические данные	34
2.2. Построение модели верхней части разреза для расчета априорных статических поправок.....	41
2.2.1. Рефракторная модель	41
2.2.2. Томографическая модель	44
2.2.3. Модель по результатам полно-волновой инверсии (FWI)	46
2.2.4. Модель по данным инверсии поверхностных волн (SWI).....	48
2.2.5. Модель по результатам комплексирования геофизических методов	51
2.3. Коррекция остаточных кинематических сдвигов	55
ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ К РЕАЛЬНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ	60
3.1. Опробование предлагаемых методик.....	60
3.1.1. Построение моделей ВЧР для расчета априорных статических поправок.....	60
3.1.2. Тестирование технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов.....	78
3.2. Обработка реальных данных с учетом предлагаемых методик	85
3.2.1. Полная обработка профиля реальных данных по предлагаемому графу	86
3.2.2. Примеры результатов, полученных с применением предлагаемого подхода.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114

Список сокращений	116
Список литературы	117

ВВЕДЕНИЕ

Восточная Сибирь в последние годы является одним из наиболее перспективных регионов для целей поиска месторождений углеводородов, поскольку традиционные месторождения имеют тенденцию истощаться. Регион имеет свои особенности, учет которых необходим при разведке и разработке перспективных горизонтов.

Восточная Сибирь характеризуется сложными сейсмогеологическими условиями, в высокоскоростном галогенно-карбонатном разрезе верхняя часть разреза (ВЧР) является наиболее неоднородной частью разреза, влияние которой на нижележащие перспективные объекты сложно недооценить. В этой зоне имеют широкое распространения скоростные аномалии различного рода: зоны развития многолетнемерзлых пород (ММП), инверсия скоростей в разрезе, выходы интрузивных тел (дайки, траппы, туфы) различной мощности на поверхность. Эти элементы разреза, сильно отличающиеся по сейсмическим скоростям и плотностям от вмещающих пород в ВЧР, формируют ложные структуры, влияние которых распространяется и на целевые интервалы разреза. Некоторые объекты обладают сильными рассеивающими, экранирующими эффектами и поглощающими свойствами, из-за чего в таких зонах качество сейсмического изображения существенно ухудшается вплоть до полного отсутствия отражений. По этой причине надежность последующей интерпретации и точность структурных построений заметно ухудшаются (Кочнев и др., 2009; Крючков, Скоробогатов, 2019).

Чтобы повысить надежность обработки сейсмических материалов необходимо построение детальной модели скоростей ВЧР и последующая интерактивная корректировка статических и кинематических поправок. В работе приводится ряд технологий, которые способствуют достижению оптимального результата обработки, улучшая корреляцию отражений не только в ВЧР, но и в зоне продуктивных горизонтов.

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 (ГРП) 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 (Твердохлебов и др, 2017; Твердохлебов и др, 2018; Гадыльшин и др., 2021; Коробкин, 2020).

В настоящей работе рассматривается ряд методик компенсации ВЧР в условиях различной сложности. Особенности технологии FWI описаны в работах Коробкина В.С., Гадыльшина К.Г., Чеверды В.А., Твердохлебова Д.Н., методика SWI (SWAMI) изучена менее детально, однако также упоминается в публикациях указанных выше авторов (Korobkin и др., 2018; Borisov и др., 2019; Farrugia и др., 2016; Douma, 2011; Maurin, 2016; Гадыльшин, Чеверда, 2018).

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. (Молчанов и др, 2021; Мостовой и др, 2021; Шелохов и др., 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. (Геништа и др., 2014; Коротков и др, 2011; Козырев и др, 2014). 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 (Коробкин, 2020; Долгих, 2017; Горелик, 2016; Семин и др., 2017; Vaixas и др., 1997; Павленкин и др., 2008; Давлетханов Р.Т., 2015).

Целью работы явилось разработка оптимальной методики компенсации неоднородностей ВЧР, не позволяющих уверенно прослеживать 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, имитирующей 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 осложненных 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 – Tesseral 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 сеймики – 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.

Благодарности

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

Автор выражает огромную благодарность коллективу компании 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.

ГЛАВА 1. СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ¹

Восточная Сибирь характеризуется весьма сложными сейсмогеологическими условиями. Верхняя часть разреза в этом регионе части осложнена выходами интрузивных тел (дайки, траппы, туфы) различной мощности на поверхность. Эти объекты, сильно отличающиеся по сейсмическим скоростям и плотности от вмещающих пород в ВЧР, формируют ложные структуры в целевых интервалах, а некоторые объекты обладают сильными рассеивающими, экранирующими эффектами и поглощающими свойствами, из-за чего в таких зонах качество сейсмического изображения существенно ухудшается вплоть до полного отсутствия отражений. По этой причине надежность последующей интерпретации и точность структурных построений заметно ухудшаются.

Поиск новых методик с учетом особенностей строения региона для компенсации описанных аномалий всегда являлся актуальным вопросом для текущей и последующей разработки продуктивных горизонтов на уже доступных для разведки участках, а также на участках, планируемых к приобретению компаниями.

1.1. Геологическое строение района

1.1.1. Краткий физико-геологический очерк

«Исследуемые в данной работе участки располагаются в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы Восточной Сибири. Площадь Восточной Сибири — 7,2 млн.км². Большая часть занята таёжным Среднесибирским плоскогорьем, сменяющимся на севере тундровыми низменностями, на юге и востоке — высокими горными хребтами Западных и Восточных Саян, горами Забайкалья и Яно-Колымского края. Здесь текут крупнейшие реки России — Енисей и Лена.

В пределах Восточной Сибири расположены Забайкальский и Красноярский края, Иркутская область, республика Якутия, Бурятия, Тува. Крупнейший город Восточной Сибири – Красноярск; крупные города – Иркутск, Якутск, Улан-Удэ, Чита, Норильск, Ангарск, Братск.

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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

2. 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. 2–8. RSCI. (0,43 п.л., авторский вклад 20%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,43

Преобладающий тип растительности – тайга. Почвы и растительность таёжной зоны Восточной Сибири развиваются в более благоприятных условиях, чем в зонах тундры и лесотундры. Рельеф более пересечённый, чем в Западной Сибири, на щебнистом элювии коренных пород формируются каменистые, нередко маломощные почвы. Болотистой местности в Восточной Сибири немного.

В Восточной Сибири встречаются разнообразные ландшафты и растительные сообщества (арктические пустыни, сухие степи, тайга, высокогорные ландшафты, лиственные леса).

Восточная Сибирь лежит в умеренном и холодном поясах. Климат Юга Восточной Сибири разнообразен: экстроконтинентальная, умеренно континентальная, резко континентальная предгорно-степная и степная климатические зоны. Осадков выпадает меньше, чем в западных областях России, мощность снежного покрова невелика, на севере повсеместно распространена вечная мерзлота.

Зима в северных районах долгая и холодная, температура достигает $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Лето тёплое, на юге жаркое. Амплитуда колебаний летних и зимних температур достигает $40 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в Восточной Якутии – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.» (Анциферов и др., 1986)

Восточная Сибирь с северной стороны выходит к Северному Ледовитому океану. По побережью имеет границы с морями Карским, Лаптевых и Восточно-Сибирским. Крупнейшие озёра на территории Байкал, Таймыр, Хантайское озеро, Лама, Пясино.

«Восточная Сибирь богата месторождениями: железными, медно-никелевыми рудами, полиметаллами, бокситами, золота, каменного и бурого угля. В Красноярском крае добывается значительное количество российской нефти. Восточная Сибирь также богата нерудными ископаемыми: слюда, графит, исландский шпат, стройматериалы, соли. Имеется также крупнейшее месторождение алмазов.» (Реутовский, 1905)

1.1.2. Литолого-стратиграфическая характеристика разреза и продуктивные горизонты

Геологический разрез Непско-Ботуобинской антеклизы представлен складчатым основанием (кристаллическим фундаментом) архейско-раннепротерозойского возраста и осадочным чехлом (Булдыгеров, 2007). Осадочный чехол выполнен в основном отложениями венда и кембрия, более древние рифейские образования распространены лишь на юго-востоке антеклизы в пределах погребенных грабенов (рисунок 1.1.1). Ограниченно распространены также ордовикские, верхнепалеозойские и юрские отложения. Общая мощность чехла в осевой части антеклизы составляет $1,6-2,0\text{ км}$, на склонах – $2,7-3,0\text{ км}$ (Анциферов и др., 1986; Долгова и др., 2021).

Фундамент (AR-PR1)

«Образования фундамента представлены, в основном, гранитами, гранодиоритами темно-серыми, розовато- и зеленовато-серыми, в меньшей мере гнейсами и сланцами хлоритово-серицитовыми и хлоритово-амфиболитовыми. Граниты серые, темно-серые, ярко-красные, средне-кристаллические, иногда разгнейсованные. Кристаллические сланцы выветрелые и трещиноватые.

В ряде скважин на поверхности фундамента залегает кора выветривания. Толщина коры выветривания фундамента в большинстве скважин не превышает 4-5м, однако иногда достигает 25м.» (Коновальцева, 2014)

Верхний протерозой (PR2)

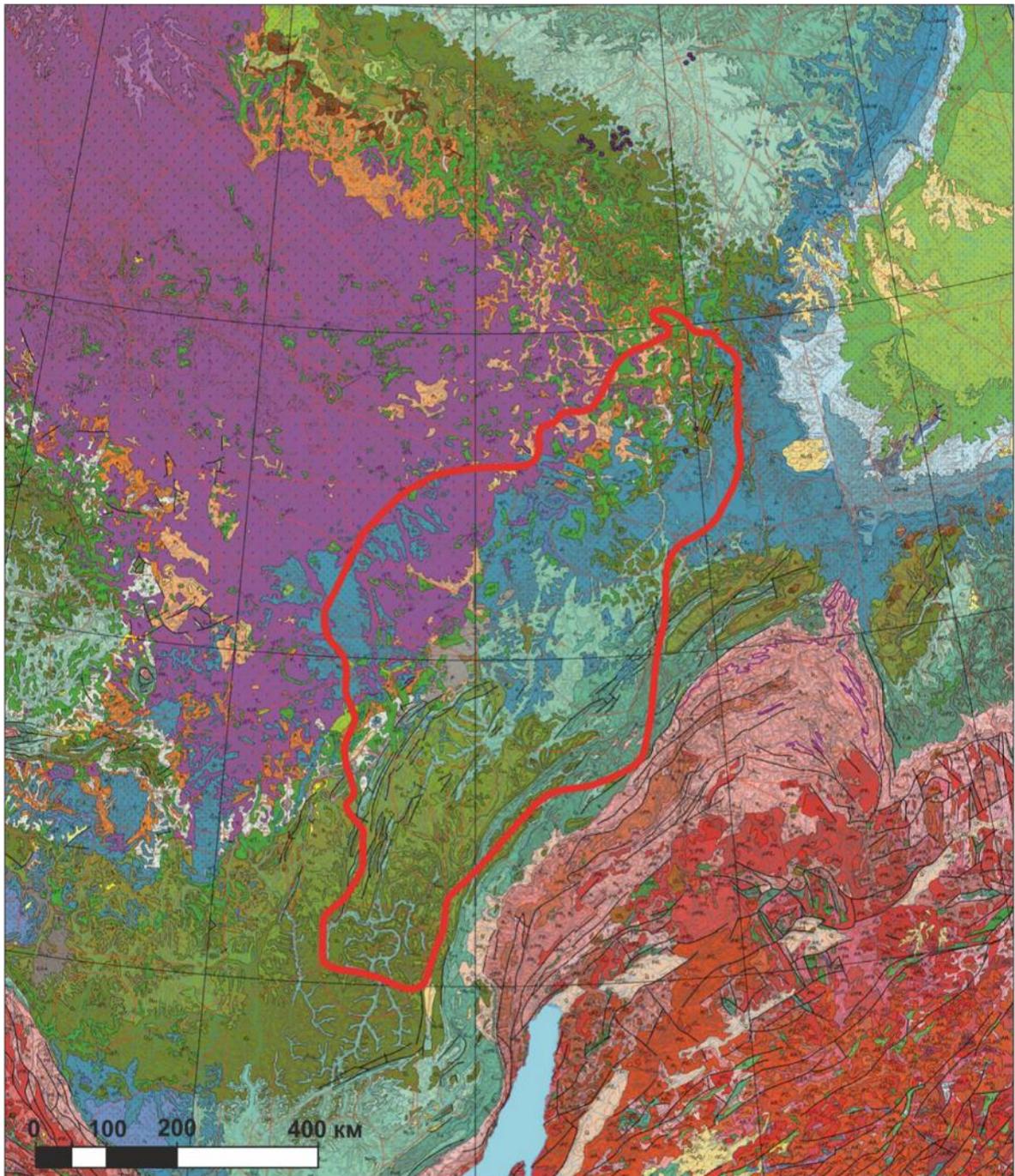
Рифей (R)

Рифейские отложения распространены на юго-восточном борту Непско-Ботубинской антеклизы. По данным бурения и сейсморазведочных работ, рифейские отложения развиты на Непско-Ботубинской антеклизе в виде узких грабенов протяженностью до 70 км, ориентированных вкост продольной оси прогиба (СЗ простирание). Глубина их вреза увеличивается в сторону Предпатомского прогиба (Кутукова, 2020).

Венд (V)

Вендские отложения распространены на всей территории НБА.

Терригенные отложения ограничено распространены на северо-восточном склоне НБА. Эти отложения отнесены к вилючанскому стратиграфическому горизонту, который относят либо к основанию венда, либо завершают ими рифей. Хоронохская свита залегает на эрозионной поверхности фундамента, сложена алевролитами, песчаниками светло-серыми пестроцветными кварцевыми. Мощность свиты 85-175 м. Песчаники хоронохской свиты слагают вилючанский горизонт. По данным СРР 2Д предполагается наличие вилючанского горизонта в ЮВ части.



Q	Антропогеновая (четвертичная) система	C	Каменноугольная система
N	Неогеновая система	D	Девонская система
P	Палеогеновая система	S	Силурийская система
K	Меловая система	O	Ордовикская система
J	Юрская система	C	Кембрийская система
T	Триасовая система	PR	Протерозой
P	Пермская система	AR	Архей

Рисунок 1.1.1 Фрагмент геологической карты для исследуемого региона. Красным контуром обозначены границы Непско-Ботубинской антеклизы. (Анциферов и др., 1986)

Отложения непской свиты сложены преимущественно терригенными породами: аргиллитами и алевролитами с прослоями песчаников. Мощность свиты увеличивается в направлении с запада на восток. На западном склоне НБА толщина свиты составляет 10-50 м. В центральной части (вдоль длинной оси антеклизы) мощность свиты составляет 0-150 м. Наиболее полный разрез свиты выявлен на восточном склоне (в зоне сочленения с Предпатомским региональным прогибом), мощность отложений свиты достигает 640 м по скважинным данным. Свиту делят на две подсвиты – нижнюю и верхнюю. Песчаные пласты нижней части верхненепской подсвиты объединяют в хамакинский (и его аналоги) продуктивный горизонт, песчаные пласты нижненепской – в талахский продуктивный горизонт (Перевозчиков и др., 2020).

Тирская свита отсутствует на северо-западном склоне НБА. На остальной территории антеклизы тирская свита со стратиграфическим несогласием залегает на терригенных отложениях непской свиты. Состав отложений свиты преимущественно карбонатный, представлен доломитами, доломито-ангидритами, с прослоями мергелей и аргиллитов. На восточном и южном склонах НБА в основании тирской свиты выделяется песчаный пласт – ботуобинский (парфеновский) продуктивный горизонт, на западе территории исследования данный горизонт песчаников отсутствует. На восточном склоне НБА (восток Непского свода) выше ботуобинского пласта залегают кавернозные доломиты, которые соответствуют телгеспитскому продуктивному горизонту. На северо-западном склоне НБА в средней части тирской свиты развит его аналог - ербогаченский карбонатный продуктивный горизонт. На южном склоне антеклизы, выше ботуобинского пласта, распространен еще один терригенный продуктивный горизонт - верхнетирский. Мощность свиты на территории НБА увеличивается в направлении с запада на восток, от полного отсутствия отложений на северо-западном склоне, до 450 м - на восточном (Жемчугова, 2014).

Катангская свита распространена на всей территории НБА, с размывом залегает на отложениях тирской свиты. Свита сложена переслаиванием доломитов, глинистых и ангидритистых доломитов, с прослоями аргиллитов, мергелей. Мощность свиты достаточно выдержана и составляет 80-120 м на всей исследуемой территории. В подошве свиты залегает пачка доломитов – преображенский продуктивный горизонт, этот горизонт является одним из наиболее выдержанных горизонтов на территории НБА и обычно его толщина составляет 20м.

Собинская свита согласно залегает на отложениях катангской свиты, на территории НБА распространена повсеместно. Сложена свита в основном доломитами, доломитами ангидритистыми, с прослоями ангидритов, мергелей, аргиллитов. Мощность свиты 60-120 м.

Тэтэрская свита залегаєт согласно на отложениях собинской свиты и представлена доломитами, глинистыми доломитами, редко аргиллитами. Встречаются тонкие прослои ангидритов. Мощность свиты изменяется в пределах 50-70 м.

К верхней и нижней частям тэтэрской свиты приурочены нефтегазоносные горизонты. Породы этих горизонтов представлены доломитами хемогенными, неяснослоистыми, строматолитовыми (местами окремненными), а также глинисто-карбонатными породами с включением ангидрита, заполняющего каверны или в виде отдельных слойков (Анциферов и др., 1986).

Палеозой (PZ)

Кембрий (Є)

Разрез нижнекембрийских соленосно-карбонатных отложений НБА начинается усольской свитой. Свита делится на три подсвиты, нижняя соответствует подосинскому горизонту, средняя – осинскому горизонту. Нижнеусольская подсвита сложена в южной части антеклизы двумя мощными пластами солей и разделяющим их пластом доломита (около 20 м). В направлении к центральным районам антеклизы мощность пластов солей уменьшается, разрез становится более карбонатным. В северной части антеклизы нижнеусольская подсвита представлена в основном доломитами, доломитами глинистыми с прослоями мергелей. Мощность подсвиты меняется от 100 м в южной части до 20 м в северной части НБА.

Среднеусольская подсвитана большей части НБА имеет двучленное строение. Нижняя часть сложена преимущественно известняками, верхняя – доломитами. В известняках многочисленные прослои сгустковых, водорослевых и микрофитолитовых разностей. Доломиты светло-серые, серые, часто известковистые, сульфатизированные, засоленные, глинистые с прослоями доломитистых известняков. Мощность осинского горизонта меняется в широких пределах – от 10 м до 120 м. Верхнеусольская подсвита представлена чередованием каменных солей, доломитов, доломито-ангидритов. Общая мощность усольской свиты составляет 580-650 м в южной части, 330-420 – в центральной, и 270-350 – в северной части.

Бельская свита по литологическому составу подразделяется на две подсвиты. Нижняя сложена доломитами и известняками с прослоями ангидритов и мергелей. В составе подсвиты обособляют христофоровский продуктивный горизонт. Верхняя подсвита представлена чередованием пластов доломитов и каменных солей, с прослоями ангидритов, известняков. В верхней части верхнебельской подсвиты выделяется продуктивный горизонт. Общая мощность бельской свиты составляет 380-480 м в южной и 415-485 м в северной частях НБА.

Булайская свита сложена исключительно карбонатными породами. Нижняя часть свиты представлена глинисто-ангидрит-доломитовыми породами. Верхняя часть сложена доломитами,

тонко-, мелко-, иногда среднезернистыми, битуминозными, массивными, мелкопористыми. Общая мощность свиты 70-170 м.

Ангарская свита сложена соленосно-карбонатными отложениями. Верхнеангарская подсвита сложена чередованием пластов соли и карбонатов. Доломиты ангарской свиты светло-серые, с коричневатым оттенком, тонкозернистые, с включениями ангидрита часто водорослевые, с прослоями известняков, слоями ангидритов. Известняки тонкозернистые, водорослевые, иногда битуминозные с прослоями доломитов и включениями кремня. Нижнеангарская подсвита сложена доломитами участками глинистыми, известковистыми, с прослоями ангидрита. Общая мощность ангарской свиты уменьшается в центральных и северных участках и составляет 210-310 м, в южной части антеклизы – мощность свиты достигает 520 м.

«Литвинцевская свита с небольшим размывом залегает на отложениях ангарской свиты. По особенностям литологического состава свита делится на две подсвиты. Нижнелитвинцевская подсвита преимущественно сложена известняками. Верхнелитвинцевская подсвита сложена доломитами с прослоями ангидритов и аргиллитов. Общая мощность литвинцевской свиты на НБА составляет 110-140 м в ее южной и центральной частях и 150-180 м в северной.» (Юрчик, 2007)

«Верхоленская свита с перерывом залегает на отложениях литвинцевской свиты, сложена в основном глинистыми породами. Для свиты характерно тонкое частое чередование пестроцветных и красноцветных алевролитов, аргиллитов, мергелей, песчаников известковистых, мелкозернистых, с прослоями известняков, доломитов. Мощность свиты составляет 80-400 м.

Илгинская свита на юге НБА представлена пестроцветными песчаниками с прослоями алевролитов, аргиллитов и известняков. В центральной и северной частях НБА свита сложена карбонатно-глинистыми разностями и представлена мергелями, аргиллитами с прослоями известняков, реже песчаников. Отложения илгинской свиты отсутствуют в центральной части НБА. Мощность свиты на склонах антеклизы изменяется от 30 до 200 м.» (Шемин, 2007)

Ордовикская система (О)

«Отложения ордовикской системы отсутствуют в центральной части НБА, распространены на южном, северном и северо-восточном склонах антеклизы. Для южного склона НБА характерно развитие терригенно-карбонатных отложений, которые в нижнеордовикской части разреза состоят из доломитов с прослоями песчаников и алевролитов. В среднеордовикской части разреза также велико содержание карбонатных разностей. На северо-восточном склоне НБА для отложений ордовика характерным является наличие рифогенных образований и преобладание известковых осадков, накопление которых происходило в более глубоководном бассейне. В северной части НБА развиты карбонатно-терригенные и

карбонатные отложения лагунного типа. В разрезе отсутствуют отложения, соответствующие верхней половине нижнего и нижней части среднего ордовика.» (Каныгин, 2016)

Отложения силурийской (S) и девонской (D) систем не развиты в пределах НБА.

Каменноугольная и пермская системы (C–P)

Отложения каменноугольной и пермской систем распространены на западном и северо-западном склоне НБА. Западный склон НБА характеризуется песчано-алевритовым составом отложений карбона и перми, формировавшихся во внутриплатформенных бассейнах с повышенной угленосностью. На северо-западе территории НБА отложения карбона-перми представлены песчано-алевритовыми, практически безугольными, нередко только песчаными, с прослоями более грубозернистых пород, толщами. Терригенные углистые породы, толщиной до 250 м, с угловым и стратиграфическим несогласием залегают на отложениях средне-верхнего кембрия или ордовика (Коновальцева, 2014).

Мезозой (MZ)

Триасовая система (T)

Отложения триасовой системы распространены в западной части Непско-Ботубинской антеклизы. Образования нижнего триаса представлены пестроцветными туффитами и туфогенно-осадочными породами. В нижнем-среднем триасе преобладают базальты.

Юрская система (J)

«Отложения юрской системы встречены на севере НБА и представлены нижним отделом. Пески, песчаники, алевролиты, аргиллиты, а также угленосные отложения со стратиграфическим несогласием залегают на разновозрастных подстилающих породах. Толщина пород достигает 45м.

Четвертичная система (Q)

На разновозрастных породах, слагающих осадочный чехол, залегают отложения четвертичной системы, представленные суглинками, супесями, глинами с обломками различных пород, а также песками и галечниками, толщиной от 10м до 70м.» (Коновальцева, 2014; Огородова, 2012)

1.1.3. Тектоническое строение

Имеющиеся геологические и геофизические материалы позволяют считать, что цоколь большей части территории Сибирской платформы и, в частности, НБА (рисунок 1.1.2.) сложен архейскими образованиями с изотопным возрастом 3000 млн.лет. В раннем - среднем протерозое (2000-1700 млн.лет) происходит окончательная стабилизация региона и фиксация его контуров.

Фундамент сложен разнотипными магматическими и метаморфическими породами. Разнородность фундамента может свидетельствовать о стадийности его формирования.

Платформенный чехол практически полностью сложен породами венд-силурийского структурного яруса (рисунок 1.1.3). Небольшую долю в разрезе занимают рифейские отложения (в рифтах и в восточной части НБА), а также отложения пермь-карбонового и триас-юрского структурного яруса (Жуков и др., 2020).

История платформенного чехла Непско-Ботуобинской антеклизы начинается в рифейское время, когда в результате рифтогенеза осадочные отложения накапливаются на востоке НБА, а также в грабенах центральной части структуры. Один из таких грабенов – Верхнечонско-Талаканский прослежен в направлении с юго-востока на северо-запад от Талаканского месторождения через северо-восточный контур Верхнечонского.

Окончание рифейского рифтогенного этапа развития ознаменовалось крупным предвендским перерывом в осадконакоплении, который подтверждается угловым несогласием (до 3°) между рифейскими и вендскими отложениями в районе Катангской седловины.

Отложения венд-раннекембрийского комплекса образовывались в условиях пострифтового погружения, что подтверждается значительным увеличением толщин венд-раннекембрийского комплекса над рифтами рифейского возраста. На границе между терригенными и карбонатными отложениями наблюдается также перерыв в осадконакоплении, связанный, вероятнее всего с особенностями седиментации, а не с ярко выраженными тектоническими событиями. Дальнейшее накопление карбонатного (подсоленосного) комплекса проходило также в пострифтовых тектонически спокойных условиях (Гайдук и др., 2016; Гайдук и др., 2016).

В раннекембрийское (атдабанский век) время произошло тектоническое событие, которое обусловило резкую смену карбонатного режима осадконакопления на галогенный.

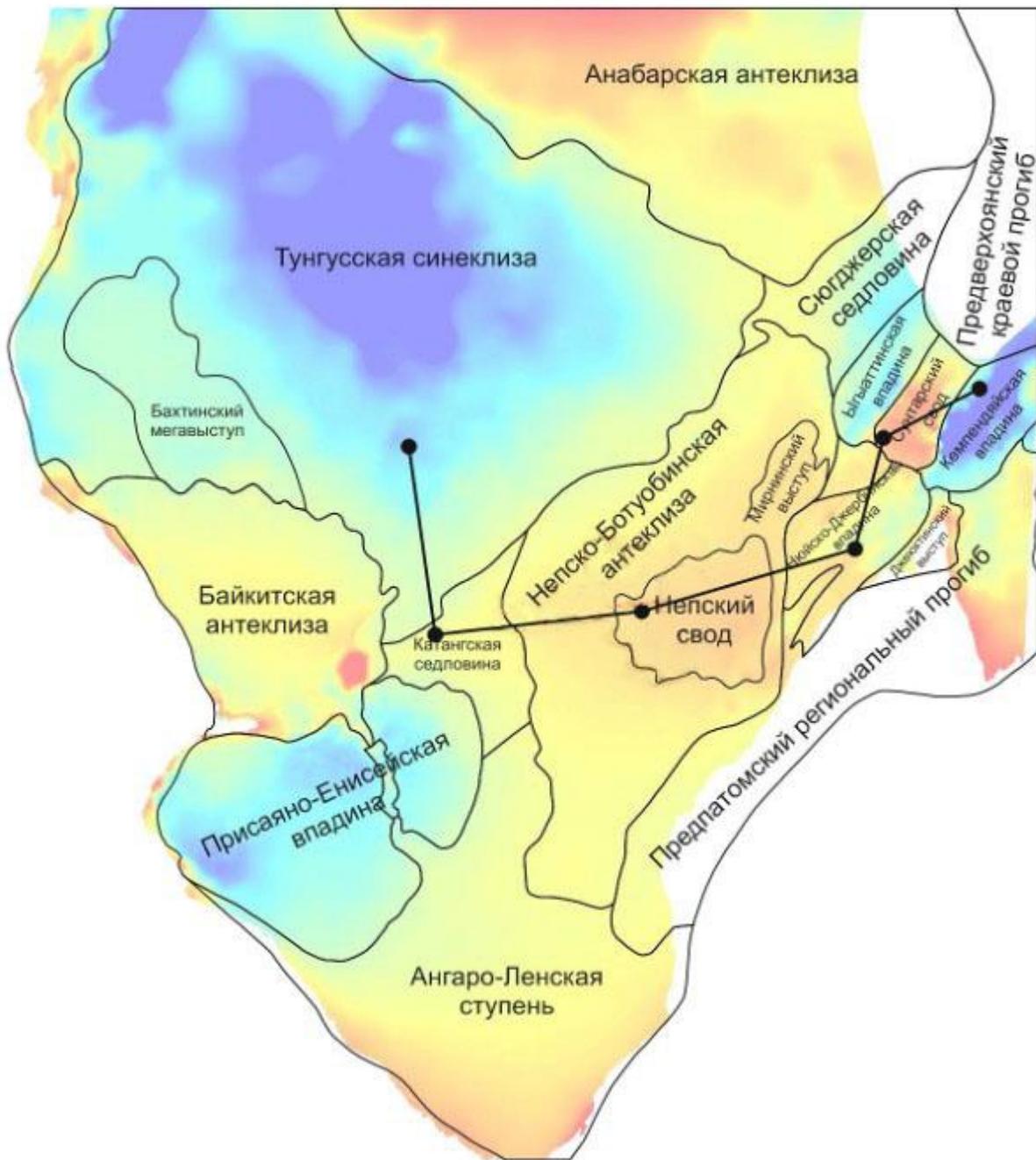


Рисунок 1.1.2. Обзорная структурная схема района работ (градиент цвета показывает изменение относительной высоты: от синего в зонах впадин до красного в зонах поднятий). (Гайдук и др., 2016)

Для данного этапа орогении в основном характерно широкое развитие надвиговых деформаций на границах слоев горных пород с контрастными реологическими свойствами. Надвиговые деформации с детачментом внутри нижнекембрийской галлогенно-карбонатной толщи зачастую находят свое отражение в современном рельефе дневной поверхности, и уверенно закартированы геологическими съемочными работами. С этими деформациями также связан региональный подъем территории и крупный размыв.

Дальнейшие деформации в районе НБА были выражены не так ярко и представлены, в основном вертикальными мезозойскими движениями, приведшими к размыву, выраженному в юрском несогласии.

1.1.4. Интрузивный магматизм и вулканизм

Немаловажным аспектом истории развития территории Сибирской платформы является широкое распространение магматизма и вулканизма (Серов, Гапоненко, 2021).

В пределах Сибирской платформы выделяется два этапа магматической (интрузивной) и вулканической (эффузивной) активности: среднепалеозойский (D3fr), связанный с заложением Вилуйской рифтовой системы в восточной части платформы, и позднепалеозойско-раннетриасовый (P2-T1), связанный с формированием Тунгусской трапповой провинции. Также масштабная фаза магматизма отмечается на Сибирской платформе в протерозойское время.

На исследуемой территории магматические образования преимущественно локализуются на двух уровнях, причем приуроченные к этим уровням тела не пересекаются, и имеют P2-T1 возраст внедрения. Оба уровня локализации связаны с солевыми комплексами кембрийского возраста – усольской и ангарской свитами. В пределах исследуемой территории интрузивные тела, отчетливо внедренные в различные комплексы, *уверенно выделяются по данным СРР МОГТ-3Д* (Сальников, 2008).

На отдельных участках трапповые интрузии преимущественно встречаются в разрезе усольской свиты, также наблюдается переход на вышележащий уровень бельской свиты. В пределах сейсмической съемки 3Д отчетливо выделяется трапповая интрузия с переходом из ангарской свиты в литвинцевскую. Граница перехода интрузивных тел на разные уровни представляет собой дайку, создающую сквозную амплитудную аномалию в сейсмической записи (рисунок 1.1.4). С внедрением интрузивных тел в галогенно-карбонатный разрез связаны зоны рассолонения и карстования. В бельской свите выделяются аномалии изрезанной формы, предположительно связанные с участками рассолонения бельской свиты, которые могут обладать хорошими коллекторскими свойствами (Вдовыкин, 2003).

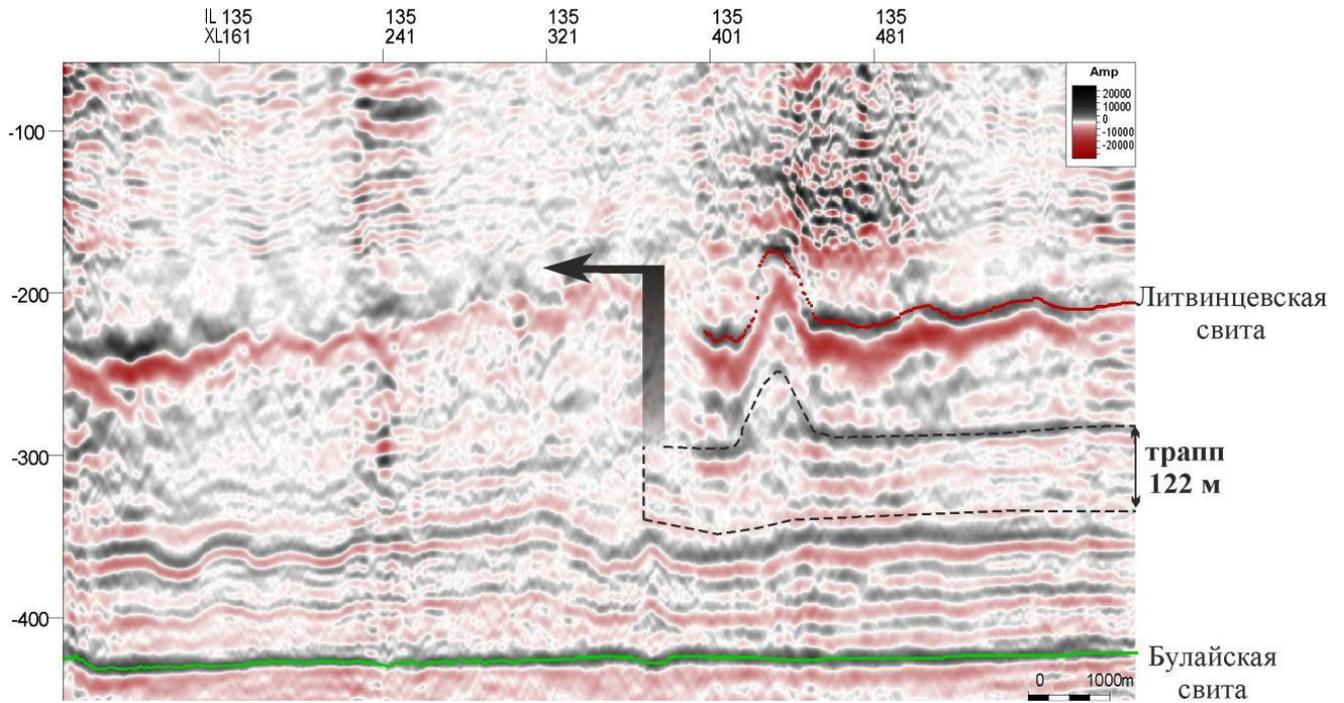


Рисунок 1.1.4. Переход траппов из ангарской свиты в литвинцевскую.

Помимо магматических тел, в западной части территории на поверхности залегают покровные эффузивные (трапповые базальты) и эффузивно-осадочные (туфы, туфопесчаники) слои P2-T1 возраста излияния и накопления. Покровные осадочные слои вулканического происхождения являются помехой при проведении СРР 2Д и 3Д, ввиду обладания свойством поглощения упругих акустических волн. В результате сейсмический материал, регистрируемый непосредственно над такими объектами, зачастую значительно менее информативен, что необходимо учитывать при проектировании полевых СРР (рисунок 1.1.5) (Кочнев, Гоз, 2008; Котова и др., 2015).

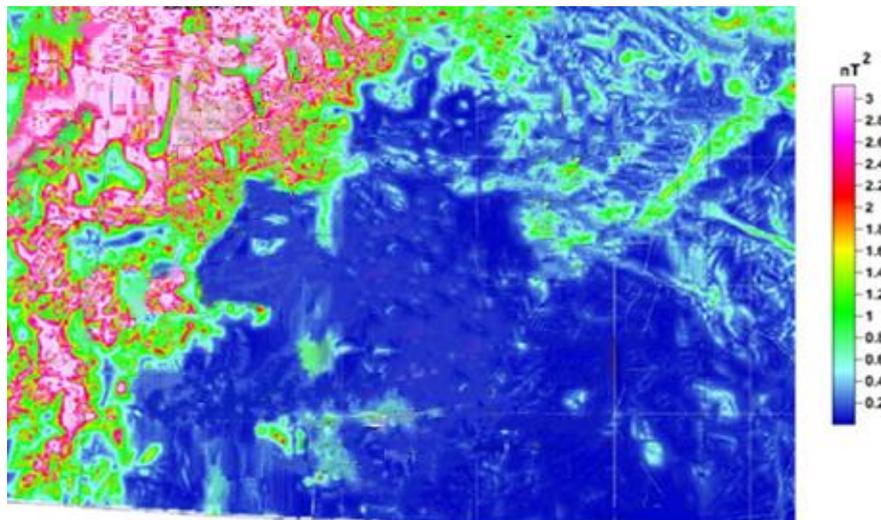


Рисунок 1.1.5. Карта энергии «шумовой» компоненты магнитного поля по данным аэрогеофизических исследований, отражающая распространение вулканических и вулканогенно-осадочных слоев

1.2. Геофизические данные

1.2.1. Сейсмогеологическая характеристика района и районирование

Для детальной оценки сейсмогеологической характеристики среды использовались результаты интерпретации данных ВСП. Результирующая скоростная характеристика среды, является наиболее детальной и представительной среди скважин, пробуренных на изучаемой территории (Романченко и др., 2016).

Скоростная характеристика среды приведена на рисунке 1.2.1. При анализе скоростной модели продольных волн установлено, что скорости, измеренные по акустическому каротажу, хорошо коррелируются со скоростями, полученными по годографу ВСП (Щетинина, Мамяшев, 2019; Анискович, Кондрашков, 2004).

Преимущественно терригенные отложения илгинской и верхней части верхоленской свит характеризуются наименьшими для разреза пластовыми скоростями продольных волн. В интервале 10–200 м они составляют 2000 м/сек.

Пластовая скорость продольных волн нижней части верхоленской свиты в интервале 200–270 м составляет 3000 м/сек. Породы данного интервала характеризуются повышенными значениями естественной радиоактивности.

В карбонатных отложениях литвинцевской свиты пластовые скорости продольных волн существенно возрастают и составляют в интервале 268–442 м 5100 м/сек.

В интервале 442–490 м (верхняя часть ангарской свиты) пластовая скорость продольных волн возрастает до 5350 м/сек. В интервале ангарской свиты присутствует интрузия долеритов, хорошо выраженная в скоростной модели, здесь значения продольных скоростей достигают 6000 м/сек. Нижняя часть ангарской свиты, сложенная низкоскоростными соленосными отложениями, характеризуется в интервале 577–837 м скоростью продольной волны, равной 5000 м/сек.

Высокими скоростями продольных волн характеризуется верхняя часть булайской свиты, сложенной известняками и доломитами. В интервале 837–905 м скорости составляют 5300 м/сек.

Ниже по разрезу скорости продольных волн достаточно сильно дифференцированы. В интервалах усольской свиты, представленной карбонатами (известняки, доломиты) и ангидритами (1243–1326 м; 1497–1561 м), продольные скорости достигают 6500 м/сек. и 5300 м/сек. соответственно. В соленосных толщах в интервалах 1429–1497 м и 1560–1626 м усольской свиты скорости продольных волн составляют 4010 м/сек. и 4550 м/сек. соответственно.

Доломиты осинского горизонта характеризуются высокими скоростями продольных волн до 6200 м/сек.

Тэтэрская свита сложена доломитами с примесью глинистого материала, что приводит к снижению пластовых скоростей до 5300 м/сек.

В более плотных доломитах собинской свиты скорость продольных волн повышается до 5800-6070 м/сек.

Глинистые доломиты и мергели верхней части катангской свиты характеризуются пластовой скоростью продольной волны, равной 5360 м/сек.

Терригенные отложения непской свиты характеризуются скоростями 4000-4200 м/сек. По данным акустического каротажа пластовые скорости в отложениях непской свиты меняются в пределах 3500-4000 м/сек.

Скорости в породах кристаллического фундамента практически не изучены методом ВСП. По данным акустического каротажа скорости продольных волн в фундаменте мало отличаются от скоростей в плотных карбонатных породах и составляют 6000-6200 м/сек.

Районирование

Сложные сейсмогеологические условия Восточной Сибири, зачастую, делают невозможной интерпретацию данных, полученных в этом регионе. На многих сейсмических разрезах выделяются поисковые объекты, но в силу неудовлетворительного качества сейсмического изображения вопрос об усовершенствовании методик обработки и опробовании новых технологий для повышения качества данных на обширной территории Сибирской платформы всегда остается актуальным (Анисимов и др., 2021). В пределах изучаемого региона было выполнено районирование (рисунок 1.2.2.) (Логинов, 2015), по результатам которого территория разделена на 4 класса согласно сложности приповерхностных условий и качеству данных сейсморазведочных работ (СРР). К I и II классу относятся наиболее благоприятные участки. К III и IV – осложненные территории с преобладанием различных аномалообразующих тел в ВЧР (интрузивные и эффузивные тела, многолетнемерзлые породы, моренные отложения и другие скоростные неоднородности). В зонах со сложным и неоднородным строением ВЧР довольно сложно картировать перспективные объекты в сейсмическом волновом поле (рисунок 1.2.3.) (Захарова, 1995). На примере осложненных участков в работе рассматривается применение новых технологий обработки сейсмических данных с целью повышения качества последующей обработки и интерпретации данных (Емельянова и др., 2021).

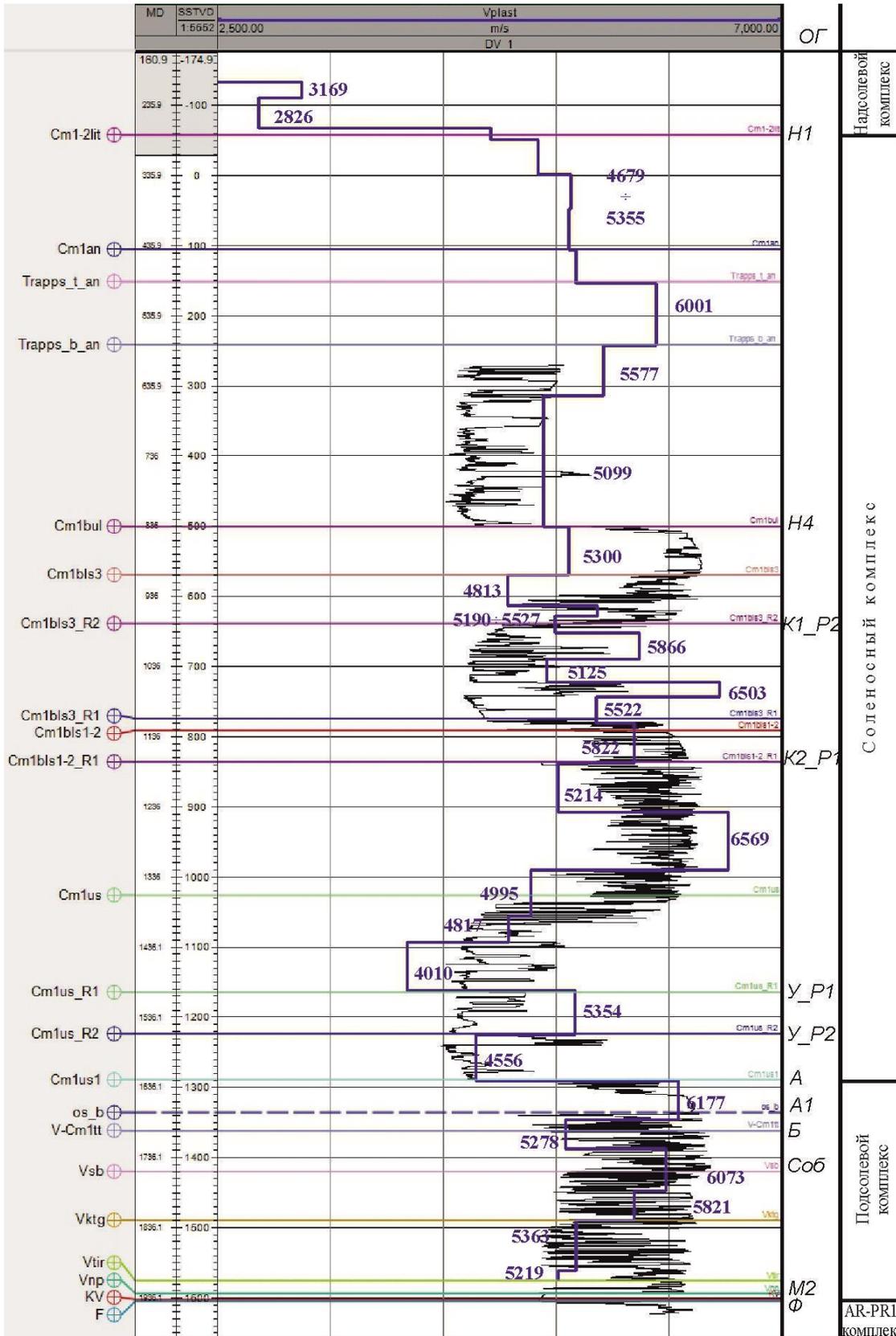


Рисунок 1.2.1. Скоростная модель среды по результатам интерпретации данных ВСП (Гайдук и др., 2016)

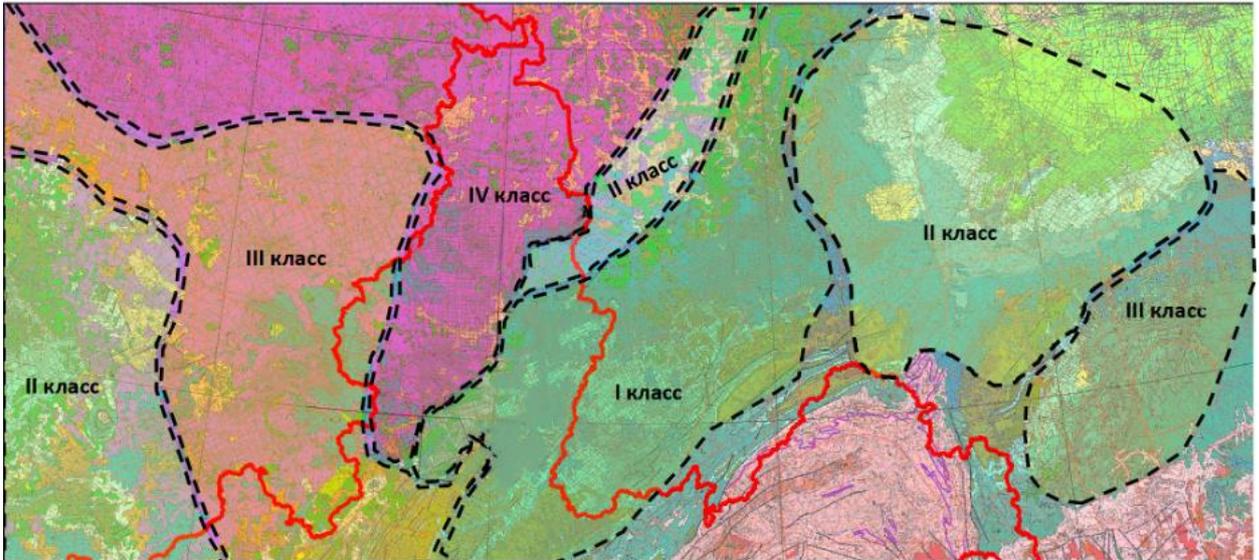


Рисунок 1.2.2. Районирование на обзорной геологической карте фрагмента Восточной Сибири. Пунктиром обозначены зоны классов, красным – контуры Иркутской области (Мостовой и др., 2021).

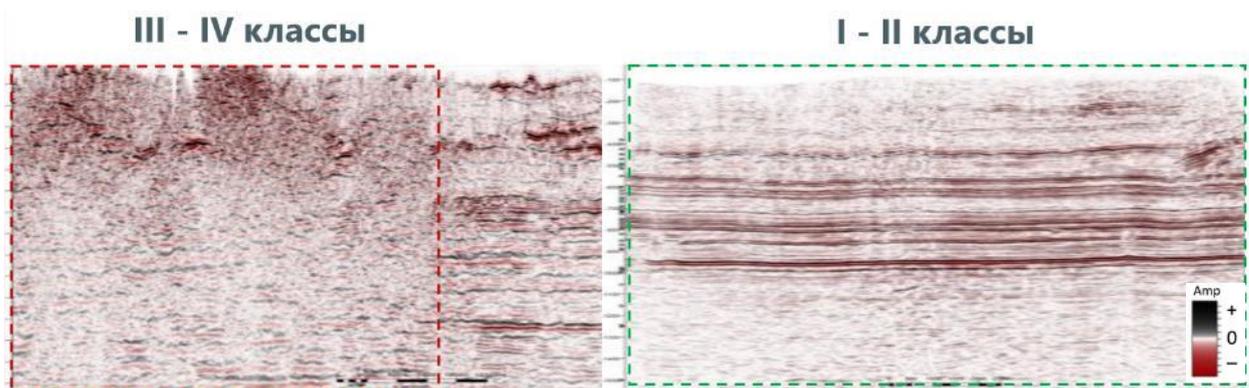


Рисунок 1.2.3. Пример качества сейсмических данных в зависимости от класса районирования (Мостовой и др., 2021).

1.2.2. Априорная геофизическая информация

По территории Восточной Сибири имеется большой объем различной геофизической информации (рисунки 1.2.4 - 1.2.6.) (Ефимов и др., 2016). Точность и масштаб варьируются в весьма широких пределах, однако любая геофизическая информация может быть полезной. Интрузивные тела по своей природе обладают повышенной магнитной восприимчивостью, плотностью и повышенными УЭС, что может помочь идентифицировать положение тел (Шелохов и др., 2021; Мироманов, 1993; Харитонов, 2019).

Эффективность применения этой информации с целью снижения влияния аномалий в ВЧР будет описана в 3 главе, однако уже на текущем этапе следует обозначить важность этой информации еще на самых ранних этапах ГРП – планировании полевых работ.

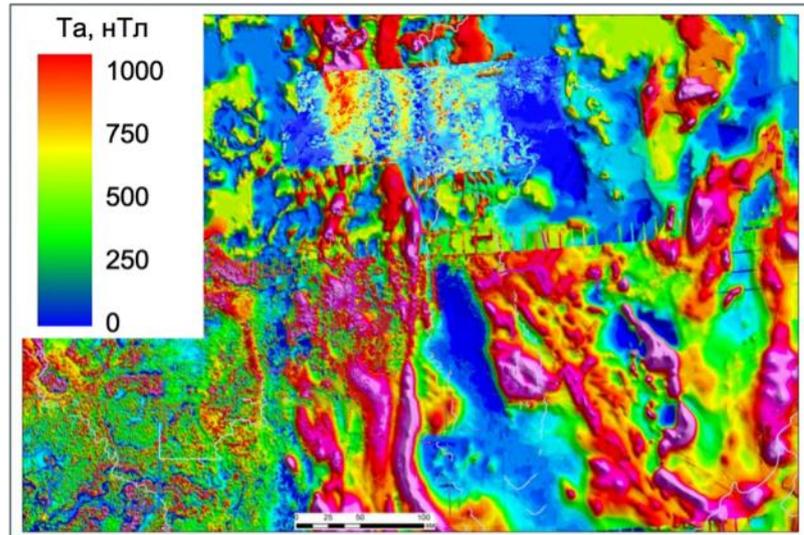


Рисунок 1.2.4. Карта аномалий магнитного поля

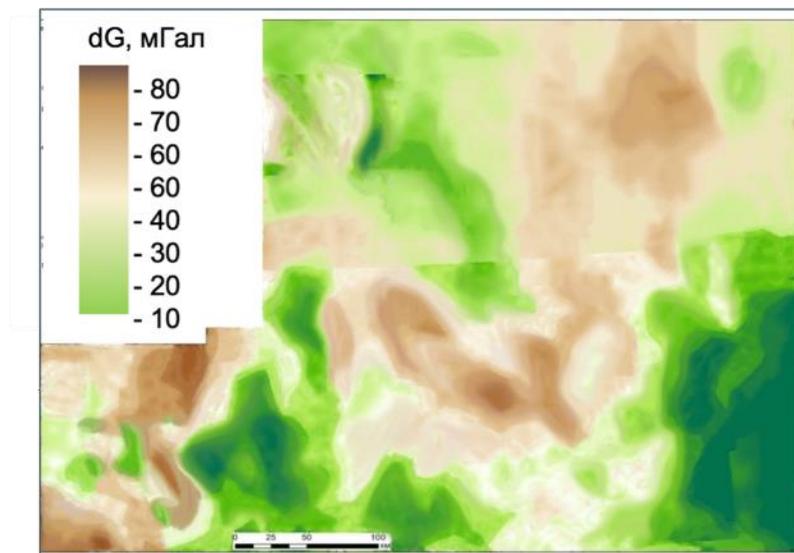


Рисунок 1.2.5. Пример карты аномалий гравитационного поля, составленной из карт разной детальности по региону

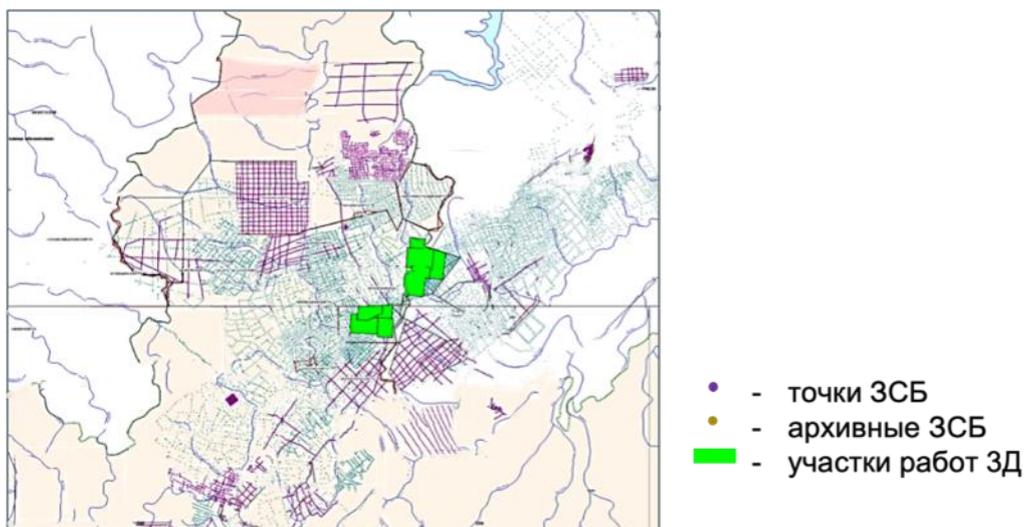


Рисунок 1.2.6. Зоны отработки методами электроразведки

1.2.3. Признаки перспективных объектов на сейсмических разрезах

В рамках рассматриваемой территории перспективные объекты выделяются в осинском и усть-кутском продуктивных горизонтах. Объекты приурочены к рифовым постройкам и выступам фундамента (рисунок 1.2.7). Также перспективные объекты обнаружены в виде кольцевых аномалий осинского горизонта, но на момент написания представленной рукописи еще недостаточно изучены для детального анализа их проявлений по результатам обработки данных новым комплексом предлагаемых технологий (Черепанова, Пормейстер, 2022).

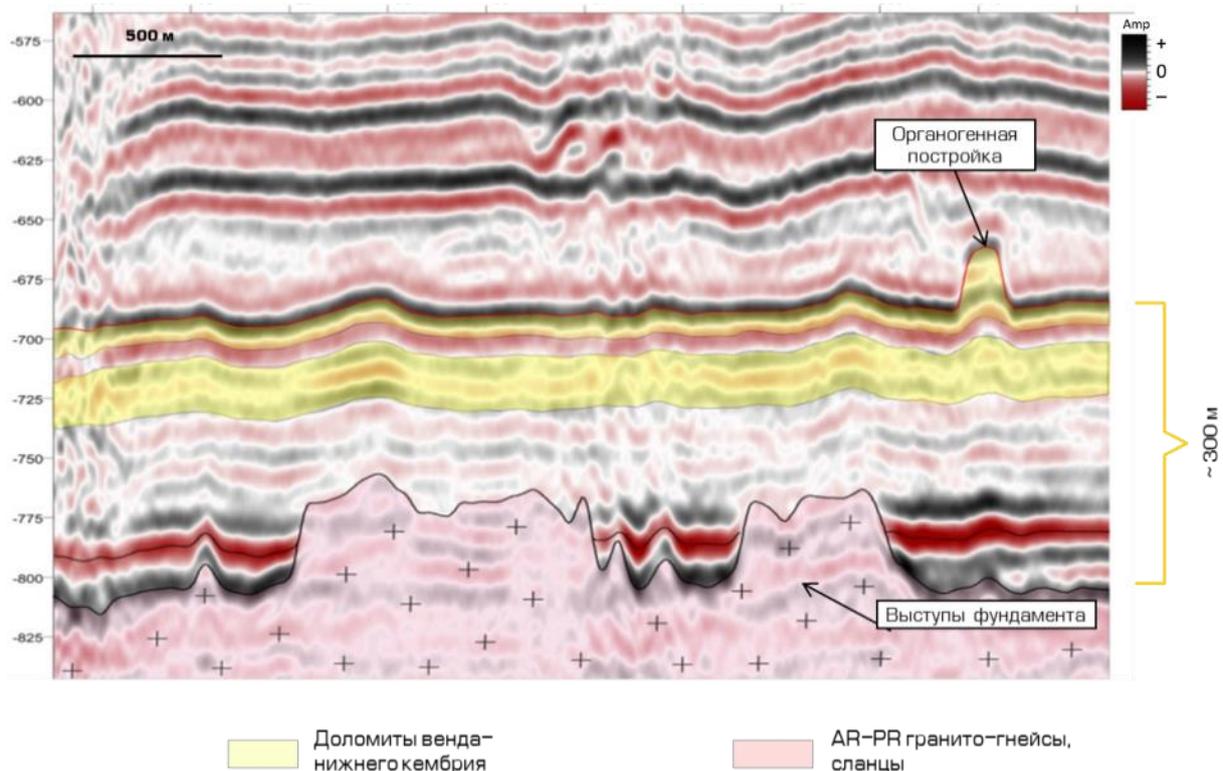


Рисунок 1.2.7. Проявление перспективных объектов Восточной Сибири на данных сейсморазведки

Ловушки, приуроченные к выступам фундамента

Выступы фундамента представляют собой ограниченные по размерам участки платформы, в которых складчатый фундамент залегает на относительно небольшой глубине или выходит непосредственно на поверхность вследствие тектонических и эрозионных процессов (рисунок 1.2.8). Продуктивный горизонт в зонах над выступами характеризуется антиклинальным вздыманием вследствие дифференциального уплотнения пород за пределами зоны выступа, а также обладает повышенными ФЭС.

Для появления такого выступа должна формироваться структура, как на уровне фундамента, так и на уровне вышележащих горизонтов, вплоть до кровли карбонатов (осинский горизонт). При идентификации объектов такого типа изучению подвергается кровля фундамента

(Ф) и ботубинский горизонт (Бт). При этом большая структура по Ф формирует структуру меньшей амплитуды на уровне Бт.

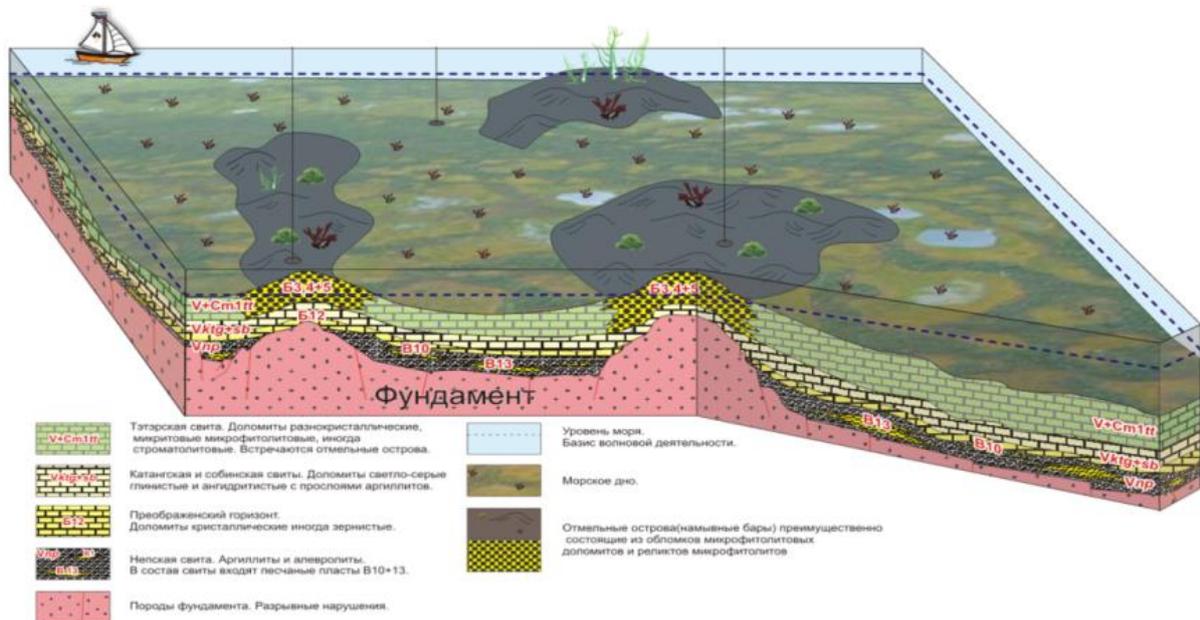


Рисунок 1.2.8. Принципиальная схема формирования отложений усть-кутского горизонта. (Гайдук и др., 2016)

По проявлению в Бт горизонте выступы делятся на две категории:

1. «Лысый выступ» – отражение от Бт фактически отсутствует и на разрезе видна акустически блеклая граница карбонатов с породами фундамента.
2. «Нелысый выступ» – отражение от Бт формируется в обычном формате, тогда признаком становится структурный фактор Ф и Бт.

Исходные данные высокого качества и корректно подобранный граф обработки позволяют выделить «стенки выступа» (рисунок 1.2.9), что также является диагностическим признаком и позволяет более качественно оценить перспективность рассматриваемого объекта.

Выявлять выступы в плане можно как по карте изохрон, так и в атрибутном поле, что полезно в случае «лысых» выступов при разделении их на лысую и полную часть (рисунок 1.2.10).

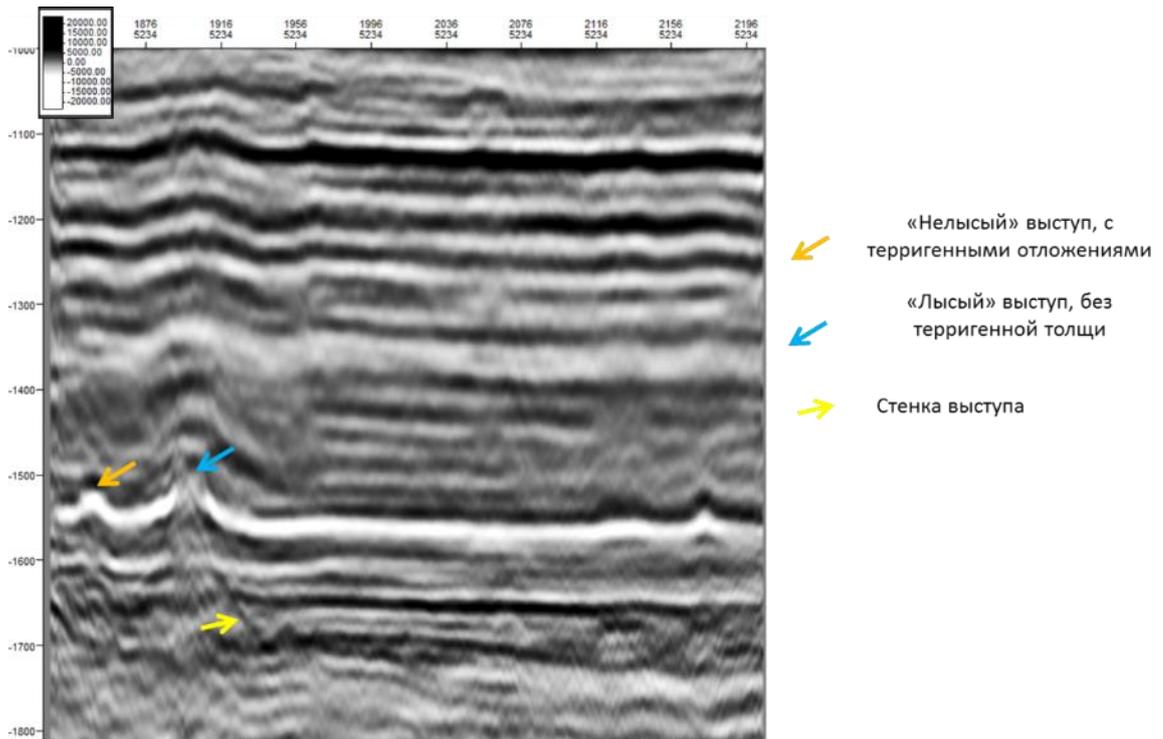


Рисунок 1.2.9. Пример проявления аномалии «выступ фундамента» на глубинном сейсмическом разрезе

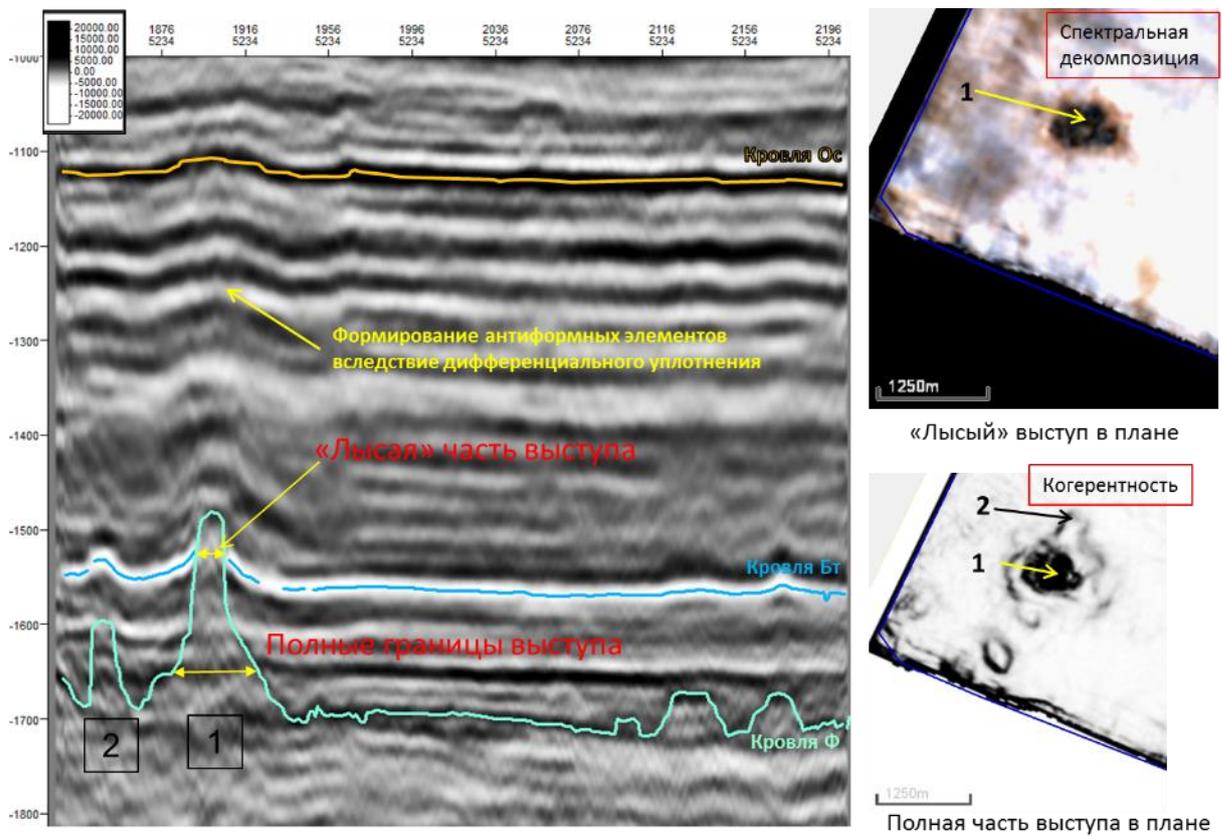


Рисунок 1.2.10. Пример проявления аномалии «выступ фундамента» с корреляцией опорных горизонтов на глубинном сейсмическом разрезе и на срезе атрибутов спектральной декомпозиции и когерентности

Ловушки, приуроченные к рифовым постройкам

Рифовые постройки формируются в прибрежных морских условиях. Наличие подъема и неровностей на дне, а значит, и близость к солнечному свету, делают данные условия более благоприятными для обитания морских организмов (рисунок 1.2.11).

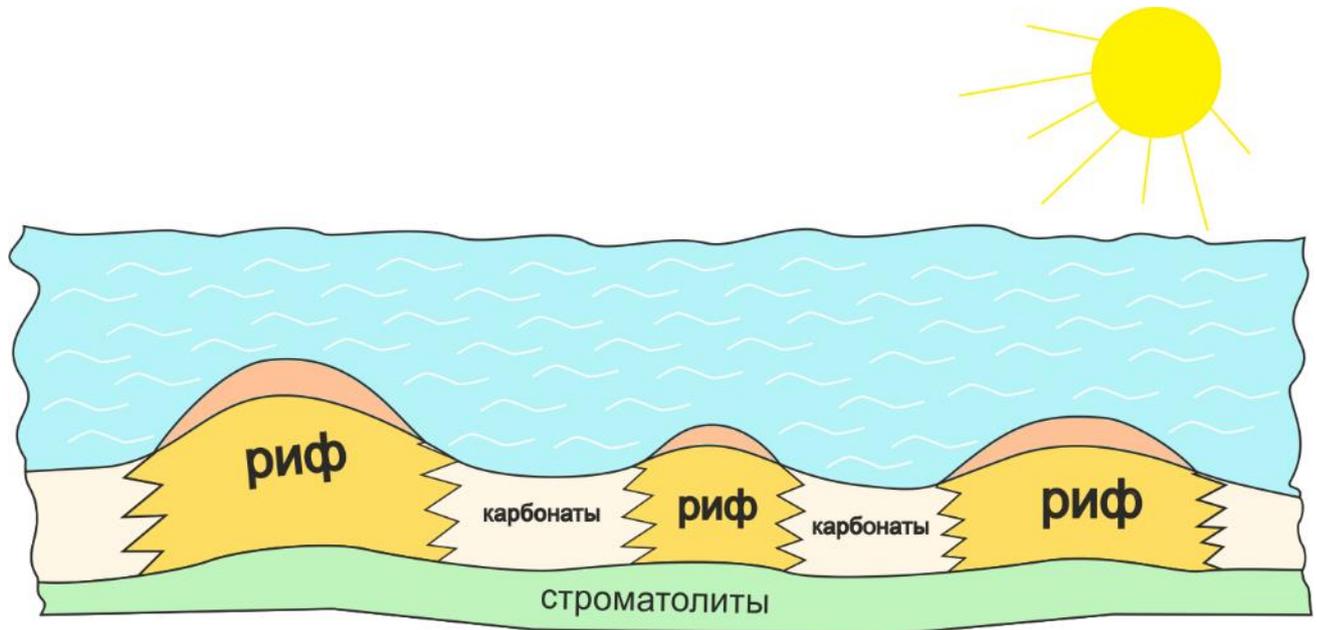


Рисунок 1.2.11. Образование рифовых построек

Характерными признаками органогенный построек на сейсмограммах считаются:

- наличие вблизи от поверхности рифа структуры типа облегаания, (является результатом дифференциального уплотнения осадков, залегающих над рифом);
- ухудшение или полная потеря корреляции отражающих горизонтов в зоне перехода от нерифового к рифовому геологическому разрезу;
- воздымание отражающих горизонтов по направлению склонов рифа с угловым несогласием;
- наличие суммарной дифрагированной волны на немигрированном разрезе;
- потеря корреляции отражающих горизонтов на участках, расположенных под рифовой постройкой;
- аномальное увеличение скорости сейсмических волн, связанное с изменениями физических свойств пород при переходе от нерифового разреза к рифовому (связано с процессами уплотнения, доломитизации);
- увеличение мощности над рифовой зоны (иногда превышает в несколько раз мощность самого рифа);

- наличие антиклинальных поднятий ниже подошвы рифа, обусловленное аномальными значениями скоростей в теле рифа;
- повышение частоты сигнала в интервале между надрифовыми и подрифовыми горизонтами.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОРРЕКЦИИ АНОМАЛИЙ ВЧР ²

Для восстановления структурного плана сейсмического разреза необходима детальная коррекция статическими и кинематическими поправками (Жданович и др., 1997; Сысоев, 2008; Сысоев, Янивец, 2004). В представленной главе рассмотрены теоретические основы и особенности ввода статических поправок по рассчитанным моделям ВЧР, а также основы технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов для дополнительной компенсации искажений, вызванных аномалиями в ВЧР (Емельянова и др., 2021, Емельянова К.Л. и др., 2022.).

2.1. Неоднородности ВЧР и их влияние на сейсмические данные

Сочетание в ВЧР разновозрастных рыхлых и консолидированных отложений, влияние процессов выветривания и денудации приводят к тому, что эта часть разреза является наиболее неоднородной как по вертикали, так и по горизонтали в большинстве районов сейсморазведочных работ.

Процессы, происходящие в приповерхностных отложениях, могут приводить к изменениям параметров ВЧР во времени, заметным при сейсморазведочных наблюдениях, особенно при мониторинге, а в некоторых случаях даже на пересечениях профилей в пределах одной съемки.

Геологические факторы, определяющие литологию и характер неоднородностей пород в ВЧР, многообразны и различны в зависимости от рассматриваемого региона. В приподнятых областях преобладающими являются процессы денудации и эрозии. В областях аккумуляции материала основную роль играют погребенный рельеф коренных пород, а также неоднородность покрывающих его наносов при сравнительно ровном рельефе. Наиболее сложными будут смешанные формы, когда местность с погребенным рельефом испытала подъем.

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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. Эффективность переобработки архивных данных 2Д сейсморазведки с использованием современных технологий // ГеоЕвразия-2018. С. 575–578. (0,28 п.л.)
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. RSCI. (0,5 п.л., авторский вклад 65%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,083

Быстрые изменения скоростей или мощностей поверхностных слоев связаны с молодыми отложениями. Поскольку они неконсолидированы, различия в литологии проявляются сильнее, чем в уплотненных породах. Примерами могут быть болотистые местности (особенно при наличии болотного газа), линзы аллювия или русла потоков в устьях больших рек, лессы, ледниковые морены. Также в большей степени молодые отложения подвержены и процессам выветривания.

В некоторых районах большую роль играют эффузивные и интрузивные образования в ВЧР (например, траппы в Восточной Сибири), а также отложения продуктов вулканической деятельности.

Рассматривая многообразие структур ВЧР, влияющих на регистрируемое сейсмическое поле, можно выделить основные искажающие эффекты:

- 1) поглощение и рассеяние энергии,
- 2) формирование поверхностных помех,
- 3) влияние на поле кратных волн,
- 4) влияние на формирование возбуждаемого источником импульса,
- 5) частотная фильтрация отраженных волн при возбуждении и приеме
- 6) искажение поляризации колебаний.

Во временных задержках, вызываемых ВЧР, с точки зрения вызываемых искажений главную роль играет переменная составляющая. Срезы амплитуд на одинаковых временах вдоль профиля или графики временных задержек, вызываемых ВЧР, могут быть представлены набором пространственных частотных компонент, при этом длина периода рассматривается обычно относительно длины расстановки, так как от нее зависит возможность их обнаружения и учета.

Частотные составляющие временных задержек обычно делят на три диапазона: короткопериодные (или высокочастотные) - КП, среднепериодные (среднечастотные) - СП и длиннопериодные (низкочастотные) - ДП, различающиеся по своему влиянию на качество сейсмических материалов. Границы диапазонов достаточно условны: КП – с длиной волны до 0,25-0,5 длины расстановки, СП - от 0,25-0,5 до 1,5-2, ДП - свыше двух расстановок. При этом фактическая длина расстановки зависит от времени отражения в связи с изменением времени вступлений и зоны мьютинга с удалением. Поэтому одна и та же аномалия может быть короткопериодной по глубокому горизонту и средне- или длиннопериодной по отношению к отражению на малых временах.

На рисунке 2.1.1 приведен разрез равных удалений по профилю с наличием поверхностных неоднородностей. Интенсивные колебания на времени 0,6-1с с увеличением до 1,8-2,3с на низкоскоростной неоднородности соответствуют поверхностной волне. Изменения

скорости и интенсивности поверхностной волны могут служить одним из признаков при выделении зон неоднородностей.

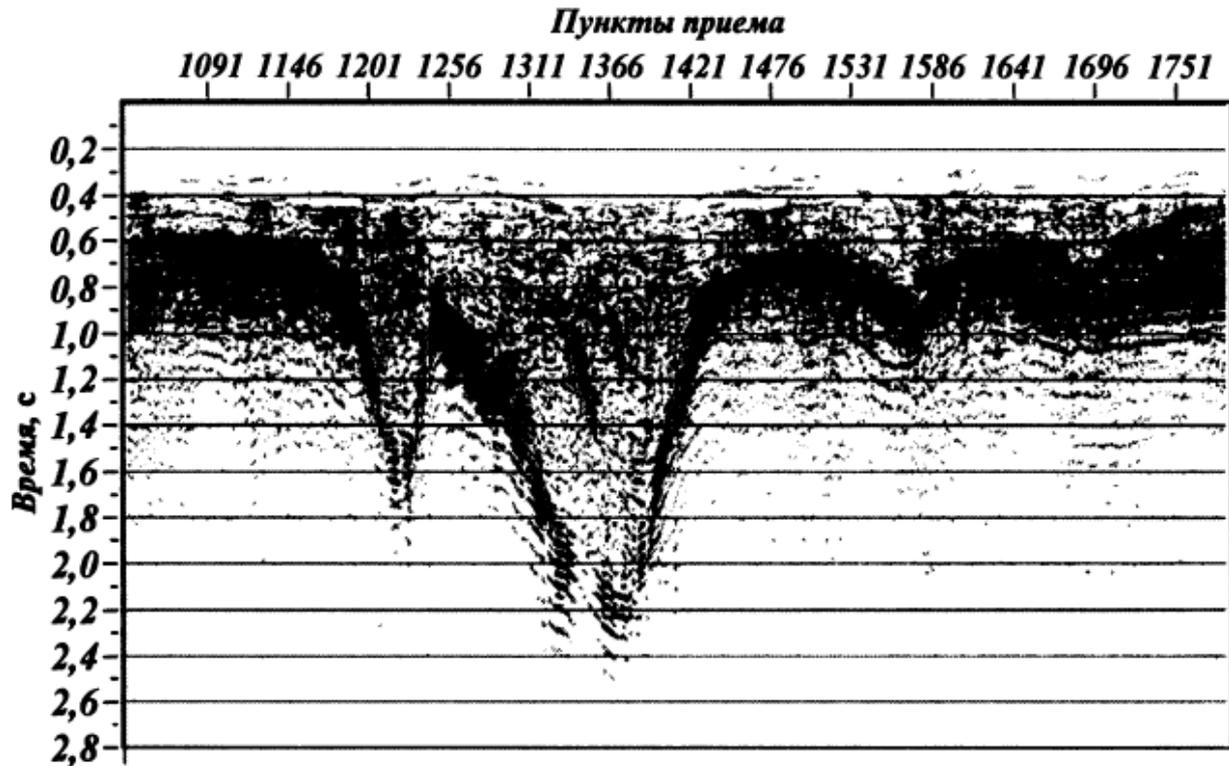


Рисунок 2.1.1. Временной разрез равных удалений по профилю с наличием низкоскоростных неоднородностей вблизи поверхности (по Козыреву, 2003).

Далее будет описано влияние различных составляющих временных сдвигов, вызываемых ВЧР.

Короткопериодные аномалии влияют на качество сейсмических материалов, вызывая:

1. Ослабление сигнала группами источников и приемников. В районах резко неоднородной ВЧР нередки случаи, когда изменения задержек на базе группирования превышают полпериода колебаний. Направленность группирования теряется при наличии случайных сдвигов, среднеквадратический разброс которых приближается к $0,3 T$, где T - видимый период колебаний; группирование становится неэффективным. Ослабление помехи возможно лишь за счет статистического усреднения, но одновременно с этим искажается и полезный сигнал.

2. Ухудшение результатов суммирования трасс в подборках по ОСТ. В зависимости от разброса времен могут происходить искажения динамических характеристик отражений, полное разрушение отражающих горизонтов и формирование ложных осей синфазности. Вследствие изменения числа суммируемых каналов в зоне мьютинга искажения могут по-разному проявиться на отражениях на разных временах.

3. Ухудшение качества скоростного анализа. Спектр скоростей становится более расплывчатым.

4. Снижение эффективности процедур обработки, особенно до суммирования по ОСТ. Влияние короткопериодных аномалий на времена отражений на разрезах обычно невелико, поскольку невелика и их средняя величина в пределах подборок трасс ОСТ. Однако это влияние может проявиться на малых временах, где кратность суммирования низка.

В среднепериодном диапазоне сдвиги приводят к искажению скоростей суммирования и времен горизонтов на результативных разрезах.

1. Искажение времен отражений на разрезах ОСТ соответствует средней величине сдвигов на суммируемых каналах. При протяженности аномалии, соизмеримой с длиной расстановки и более, проявляющейся одинаково на пунктах возбуждения и приема, максимальное смещение времен приближается к удвоенной величине аномалии.

2. Времена отражений на разрезах зависят от диапазона удалений, что вызывает различие частично-кратных сумм.

3. Протяженность аномалии на разрезах растягивается на величину порядка максимального удаления источник - приемник. Аномалия типа ступени нередко отражается на разрезах двумя ступенями.

4. Статистические сдвиги вызывают ложные аномалии скоростей суммирования, характеризующиеся сочетанием экстремумов разного знака и зависящие от диапазона удалений, глубины границ, соотношения протяженности неоднородности с длиной расстановки.

5. Форма аномалий, как на разрезах, так и в поле скоростей суммирования зависит от времени в соответствии с изменением эффективной длины расстановки, обусловленным мьютингом.

6. Среднепериодные аномалии могут ухудшать результаты процедур обработки.

Длиннопериодные компоненты не сказываются на качестве суммирования, однако недоучет длиннопериодных составляющей может оказать влияние на геометрию крупных структур в разрезе.

Далее приведены примеры влияния некоторых вышеперечисленных факторов на сейсмические данные.

На рисунке 2.1.2 приведены результаты суммирования по общим средним точкам на модельном профиле, содержащем высокоскоростную и низкоскоростную поверхностные аномалии протяженностью в четверть длины расстановки. Временные разрезы получены по

ближней и дальней половинам диапазона удалений. Поскольку в подборки трасс одинаковых ОСТ на этих разрезах входят наборы трасс, не перекрывающиеся по поверхностным позициям, проявление аномалий существенно различается, что может служить диагностическим признаком при их выделении. Протяженность зон влияния аномалий больше на разрезе по дальним каналам, а временные сдвиги в средней части аномалий - по ближним.

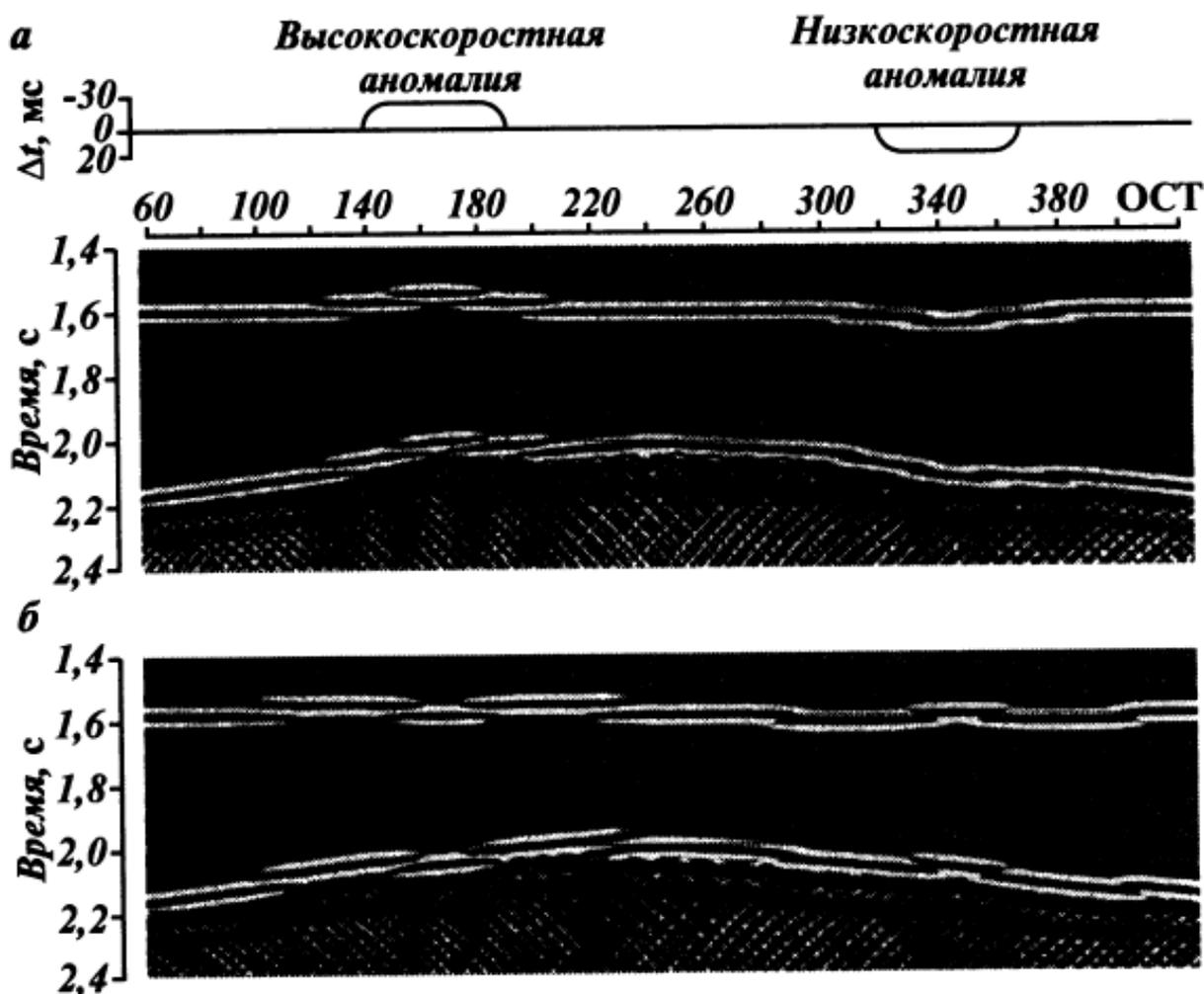


Рисунок 2.1.2. Частично-кратные разрезы ОСТ по модельному профилю с высокоскоростной и низкоскоростной поверхностными аномалиями, полученные в диапазонах удалений 0-1200 м. (по Козыреву, 2003)

Поскольку аномалии в модели имели трапецевидную форму, на разрезе по ближним каналам можно наблюдать две ступени. Первая соответствует положению расстановки, когда на половине суммируемых каналов либо источник, либо приемник выходят в зону неоднородности. Вторая ступень проявляется тогда, когда для половины суммируемых каналов и источник, и приемник пересекли ее границу.

Аналогичные разрезы ОСТ по ближним и дальним каналам на реальном профиле даны на рисунке 2.1.3 а. Протяженность аномалии на разрезе по ближним каналам близка к

действительной, амплитуда завышена почти вдвое. При автоматической коррекции статических поправок (рисунок 2.1.3 б) формируются ложные оси синфазности.

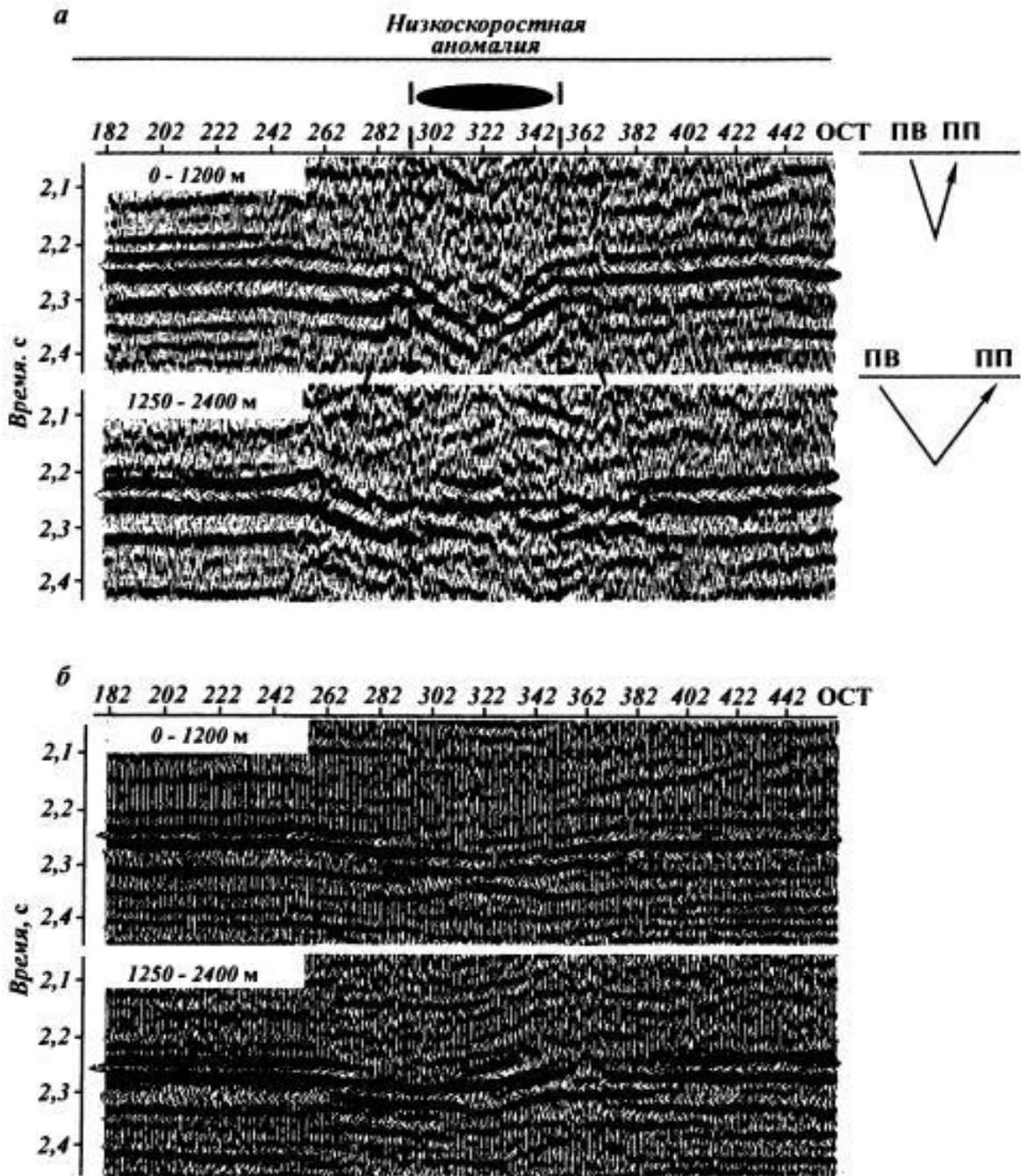


Рисунок 2.1.3. Частично-кратные разрезы ОГТ в ближнем и дальнем диапазонах удалений на участке с наличием низкоскоростной неоднородности в мерзлоте после введения априорных статических поправок (а) и после автоматической коррекции (б). (по Козыреву, 2003)

На рисунке 2.1.4 на модельных данных показано изменение формы аномалии на разрезе ОГТ по мере увеличения эффективной длины расстановки, что может иллюстрировать влияние мьютинга. Диапазон суммирования изменяется от четверти до полной длины расстановки, протяженность неоднородности составляет примерно половину максимального удаления

источник - приемник. По мере увеличения длины расстановки со временем в зоне мьютинга протяженность аномалии на разрезе ОГТ увеличивается, длина участка с удвоенной амплитудой аномалии падает. Четко этот участок проявляется только на разрезах рисунке 2.4 а и б. Аномалия на разрезе в каждом случае превышает длину неоднородности на величину, несколько меньшую максимального удаления в диапазоне суммирования.

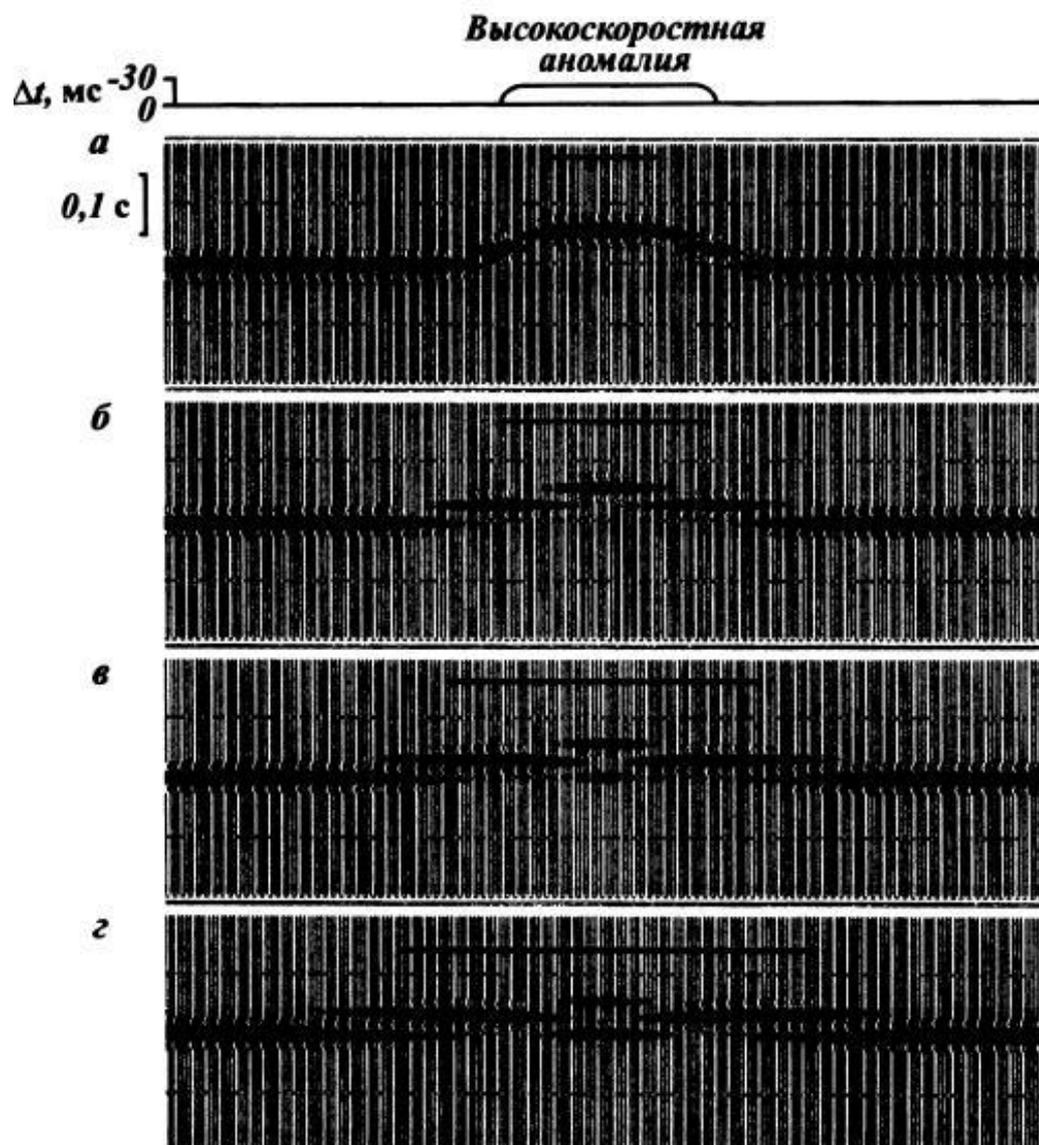


Рисунок 2.1.4. Зависимость формы аномалии на разрезах ОСТ от эффективной длины расстановки. На разрезах чертой помечена длина расстановки долей от максимального удаления: а – 0,25, б – 0,5, в – 0,75, г – 1 (по Козыреву, 2003)

Для снижения влияния приповерхностных неоднородностей необходимо построение скоростной модели ВЧР для расчета необходимых поправок, компенсирующих влияние неоднородностей (Емельянова, 2017).

Статические поправки делятся на два типа: априорные и остаточные. Априорные статические поправки рассчитываются по скоростной модели ВЧР и вводятся в данные единожды (компенсируют длинно- и среднепериодные аномалии). Остаточные статические поправки рассчитываются при помощи алгоритмов, основанных на корреляционных зависимостях, ввод таких поправок выполняется в несколько итераций на различных этапах обработки (такие поправки компенсируют средне- и короткопериодные аномалии) (Емельянова, 2019).

2.2. Построение модели верхней части разреза для расчета априорных статических поправок

В настоящем разделе описаны теоретические основы всех опробованных методик моделирования ВЧР с целью последующего расчета априорных статических поправок (Козырев и др., 2003; Сысоев, 2011; Твердохлебов и др., 2017, 2018; Романченко и др., 2016). Результаты расчета поправок рассмотренными методиками на примерах реальных данных будут приведены в следующей главе (Емельянова и др., 2022).

2.2.1. Рефракторная модель

Для построения рефракторной модели необходимо четкое прослеживание первых вступлений на каждой сейсмограмме ОПВ (рисунок 2.2.1.), такие волны несут в себе информацию о скоростях и глубинах залегания слоев в ВЧР. В результате анализа прослеженных времен первых вступлений преломленных волн выполняется рефракторный анализ: интерактивно задаются интервалы удалений, соответствующие регистрации преломленных волн от границ в ВЧР. Как правило, рефракторов от 1 до 3, границы их определяются по изменению угла наклона годографа первых вступлений (Горелик, Сысоев, 2015). По полученным данным рассчитываются интервальная и эффективная скорости (рисунок 2.2.2) (Archer, Heathcote, 1985; Reinado, 1996). «Скоростные и глубинные характеристики, полученные на предыдущем этапе, используются в качестве входной информации для формирования и решения системы уравнений относительно временных задержек для каждого ПП и ПВ. Рассчитанные таким образом задержки являются основой для построения глубинно-скоростной модели верхней части разреза» (Yilmaz, Doherty, 2001; Yilmaz, 1986)

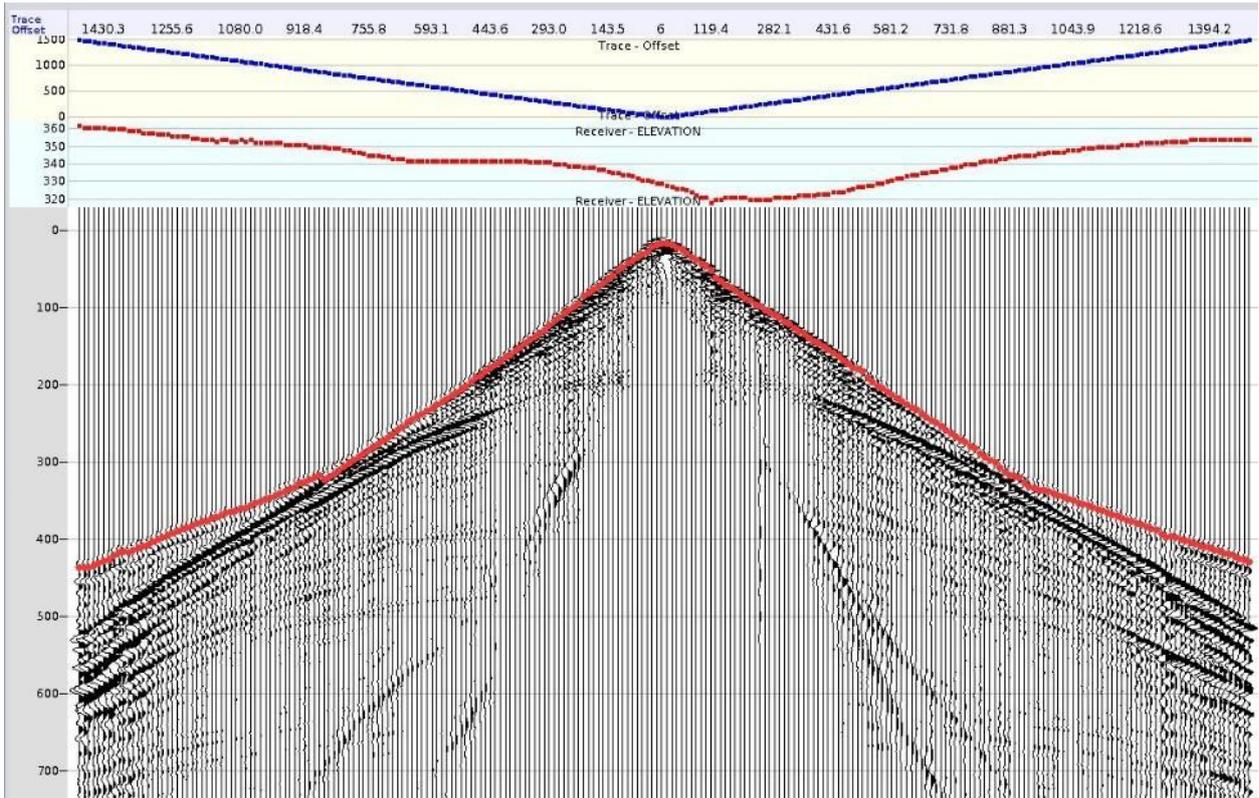


Рисунок 2.2.1. Пример прослеживания первых вступлений на сейсмограмме ОПВ

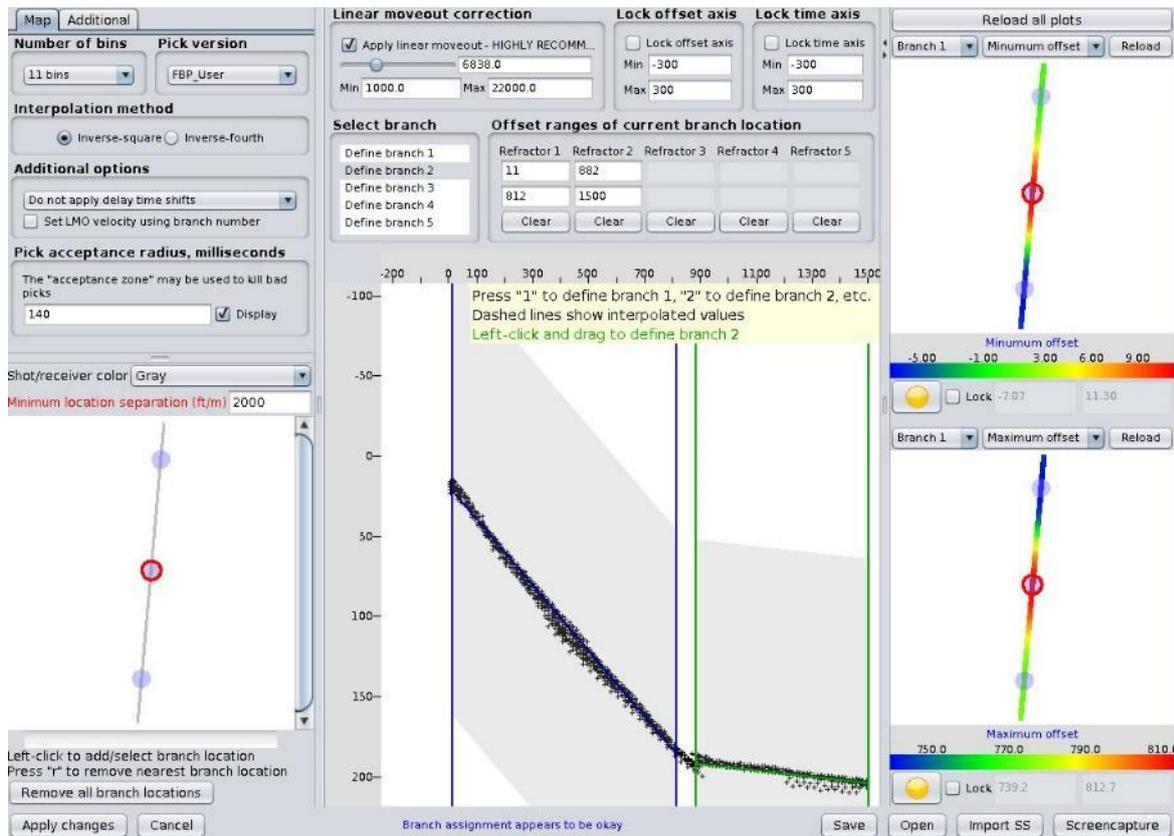


Рисунок 2.2.2. Задание априорной модели ВЧР

Контроль качества полученной корреляции первых вступлений выполнялся следующим образом:

- визуальная оценка с введением в сейсмограммы ОПВ линейных кинематических и временных (delaytime) задержек;
- уточнение корреляции первых вступлений после ввода линейных кинематических и временных задержек;
- получение гистограммы распределения средней ошибки пиков первых вступлений относительно рассчитанных теоретических времен первых вступлений.

Полученная глубинно-скоростная модель ВЧР является основой для расчета априорных статических поправок. Скорости и глубины залегания горизонтов в ВЧР дают информацию для расчета поправок, ввод которых позволяет привести трассы к заданному уровню через последующее замещение области между рельефом и уровнем приведения постоянной скоростью. Общая статическая поправка, вводимая в трассу, есть сумма поправок за ПП и ПВ для данной трассы (при совмещенных ПП и ПВ поправки соответственно равны по величине). Расчет поправки для каждой выбранной точки проводится по формуле (ф.1) (Yilmaz, 2001; Shearer, 2009):

$$t_{\text{стат}} = -T_{\text{змс}} - \sum_{i=0}^n T_i + T_{\text{ур}} \quad (1)$$

$$T_{\text{змс}} = \frac{H_{\text{рел}} - H_{\text{змс}}}{V_{\text{змс}}}; \quad (2)$$

$$T_i = \frac{H_{i-1} - H_i}{V_i}; \quad (3)$$

$$T_{\text{ур}} = \frac{H_{\text{рел}} - H_{\text{ур}}}{V_{\text{зам}}}. \quad (4)$$

Здесь:

$T_{\text{змс}}$ – временной интервал от поверхности до подошвы ЗМС;

$H_{\text{рел}}$ – уровень линии наблюдения;

$H_{\text{змс}}$ – глубина до подошвы ЗМС;

$V_{\text{змс}}$ – скорость ЗМС;

T_i – временной интервал от кровли до подошвы i -го слоя;

H_i –глубина до i -го слоя, при $i=1$ величина $H_{i-1} = H_{\text{змс}}$;

V_i – скорость i -го слоя;

$T_{\text{ур}}$ – временной интервал от уровня рельефа до уровня приведения при замещении постоянной скоростью $V_{\text{зам}}$;

$H_{\text{ур}}$ – уровень приведения;

$V_{\text{зам}}$ – скорость замещения;

n – количество слоев в модели (обычно не более 2 ниже ЗМС).

2.2.2. Томографическая модель

Для построения томографической модели требуются ровно такие же входные данные, какие используются для построения рефракторной модели, а именно, пикировки волн в первых вступлениях, дополнительно необходимо задать стартовую скоростную модель для запуска расчета.

Для повышения достоверности полученного результата согласно этой технологии необходимо наличие минимальных удалений, информация с которых позволяет учитывать характеристики зоны малых скоростей (ЗМС).

В основе алгоритма расчета скоростной модели используемого ПО Flatirons лежит лучевая сейсмическая томография. Уравнение эйконала связывает время прихода волны в заданную точку с распределением скорости P или S волны (ф.5-6):

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{v_p^2}; \quad (5)$$

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{v_s^2}. \quad (6)$$

Здесь:

$\nabla\tau$ – время прихода волны в заданную точку;

v_p – скорость пробега продольных волн;

v_s – скорость пробега поперечных волн.

Уравнение луча выводится из уравнения эйконала, с помощью него рассчитывается время пробега луча T_{ij} от i -го ПВ до j -го ПП. Далее рассмотрим элемент луча dl . Из описанного выше уравнения: $|\nabla\tau| = \frac{d\tau}{dl} = \frac{1}{v}$; $d\tau = \frac{dl}{v}$. Учтем, что медленность $s = 1/v$. Время пробега волны вдоль луча Γ_{ij} (ф.7):

$$T_{ij} = \int_{\Gamma_{ij}} \frac{dl}{v} = \int_{\Gamma_{ij}} s \cdot dl. \quad (7)$$

На основе уравнений эйконала и луча алгоритм решает задачу лучевой сейсмотомографии, т. е. рассчитывает поле времен и выполняет трассировку траекторий сейсмических лучей. На основе этих же уравнений решается и задача определения скоростных характеристик модели по зарегистрированным временам пробега лучей T_{ij} (Волчкова, Шишкина, 2021).

Процесс расчета скоростной модели реализуется следующим образом: задание стартовой модели, относительно которой программа будет рассчитывать теоретическое положение первых вступлений; расчет невязки реальных и модельных первых вступлений; корректировка исходной модели для минимизации невязки; запуск следующей итерации.

Контроль качества выполняется по оценке следующих характеристик:

- мониторинг невязки после каждой итерации или группы итераций (обычно контролируется каждый 10-ый расчет);
- мониторинг промежуточных результатов корректировки модели на предмет наличия артефактов, нереалистичных скоростных аномалий;
- мониторинг изменений, вносимых в модель на предыдущем шаге (рисунок 2.2.3.)

Цикл корректировки модели прерывается в случае, если а) достигнуто заданное количество итераций, б) достигнута заданная невязка.

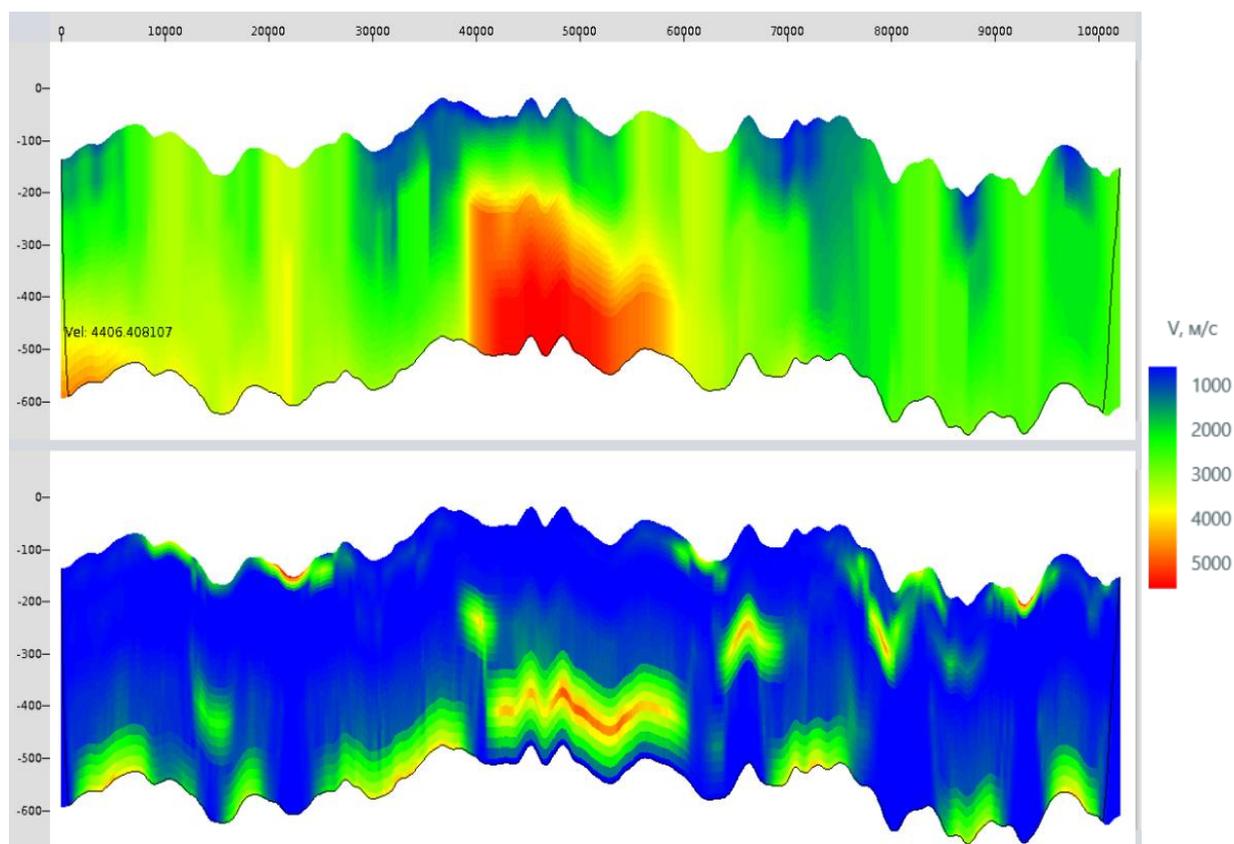


Рисунок 2.2.3. Процесс построения томографической модели. Верхний рисунок – модель, полученная по результатам 30 итераций. Нижний – разница между моделями, полученными после 20ой и 30ой итерацией.

2.2.3. Модель по результатам полно-волновой инверсии (FWI)

Полноволновая инверсия сейсмических данных “Full Waveform Inversion” или коротко FWI сейчас одно из наиболее популярных веяний в геофизическом сообществе и является одним из самых перспективных направлений развития обработки и интерпретации сейсмического сигнала. основополагающий вклад в развитие методики внесли Lailly (1983), Tarantola (1984), Mora (1988), технология активно развивается уже более 30 лет. Методика направлена на построение детальной модели среды на основе минимизации различия между рассчитанным (модельным) и зарегистрированным (реальным) сейсмическим полем и по реализации имеет схожие черты с сейсмической томографией.

FWI способен получить высокоточный, с разрешением до половины длины волны, многопараметрический разрез среды, содержащий информацию о скоростях продольных и поперечных волн, плотности, затухании и т.д. (Коробкин и др., 2020; Коробкин, 2021; Korobkin и др., 2018).

Международные компании находятся на разных стадиях развития метода и имеют различные практические реализации. Результаты по применению FWI на данных Восточной Сибири, представленные в настоящей работе, получены совместно с ИНГГ СО РАН и СЖЖ-Восток.

FWI для реальных сейсмических данных обычно использует в первую очередь рефрагированные волны (первые вступления), которые хорошо аппроксимируют поле скоростей в среде (НЧ компоненту) благодаря большим путям пробега. Однако это означает, что для использования необходимо, чтобы в среде был достаточно большой градиент изменения скоростей для их возникновения и распространения и в приемной расстановке должны быть большие удаления для их регистрации. Поэтому наиболее устойчивое решение FWI возможно до глубины $1/4-1/2$ от максимального удаления и зависит от скоростей в среде, а в частотном диапазоне обязательно должна быть сохранена низкочастотная составляющая. Для реализации метода необходимо наличие мощных вычислительных центров (мощнее, чем для реализации PSDM).

«С технической точки зрения работа алгоритма основана на решении волнового уравнения (ф.8):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 t}{\partial t^2} - \nabla^2 p = s, \quad (8)$$

где s – прилагаемая сила, p –давление (величины меняются в пространстве и времени); c –скорость (изменяется только в пространстве). Наиболее распространена реализация в акустическом приближении» (Коробкин, 2020).

Процесс построен на многоитеративном уточнении модели на различных частотах от максимально возможной низкой до максимально высокой. Работа алгоритма реализуется следующим образом:

- в качестве входных данных используются сейсмограммы ОПР после шумоподавления с сохранением информации о низких частотах, обычно используются рефрагированные волны;
- задается стартовая скоростная модель, по которой рассчитывается модельное волновое поле и сопоставляется с реальным (в качестве стартовой модели необходимо брать наиболее приближенную к реальности, например, томографическую) (рисунок 2.2.4.);
- выполняется расчет невязки модельных и реальных данных;
- исходная модель корректируется для минимизации невязки;
- запускается новый цикл: расчет синтетических данных, сопоставление с реальными, и т.д. до достижения необходимого результата

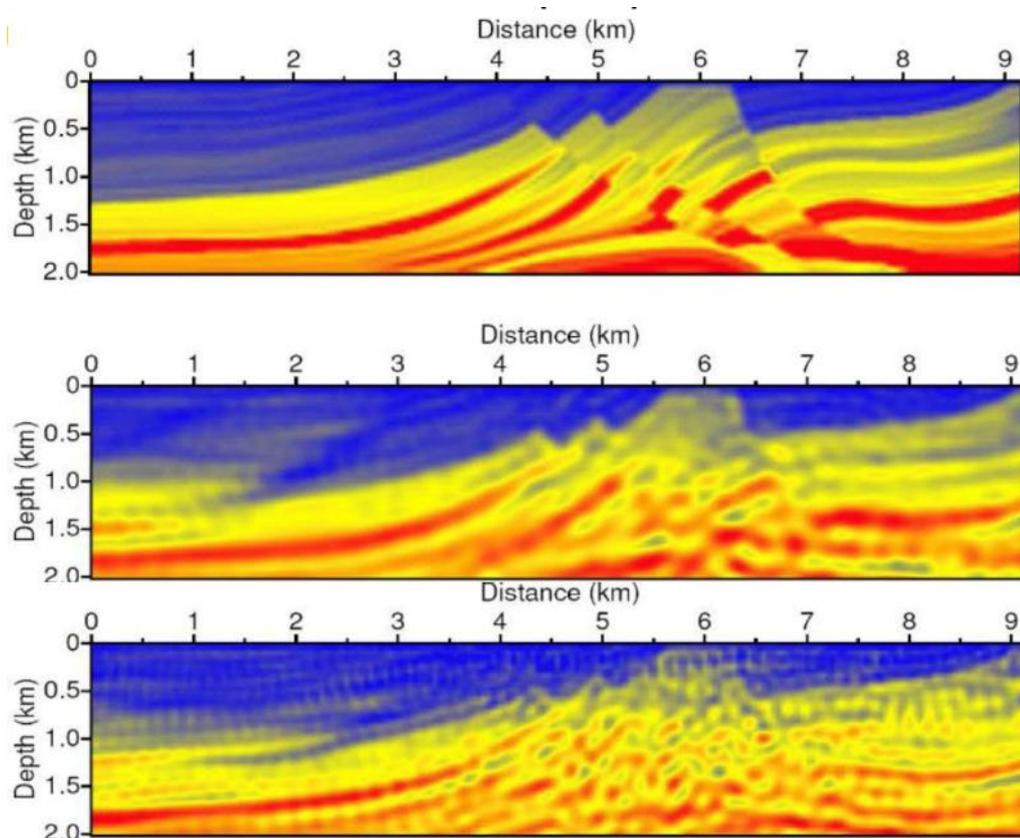


Рисунок 2.2.4. Сверху – истинная ГСМ, в центре – результат FWI с хорошей моделью на входе, внизу – результат FWI с плохой моделью на входе (много артефактов). Градиент цветов показывает изменение скорости: от синего к красному скорость возрастает.

Алгоритм работает с большим количеством итераций. На каждой итерации подбора модели среды выполняется конечно-разностное моделирование сейсмического поля (рисунок 2.2.5.). На расчет одной 2Д модели с приемлемой итоговой невязкой может потребоваться порядка нескольких недель, а на модель небольшого куба в 150 км^2 порядка нескольких месяцев (в зависимости от вычислительных мощностей, детальности и протяженности модели). Оценка практических результатов показывает, что технология позволяет работать с инверсией в скоростной модели (рисунок 2.2.4.). За неимением на сегодняшний день необходимого вычислительного аппарата в периметре компании ООО «РН-Эксплорейшн» все расчеты и тестирования выполнялись при помощи мощностей компании СЖЖ-Восток и ИНГГ СО РАН (Коробкин, 2020; Гадыльшин и др., 2021).

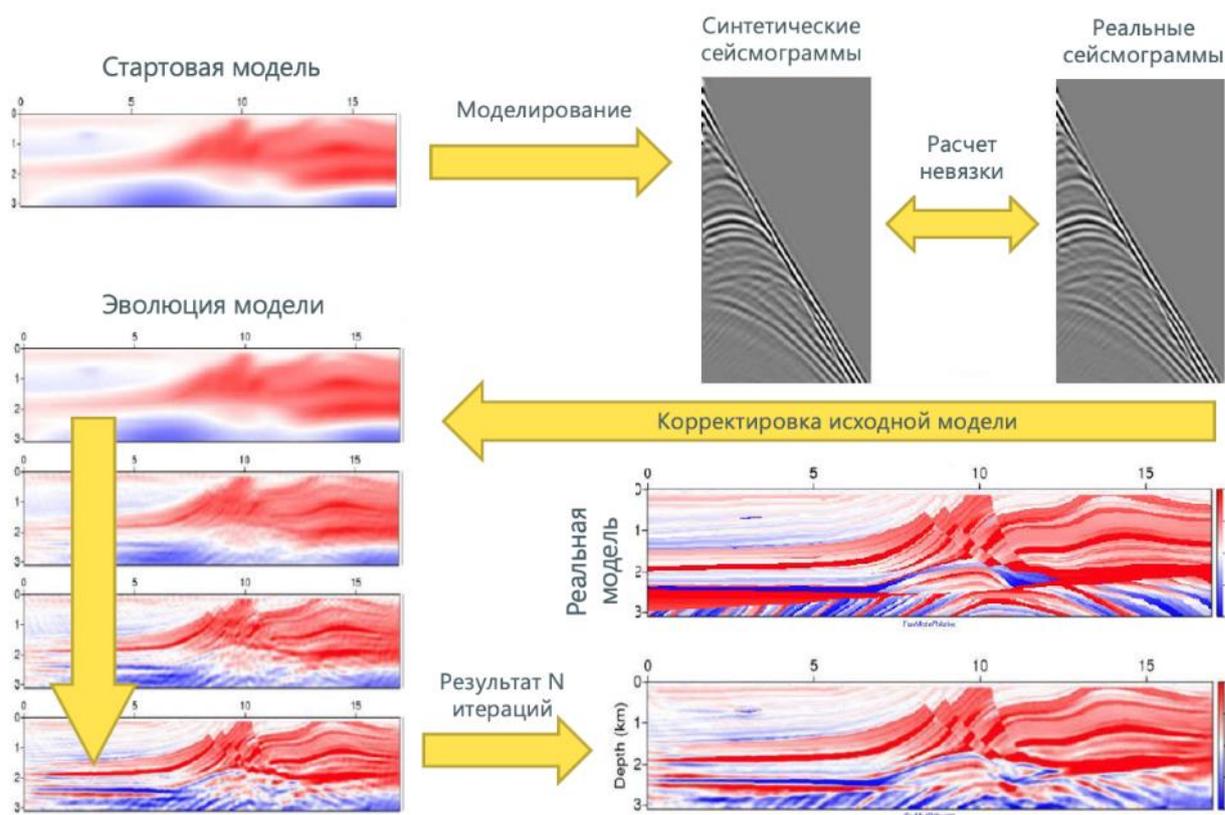


Рисунок 2.2.5. Схема работы алгоритма FWI

2.2.4. Модель по данным инверсии поверхностных волн (SWI)

Методика Surface Wave Inversion (также встречается под названием SWAMI –Surface Wave Analysis Modeling and Inversion) заключается в изучении дисперсии поверхностных волн по площади.

Поверхностные сейсмические волны образуются в результате взаимодействия S- и P-волн, либо затухающих с глубиной, либо распространяющихся субгоризонтально в верхней части

разреза за счет многократных отражений между поверхностью и границами раздела. Основной тип поверхностных волн в рамках рассмотрения описанной методики – волны Рэлея, состоящие из Р-волн и вертикально поляризованных S-волн. Отражение от свободной поверхности объединяет эти две волны в волну с обратным эллиптическим движением, амплитуда которого постепенно уменьшается с глубиной.

В отличие от стандартных методик обработки, SWI использует поверхностные волны не как помеху, а как полезный сигнал. В силу природы распространения волн такого типа, они несут в себе информацию о скоростном строении ВЧР: чем ниже частота волны, тем на большей глубине она распространяется и тем выше ее скорость. Поверхностные волны имеют на каждой частоте одну основную моду и несколько побочных, более высоких. В зарубежной литературе они упоминаются под названием «обертоны».

Благодаря явлению дисперсии скоростей поверхностные волны используются для исследования Земли: измеряя скорость волн с разными частотами (или, что то же самое, с разными длинами волн или глубинами проникновения), мы можем реконструировать глубинный профиль структуры, в которой они распространились. Глубинность модели возрастает с длиной волны, однако, использование больших длин волн ограничивает разрешение итоговой модели. Это означает, что поверхностные волны не дают четких изображений глубинных горизонтов, а скорее дают информацию о свойствах объема в данной области в заданном диапазоне глубин.

Поверхностные волны, как и любая дисперсионная волна, характеризуются двумя видами скоростей: групповая и фазовая. Групповая скорость — это скорость волнового пакета, и ее можно измерить делением расстояния от источника до приемника на время распространения волны. Поскольку поверхностные волны представляют собой длинные дисперсионные пакеты энергии, время распространения не так просто определить, если только волна не подвергается узкополосной фильтрации. Поэтому для измерения групповой скорости необходимо отфильтровать сейсмограмму вокруг заданной частоты f_0 и измерить время распространения, выбрав время прихода максимума огибающей отфильтрованного сигнала. Фазовая скорость — это скорость, которую можно увидеть, отслеживая максимумы трасс с узкополосной фильтрацией (или минимумы, или узлы, или любую точку в одном положении на синусоидальных трассах). Поскольку они связаны с фазой сигнала, их можно измерить путем преобразования Фурье сигнала в двух приемниках и преобразования их разности фаз $\Delta\varphi(f_0)$ в разность времени $\Delta t(f_0)$ (ф.9):

$$\Delta t(f_0) = \frac{\Delta\varphi(f_0)}{2\pi f_0}, \quad (9)$$

что дает фазовую скорость для расстояния d как (ф.10):

$$c(f_0) = \frac{d}{\Delta t(f_0)}. \quad (10)$$

Если два приемника удалены друг от друга более чем на одну длину волны, необходимо ввести соответствующее количество величин 2π в разность фаз. Групповая скорость $u(f_0)$ выражается из фазовой скорости как (Маурин, 2016) (ф.11):

$$\frac{1}{u(f_0)} = \frac{d}{df_0} \left(\frac{f_0}{c(f_0)} \right). \quad (11)$$

На практике алгоритм SWI реализуется следующим образом:

- Предварительная обработка данных для фокусирования на поверхностных волнах (рисунок 2.2.6.);
- Построение спектров в FK-области (построение спектров выполняется с помощью всех трасс, относящихся к выбранному пункту приема);
- Автоматическая пикировка дисперсионных кривых (рисунок 2.2.7.);
- Инверсия с получением скоростной модели S-волн;
- Переход от S- к P-волнам (для этого требуется скважинная информация или совместный анализ поверхностных и преломленных волн).

Максимальная глубина полученной модели зависит от рабочего диапазона частот сейсморазведки и обычно составляет около 150 м, чего достаточно для построения модели ВЧР (Korobkin и др., 2018).

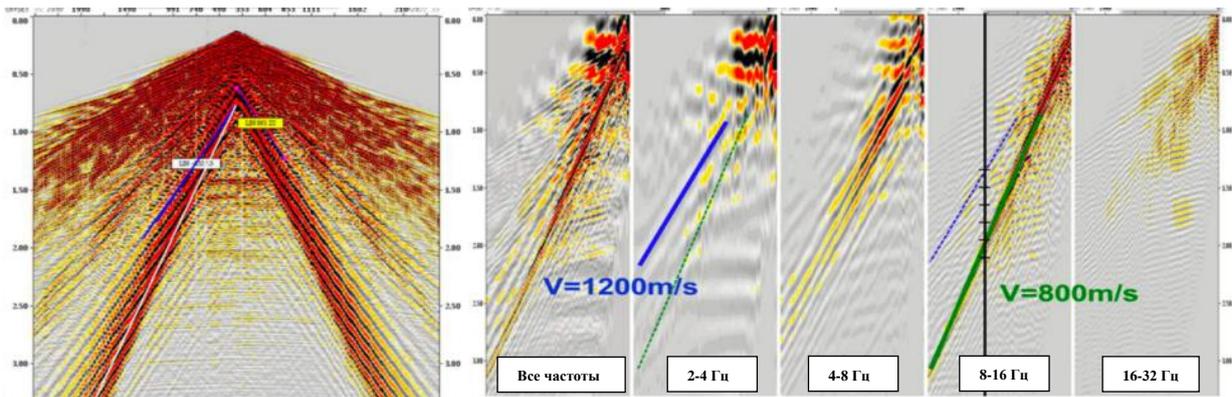


Рисунок 2.2.6. Скорости поверхностных волн на различных частотах (Korobkin и др., 2018)

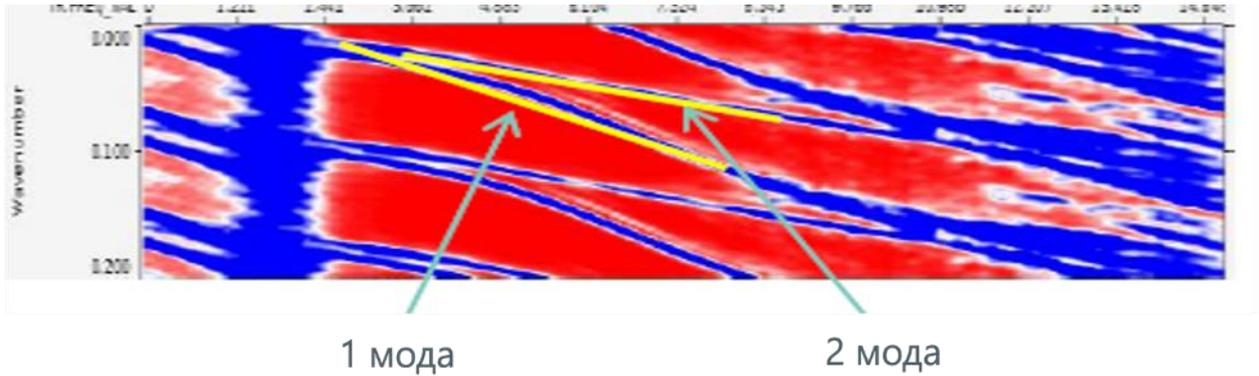


Рисунок 2.2.7. Моды на F-K спектре

Несмотря на то, что инверсия является одномерной, полученные модели с хорошей точностью могут аппроксимировать зону ВЧР, их можно использовать как в качестве основы для расчета априорных статических поправок.

2.2.5. Модель по результатам комплексирования геофизических методов

При работе в особо сложных условиях одних только данных сейсморазведки не всегда достаточно для построения наиболее приближенной к реальности модели ВЧР.

Каждый геофизический метод, данные которого получены с необходимой точностью, несет в себе информацию о характеристиках аномалообразующих объектов в силу определенного набора их свойств. Интрузивные тела обладают более высокими плотностями, намагниченностью и, как правило, более высокими удельными электрическими сопротивлениями (Шелухов, 2021, Чепиго, Лыгин, 2021, Булычев и др., 2010).

Для совместного применения различных методов геофизики с целью построения оптимальной скоростной модели ВЧР необходимо понимание теоретических связей между методами.

Уравнения скоростей продольных волн V_p (ф.12), поперечных волн V_s (ф.13), акустической жесткости Z (ф.14) связывают скорости с плотностями, где λ и μ – коэффициенты Ламэ:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; \quad (12)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \quad (13)$$

$$Z = V \cdot \rho. \quad (14)$$

Гравитационный (V) и магнитный (U) потенциалы связаны уравнением Пуассона (ф.15).

$$U = \frac{1}{G\rho} \frac{\delta V}{\delta \bar{r}} \quad (15)$$

Система уравнений Максвелла (ф.16) связывает электрическое и магнитное поля.

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0}; \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right); \end{aligned}$$

Здесь:

\vec{E} – векторное электрическое поле; (16)

ρ – суммарный заряд, заключенный внутри замкнутой поверхности;

\vec{B} – поток магнитного поля;

t – время;

μ – магнитная проницаемость;

j – удельное электрическое сопротивление;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость.

При анализе исходных данных необходимо установление *корреляционных связей*. Особое внимание уделяется зонам потери корреляции отражений на сейсмических разрезах и их связи с магнитными аномалиями. Если прямая связь устанавливается, то с высокой вероятностью можно считать, что причина низкой информативности сейсморазведки – магматические тела. Следующим этапом является проверка выраженности аномальных по магнитному полю и сейсморазведке зон в аномалиях гравитационного поля и геоэлектрических разрезах (Мостовой и др., 2021).

В зависимости от размера магматических тел, их глубины залегания, степени аномальности физических свойств (относительно вмещающих пород) эффективность проявления в потенциальных полях и разрезах УЭС оказывается различной. В частности, отсутствие аномалий гравитационного поля над предполагаемыми интрузивными телами может свидетельствовать о том, что тела находятся внутри или вблизи кровли комплексов близких по плотности (Фоменко, 2016).

Пример выявления корреляционных связей геофизических методов: в результате совместного анализа временного сейсмического разреза с поведением геофизических полей (рисунок 2.2.8) выявлена зависимость – в зоне отсутствия аномалий в ВЧР горизонты на сейсмическом разрезе видны четко, а поведение полей спокойно, без резких перепадов и выраженных аномалий; в зонах сложного строения ВЧР корреляция отражающих горизонтов нарушается, вместе с ней и характер полей становится беспокойным, выделяются аномалии и резкие перепады значений (Емельянова и др., 2021).

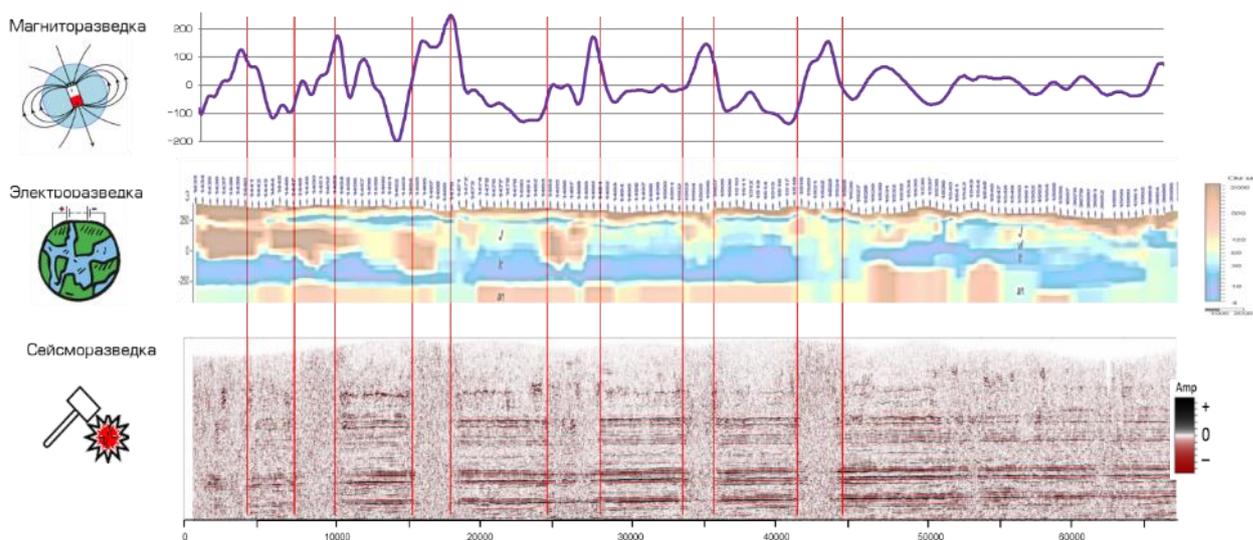


Рисунок 2.2.8. Корреляционные связи геофизических методов

Следует помнить, что каждый участок исследования имеет свои особенности и аспекты корреляционных зависимостей, например, на одном из ЛУ сопротивление в карбонатах выше, чем в долеритах. Учет этого фактора необходим для качественного выполнения комплексирования.

Технология применения комплексирования геофизических методов для уточнения модели ВЧР состоит из следующих этапов (Мостовой и др., 2021):

- Анализ сейсмических данных. Если исходные данные качества высокого, в применении комплексирования не будет необходимости.
- По данным сейсморазведки низкого качества выполняется построение модели ВЧР с локализацией неоднородностей по имеющимся исходным данным. В качестве исходной модели необходимо брать ту модель, по которой рассчитанные априорные статические поправки позволяют добиться наилучшей корреляции отражающих горизонтов (выбирать метод построения модели рекомендуется из перечисленных ранее в этой главе).

- Анализ чувствительности несейсмических методов к неоднородностям в ВЧР с учетом некоторой вариативности свойств аномальных тел в ВЧР в зависимости от рассматриваемого участка.
- Построение глубинно-скоростной модели с учетом имеющейся информации. Первичный анализ основывается на данных магниторазведки, в которых наиболее явно выделяются магматические образования (для этого может быть достаточно априорной региональной геофизической информации – рисунок 1.1.5, 1.2.4). Только этот геофизический метод позволяет быстро и с относительно небольшими затратами получить информацию о площадном распространении интрузивов в ВЧР. Применение современных компьютерных средств обработки данных позволяет выделить из архивных аналоговых записей высокочастотную составляющую аномального магнитного поля. В ходе качественного ее анализа локализуются области распространения магнитных объектов. По результатам анализа выполняется оконтуривание аномальных тел и подбор скоростей по данным потенциальных методов (аномальное поведение полей), далее результат уточняется по данным электроразведки (зоны повышенного сопротивления). Для контроля качества полученной модели рассчитываются модельные поля от полученной модели и сопоставляются с реальными данными. Корректировка параметров аномальных тел в ВЧР выполняется до тех пор, пока не будет достигнуто соответствие полей. Также необходимо принимать во внимание данные ГИС (при наличии) и сведения о геологии района (для понимания возможных параметров аномальных тел, характерных для изучаемого региона).
- По полученной уточненной модели ВЧР рассчитываются априорные статические поправки, вводятся в данные, далее оценивается качество результата. При неоптимальном качестве проводится корректировка контуров/характеристик аномальных тел

В результате тестирования различных модельных и реальных данных по участкам, располагающимся в наиболее осложненных аномалиями ВЧР зонах, была выведена статистика по свойствам интрузивных тел и вмещающих пород (таблица 1), требования к исходным геофизическим данным для эффективного уточнения аномальных объектов в ВЧР (таблица 2), а также соответствие геофизических методов элементам аномалообразующих тел, которые можно определить с применением конкретного метода (таблица 3) (Емельянова и др., 2021; Молчанов и др., 2021; Мостовой и др., 2021).

Таблица 1. Свойства интрузивных тел и вмещающих пород для условий Восточной Сибири

Петрофизические свойства	Интрузивные тела	Вмещающая среда
Скорость V_p , м/с	5000 - 6500	1500 - 3500
Плотность, г/см ³	2,7 - 3,1	1,9 - 2,7
УЭС, Ом*м	более 1200	менее 100
Магнитная восприимчивость, ед	50 - 500	$n*1 - n*10$

Таблица 2. Требования к данным геофизических методов

Карты аномальных полей	Масштаб от 1:200 000 и крупнее
Гравиметрические съемки	Погрешность менее $\pm 0,25$ мГал
Магнитометрические съемки	Погрешность менее ± 3 нТл
Электроразведочные работы	Регулярная сеть, шаг менее 500 м по профилю

Таблица 3. Определение элементов интрузивного тела по данным геофизических методов

	Сейсморазведка	Электроразведка	Гравирозведка	Магниторазведка
Кровля	+	+		+
Подшва		+	+	
Скорость	+			

2.3. Коррекция остаточных кинематических сдвигов

Кинематические поправки позволяют спрямлять оси синфазности, учитывая разности времени прихода волны, отраженной от сейсмической границы по косому и нормальному лучам, согласно заданному скоростному закону. В некоторых случаях ввода кинематических поправок в чистом виде недостаточно для учета разности времен прихода сигнала на приемники с различными удалениями в силу присутствия серьезных аномалий в ВЧР, компенсацию влияния которых невозможно выполнить только лишь вводом статических поправок на предыдущем этапе (Козырев, Королев, 1994). Ни статические, ни кинематические поправки в стандартном

цикле обработки не способны компенсировать негиперболичность годографа, причиной которой становятся аномалии в ВЧР.

Для улучшения корреляции отражений на суммарных разрезах, компенсации ложных подтяжек горизонтов, вызванных аномальными высокоскоростными телами в ВЧР, и повышения вероятности последующего обнаружения перспективных объектов в зоне поиска необходимо полное спрямление годографов ОГТ отражённых волн (Черняк, Гриценко, 2009; Давлетханов, Силаенков, 2016). Для наиболее оптимального спрямления годографов, доучета средне- и длиннопериодных аномалий и последующего эффективного суммирования предлагается к рассмотрению метод коррекции остаточных кинематических сдвигов.

На рисунок 2.3.1. показано теоретическое положение горизонтальных спектров в левой части. При ровном положении границы (рисунок 2.3.1-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 (рисунок 2.3.1 - б, в). При наличии неоднородности в ВЧР в зоне под аномалией будут наблюдаться искажения геометрии границ (рисунок 2.3.1-г), однако, в силу особенностей методики сейсмической съемки (например, слишком редкий шаг по профилю) и описанных в предыдущем разделе причин – корреляция в ВЧР может быть нарушена (рисунок 2.3.1-д). Как следствие – весьма проблематично установить причину, вызвавшую искривления: это аномалия в ВЧР подтягивает горизонты ниже или таково естественное положение границ.

Для 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 (Емельянова, 2021; Карандашов, 2020).

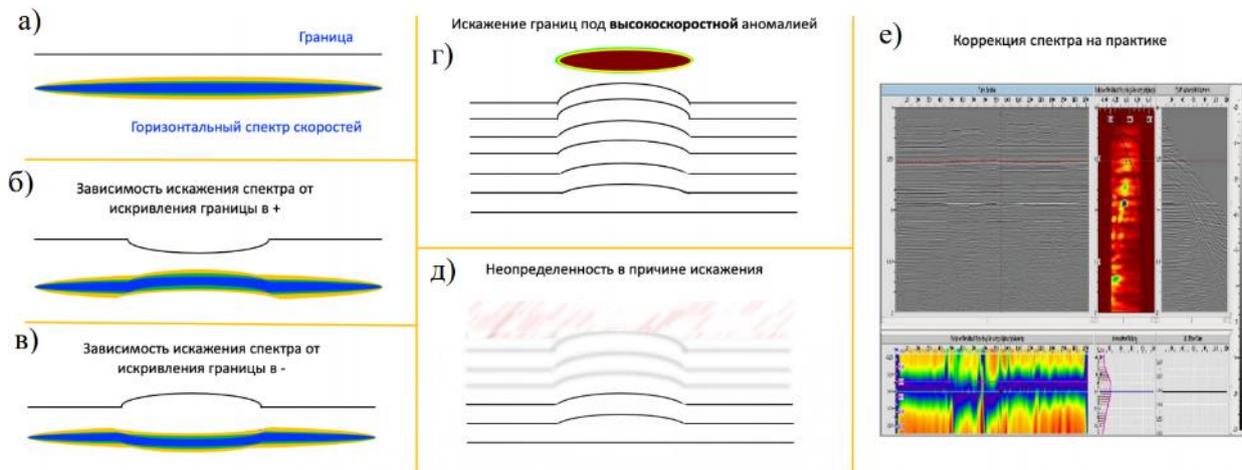


Рисунок 2.3.1. Теоретические положения горизонтальных спектров в зависимости от различных искажающих факторов

Работа алгоритма коррекции остаточных кинематических сдвигов выполняется следующим образом:

- Выбор горизонта для расчета горизонтального спектра. Граница должна быть расположена выше аномальной зоны целевого интервала и иметь непрерывную корреляцию.
- Расчет горизонтального спектра.
- Выбор аномальных зон для последующей коррекции (при наличии модели ВЧР с высокой степенью достоверности, аномальные зоны будут соответствовать объектам в ВЧР). Также полезно построение разрезов по ОТП и ОТВ с фиксированными базами суммирования для идентификации зон, нуждающихся в корректировке. Обычно на таких разрезах более четко проявляются «негеологические» подвижки горизонтов.
- Расчет подвижек в обозначенных зонах, которые необходимо ввести в сейсмограммы для компенсации аномалий. Для получения оптимального результата по завершению алгоритма необходимо вводить подвижки с различной процентной долей для промежуточной оценки спрямления, приближаясь к результату после каждой итерации. Такой подход позволит избежать переспрямления/искажения корректируемой границы
- Распределение полученных поправок на ПП и ПВ, аналогично распределению при вводе статических поправок. Ввод поправок производится в сейсмограммы. (Пример: оценочная сдвигка в аномальной зоне 20 мс, ввод поправки на первой итерации 30%, т.е на каждый ПП и ПВ приходится по 3 мс). После каждой итерации ввода поправок годограф будет распрямляться, приближаясь к более гиперболическому виду, а максимум на вертикальном спектре скоростей, соответствующий аномалии, будет смещаться к своему естественному положению.
- После ввода поправок выполняется суммирование по ОГТ и подбор оптимальных значений $V_{\text{ОГТ}}$ (обновление скоростного закона после корректировок), а также автоматический расчёт остаточных статических поправок для дополнительного улучшения прослеживаемости.
- Далее снова выполняется прослеживание выбранного горизонта по уже скорректированному разрезу ОГТ, рассчитывается горизонтальный спектр, остаточные кинематические поправки и так далее.

Количество итераций коррекции остаточных кинематических сдвигов зависит от сложности сейсмогеологических условий рассматриваемого региона. Результатом эффективной

коррекции служит спрямленность годографов ОГТ и компенсация аномалий на временном сейсмическом разрезе.

Рассмотренная методика позволяет выполнить доучет статических поправок на целевых горизонтах через кинематические сдвиги и дополнительно улучшить прослеживаемость отражений

По результатам выполнения процедуры общий структурный план разреза может быть смещен по уровню. Для его корректировки по результатам обработки потребуется увязка сейсмического разреза по маркирующим горизонтам из скважинных данных (или увязка с профилями, проходящими вкрест), что является стандартной процедурой, предшествующей интерпретации сейсмических данных.

В результате опробования методики на модельных и реальных данных были выделены некоторые предпосылки к применению описанной технологии:

- Искаженные, несимметричные, негиперболические годографы ОГТ (рисунок 2.3.2);
- «Подтяжки» горизонтов, необоснованные геологическими причинами;
- Явный недоучет статики после применения оптимального комплекса методик;
- Наличие заниженных интервальных скоростей в зоне под аномалией.

Также был выявлен ряд факторов, учет которых необходим для эффективного применения методики:

- Наличие надёжного прослеживания горизонта, по которому выполняется расчет горизонтального спектра и последующие корректировки (пример ненадежного прослеживания – рис. 2.3.3). Горизонт должен располагаться над аномальной зоной целевого интервала, поскольку коррекция такой методикой позволяет вводить поправки только в горизонты, расположенные ниже.
- Отсутствие инверсии скоростей в разрезе.
- Серьезные искажения скоростной модели ВЧР, создающие сильные аномалии, которые методика не сможет скомпенсировать (например, серия надвигов)

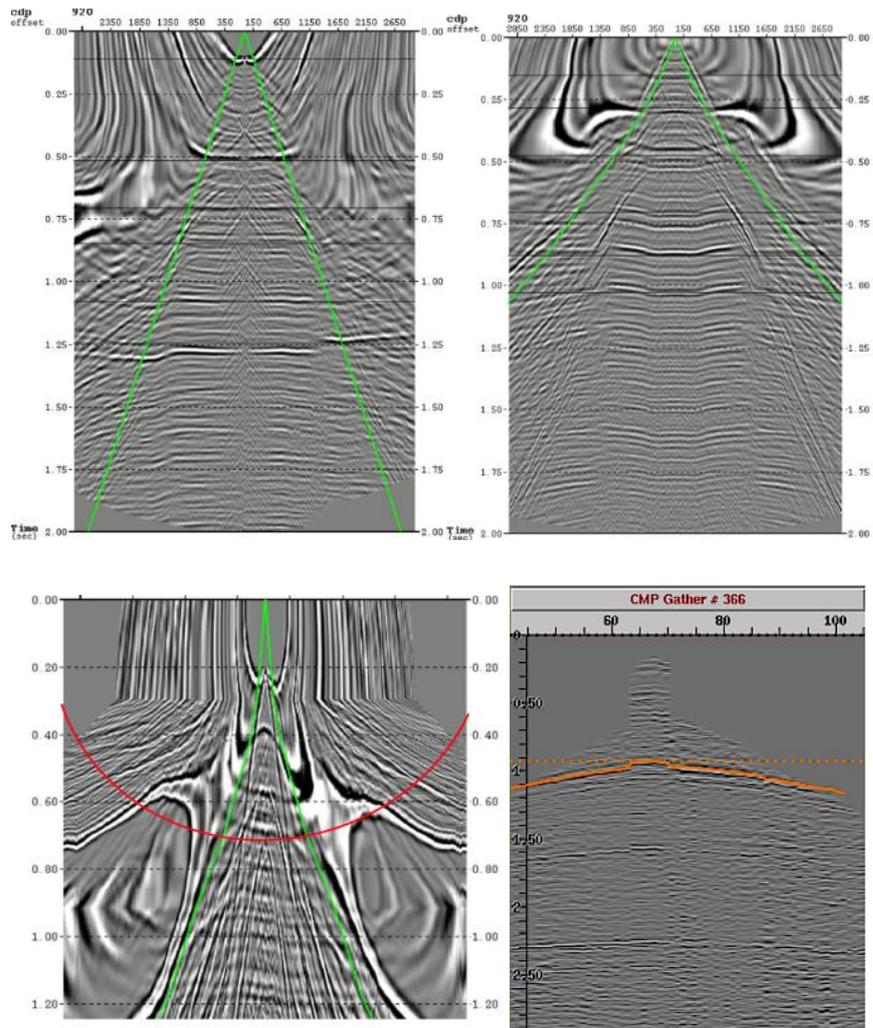


Рисунок 2.3.2. Несимметричные и негиперболические годографы ОГТ. Модельные (сверху) и реальные (снизу) данные

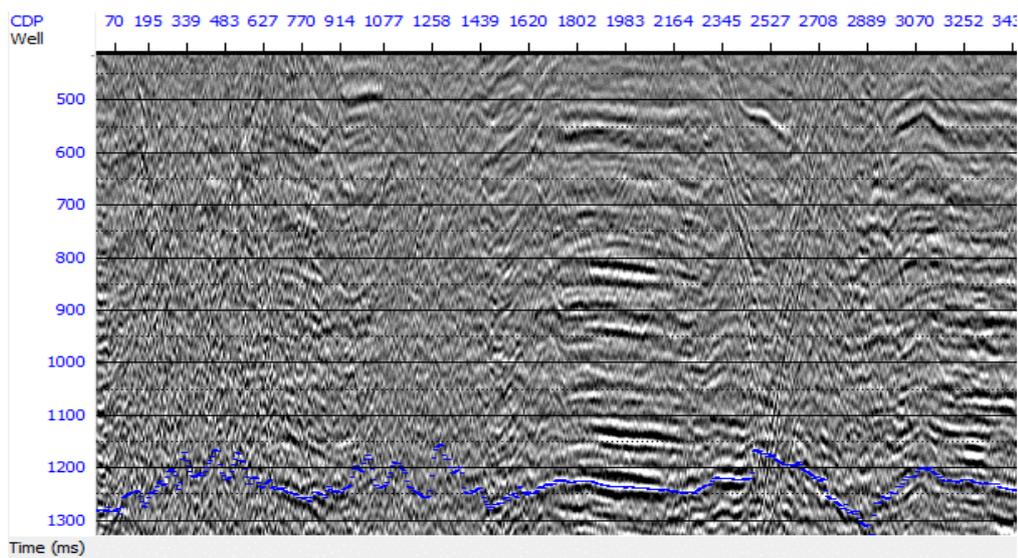


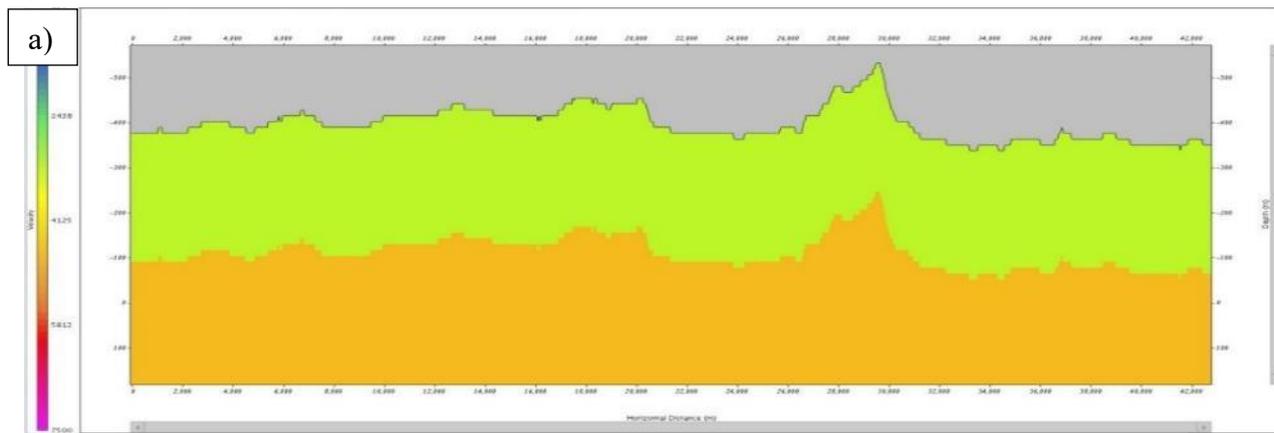
Рисунок 2.3.3. Отсутствие надёжного прослеживания горизонта (такие данные непригодны для реализации технологии остаточных кинематических сдвигов)

ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ К РЕАЛЬНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ ³

3.1. Опробование предлагаемых методик

3.1.1. Построение моделей ВЧР для расчета априорных статических поправок

Для начала следует рассмотреть результаты, полученные с применением стандартных методик – рефракторной и томографической. На рисунке 3.1.1 представлены скоростные модели, полученные а) рефракторной методикой, б) томографической методикой. Возвращаясь к теоретическим основам, следует отметить, что для построения этих моделей использовался один набор исходных данных (пикировки волн в первых вступлениях). Уже при визуальном анализе заметно, как разнятся полученные модели. Модель, полученная при помощи сейсмической томографии, обладает значительно большей детальностью, более широким диапазоном скоростей, однако имеет краевые эффекты (Коротков и др., 2014; Гаджиметов, Пьянков, 2021).



³ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Емельянова К.Л.** Особенности обработки архивных данных сейсмозаписи 2Д на территории Восточной Сибири // XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018». 2018. С. 1-2. (0.14 п.л.)
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: 0,43
3. **Емельянова К.Л.,** Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В. Технология восстановления верхней части разреза при помощи коррекции статических и кинематических поправок на основе сейсмогеологического моделирования в условиях Восточной Сибири // ГеоЕвразия-2021. Том 1. С. 67–70. (0.28 п.л.)
4. **Емельянова К.Л.,** Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В., Степанов П.Ю. Восстановление скоростной модели ВЧР на основе сейсмогеологического моделирования в условиях Восточной Сибири // ГеоЕвразия-2022. Том 3. С. 46–48. (0.21 п.л.)

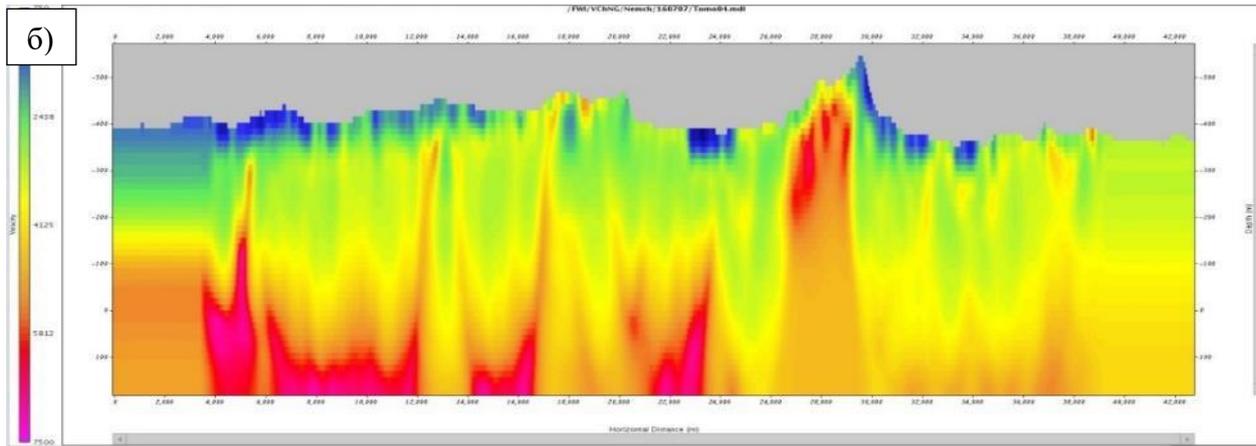
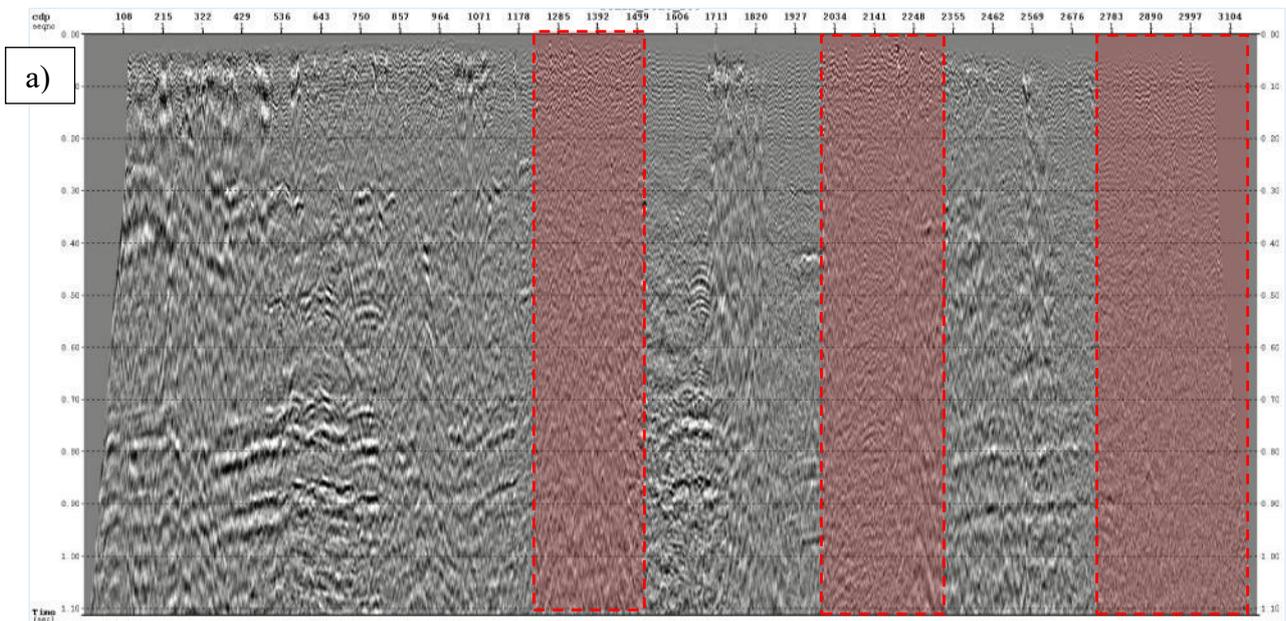


Рисунок 3.1.1. Рефракторная и томографическая скоростные модели ВЧР. Программа GeoTOMO

На рисунке 3.1.2 представлены сейсмические разрезы, полученные в результате расчета априорных статических поправок по а) рефракторной модели, б) томографической модели. Качество разрезов различается так же, как и качество полученных скоростных моделей ВЧР. Разрез в результате расчета статики по томографии обладает заметно лучшей корреляцией отражающих горизонтов, оси синфазности более протяженные. Однако, следует отметить один аспект, присущий обоим сейсмическим разрезам – отсутствие корреляции в «слепых зонах» (подсвечены красным). Такие зоны в большинстве случаев соответствуют положению высокоскоростных аномальных тел в ВЧР, что препятствует нормальному распространению сейсмически лучей.



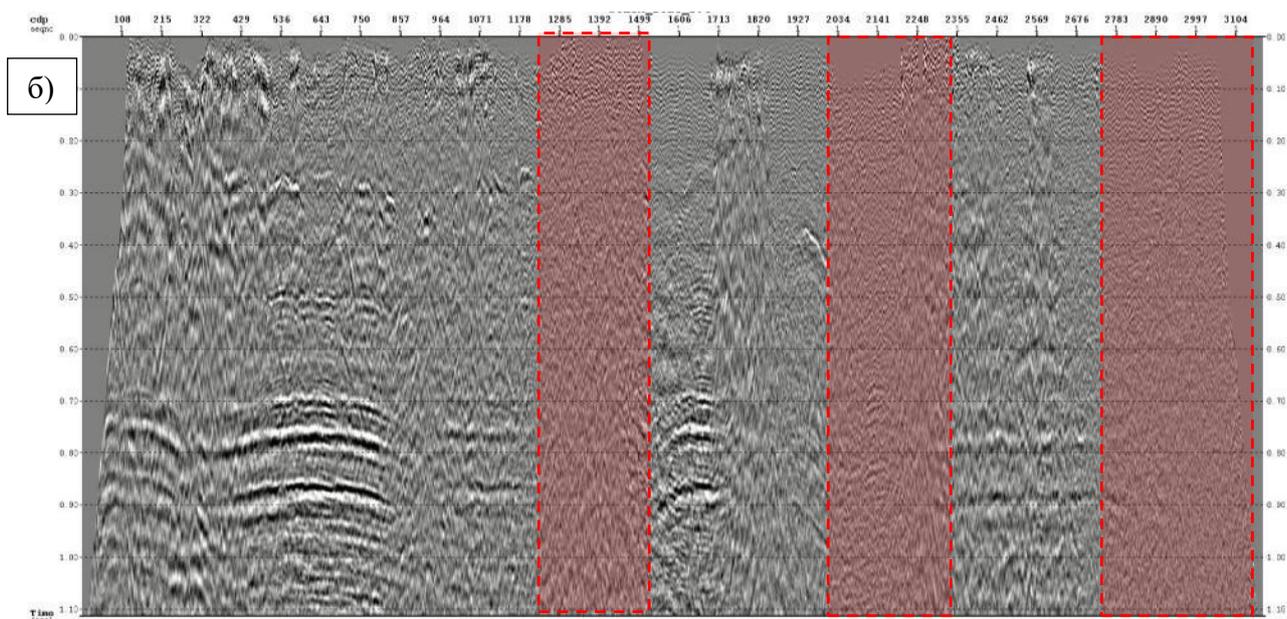


Рисунок 3.1.2. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по рефракторной и томографической моделям.

В рассмотренном случае более высоким качеством обладает разрез, полученный в результате расчета априорной статике по томографической модели, однако в «слепых зонах» методика не дала прироста информации.

Еще один пример результата также касается рассмотренных выше методик, однако на этот раз при расчете томографии была заложена вероятность инверсии скоростей в модели. При таком варианте в модели на рисунке 3.1.3 просматриваются более четко локализованные аномалии, однако на сейсмических разрезах после ввода поправок в зонах проявления аномалий (зоны инверсия) прироста полезной информации не обнаружено.

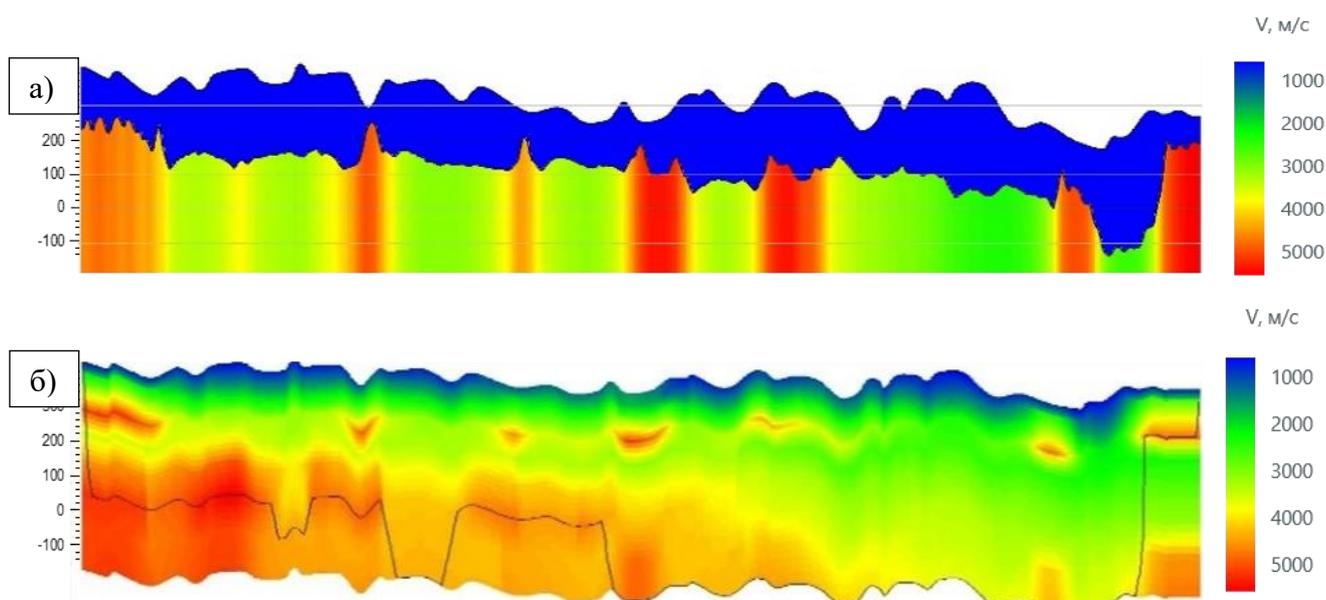
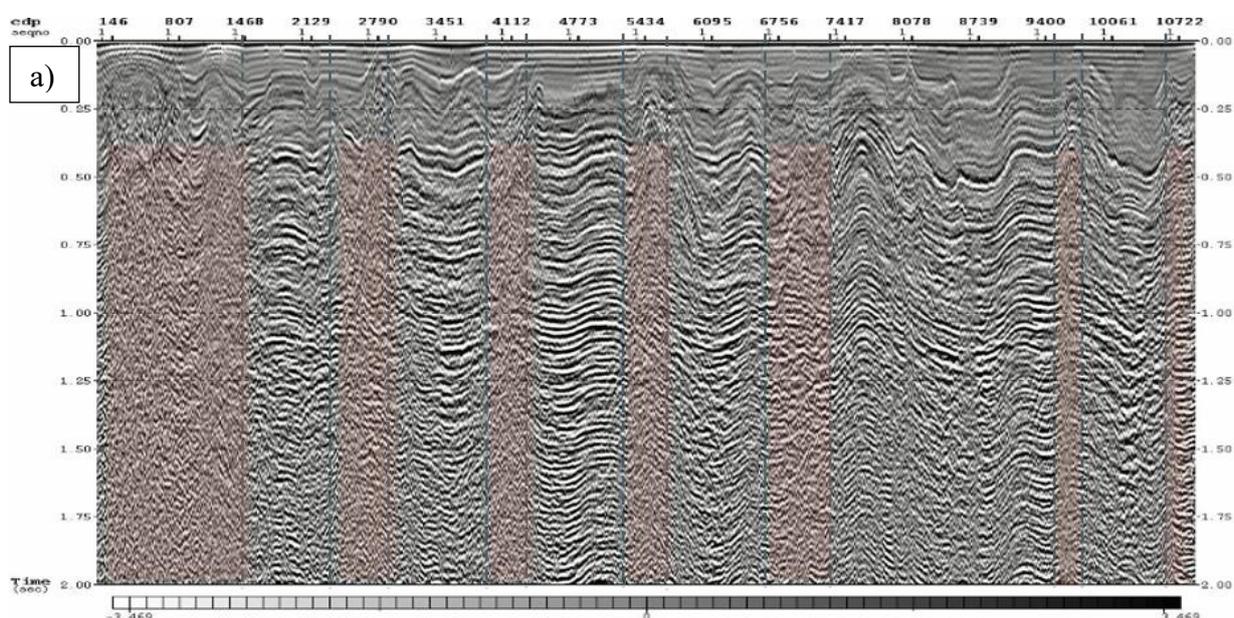


Рисунок 3.1.3. Рефракторная (а) и томографическая (б) скоростные модели ВЧР. Программа Flatirons

Результат ввода статических поправок представлен на рисунок 3.1.4. В некоторых зонах корреляция отражений лучше на втором варианте (сейсмотомография), однако есть и некоторые зоны, лучше восстановленные по рефракторной модели.

Такая ситуация случается довольно часто в реальном производственном процессе, здесь приходится делать выбор, какой из разрезов в большей степени отвечает стандартам качества и наилучшим образом «подсвечивает» целевые горизонты. Зачастую сравнивается несколько разрезов по результатам расчета рефракторной статики (поскольку существует несколько методик в зависимости от типа замещения верхней части), так же, как и по результатам томографии имеется набор моделей на разных этапах с разным количеством просчитанных итераций. Большое количество итераций не всегда лучший вариант, поскольку с определенного момента в модели могут появляться артефакты, искажающие скоростную модель (невязка начинает расти). В большинстве случаев выбор падает на результат по томографической модели, однако при отсутствии в исходных данных ближних удалений методика сейсмической томографии не даст оптимального результата.

Возвращаясь к оценке полученного результата, на данном этапе следует снова отметить факт, обнаруженный ранее на другом примере – отражения восстанавливаются в зонах, где ранее была сейсмическая информация. В зонах отсутствия (или почти полного отсутствия) информации корреляция не улучшилась.



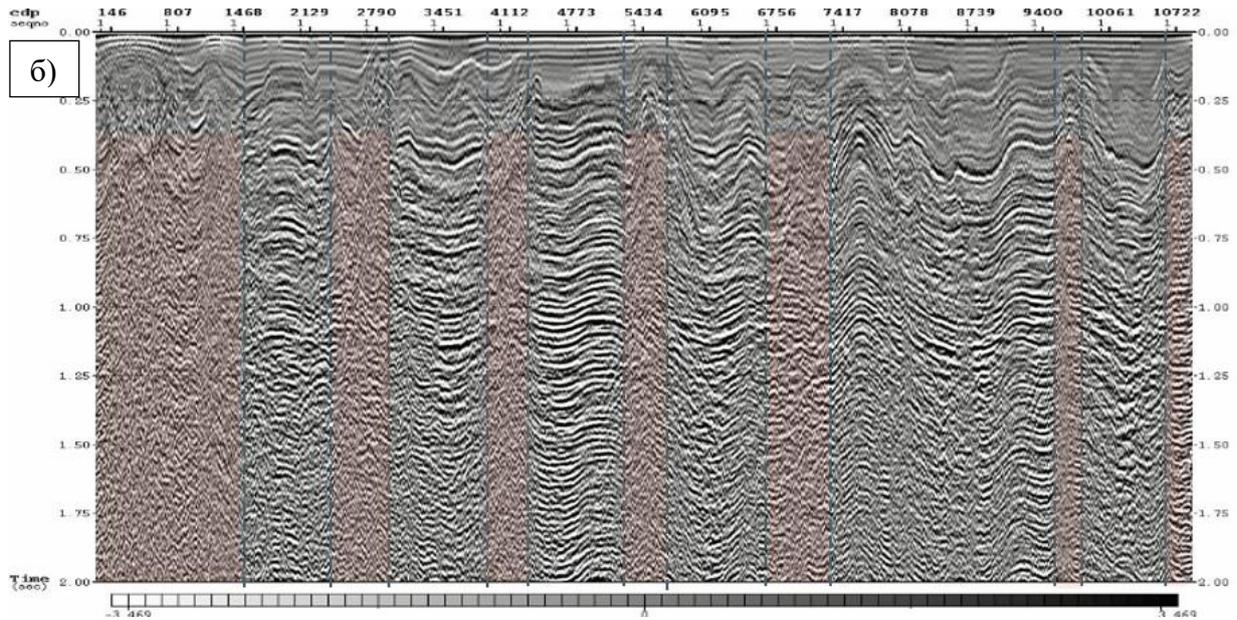


Рисунок 3.1.4. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по рефракторной (а) и томографической (б) моделям.

Несмотря на невпечатляющие примеры, приведенные выше (иллюстрирующие слабый эффект в сложных зонах), есть примеры применения стандартных технологий в условиях Восточной Сибири, позволяющих получить сейсмические разрезы высокого качества в случае отсутствия аномалообразующих объектов в ВЧР. На рисунке 3.1.5 представлено сравнение разрезов по одному сейсмическому профилю, сверху – результат архивной обработки, снизу – результат специальной современной обработки с применением для компенсации ВЧР сейсмической томографии и последующим многоитеративным подбором кинематики и коррекцией остаточными статическими поправками. По результатам современной специальной (не пакетной) обработки удалось не только восстановить очертания структур, но и выполнить картирование разломных нарушений (Емельянова К.Л., 2018).

Таким образом, рефракторные и томографические модели, безусловно, помогают в решении некоторых задач при работе в сложных сейсмогеологических условиях Восточной Сибири, однако на некоторых ЛУ в зонах, осложненных инверсией скоростей или выходами интрузивных тел в ВЧР, методики не дают оптимального результата

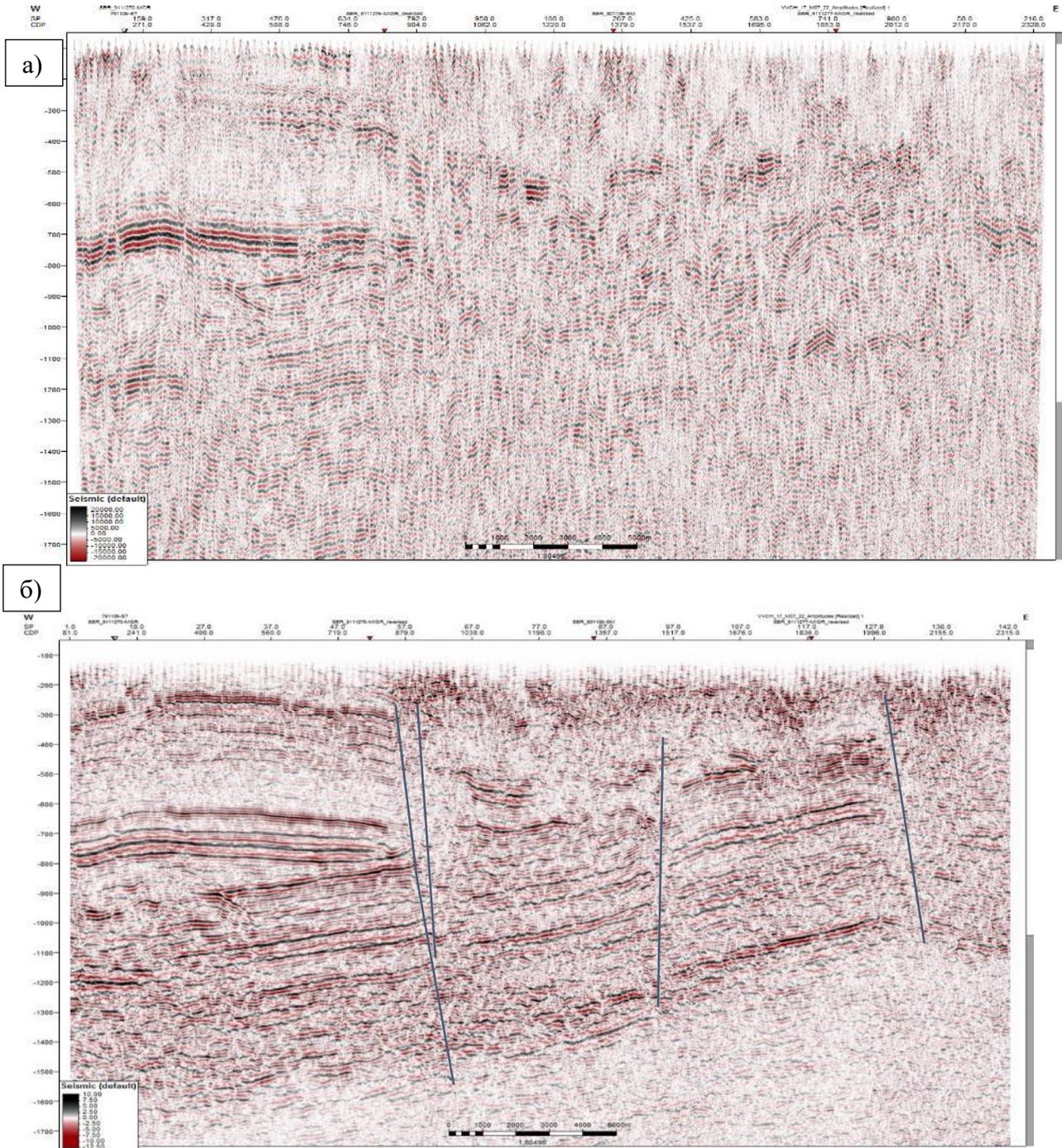


Рисунок 3.1.5. Сейсмические разрез: а – результат архивной обработки, б – результат современной обработки с применением стандартных методик.

Далее будут представлены нестандартные методики построения модели ВЧР. Все полученные результаты будут сравниваться с результатами, полученными по методике сейсмической томографии как с наиболее успешной из стандартных, описанных выше.

Тестирование методики FWI

Для демонстрации результата работы методики FWI были рассмотрены сейсмические данные в формате 3Д. На рисунке 3.1.6 представлены модели, полученные в результате

применения сейсмотомографии и FWI. Большой детальностью обладает модель по FWI, однако, необходимо иметь представление о природе подобного рода скоростных аномалий во избежание учета артефактов (Тихонов, Стив, 2017; Когобкин др., 2018; Гадыльшин и др., 2021; Гадыльшин, Чеверда, 2018).

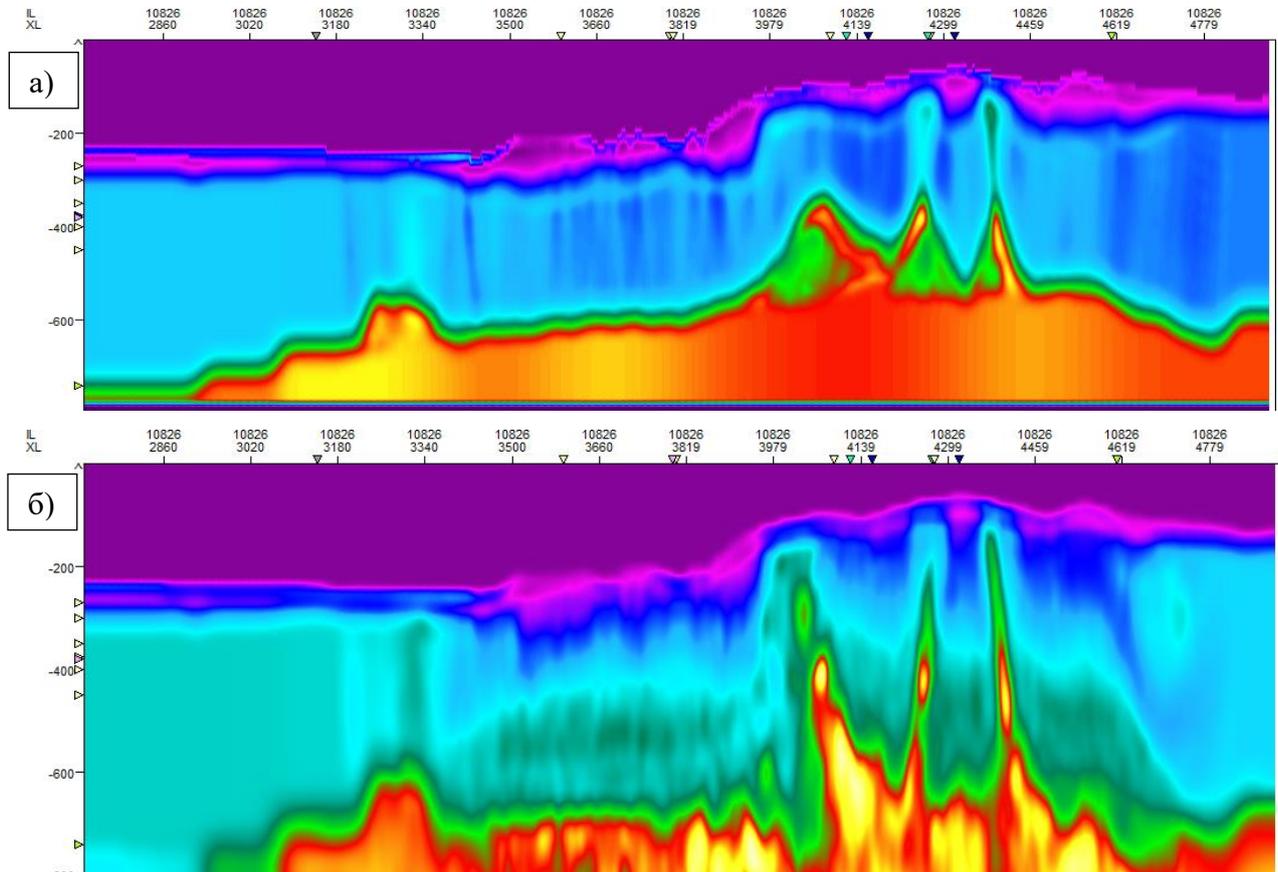


Рисунок 3.1.6. Скоростные модели: а - томографическая, б - по FWI. Градиент цвета показывает изменение скорости: возрастание значения от синего к красному.

На рисунке 3.1.7 представлены суммарные разрезы по одной линии из объема 3Д данных, полученные с учетом ввода априорных статических поправок описанными методами. По результатам построения ВЧР с помощью FWI заметны локальные улучшения, улучшилась прослеживаемости сейсмических горизонтов, появляется корреляция в слепой зоне.

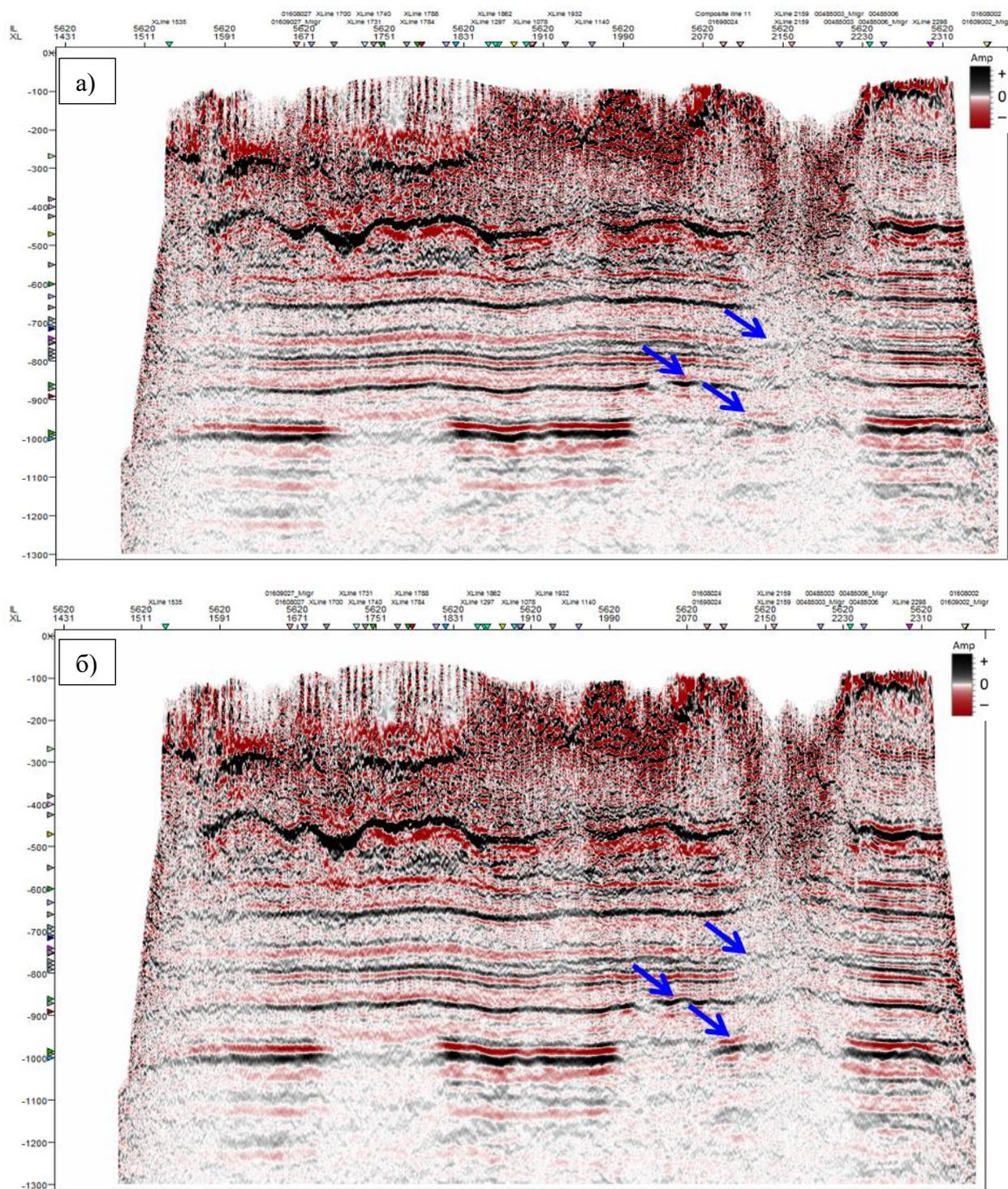


Рисунок 3.1.7. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по томографической (а) и FWI (б) моделям.

Еще один пример сравнения результатов, полученных при расчете априорных статических поправок по томографическим и FWI моделям представлен на рисунке 3.1.8. Здесь показаны два фрагмента куба с другого лицензионного участка. При детальном сравнении заметна разница в зоне, подсвеченной желтым контуром, а также по всей зоне ВЧР: просматривается улучшение корреляции отражений и лучшая спрямленность горизонтов.

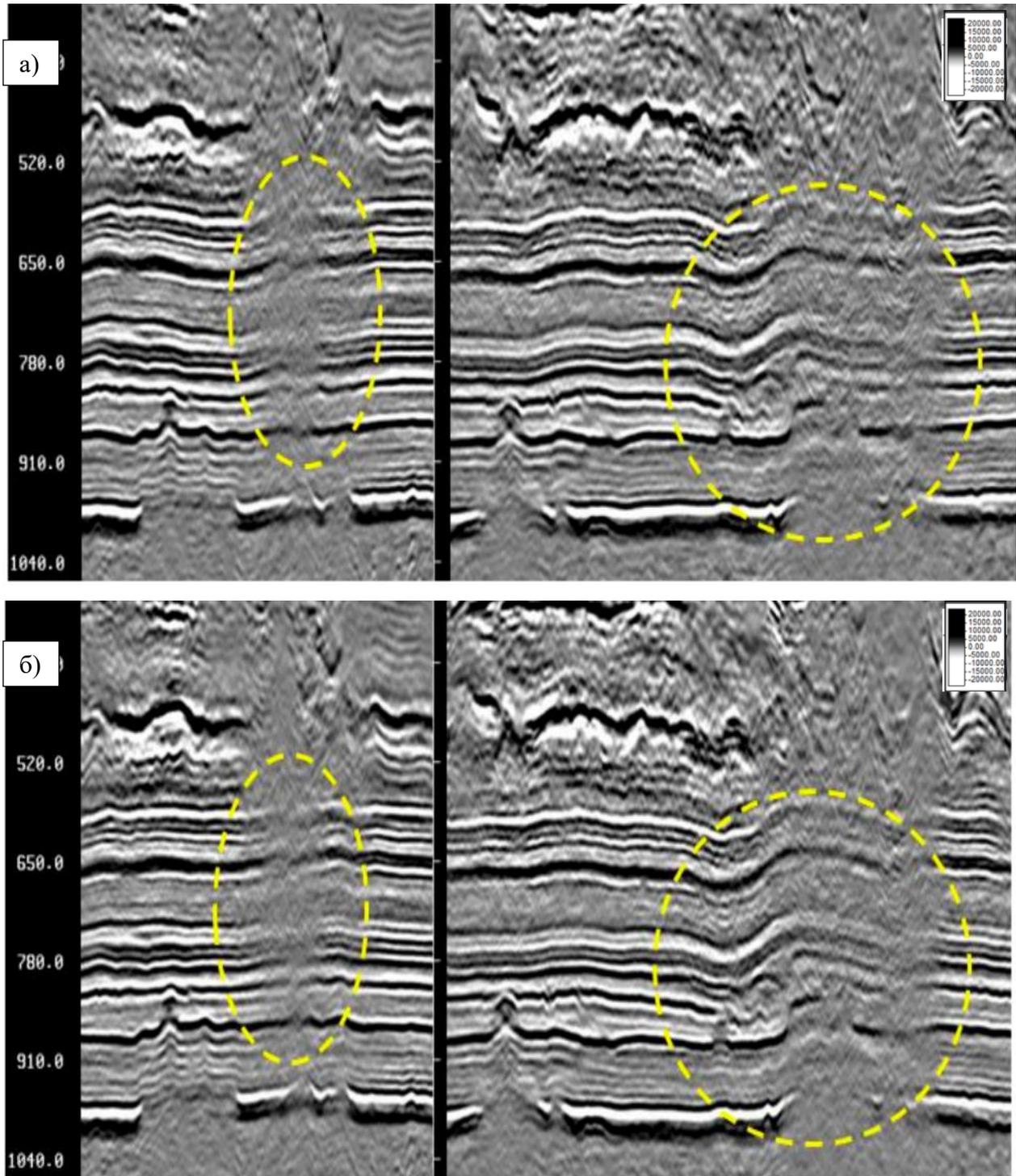


Рисунок 3.1.8. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по томографическим (а) и FWI (б) моделям (Korobkin и др., 2018.).

На текущий момент по результатам опробования в различных условиях рассматриваемого региона эффективность FWI выше, чем у сейсмической томографии, однако, необходимо отметить существенную трудоемкость и ресурсоемкость при расчете модели по FWI в сравнении со стандартными методиками.

Следует также упомянуть, что данные выводы характерны исключительно для восстановления строения ВЧР по технологии FWI и не характеризуют применимость методики

для построения общей скоростной модели для других целей обработки и интерпретации сейсмических данных.

Тестирование методики SWI

Еще одна методика, которую можно отнести к нестандартной – методика SWI. Технология построения скоростной модели основана на использовании поверхностных волн (теоретические основы и алгоритм работы см. раздел 2.2.4). Оценку результата также рекомендовано сравнивать с результатом по сейсмической томографии.

На рисунке 3.1.9 представлены модели ВЧР, полученные соответствующими методиками. Общие скоростные характеристики эквивалентны, однако контуры и скорости вмещающих пород аномальных объектов немного разнятся.

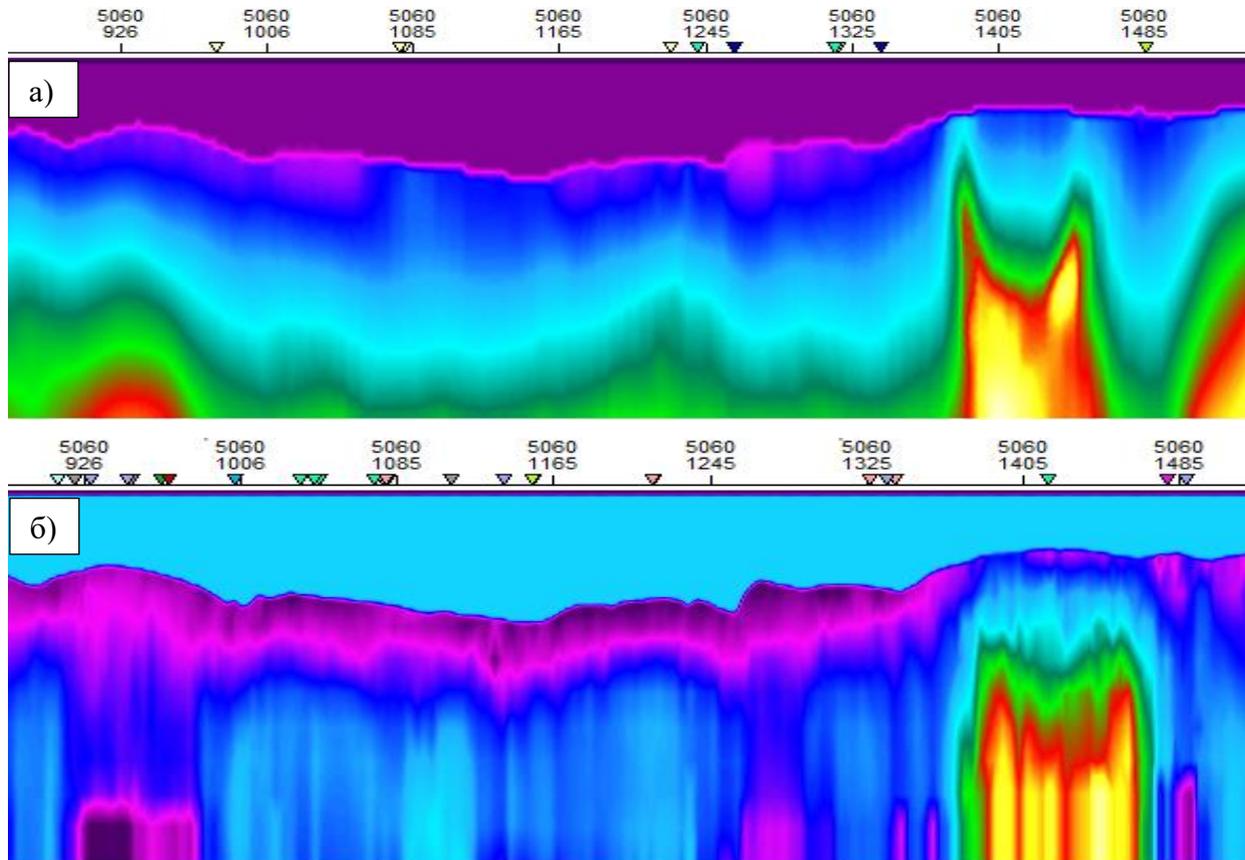


Рисунок 3.1.9. Томографическая модель (а), модель по SWI (б). Градиент цвета показывает изменение скорости: возрастание значения от синего к красному.

На рисунке 3.1.10 представлен полученный результат по итогам ввода априорных статических поправок. В зонах, указанных левой и центральной стрелками, заметен прирост информации по SWI, что говорит об эффективности предлагаемой технологии в сравнении со стандартными методиками. Общий структурный план по результатам SWI в большей степени

соответствует геологическому строению района, т.к. заметна эффективная компенсация среднепериодной аномальной составляющей.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что эффективное применение технологии заметно в зонах с изначально более надежной прослеживаемостью горизонтов для улучшения корреляции, а также возможно эффективное применение технологии при наличии инверсии скоростей в разрезе (Farrugia и др., 2016).

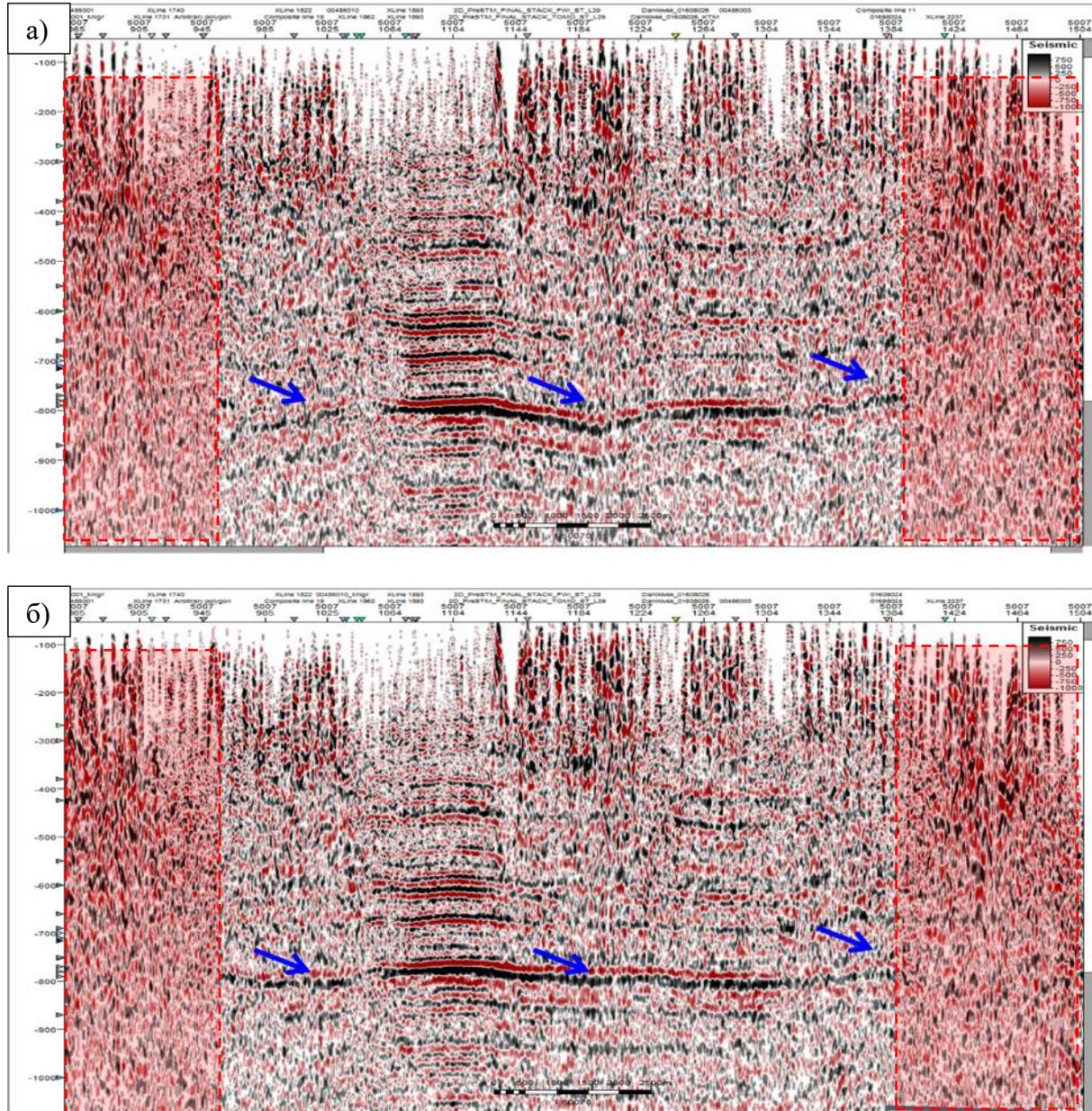


Рисунок 3.1.10. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по томографической и SWI моделям.

Сравнение FWI и SWI

Обе рассмотренные технологии дают вполне удовлетворительный результат, однако более объективную оценку можно вывести только при сравнении технологий на примере общего сейсмического профиля (в данном случае – линии 3Д съемки).

На рисунке 3.1.11 представлены скоростные модели, полученные соответствующими методиками. Следует отметить, что модель по FWI имеет большую глубинность (до 1000 м) по сравнению с SWI (до 600 м), а также обе модели показали наличие инверсии скоростей в разрезе. С точки зрения детальности выводы не так однозначны. Модель SWI, на первый взгляд, выглядит более подробной по сравнению с более гладкой FWI, однако в модели по SWI присутствуют «негеологические» латеральные объекты. Ранее на модели рисунке 3.1.9-б такие же признаки присутствовали, но выглядели менее явно и не так неестественно.

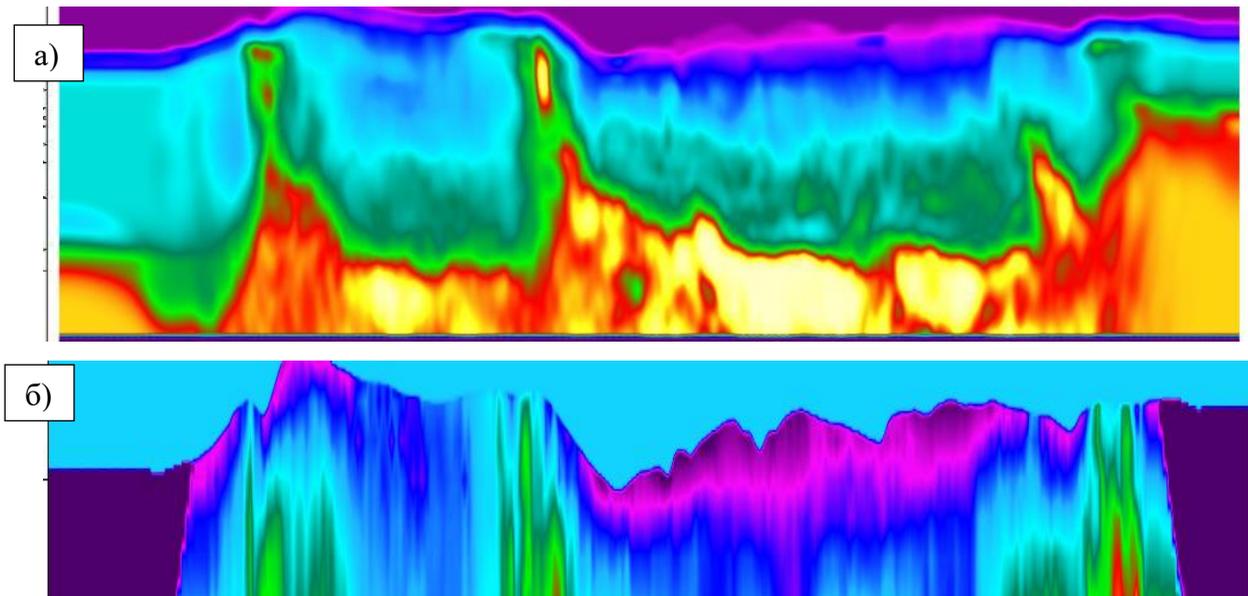


Рисунок 3.1.11. Скоростные модели ВЧР, полученные методами FWI (сверху) и SWI (снизу). Градиент цвета показывает изменение скорости: возрастание значения от синего к красному.

На рисунке 3.1.12 представлены суммарные разрезы, полученные с учетом априорной статистики указанными методами. Поправки по модели SWI не компенсирует скоростные и статические аномалии. На суммарных кубах по сравнению со статикой после FWI присутствуют статические аномалии, хуже качество суммирования. Результат с применением FWI позволяет проследить и восстановить геометрию крутонаклонных границ, которых не видно на сейсмическом кубе в верхней части разреза.

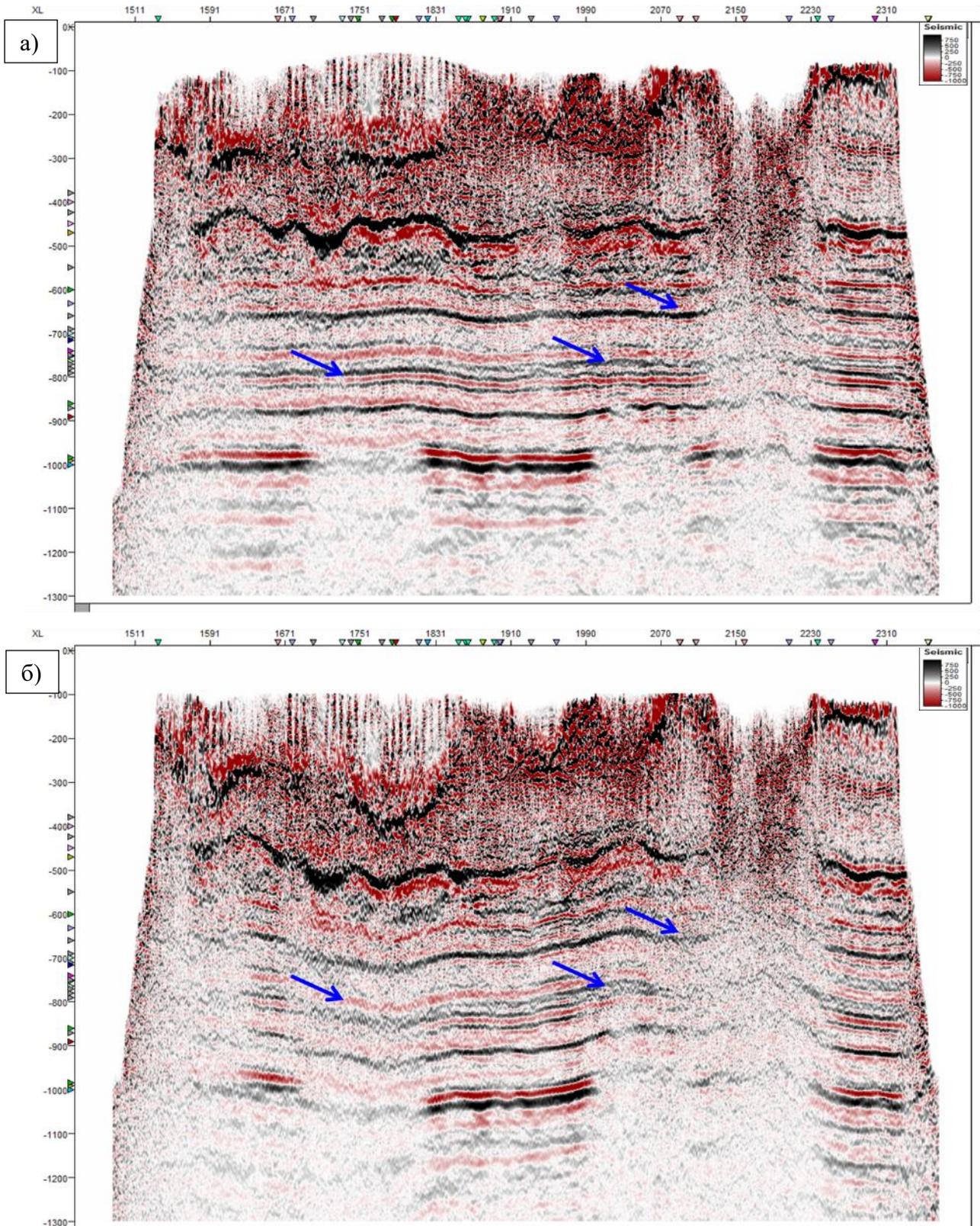


Рисунок 3.1.12. Сейсмические разрезы, полученные в результате учета априорных статических поправок по технологии FWI (а) и SWI (б).

Также по результатам проделанной работы необходимо отметить трудоемкость выполняемых процедур. В таблице 4 представлена статистика, выведенная по итогам различных тестирований, отражающая затраченное время на расчет соответствующих моделей.

Таблица 4. Статистика трудозатрат на построение скоростной модели методиками: сейсмотомография, SWI, FWI.

Методика	Тестирование (количество рабочих дней)	Счет (количество часов)
<u>Томографическое</u> уточнение по преломленным волнам Контроль пикировки первых вступлений и томография по объему 300 км ²	7	10
<u>SWI</u> Пикирование спектров поверхностных волн по объему 300 км ² Инверсия поверхностных волн	25	150
<u>FWI</u> Уточнение модели FWI по объему 300 км ² 3 итерации на одну частоту Суммарно 80 итераций	14	500

Несмотря на то, что результат по технологии SWI в последнем примере далек от желаемого, в примере, приводимом ранее, заметны улучшения в сравнении с технологии сейсмотомографии (рисунок 3.1.9) как с точки зрения прослеживаемости горизонтов, так и со стороны компенсации среднепериодных аномалий. Учитывая значительно более серьезные трудозатраты на реализацию технологии FWI, при отсутствии возможности проводить такие трудоемкие и ресурсоемкие тестирования рекомендуется обратиться к технологии SWI.

Комплексный анализ геолого-геофизической информации

Основной проблемой построения модели ВЧР можно назвать, безусловно, неоднозначность решения обратной задачи геофизики. Наиболее четко неустойчивость решения прослеживается на примере рассмотрения моделей по рефракторной и томографической технологии, поскольку входная информация для обоих методов одинаковая, однако модели получаются абсолютно разные. Приходя к таким выводам, интуитивно появляется потребность

уточнить модель, привлекая больше информации для сужения неопределенности решения обратной задачи (Долгих, 2011).

В 1 главе настоящей работы упоминалось наличие больших объемов архивной и современной геофизической информации с данными магнито- грави- и электроразведки различных масштабов. Учет этой информации помогает уточнить модели и оконтурить аномальные тела в ВЧР.

Технология выполнения комплексирования реализуется следующим образом. После анализа корреляционных связей и пригодности данных (раздел 2.2.5), выполняется совместный анализ и оконтуривание аномальных объектов в ВЧР (рисунок 3.1.13).

Контурные и сейсмические скорости тел подбираются с учетом аномалий потенциальных методов, а также максимумов УЭС по данным электроразведки. За основу берется скоростная модель, полученная по данным сейсморазведки. Здесь модель можно выбирать любую из доступных методик, описанных выше, если она компенсирует аномалии лучше остальных.

Контролем качества полученной модели в данном случае может выступать:

- Решение прямой задачи и сопоставление реальных геофизических полей с модельными;
- Оценка спрямленности отражений на сейсмическом разрезе (благодаря разработке «Tomplex» компании ООО «РН-Эксплорейшн» это реализуемо в режиме реального времени)

Результатом построения модели становится модель, наложенная в полупрозрачном режиме на сейсмические разрезы (рисунок 3.1.14). Здесь представлены результаты ввода априорной статики по технологии сейсмотомографии (с применением данных только сейсморазведки) и с применением комплексирования.

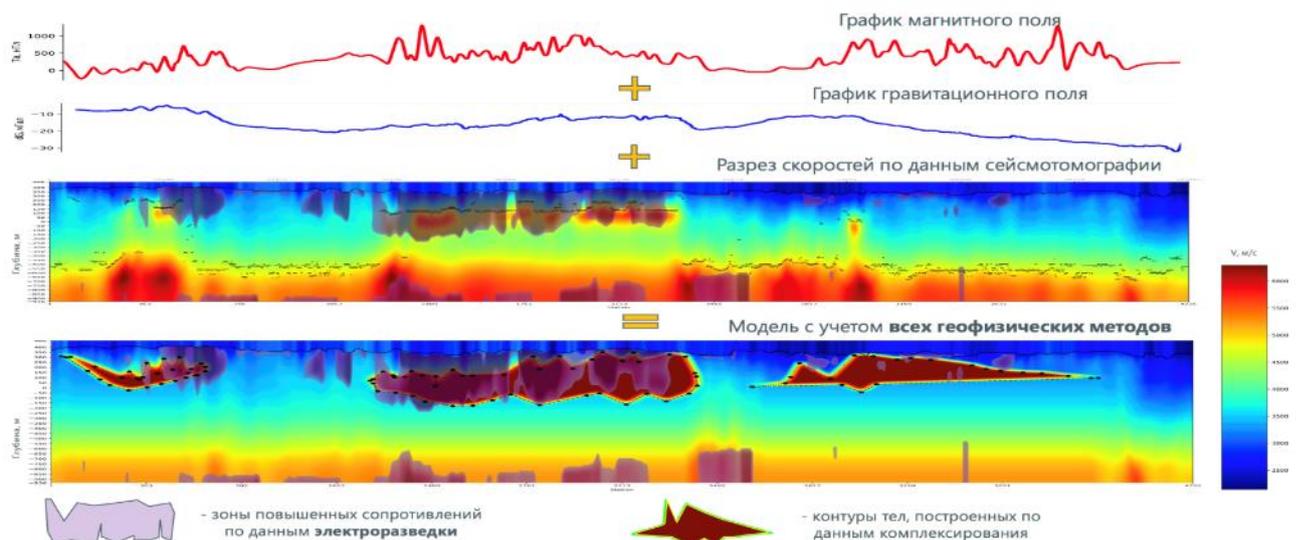


Рисунок 3.1.13. Объединение данных геофизических методов для построения модели ВЧР.

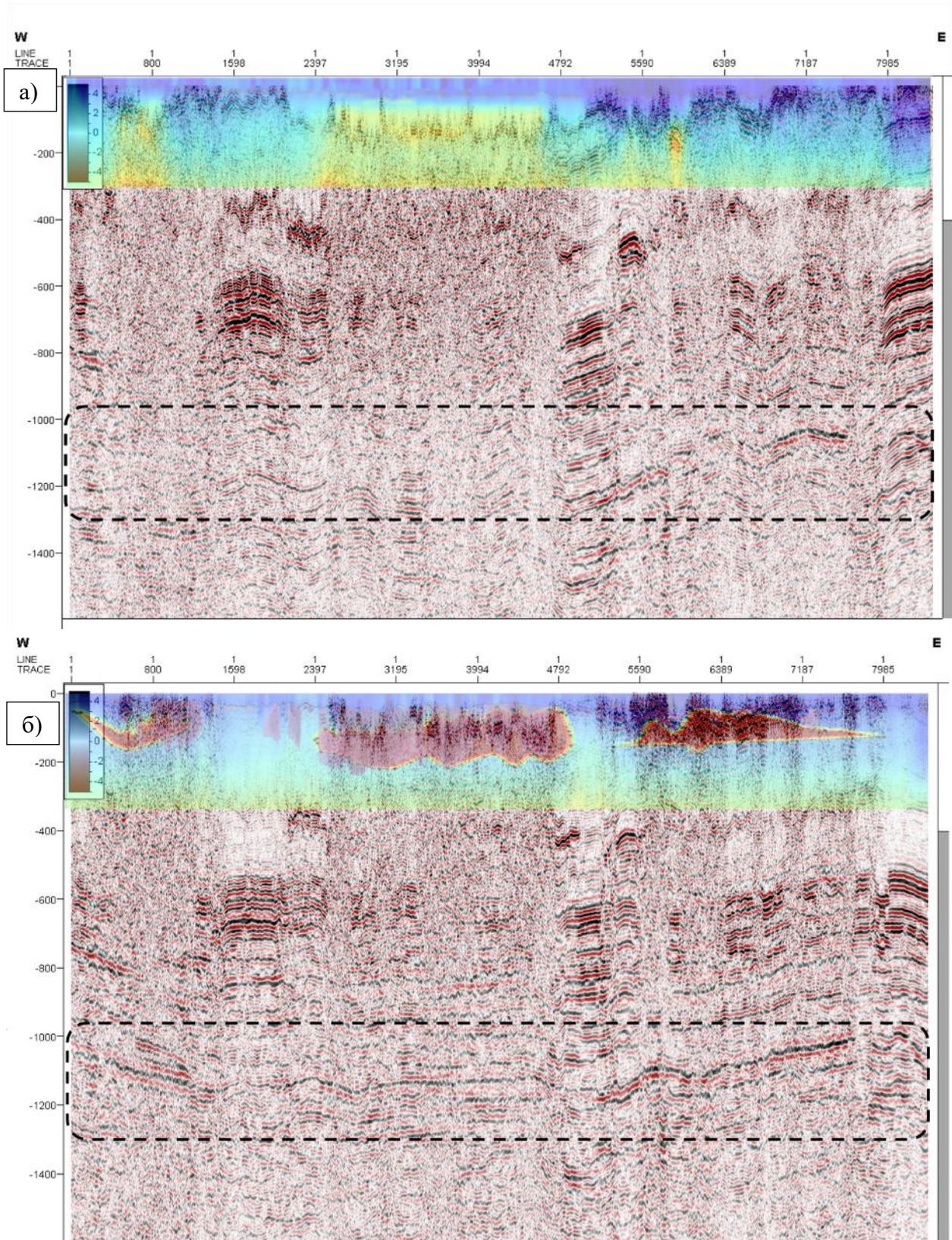


Рисунок 3.1.14. Сейсмические разрезы по результатам ввода априорных статических поправок, рассчитанных по сейсмотомографии (а) и по результатам комплексирования (б).

В целевом интервале, подсвеченном пунктиром, заметно улучшается корреляция и прослеживаемость отражений, однако, далеко не на всех примерах в результате тестирования технологии был получен такой существенный прирост информации.

На рисунках 3.1.15 и 3.1.14 представлены примеры применения компенсирования, в результате которых прироста информации относительно применения сейсмической томографии не произошло. Технология, однозначно, нуждается в доработке для повышения устойчивости результата относительно входных параметров.

Применение комплексирования рекомендуется при наличии необходимой точности геофизической информации (таблица 2), или возможности проведения дополнительных полевых геофизических работ с заданными системами наблюдения и точностью.

Следует отметить один факт, несомненно, влияющий на полученный результат с применением комплексирования. Как известно, обратная задача геофизики имеет бесконечно много решений, соответственно, форму и характеристики аномального тела в ВЧР можно выбрать множеством различных способов, получая необходимый эффект. Соответственно, использование в дальнейшей обработке и интерпретации полученных моделей без обоснований не рекомендуется.

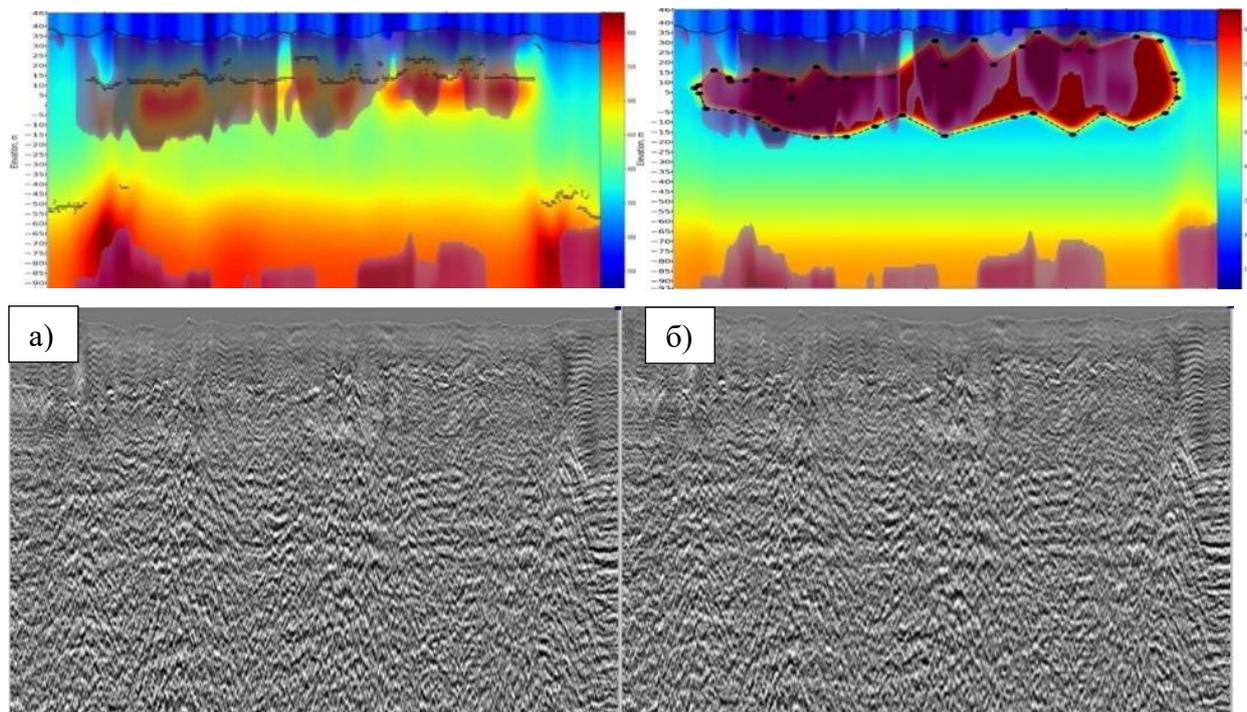


Рисунок 3.1.15. Пример 2. Сейсмические разрезы по результатам ввода априорных статических поправок, рассчитанных по сейсмотомографии (а) и по результатам комплексирования (б), а также соответствующие им модели ВЧР

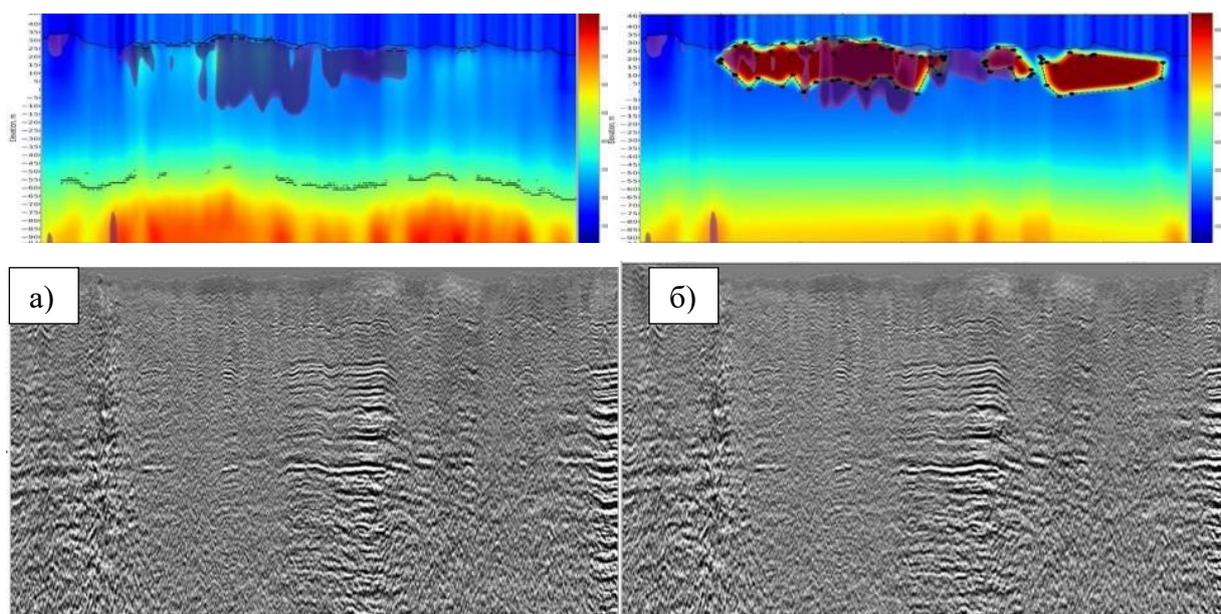


Рисунок 3.1.16. Пример 3. Сейсмические разрезы по результатам ввода априорных статических поправок, рассчитанных по сейсмотомографии (а) и по результатам комплексирования (б), а также соответствующие им модели ВЧР

Общий вывод, который можно сделать по итогам рассмотренных выше стандартных и нестандартных методик: в осложненных зонах нестандартные технологии позволяют получить прирост полезной информации на сейсмическом разрезе. При выборе подхода к построению скоростной модели ВЧР необходимо учитывать следующие условия:

- Наличие в ВЧР инверсии скоростей.
- Наличие в ВЧР выходов интрузивных образований.
- Возможность использования лицензионного ПО для реализации выбранного подхода.
- Оценка вычислительных мощностей для прогнозирования сроков построения модели (поскольку производственный процесс в большинстве случаев сопряжен с четкими сроками на выполнение каждого этапа геологоразведочных работ).
- Наличие данных со съемок несейсмическими методами необходимой точности/плотности или возможности выполнять дополнительные исследования для получения данных (в случае опробования технологии комплексирования).

После ввода априорных статических поправок любым из перечисленных методов требуется дополнительный расчет и ввод остаточных статических поправок, алгоритмы которых основаны на расчете взаимно-корреляционных функций [Давлетханов, 2014; Давлетханов, 2017; Xinxiang, 1999]. Рекомендуется рассматривать исключительно поверхностно-согласованные

процедуры для сохранения соотношения сигнала на соседних трассах, чтобы данные оставались пригодными для дальнейшей динамической интерпретации по результатам обработки.

К рассмотрению предлагаются алгоритмы staticR и eppstk, а также MAST в случае наличия крутонаклонных структур. Крайне не рекомендуется рассматривать технологию TRIM, поскольку процедура не является поверхностно-согласованной, а чрезмерная максимизация энергии может сгладить проявление малоамплитудных перспективных объектов. Пример бурения в ложную структуру в результате некорректной обработки с применением технологии TRIM представлен в 4 главе. TRIM-статику можно использовать как вспомогательный инструмент. По сейсмическому разрезу, полученному с применением данной технологии, можно прокоррелировать горизонт для расчета поправок, которые после вводятся в разрез для пересчета поверхностно-согласованными процедурами (если это обеспечит улучшение корреляции горизонтов).

Подводя промежуточный итог исследований, результаты которых приведены в данном разделе, можно сформировать 1-ое защищаемое положение: для корректного расчета априорных статических поправок в условиях Восточной Сибири необходим выбор алгоритма построения модели ВЧР согласно особенностям строения приповерхностной зоны: 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 априорной информации для уточнения геометрии аномалообразующих тел.

3.1.2. Тестирование технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов

Теоретические основы технологии описаны в разделе 2.3. В данном разделе будет представлено опробование ее на различных модельных данных, в результате которых были определены границы применимости методики, а также представлены результаты опробования на реальных данных (Емельянова и др., 2022).

Детальное построение модели №1 (рисунок 3.1.17) представлено в магистерской работе автора (Емельянова, 2019). В данной модели были заложены скоростные аномалии (надвиговая структура, соляные подушки), а также перспективные объекты (Bridle, 2008; Vivieux, Lambare, 2007).

На рисунке 3.1.18 представлен сейсмический разрез – промежуточная стадия обработки для оценки возможности коррекции кинематических сдвигов. В зонах отсутствия аномалий перспективные объекты вырисовываются четко (до миграции рифовые постройки идентифицируются по интенсивным дифрагированным волнам в области целевого горизонта на модельных данных). В зоне под надвигом в модель заложены выступы фундамента, которые также идентифицируются, однако под самым надвигом в районе 2700 cdp заметен «соскок» оси синфазности, из-за которого нарушается корреляция.

Опробования технологии не позволило эффективно скомпенсировать аномальную «подтяжку» в силу отсутствия в требуемой зоне непрерывной корреляции горизонта.

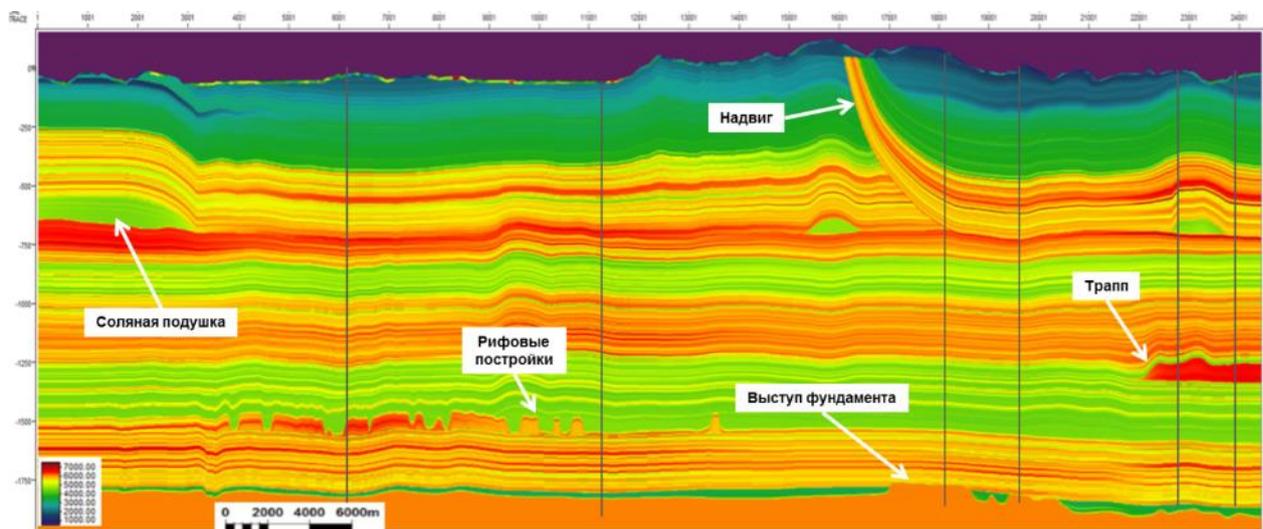


Рисунок 3.1.17. Тонкослоистая глубинно-скоростная модель №1

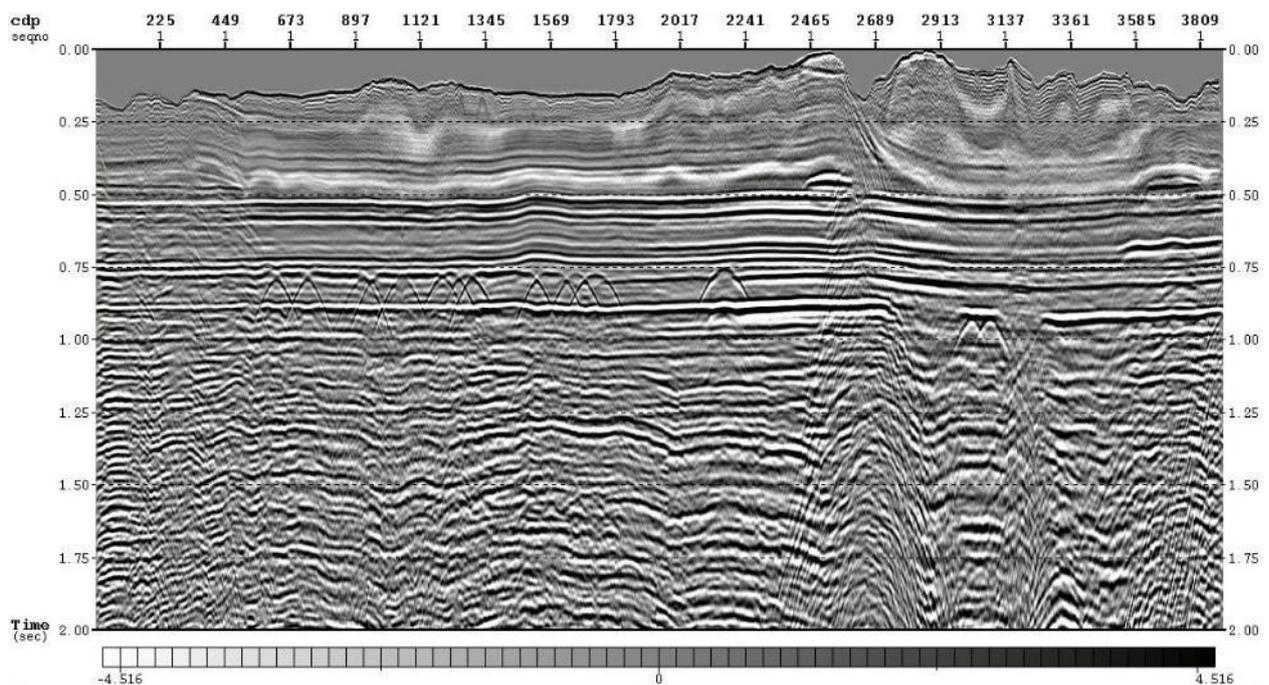


Рисунок 3.1.18. Синтетический сейсмический разрез, полученный в результате обработки модели №1.

В модель №2 (рисунок 3.1.19) были заложены интрузивны объекты таким образом, чтобы симитировать наиболее сложные с точки зрения ВЧР условия. В процессе обработки синтетических данных была заново отстроена модель ВЧР по сейсмограммам и модельным данным геофизических полей. Промежуточный результат обработки представлен на рисунке 3.1.20. Поскольку 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 силу отсутствия непрерывного горизонта.

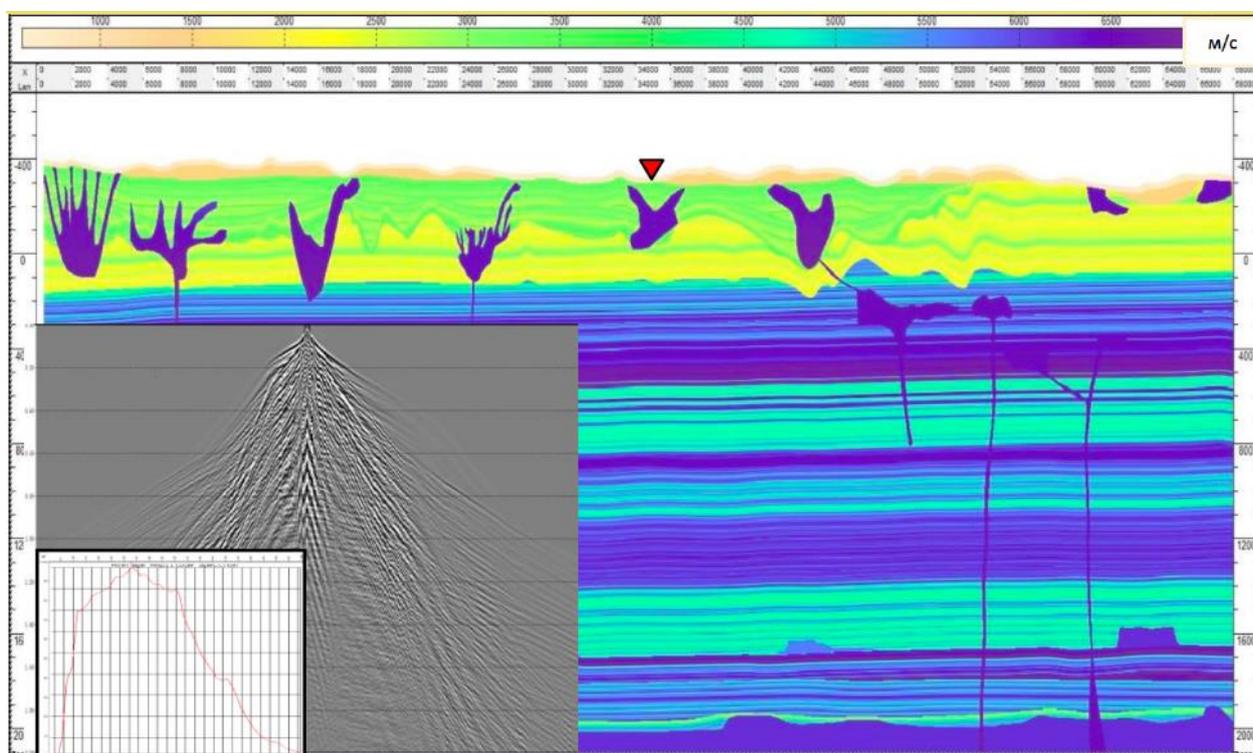


Рисунок 3.1.19. Тонкослоистая глубинно-скоростная модель №2

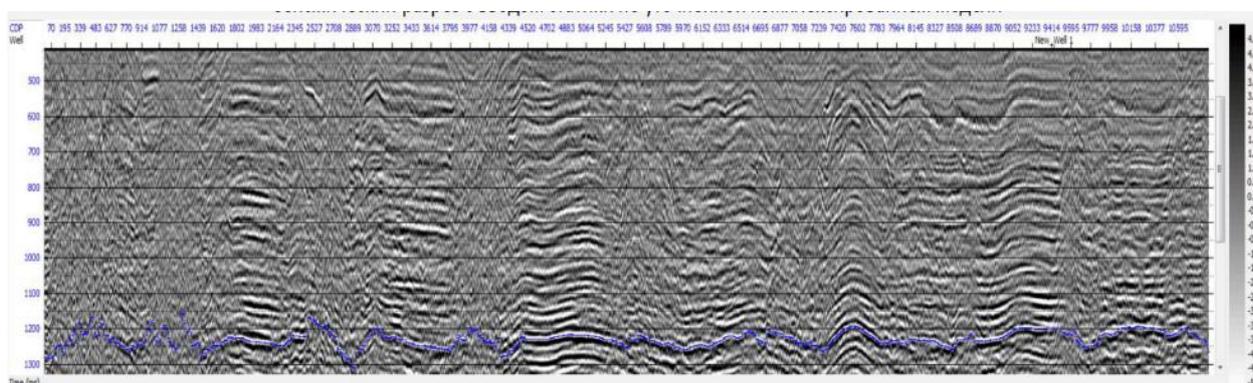


Рисунок 3.1.20. Синтетический сейсмический разрез, полученный в результате обработки модели №2.

В модель №3 (рисунок 3.1.21), построенную на основе данных Ванкорского месторождения, были заложены интервалы развития многолетнемерзлых пород ($V = 2500$ м/с) и зоны растепления (Долгих, 2008; Черняк, 2006). В скоростной модели горизонты на глубине 3000-4000 м в левой части заложены субгоризонтально. На сейсмическом разрезе в этой же зоне (рисунок 3.1.22) выделяется поднятие горизонтов, которое не удалось скомпенсировать на этапе ввода статических и кинематических поправок. На рисунке 3.1.23 видно характерное искривление годографа отраженных волн (указано желтой стрелкой), что говорит о возможности коррекции сейсмического разреза методом остаточных кинематических сдвигов, однако на практике реализовать методику не представилось возможным. Наличие протяженного слоя ММП в верхней части искажает скоростной закон. На вертикальном спектре скоростей можно заметить наличие побочного максимума в зоне 250-500 мс, растягивающего далее по разрезу максимумы спектра. Эта аномалия также оказывает сильное влияние и на горизонтальный спектр скоростей, соответственно, попытки скорректировать сейсмический разрез предлагаемой технологией не могут считаться корректными.

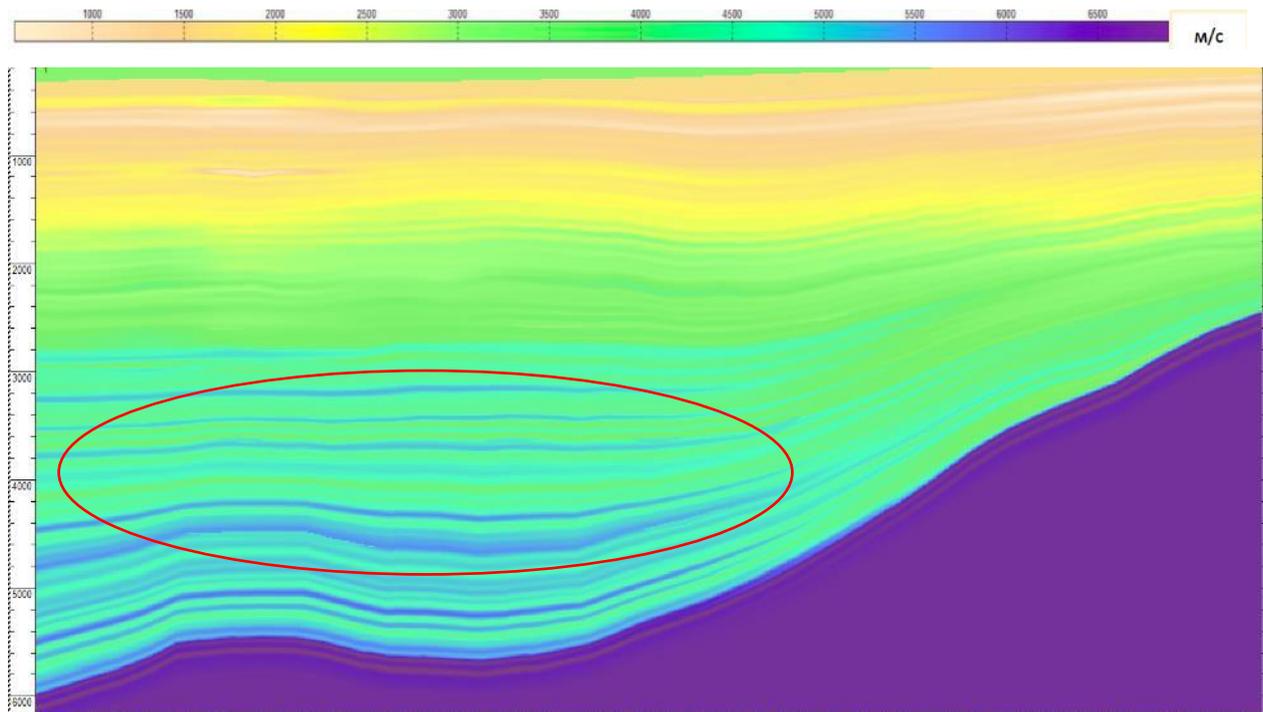


Рисунок 3.1.21. Тонкослоистая глубинно-скоростная модель №3.

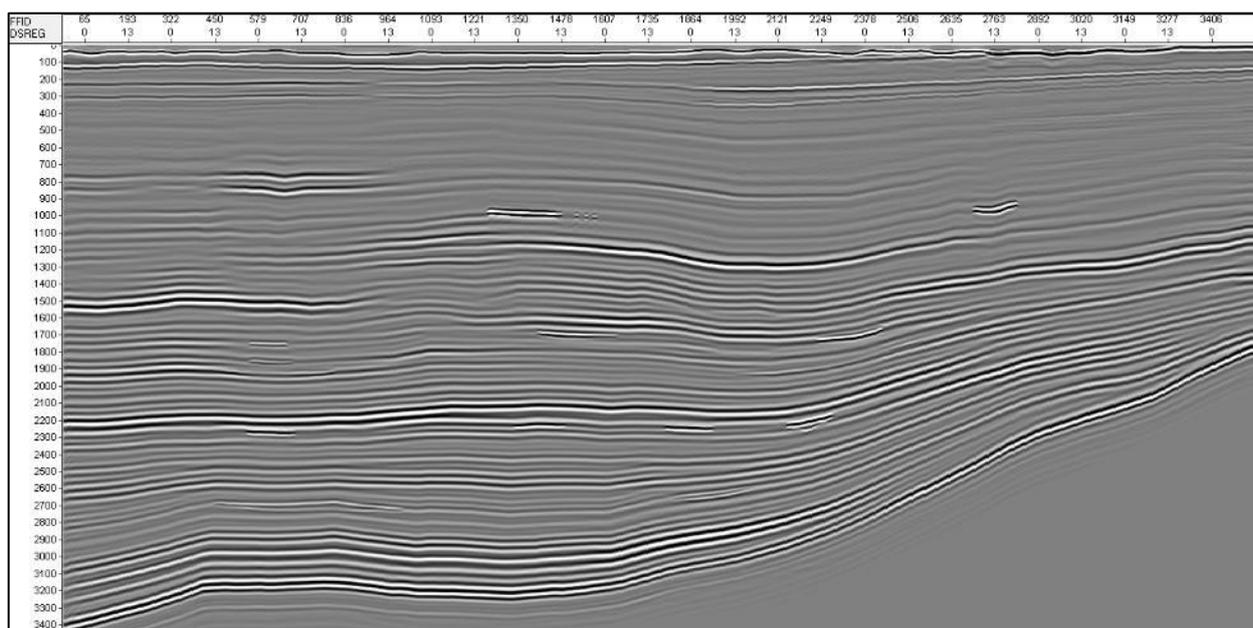


Рисунок 3.1.22. Сейсмический разрез по модели №3 после многоитеративного ввода статических и кинематических поправок.

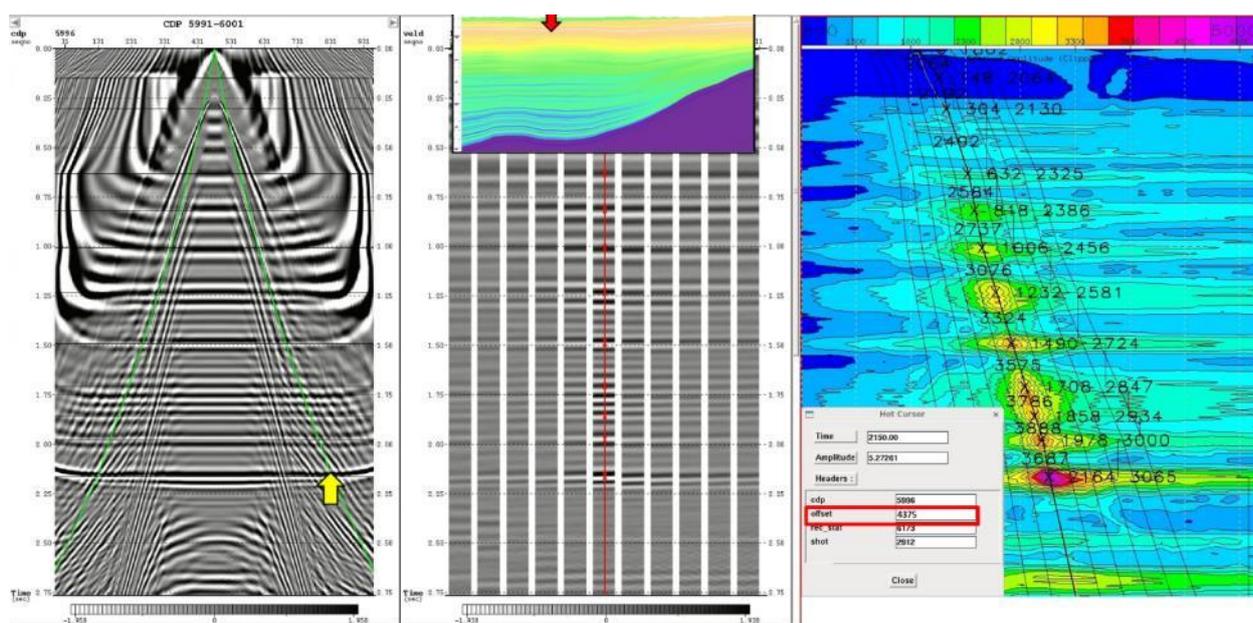


Рисунок 3.1.23. Сейсмограммы ОГТ и вертикальный спектр скоростей в зоне под аномальными ММП.

На рисунке 3.1.24 представлена модель №4. В нее заложены как перспективные объекты, так и осложняющие факторы: пластовая интрузия и сложная надвиговая структура. На рисунке 3.1.25 представлен суммарный разрез по модели. Наличие непрерывного горизонта позволяет опробовать применение технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов.

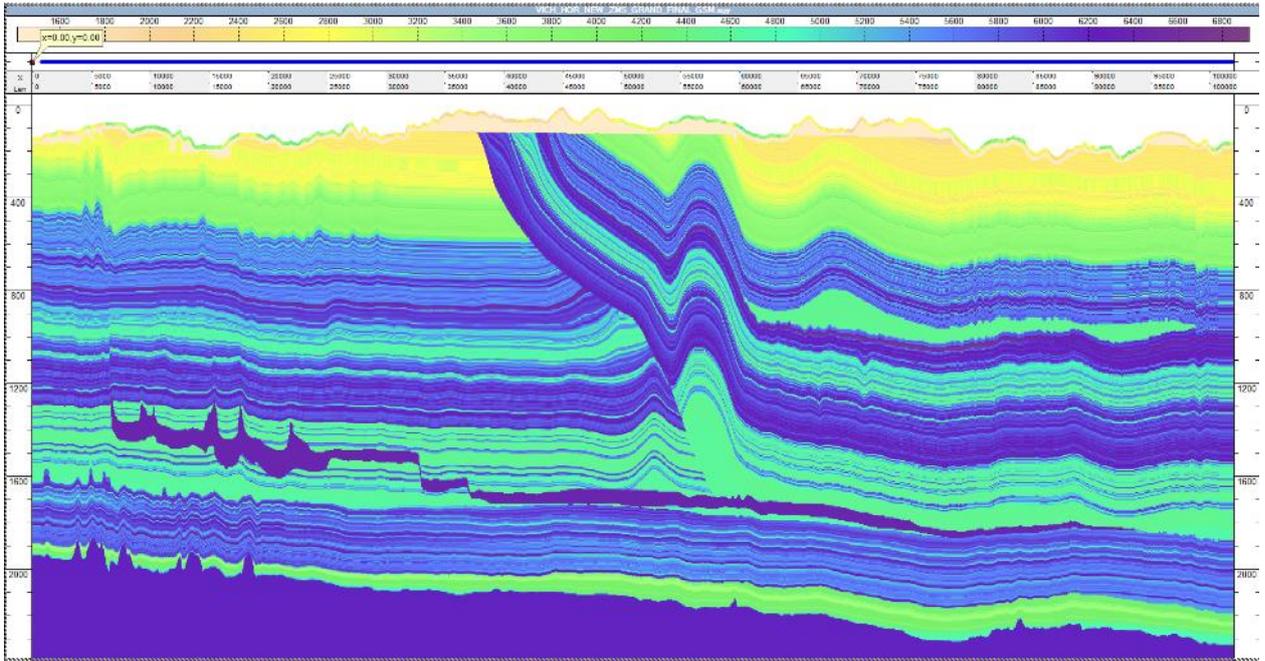


Рисунок 3.1.24. Тонкослоистая глубинно-скоростная модель №4

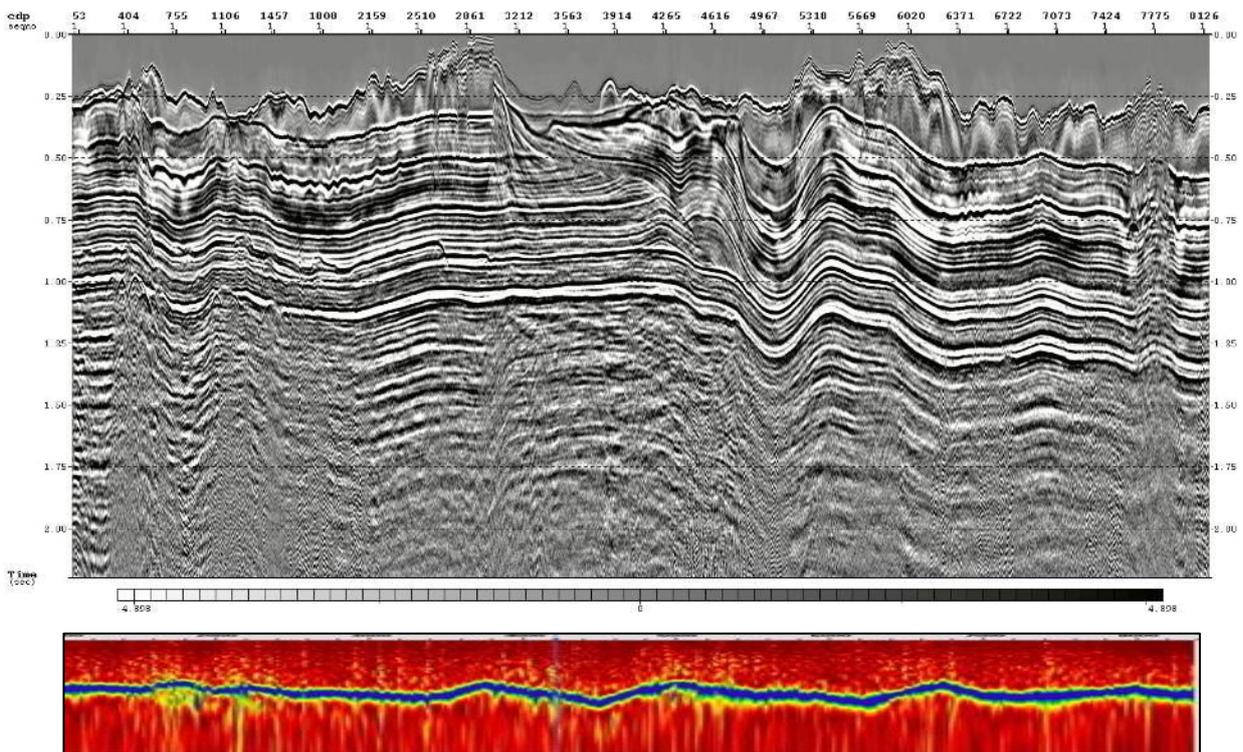


Рисунок 3.1.25. Синтетический сейсмический разрез, полученный в результате обработки модели №4, и соответствующий ему горизонтальный спектр по границе на уровне 0.8-1.1 с.

В результате сравнительного анализа модели и полученного сейсмического разреза ключевым выводом становится явная недоспрямленность, причиной которой является недоучет средне- и длиннопериодных аномальных составляющих. Визуальный анализ суперсейсмограмм с введенной кинематикой позволяет определить ключевые зоны, требующие корректировки по наличию несимметричных, искаженных и недоспрямленных годографов ОГТ (рисунок 3.1.26)

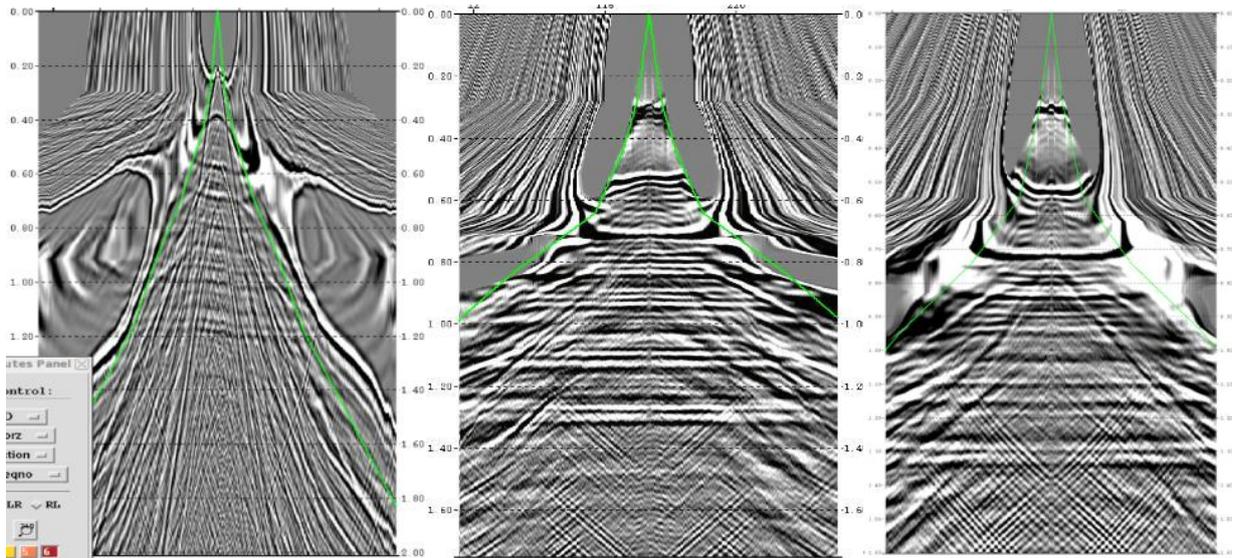


Рисунок 3.1.26. Суперсейсмограммы с введенными кинематическими поправками для различных зон сейсмического разреза.

В результате многоитеративного применения технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов (9 итераций), теоретические основы и алгоритм реализации которой рассмотрены в разделе 2.3, был получен сейсмический разрез, представленный на рисунке 3.1.27. Корреляция в зоне под выбранным для расчета поправок горизонтом улучшилась, скомпенсировались амплитудные среднепериодные аномалии, все заложенные в модель структуры «отрисовываются» на разрезе: пластовая интрузия (фиолетовая заливка), надвиг (поверхность выделена оранжевым контуром), рифовые постройки и выступы фундамента (выделяются в зеленой и желтой корреляции на разрезе соответственно).

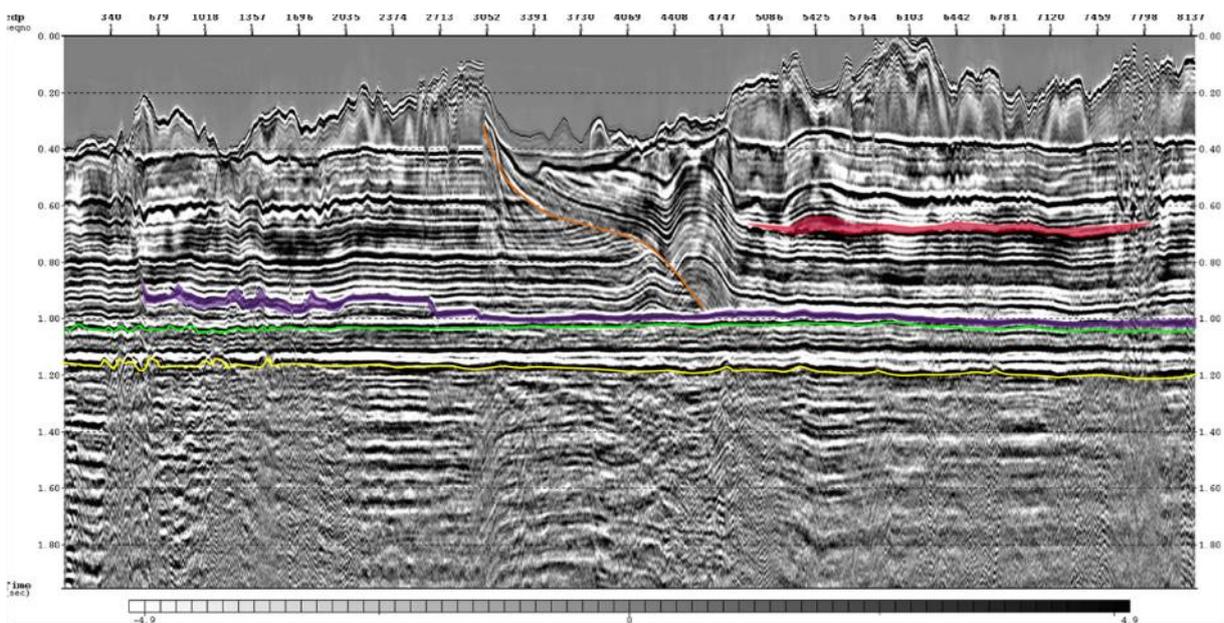


Рисунок 3.1.27. Синтетический сейсмический разрез, полученный после коррекции остаточных кинематических сдвигов по модели №4

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.

Также был выявлен ряд факторов, учет которых необходим для эффективного применения 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 компенсировать (например, серия надвигов).

По результатам исследований, приведённых в данном разделе, было сформировано 2-ое защищаемое положение: методика коррекции остаточных кинематических сдвигов позволяет компенсировать средне- и длиннопериодные скоростные аномалии, учет и компенсацию которых невозможно выполнить на этапе ввода статических поправок. Технология показывает хороший результат в условиях отсутствия серии надвигов, интенсивных интервалов инверсии скоростей и развития ММП в верхней части разреза.

3.2. Обработка реальных данных с учетом предлагаемых методик

По результатам тестирований был сформирован оптимальный граф обработки (рисунок 3.2), предлагаемый к работе с данными в особо сложных условиях, где имеют широкое распространение аномалии в ВЧР (Гуренцов и др., 2021). Для обработки данных использовалось программное обеспечение Paradigm Echos (Барс, Карапетов, 2002).

В предлагаемом графе блоки кинематической и сигнальной обработки зациклены, поскольку после каждого этапа шумоподавления прослеживаемость горизонтов улучшается, что позволяет получить прирост информации от дополнительного цикла остаточной статистики 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 деконволюция;
 - Миграция;
 - Обработка мигрированных временных разрезов.



*выбор модели зависит от приповерхностных условий: при наличии инверсии в разрезе – модели по технологиям FWI и SWI, при наличии высокоскоростных аномальных тел – комплексирование геофизических методов, в отсутствие описанных факторов – рефракторная или томографические модели

Рисунок 3.2. Оптимальная последовательность процедур обработки сейсмических данных в осложненных условиях Восточной Сибири

3.2.1. Полная обработка профиля реальных данных по предлагаемому графу

В данном разделе будет приведен пример обработки согласно предлагаемому графу и продемонстрированы результаты применения основных процедур обработки. В конце главы представлен раздел, в котором приведен сравнительный анализ сейсмических разрезов, полученных в результате стандартной обработки и обработки согласно предлагаемому графу.

Процедуры будут описаны блоками. При обработке реальных данных в зависимости от сложности ВЧР и характера шумовой составляющей, построение модели ВЧР и количество циклов коррекции статических и кинематических поправок разнится, также как настройка и количество циклов фильтрации, выбор типа миграции и т.д.

К рассмотрению выбран протяженный профиль (105 400 м) одного из участков, находящегося в пределах 4 класса сложности, на рисунке 3.2.1 отмечены зоны положения профиля, точные данные не приводятся из соображений конфиденциальности.

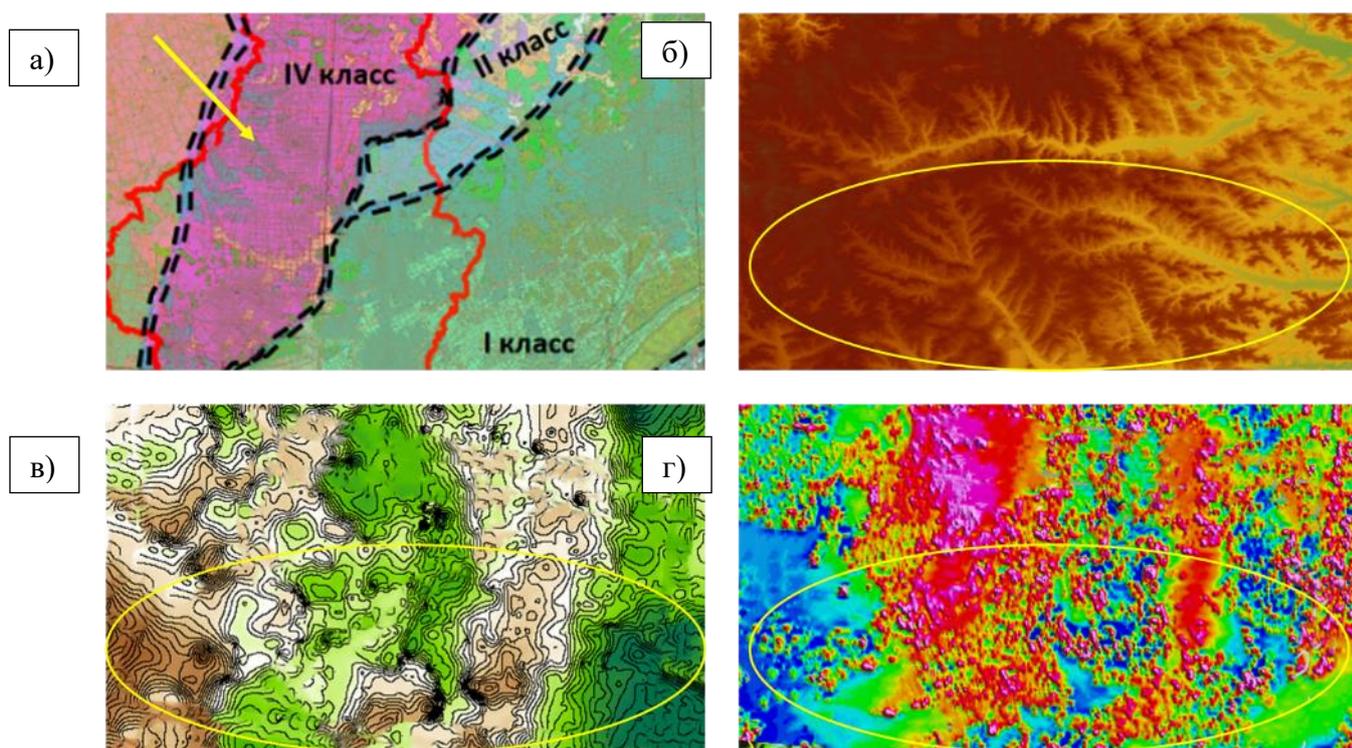


Рисунок 3.2.1. Положение профиля на картах а) районирования б) рельефа местности в) аномалий гравитационного поля г) аномалий магнитного поля.

Полная последовательность процедур обработки для данного профиля выбрана следующая:

- Ввод данных и создание базы данных.
- Контроль качества присвоения геометрии.
- Редакция шумящих трасс, исправление обратной полярности.
- Первичный скоростной анализ, предварительный мьютинг, получение первой контрольной суммы.
- Пикировка первых вступлений, построение рефракторной и томографической моделей ВЧР.
- Корректировка скоростного закона, получение контрольных сумм.
- Анализ априорной геолого-геофизической информации, построение комплексной модели ВЧР.
- Корректировка скоростного анализа в соответствии с новой моделью, получение контрольной суммы.
- Расчет остаточных статических поправок (6 итераций), промежуточная корректировка скоростного закона, получение контрольных сумм.
- Шумоподавление по технологии LIFT-1 (случайный шум), получение контрольной суммы.

- Поверхностно-согласованная регулировка амплитуд (1-ая итерация), получение контрольной суммы.
- Расчет остаточных статических поправок (5 итераций), промежуточная корректировка скоростного закона, получение контрольных сумм.
- Шумоподавление по технологии LIFT-2 (амплитудные помехи), получение контрольной суммы.
- Поверхностно-согласованная регулировка амплитуд (2-ая итерация), получение контрольной суммы.
- Расчет остаточных статических поправок (3 итераций), промежуточная корректировка скоростного закона, получение контрольных сумм.
- Поверхностно-согласованная деконволюция, коррекция скоростного закона, получение контрольной суммы.
- Поверхностно-согласованная регулировка амплитуд (3-ая итерация), получение контрольной суммы.
- Построение горизонтальных спектров, коррекция остаточных кинематических сдвигов (7 итераций), расчет остаточных статических поправок (2 итерации), корректировка скоростного закона, получение контрольных сумм.
- Шумоподавление по технологии LIFT-3 (линейные помехи), получение контрольной суммы.
- Поверхностно-согласованная регулировка амплитуд (4-я итерация), получение контрольной суммы.
- Расчет остаточных статических поправок (1 итерация), промежуточная корректировка скоростного закона, получение контрольной суммы.
- Подготовка сейсмограмм и скоростей для миграции.
- Временная миграция после суммирования.
- Постмиграционная обработка.

Ввод полевых данных, присвоение и контроль геометрии, визуальный анализ данных

Для оценки правильности присвоения геометрии выполнялась визуализация всех сейсмограмм с трассировкой расчетных первых вступлений. Присвоение и контроль геометрии осуществлялись в следующей последовательности:

- сейсмические данные были переведены во внутренний формат обрабатывающей системы Paradigm Echos с сортировкой по пунктам взрыва (ПВ);

- данные описания геометрии полевой съемки импортировались в проект, и проводился контроль присвоения геометрии. Пример контроля качества присвоения геометрии показан на рисунке 3.2.2.

Ошибок в описании геометрии при выполнении полевых работ выявлено не было, при визуальном анализе данных были отмечены зоны сильного зашумления с полным отсутствием отражений.

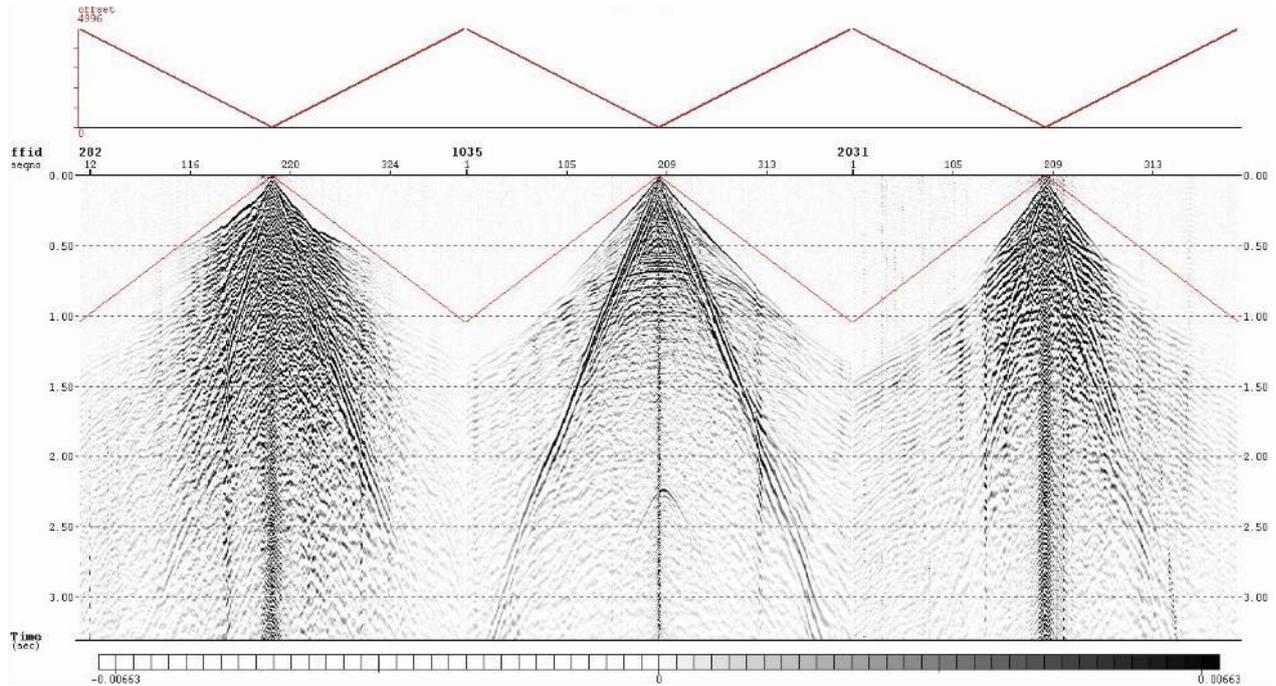


Рисунок 3.2.2. Пример контроля качества присвоения геометрии

Коррекция за сферическое расхождение

С целью компенсации сферического расхождения и выравнивания амплитуд по времени была введена поправка за сферическое расхождение (рисунок 3.2.3).

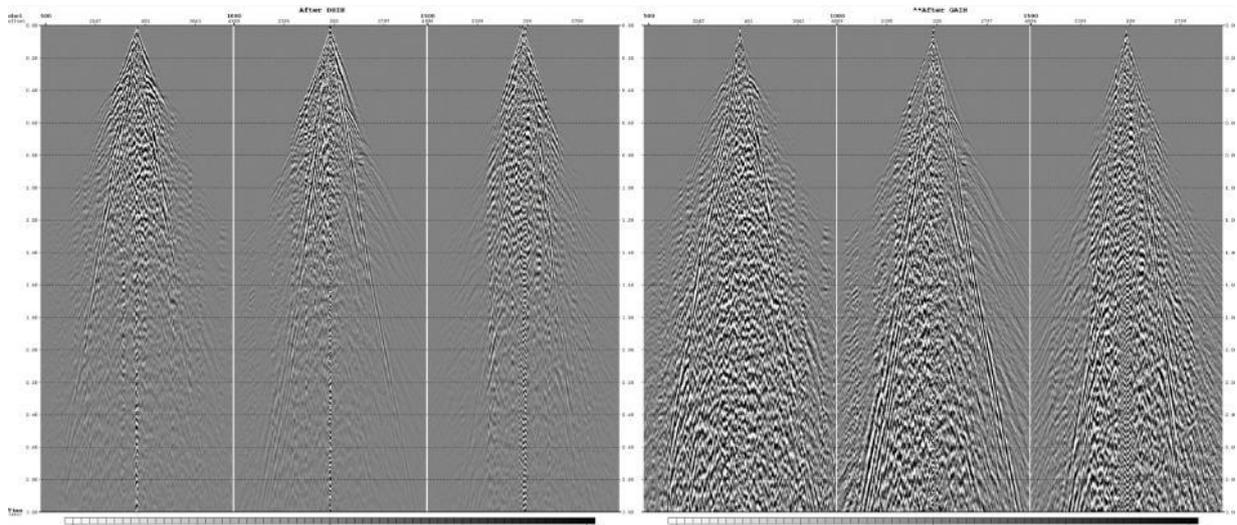


Рисунок 3.2.3. Сейсмограммы до и после коррекции за сферическое расхождение

Расчет априорных статических поправок

На начальном этапе была произведена первичная оценка скоростей суммирования и получена первая контрольная сумма для последующей оценки корректности расчета априорной статистики.

По исходным сейсмограммам выполнялось прослеживание волн в первых вступлениях, учет зоны малых скоростей, построение глубинно-скоростной модели ВЧР по рефракторной и томографической технологии (данные процедуры выполнялись в программном пакете “Flatirons”).

Первые вступления прослеживались на каждой сейсмограмме ОПВ на удалениях 0-4000 м (рисунок 3.2.4).

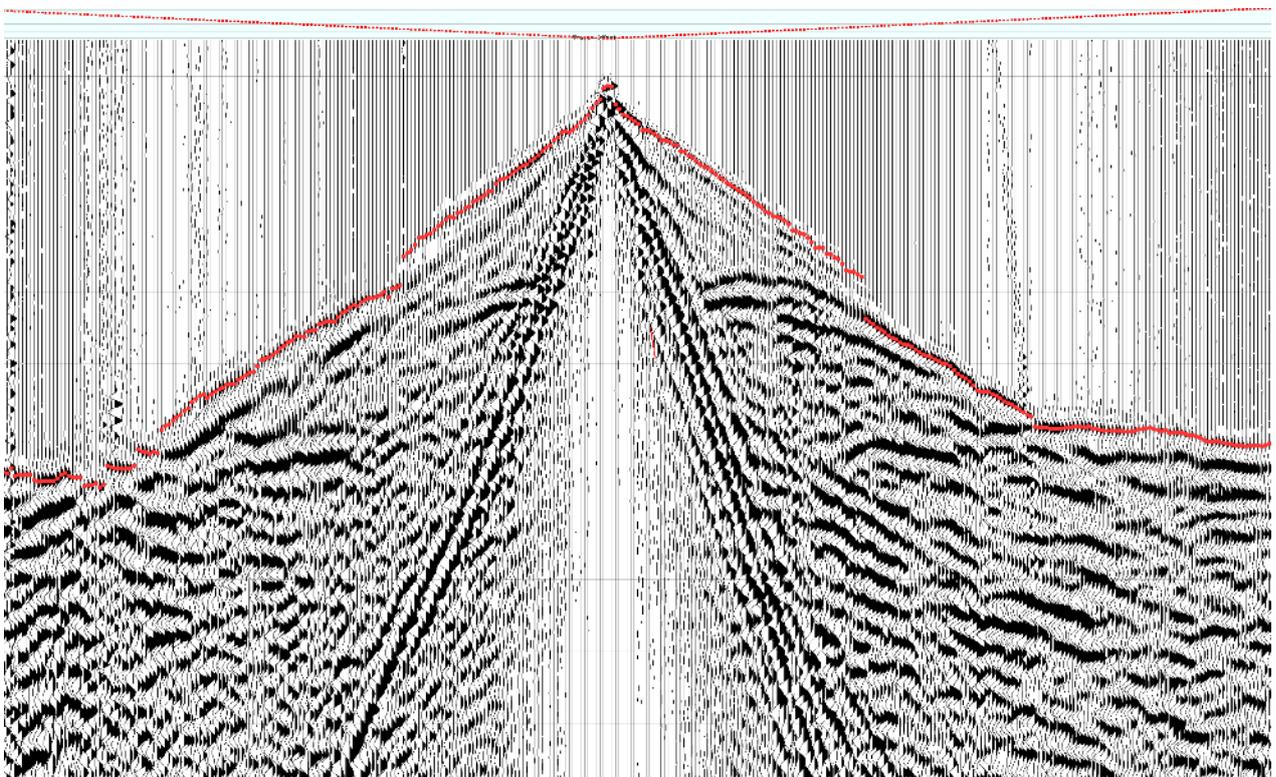


Рисунок 3.2.4. Пример прослеживания первых вступлений на сейсмограмме ОПВ

На рисунке 3.2.5 представлены скоростные модели ВЧР (серая заливка на последних двух моделях – зоны повышенного УЭС). Рефракторная и томографическая технологии не дали существенного прироста информации на сейсмических разрезах (рисунок 3.2.6). Для уточнения модели ВЧР применялось комплексирование геофизических методов, поскольку рассматриваемый профиль относится к лицензионному участку в особо сложной зоне, а по томографической модели ВЧР очерчиваются контуры аномальных высокоскоростных тел.

На рисунок 3.2.6 показаны временные разрезы: (а) – с вводом статических поправок по рефракторной модели, (б) – с вводом статических поправок по томографической модели, (в) – по

модели с учетом комплексирования. Наилучшая корреляция и спрямление горизонтов отмечается по результатам ввода статистики по комплексной модели.

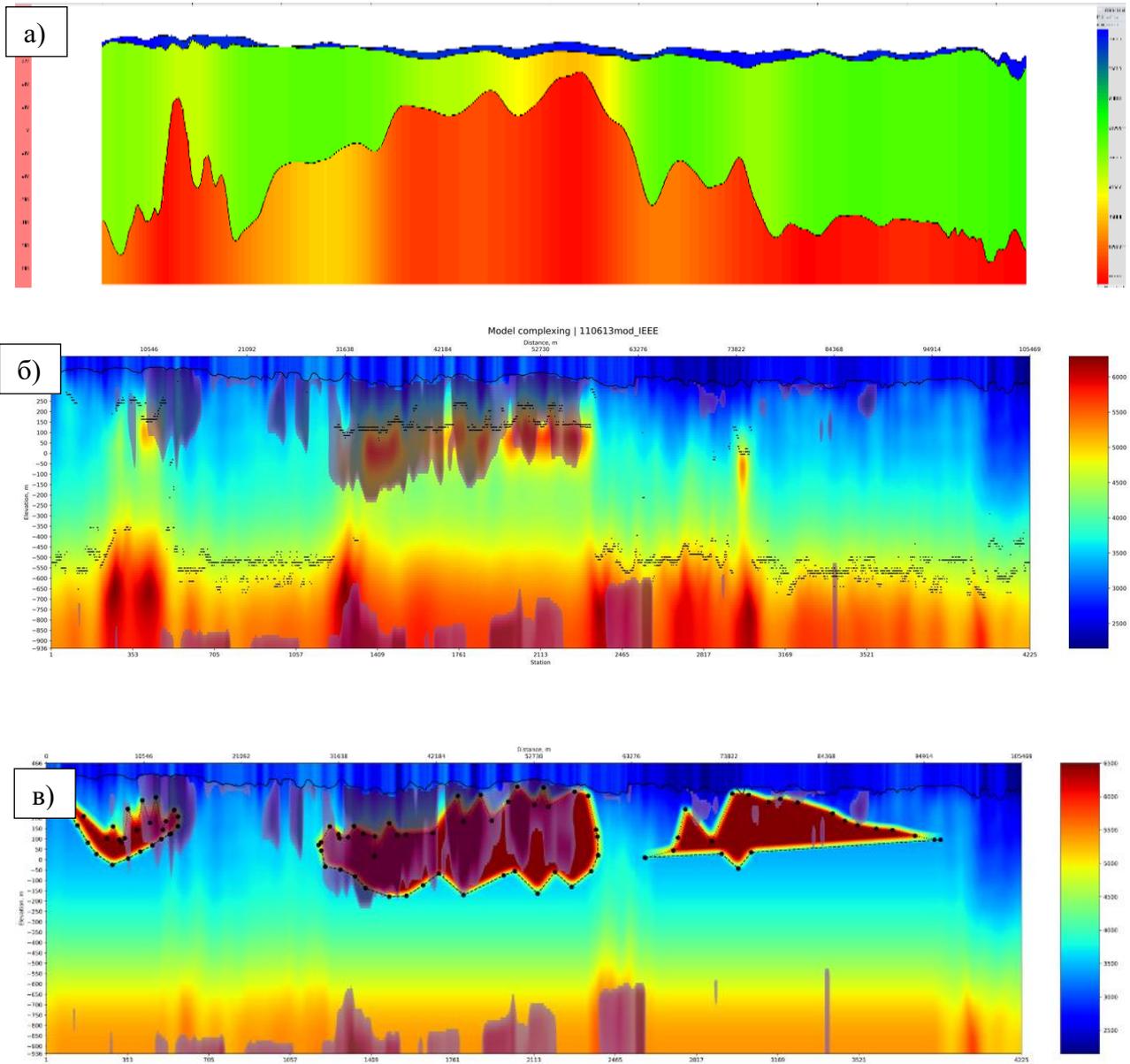


Рисунок 3.2.5. Скоростные модели ВЧР: а – рефракторная, б – томографическая, в – комплексная

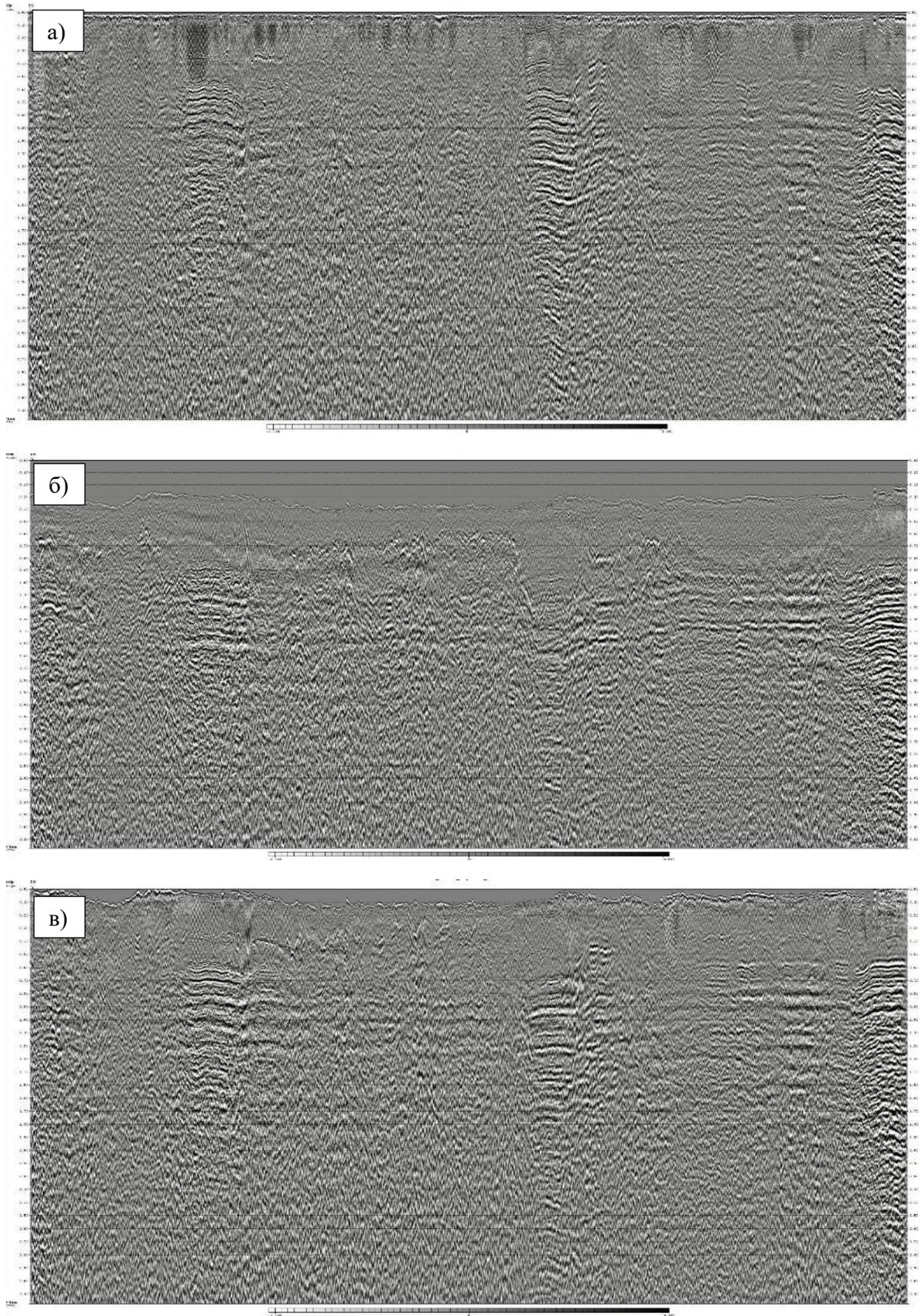


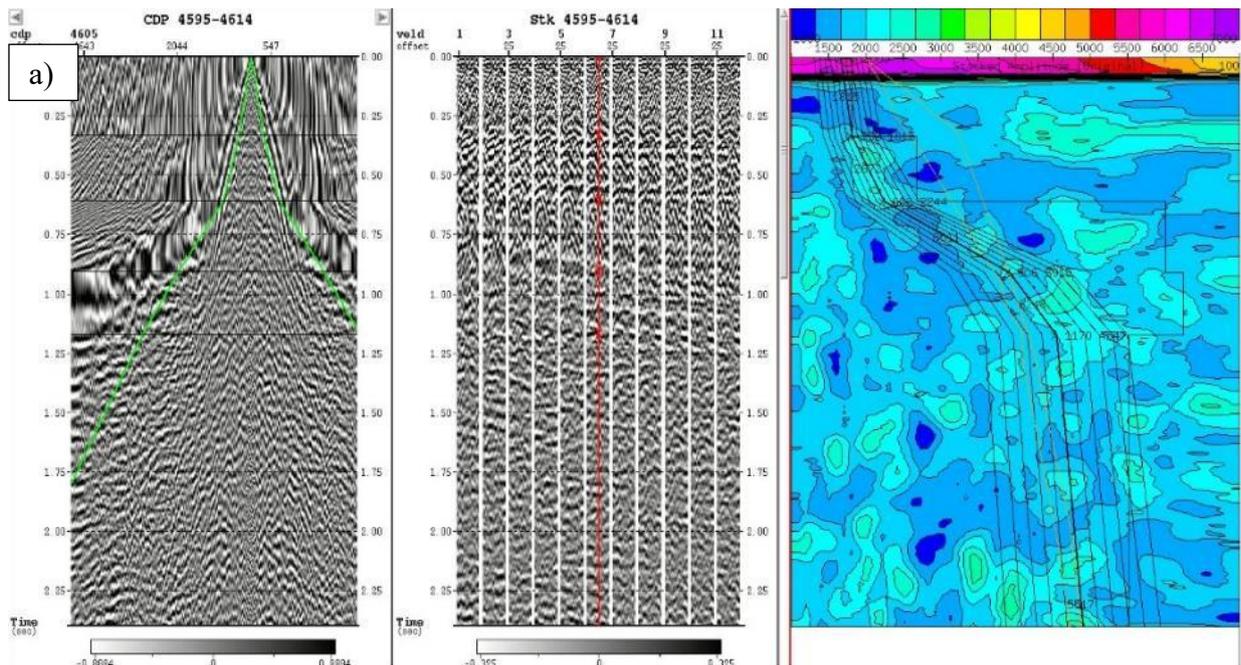
Рисунок 3.2.6. Временные сейсмические разрезы после ввода априорных статических поправок по: рефракторной модели (а), по томографической (б), по комплексной (в)

Многоэтапная коррекция остаточных статических и кинематических поправок

Коррекция остаточных статических поправок выполнялась автоматическими процедурами (erpstk, StaticR). Процедуры автоматической коррекции работают по алгоритмам, основанным на максимизации энергии суммирования. При расчете использовалось окно от 200 мс до 700 мс.

С целью улучшения качества прослеживаемости горизонтов на временных разрезах был произведен анализ кинематических поправок с шагом 250 точек ОГТ на различных этапах обработки (рисунок 3.2.7).

Было выполнено суммарно 17 итераций автоматической коррекции статических поправок, после каждого цикла выполнялось уточнение скоростной модели (Давлетханов, 2017). Рассчитанные априорные и полученные после автоматической коррекции статические поправки были просуммированы. На рисунке 3.2.8 представлены разрезы ОГТ до и после коррекции остаточных статических и кинематических поправок.



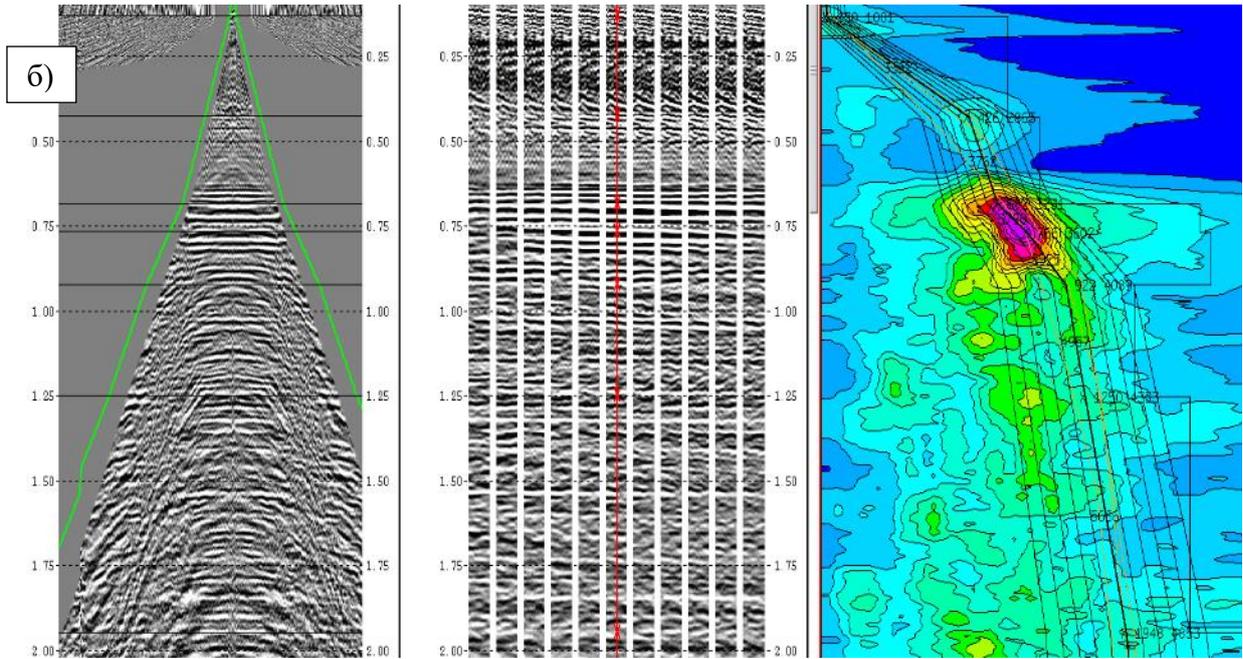
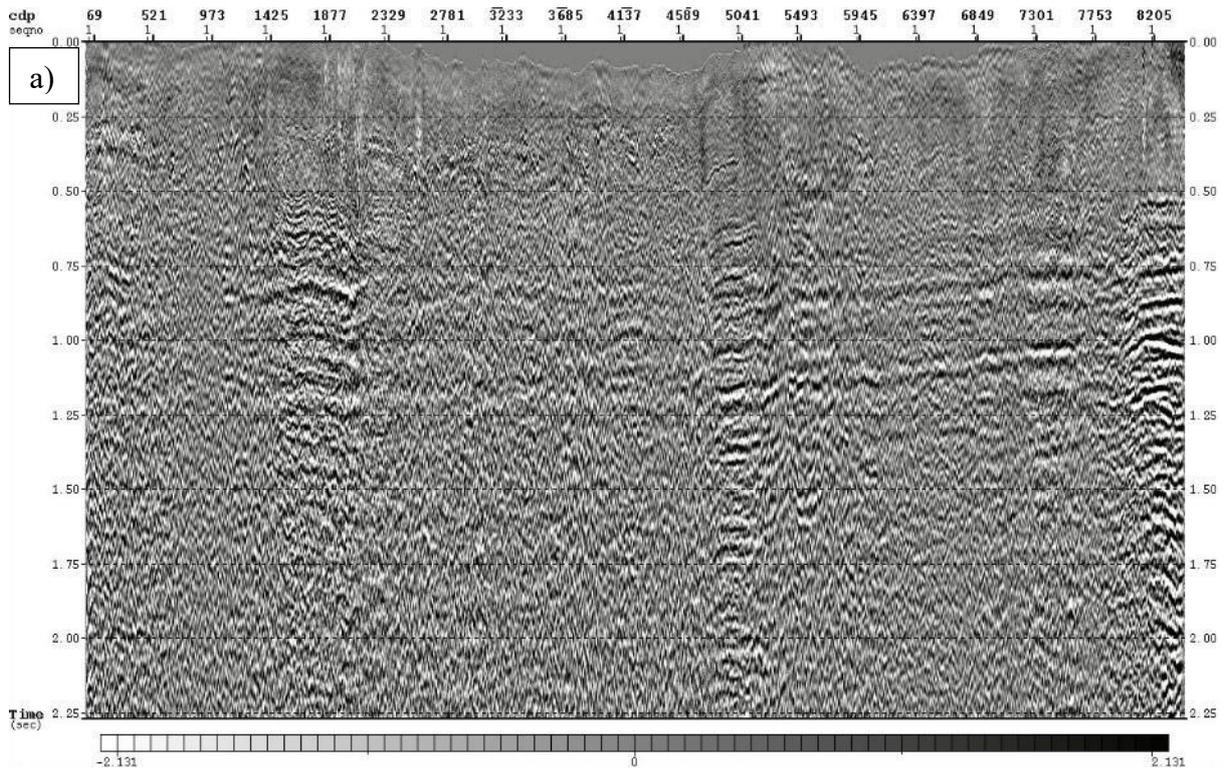


Рисунок 3.2.7. Пример пикировки скоростей для расчета кинематических поправок на этапе получения первичного разреза (а) и на этапе последней итерации корректировок кинематического закона (б)



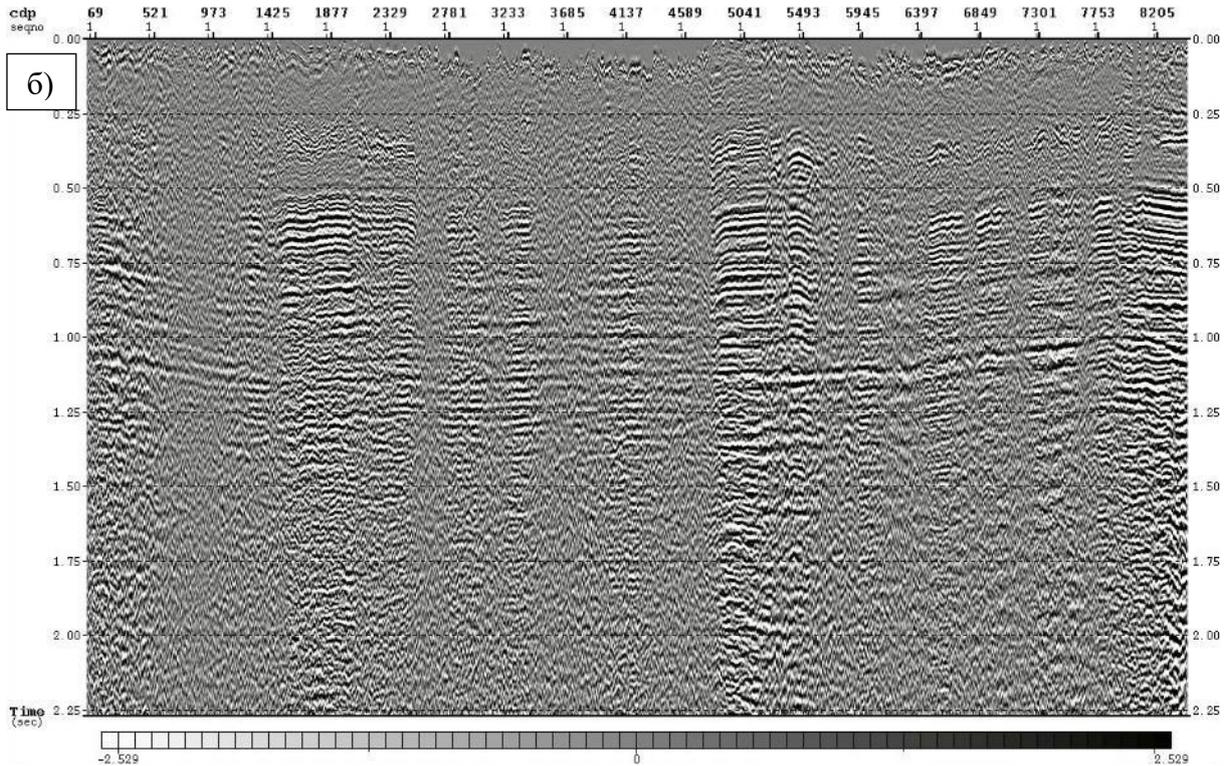


Рисунок 3.2.8. Временные сейсмические разрезы до (а) и после (б) коррекции остаточных статических и кинематических поправок.

Коррекция остаточных кинематических сдвигов

С целью дополнительного улучшения качества данных и повышения прослеживаемости горизонтов в целевом интервале была выполнена коррекция остаточных кинематических сдвигов. Процедура выполнялась в 7 итераций, на каждом из этапов выполнялся перерасчет горизонтальных спектров скорости (рисунок 3.2.9).

На рисунке 3.2.10 представлены сейсмические разрезы до и после коррекции (для удобства сравнения представлены с АРУ), а также соответствующие им горизонтальные спектры. После коррекции значительно снизилось влияние среднепериодных аномалий, улучшилась корреляция горизонтов. Улучшение корреляции также сказалось на спектрах скоростей – максимумы амплитуд полезных отражений стали более локализованы, что позволило провести очередной этап корректировки скорости.

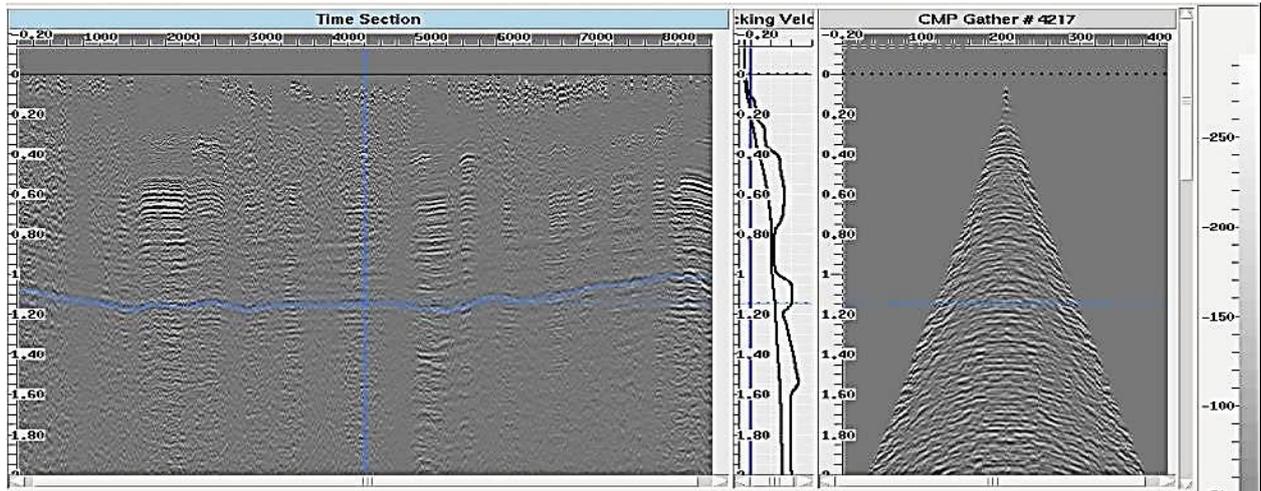
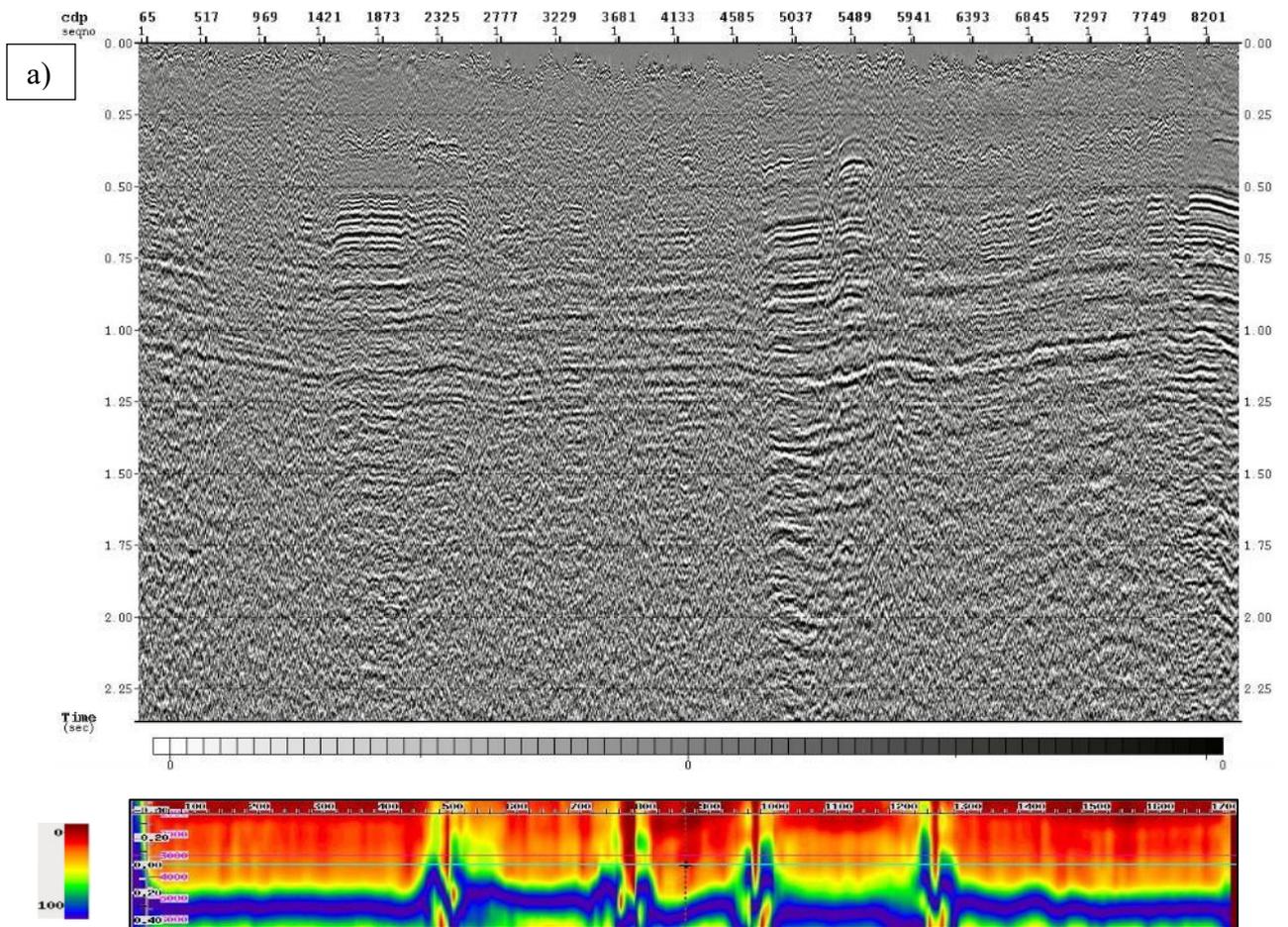


Рисунок 3.2.9. Выбор горизонта для корректировки остаточных кинематических сдвигов.



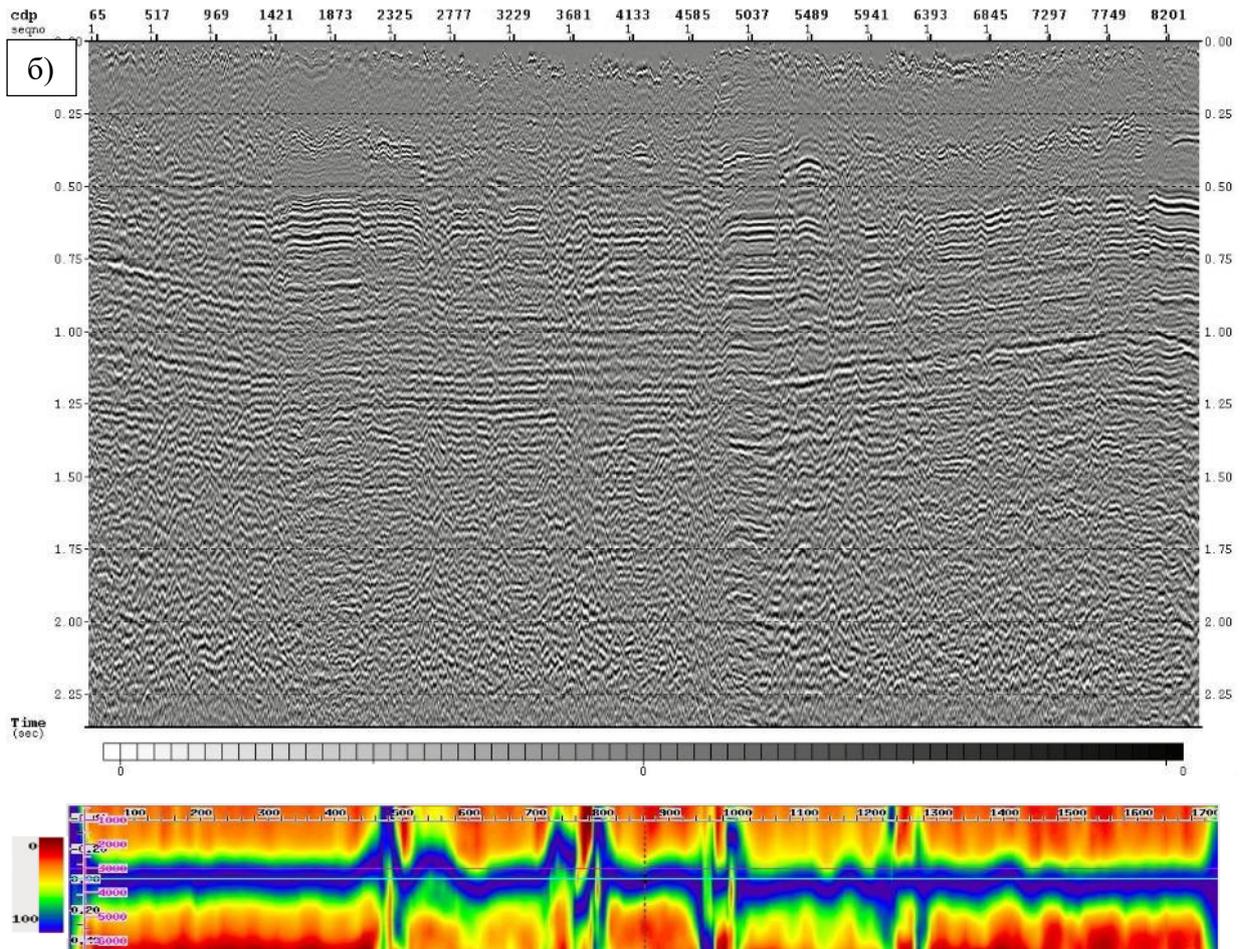


Рисунок 3.2.10. Временные сейсмические разрезы до (а) и после (б) коррекции остаточных кинематических сдвигов, а также соответствующие им горизонтальные спектры скорости.

Поверхностно-согласованная регулировка амплитуд (балансировка)

Способы поверхностно-согласованной коррекции опираются на 4-х факторную модель. В соответствии с этой моделью различия уровня амплитуд сейсмических трасс обусловлены следующими 4-мя факторами: условиями возбуждения (S_i), условиями приема (R_j), удалением источник-приемник (M_i), а также положением срединной точки (C_{ij}). Эти факторы являются основными для последующего анализа и динамической интерпретации геологического содержания (ф.17) (Yilmaz, 2001).

$$A_{ij} = S_i * R_j * C_{ij} * M_i \quad (17)$$

Расчет множителей проводился в широком окне 350-3000 мс – ближние удаления, 1800-3300 мс – средние удаления, 2000-4500 мс – дальние удаления по методу осреднения множителей в заданном окне, после чего к данным применялись множители, отвечающие за S_i и R_j , что позволяет сохранить соотношения относительных амплитуд.

Данная процедура выполнялась после каждого этапа шумоподавления, а также после деконволюции. На рисунке 3.2.11 представлены полученные сейсмограммы после первого этапа

шумоподавления до и после балансировки. После процедуры амплитуды стали более равномерно распределены по сейсмограммам.

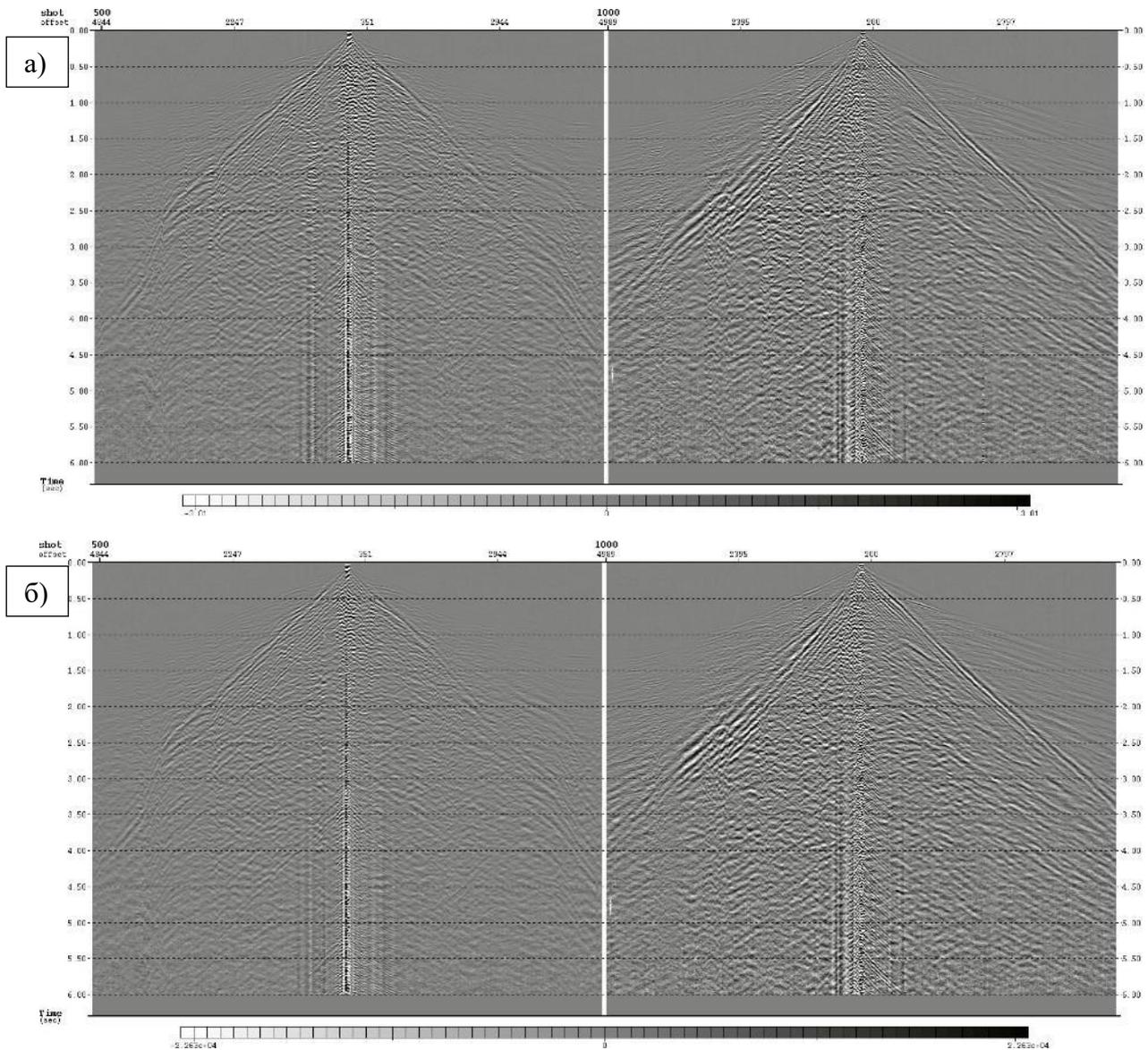


Рисунок 3.2.11. Сейсмограммы до (а) и после (б) балансировки амплитуд

Подавление амплитудных волн-помех и случайного шума в сортировках ОПВ и ОПП

«Подавление волн помех выполнялось с применением технологии LIFT (Leading Intelligent Filter Technology). Каскадное подавление волн-помех с применением различных видов сортировок входных данных позволяет эффективно подавить волны-помехи различной природы с сохранением амплитуд и фазовых характеристик сигнала. В основе этой методики лежит выделение по сейсмическим данным сигнала и шума в разных частотных диапазонах, ослабление волн-помех до уровня меньшего или равного уровню полезной записи в каждом частотном диапазоне с применением различных фильтров и вычисление суммы остаточных компонент

сигнала, которые формируют сигнальную часть сейсмических данных (рисунок 3.2.12) (Булеев, 2016, Емельянова и др., 2018).

Из компоненты «сигнал» выделялись остаточные помехи. Из компоненты «шум» удалялся остаточный сигнал с прибавлением его к первичной компоненте «сигнал». Уровень амплитуд шумовой компоненты понижался до 30% от первоначального уровня и вычитался из исходных данных.

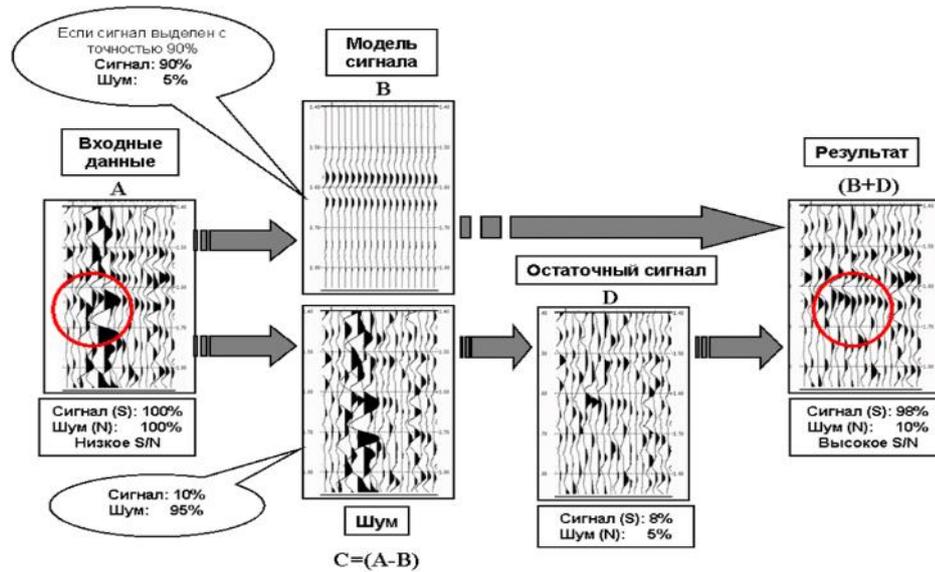


Рисунок 3.2.12. Упрощенная блок-схема технологии LIFT

Исходные сейсмограммы раскладывались на «шум»/«сигнал», разделение производилось по наборам частот. В каждом диапазоне производилась медианная фильтрация в окне по 5-7 трасс. В результате фильтрации шумовая компонента была приведена к уровню ниже, чем амплитуда сигнальной части. В процессе обработки на разных этапах шумоподавление выполнялось 3 раза.

Для LIFT-1 рассматривались интервалы, заданные трапецевидными полосовыми фильтрами: 2-4-10-20 Гц; 10-20-30-40 Гц и т.д. до 90-100-120-140 Гц.

Для LIFT-2 интервалы 2-4-6-12 Гц; 6-12-20-30 Гц и т.д. до интервала 100-120-200-225 Гц.

На этапе LIFT-3 выполнялось ослабление линейных волн-помех на сейсмограммах. Борьба с волнами такого типа производится по результатам тестирования различных наклонов, в данном случае, ослабление выполнялось в интервале 600-1900 м/с.

Результат применения шумоподавления представлены на рисунке 3.2.13. Между этапами LIFT-2 и LIFT-3 была выполнена деконволюция, особенности которой рассмотрены ниже.

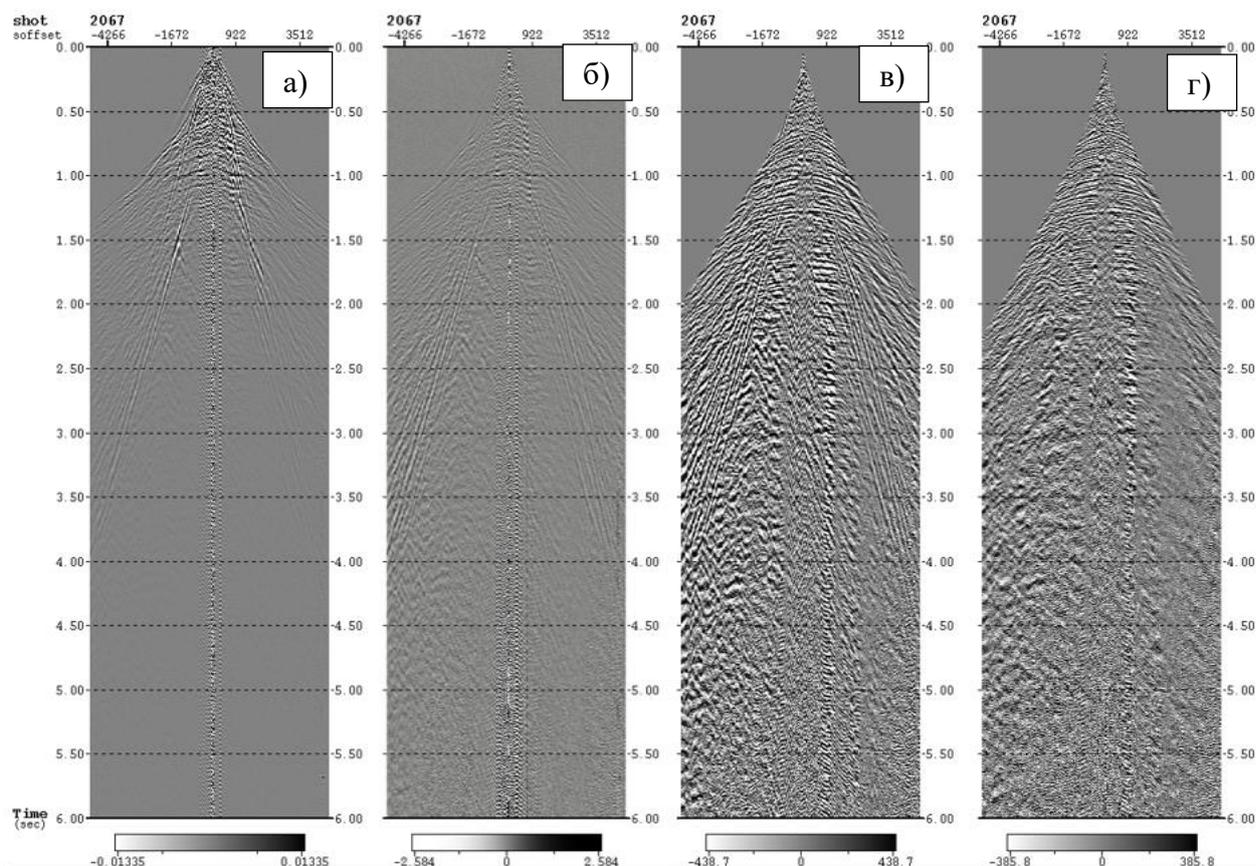


Рисунок 3.2.13. Сейсмограммы (а) до подавления волн-помех, (б) после первой итерации, (в) после второй итерации, (г) после третьей итерации.

Поверхностно-согласованная деконволюция (ПСД)

«Целью ПСД является увеличение временной разрешающей способности данных с одновременным увеличением амплитудно-частотных характеристик и сохранением формы импульса сигнала, а также для подавления короткопериодных кратных волн. Исходными данными для расчета операторов ПСД являлись автокорреляционные функции (АКФ), осредненные по ПП и ПВ» (Переволоцкая, 2018; Денисов, Фиников, 2007)

По результатам тестирования материалов была выбрана деконволюция сжатия (спайковская) со следующими параметрами:

Уровень белого шума – 2%;

Длина оператора - 400 мс

Шаг – 8.

Применялся однооконный режим расчета оператора, чтобы сохранить форму импульса на всем временном интервале сейсмической записи. Окно расчета оператора 110-2500 мс – ближние удаления, 2520-4200 мс – дальние удаления (рисунок 3.2.14 – 3.2.15).

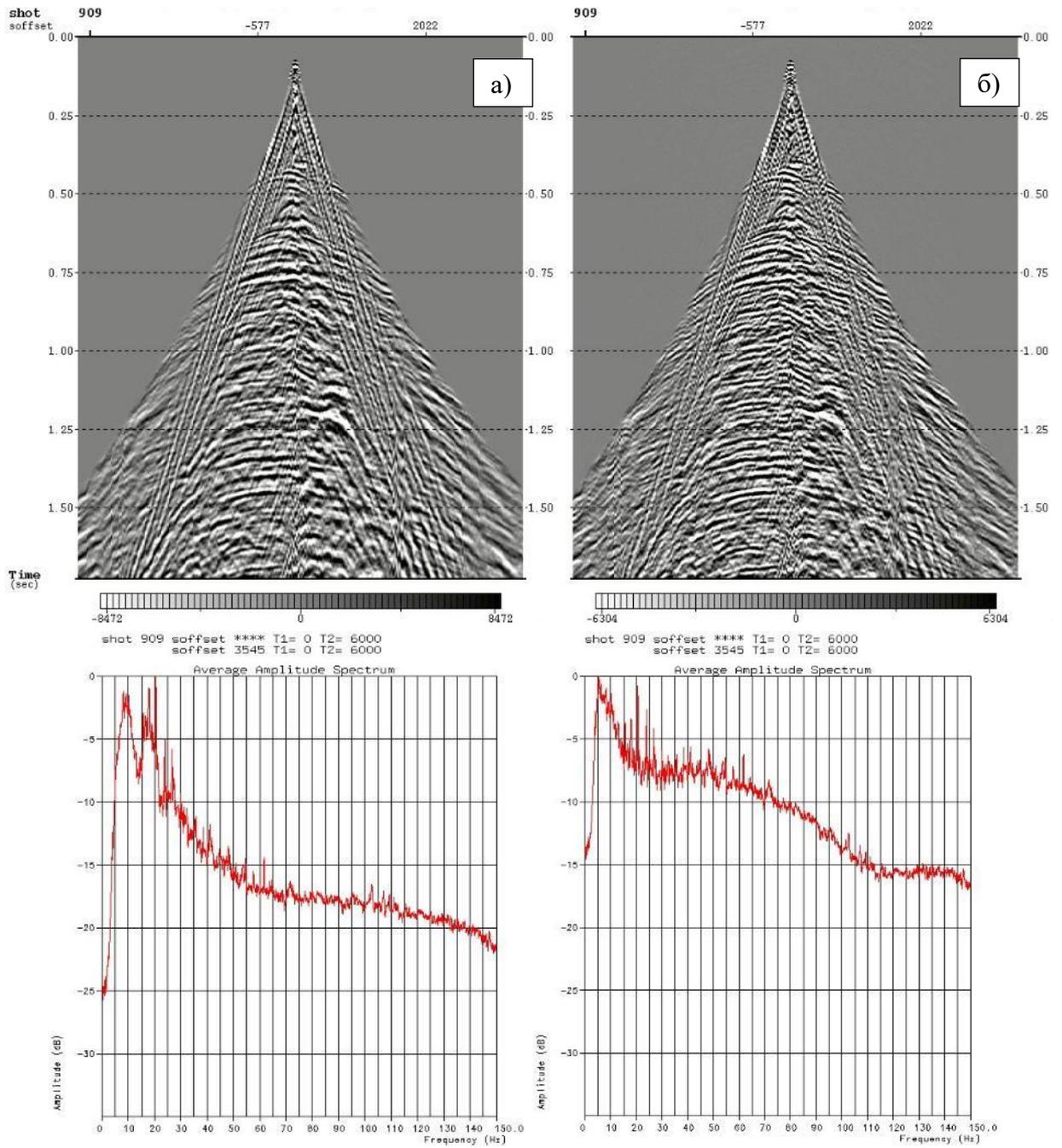


Рисунок 3.2.14. Сейсмограммы и амплитудно-частотные характеристики до (а) и после (б) поверхностно-согласованной деконволюции.

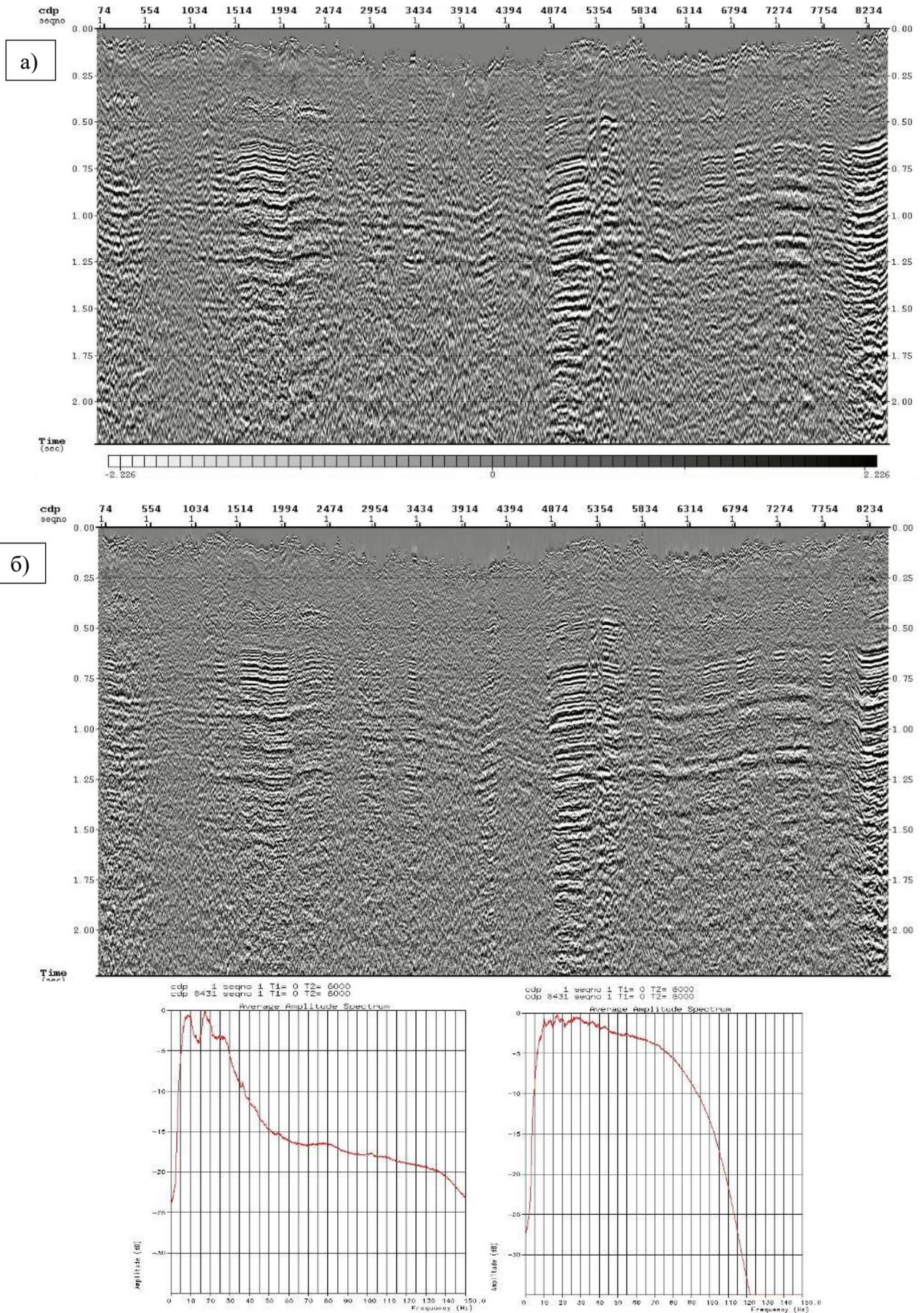


Рисунок 3.2.15. Суммарные разрезы и соответствующие им амплитудно-частотные спектры до (а) и после (б) поверхностно-согласованной деконволюции

Временная миграция после суммирования и постобработка

Для рассматриваемого типа данных была выбрана временная миграция после суммирования, поскольку по разрезу преимущественно сохраняется горизонтальное залегание слоев с относительно постоянными скоростями. Применение глубинной миграции также тестировалось на некоторых участках региона, результаты показывают высокую эффективность процедуры в областях, имеющих более сложное структурное строение (Данько и др., 2021).

В качестве базовых скоростей для временной миграции использовались окончательные скорости суммирования, уменьшенные на 15%. Из скоростей суммирования была получена сглаженная скоростная модель.

Также была выполнена постмиграционная обработка суммарных разрезов. Для дополнительного улучшения прослеживаемости – когерентная фильтрация, для компенсации локальных изменений амплитуд – потрассная балансировка в перекрывающихся окнах (рисунок 3.2.16).

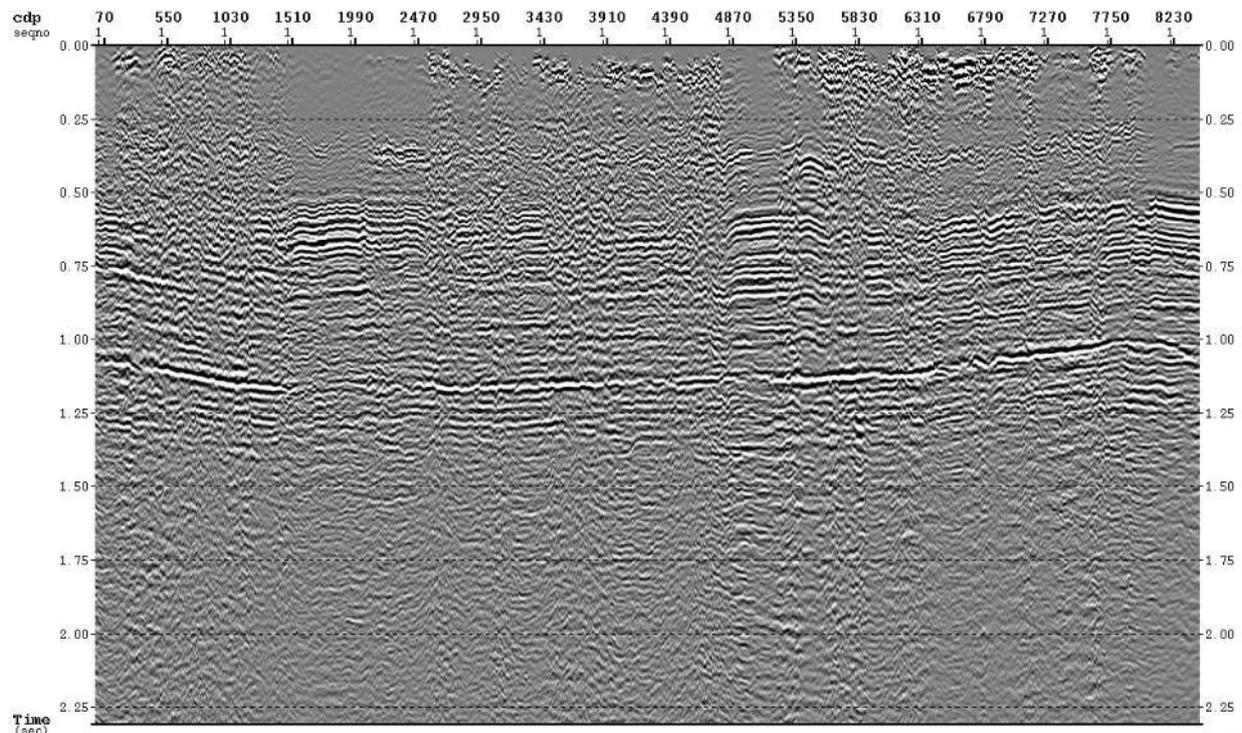


Рисунок 3.2.16. Результат постобработки мигрированного сейсмического разреза

Сравнение результата, полученного стандартной методикой и оптимальной

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.

По результатам обработки с использованием предлагаемого графа значительно улучшается корреляция отражений, компенсируются среднепериодные аномалии, появляется возможность для непрерывной уверенной корреляции отражающих горизонтов. Вероятность обнаружения перспективных объектов повышается.

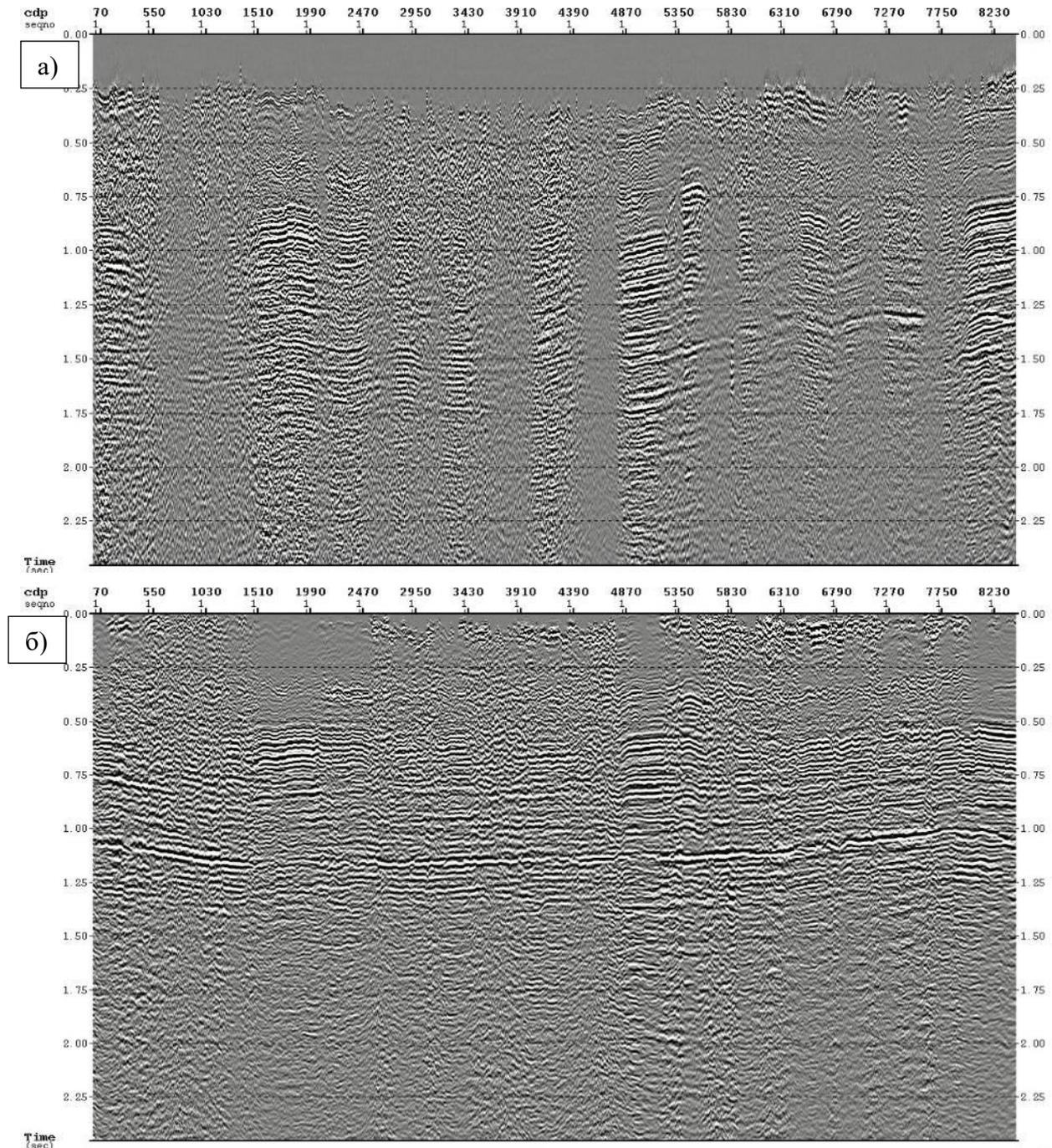


Рисунок 3.2.17. Сравнение результатов, полученных стандартной обработкой (а) и обработкой, согласно предлагаемому графу (б)

3.2.2. Примеры результатов, полученных с применением предлагаемого подхода

Пример 1. Риф под надвигом, подтвержденный бурением

Как отмечалось выше, серьезные аномалии в ВЧР могут препятствовать эффективному применению технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов. Однако, при выполнении одного из ключевых проектов 3Д удалось получить результат высокого качества, который является отличным примером появления новых перспектив для лицензионных участков после применения предлагаемой технологии.

На рисунке 3.2.18 представлен фрагмент модели ВЧР, по которой с высокой вероятностью прогнозируется наличие надвига. Поднятие осей синфазности в этой зоне на сейсмическом разрезе подтверждает эту теорию.

На рисунке 3.2.19 представлены суммарные сейсмические разрезы по линии в этой зоне до и после коррекции описанной методикой. В результате многоитеративной коррекции удалось получить не только восстановление отражений, но и обнаружить перспективный объект (рифовая органогенная постройка) прямо под надвиговой структурой. По результатам интерпретации и оценки перспективности обнаруженного объекта, была спроектирована и пробурена поисково-разведочная скважина, подтвердившая наличие перспективного объекта и его нефтеносность.

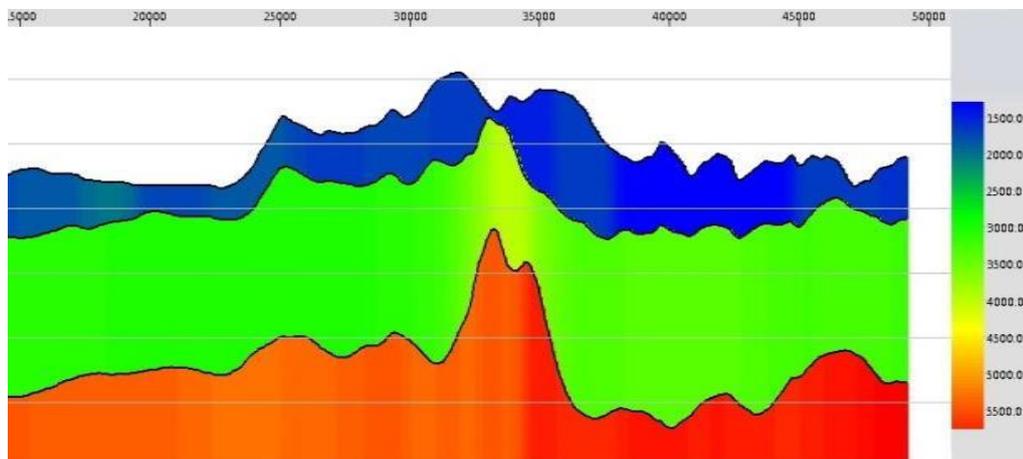


Рисунок 3.2.18. Фрагмент с надвигом в модели ВЧР, полученной рефракторным методом.

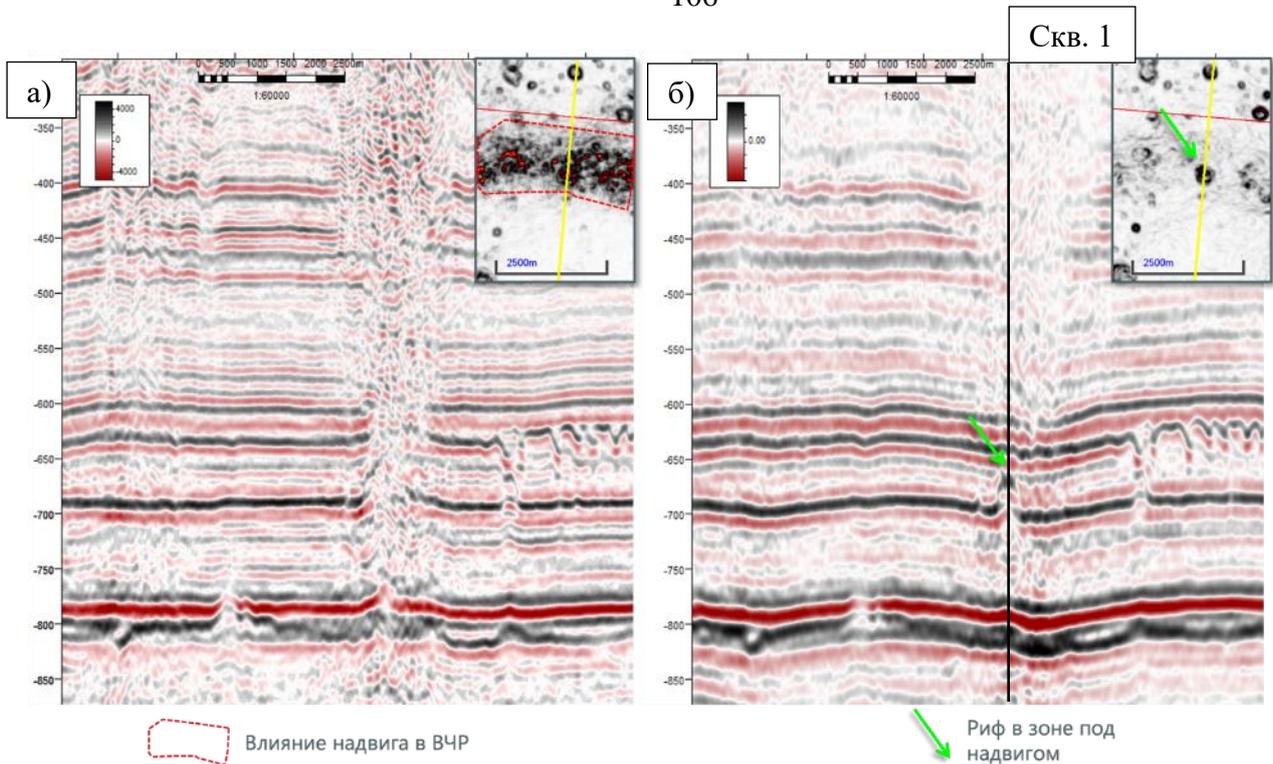


Рисунок 3.2.19. Фрагмент сейсмического разреза до (а) и после применения технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов (б)

Пример 2. Значительное сужение зоны плохого качества данных сейсморазведки

По результатам переобработки большого объема данных 3Д в зоне на стыке I и III классов сложности, согласно предлагаемой оптимальной технологии, удалось значительно повысить качество данных сейсморазведки.

На рисунке 3.2.20 представлены результаты обработки сейсмических данных. На рисунке 3.2.20-а результат работы другой компании, на рисунке 3.2.20-б результат обработки ООО «РН-Эксплорейшн» согласно описанной в этой работе методике. В центральной зоне значительно улучшилась прослеживаемость отражающих горизонтов.

На рисунке 3.2.21 приведены карты когерентности в одном из интервалов. Контуром подсвечены – зоны пониженного качества. На примере неоптимальной обработки площадь таких территорий составляла 590 км². После применения оптимального графа обработки суммарная площадь таких зон уменьшились более чем на 60% и составила 230 км².

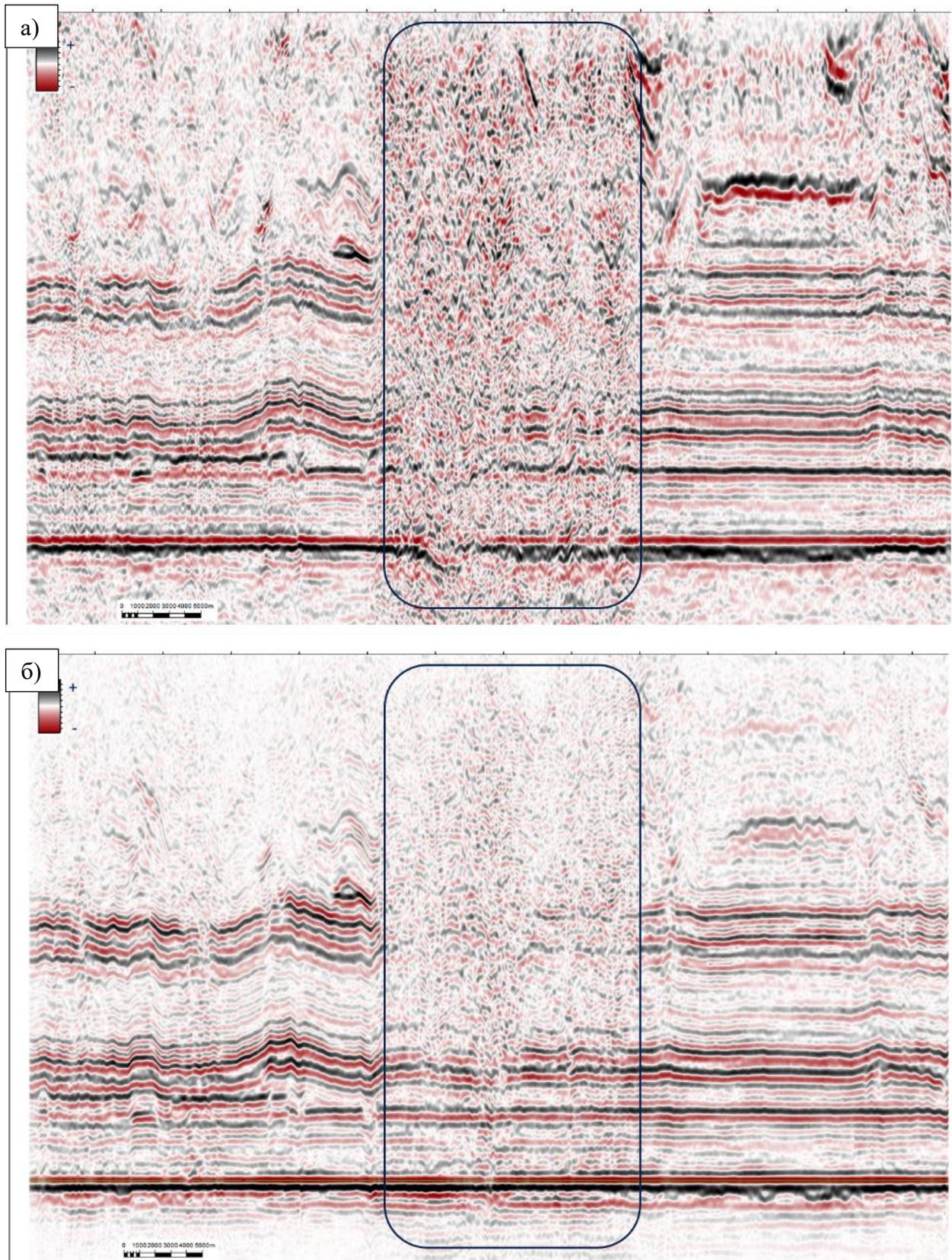


Рисунок 3.2.20. Сейсмические разрезы, полученные в результате (а) стандартной технологии обработки и (б) с предлагаемой оптимальной технологией

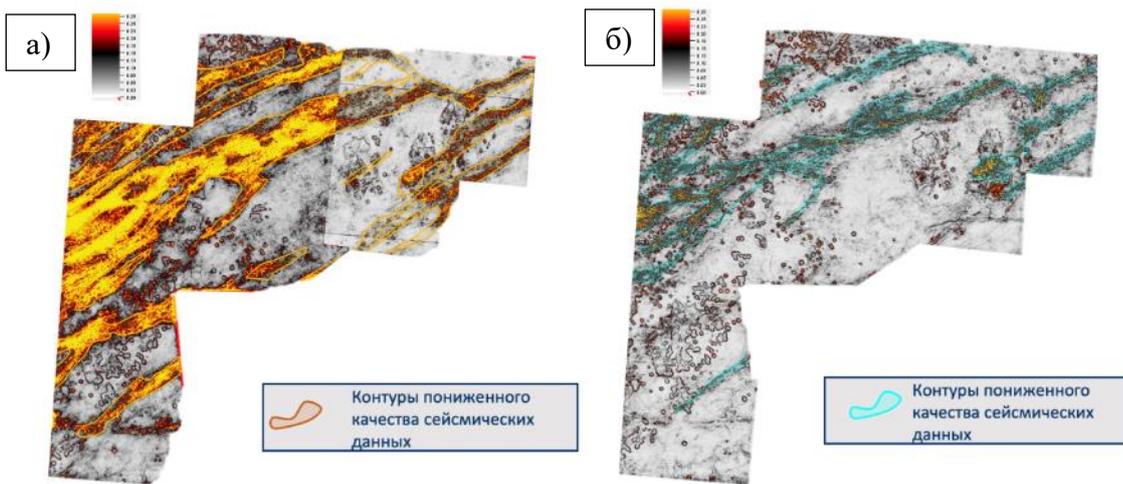


Рисунок 3.2.21. Изменение контуров пониженного качества данных сейсморазведки на карте когерентности. (а) – результат обработки другой компании, (б) – результат обработки компании ООО «РН-Эксплорейшн»

Пример 3. Закартинована серия рифов в зоне влияния ВЧР

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 (рисунке 3.2.22). Предположительно, в ВЧР над перспективными объектами расположена надвиговая структура.

На рисунке 3.2.23 представлен слайс спектральной декомпозиции, на котором контурами подсвечены рифовые постройки по результатам неоптимальной и оптимальной обработки. Прирост ресурсной базы по одиночным рифовым постройкам составил 1.3 млн.т. нефти.

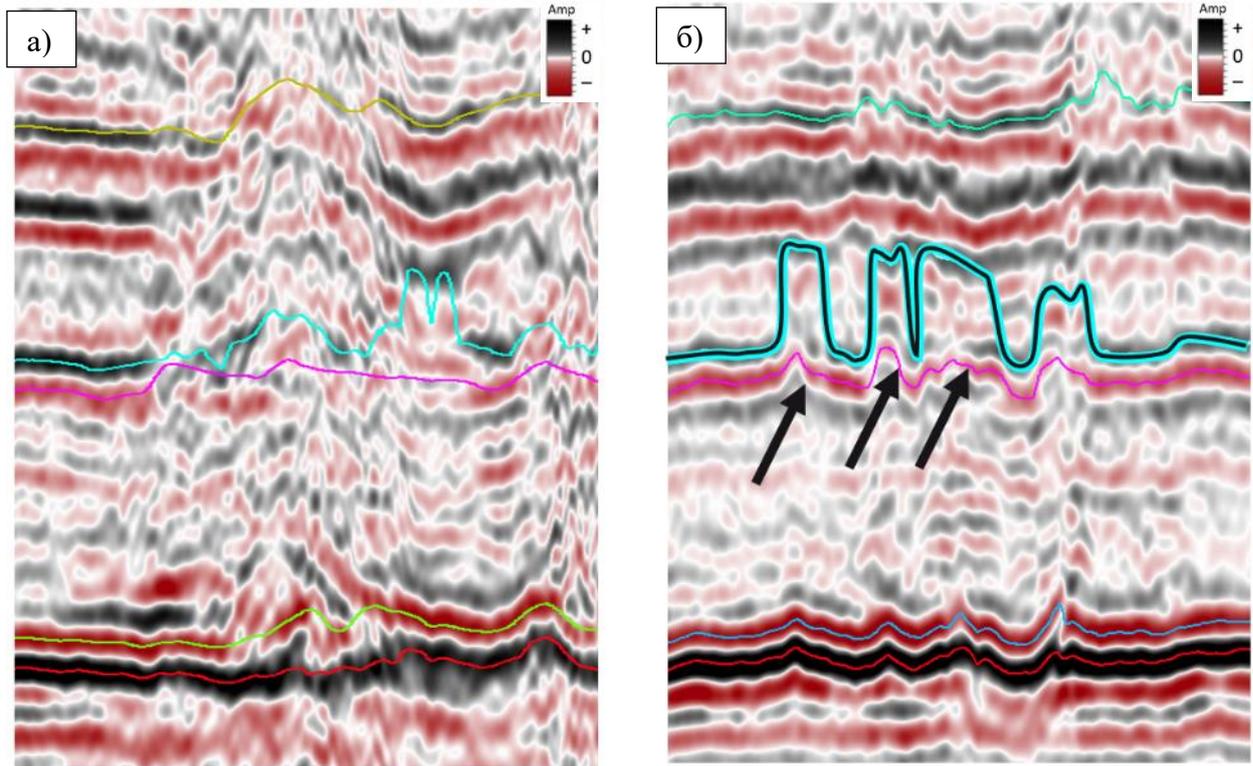


Рисунок 3.2.22. Сейсмические разрезы с корреляцией целевых горизонтов как результат переобработки сейсмических данных (б) в сравнении с результатом неоптимальной обработки (а)

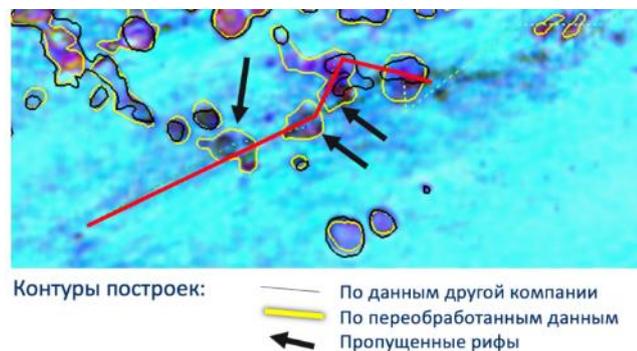


Рисунок 3.2.23. Слайс спектральной декомпозиции на уровне опорного горизонта

Пример 4. Повышение точности и детальности структурных построений

По результатам 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. На рисунках 3.2.24 и 3.2.25 представлены примеры сейсмических разрезов по двум профилям.

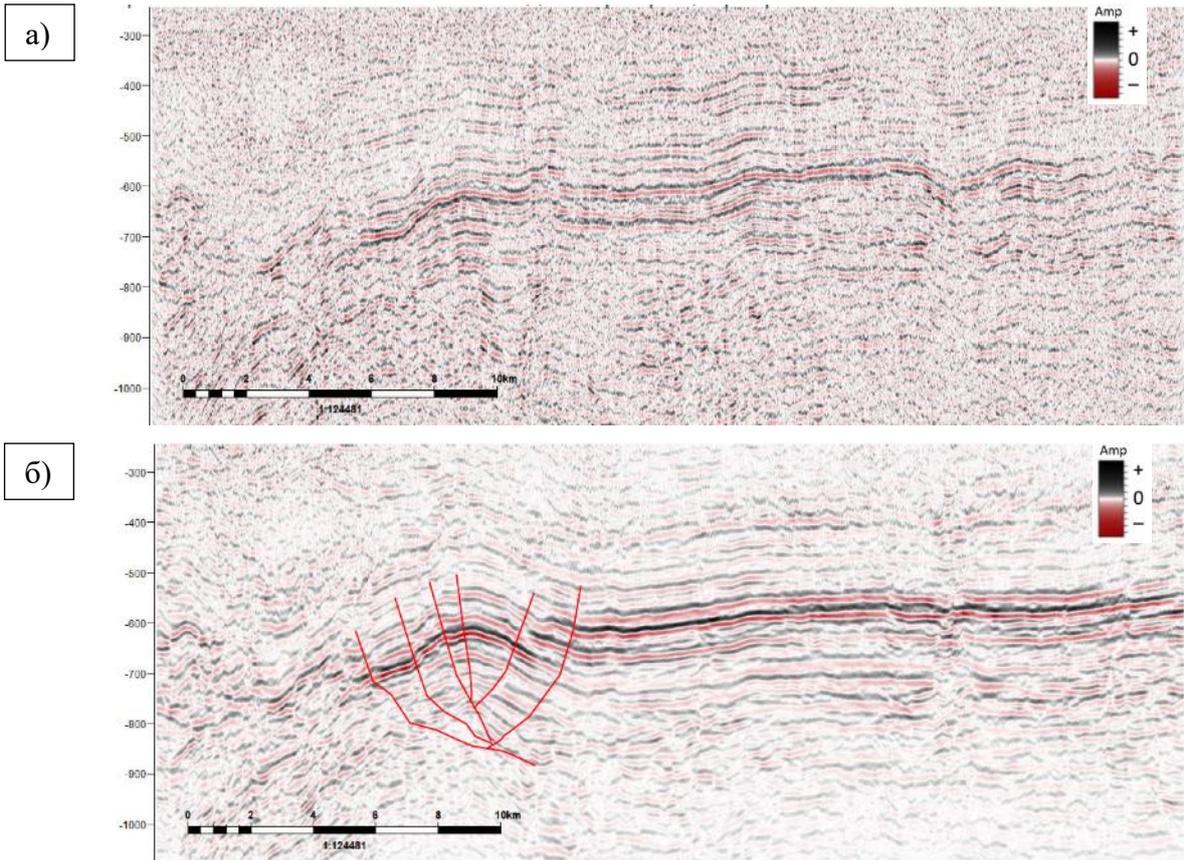


Рисунок 3.2.24. Сейсмический разрез в результате неоптимальной обработки (а) и обработки согласно предлагаемому графу (б) по профилю 1

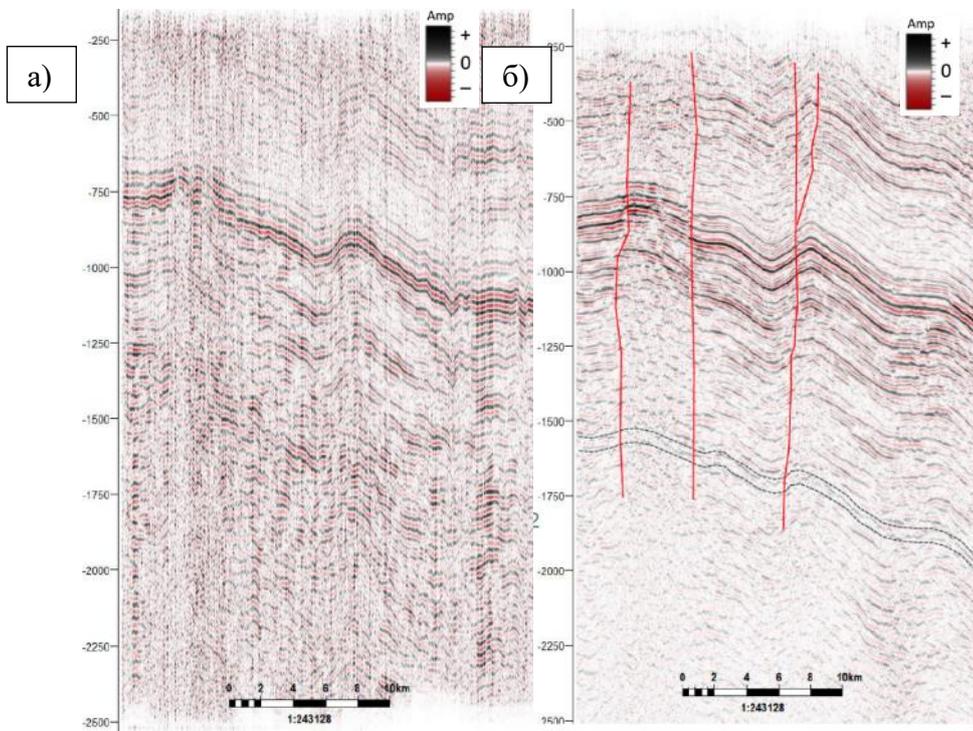


Рисунок 3.2.25. Сейсмический разрез в результате неоптимальной обработки (а) и обработки согласно предлагаемому графу (б) по профилю 2

Пример 5. Уточнение контуров рифовых построек

В результате переобработки еще одного участка, расположенного во II зоне сложности, удалось улучшить корреляцию отражений как в ВРЧ, так и в целевом интервале. Перспективные объекты картируются с большей надежностью (рисунок 3.2.26) 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.

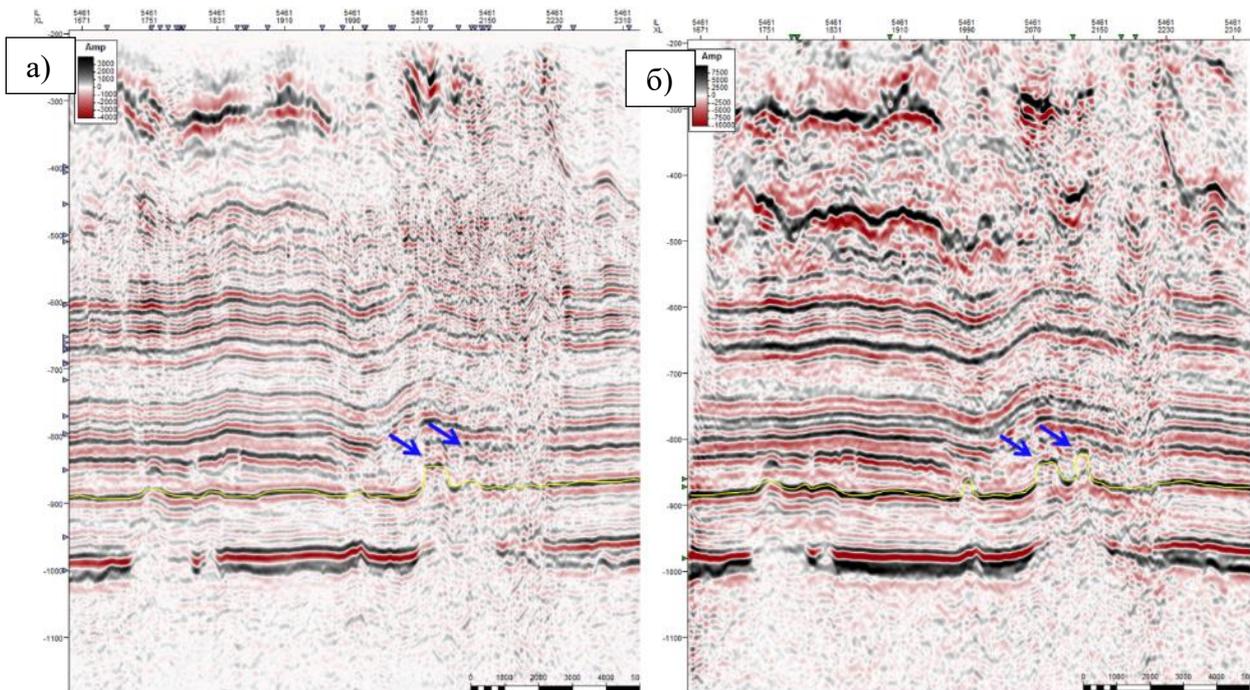


Рисунок 3.2.26. Сейсмический разрез в результате неоптимальной обработки (а) и обработки согласно предлагаемому графу (б)

Пример 6. Недоучет аномалии в результате неоптимальной обработки

Еще один участок, на примере которого представляется возможным оценить необходимость грамотного подхода к обработке, расположен в зоне III-го класса сложности. По результатам архивной обработки был получен сейсмический разрез (рисунок 3.2.27-а) с весьма 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 100 м (рисунок 3.2.28).

Реальный облик сейсмического разреза без применения TRIM-статики представлен на рисунке 3.2.27-б. 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 ГРП.

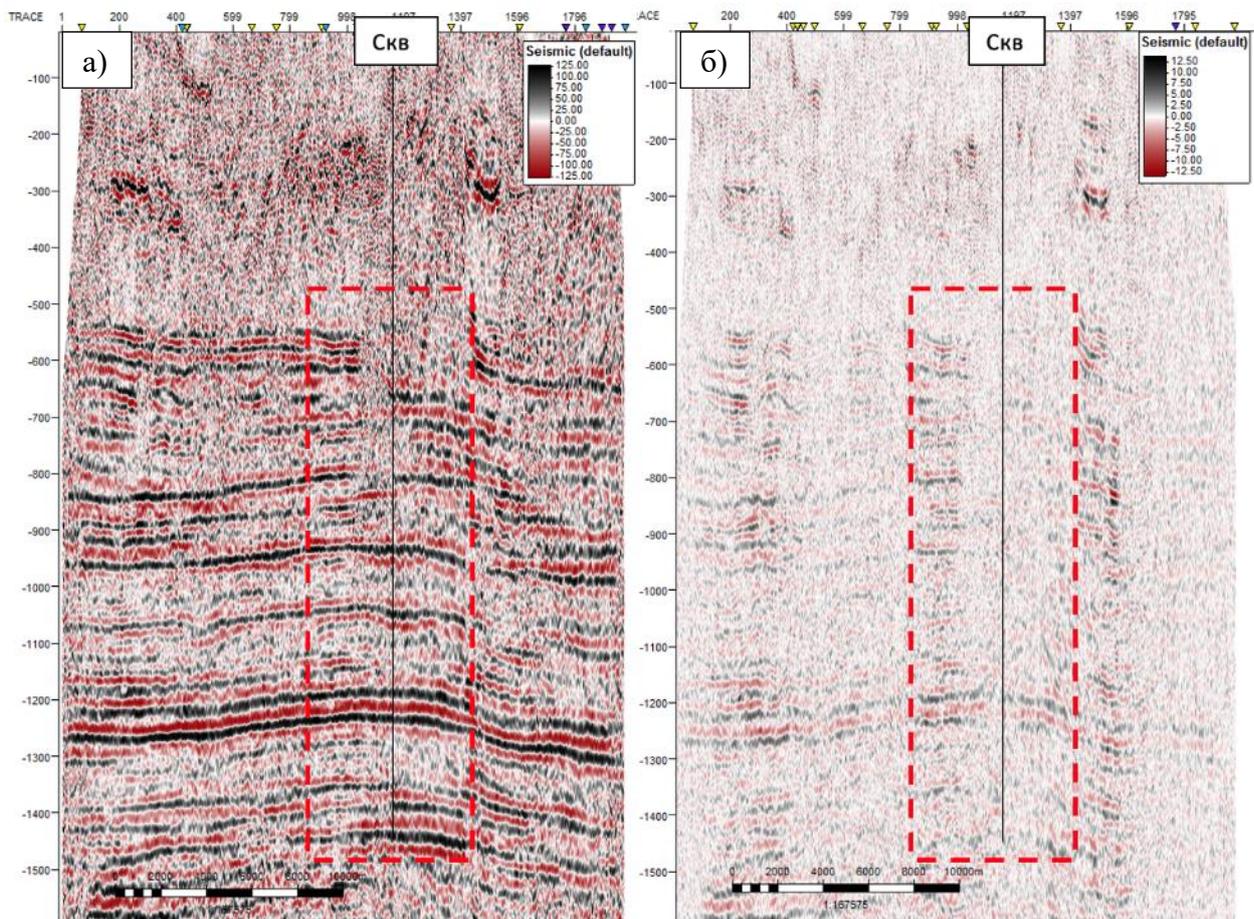


Рисунок 3.2.27. Архивные сейсмические разрезы (а) – с применением TRIM-статики и (б) без применения

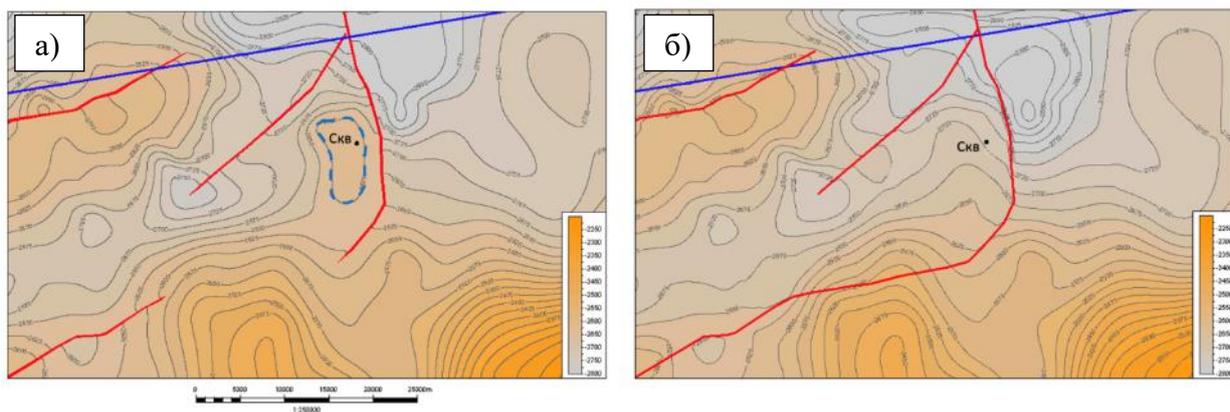


Рисунок 3.2.28. Структурная карта по опорному горизонту, (а) – проектируемая по архивным данным, (б) – скорректированная после бурения

По результатам анализа приведенных примеров было сформировано 3-е защищаемое положение: Предложенная автором технология обработки сейсмических данных в условиях Восточной Сибири позволяет получить качественные сейсмические разрезы даже тогда, когда традиционная обработка дает неудовлетворительный результат.

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 технологии, 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 отсутствии 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 априорной информации для уточнения геометрии аномалообразующих тел.

С учетом обозначенной зоны применимости технологии коррекции остаточных кинематических сдвигов методика позволяет скомпенсировать 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 сокращений

АРУ	Автоматическая регулировка усиления
ВСП	Вертикальное сейсмическое профилирование
ВЧР	Верхняя часть разреза
ГИС	Геофизическое исследование скважин
ГРР	Геологоразведочные работы
ГСМ	Глубинно-скоростная модель
ЗМС	Зона малых скоростей
ЛУ	Лицензионный участок
ОРГ	Общая глубинная точка
ПСД	Поверхностно-согласованная деконволюция
FWI	Full waveform inversion (полноволновая инверсия, обращение полного волнового поля)
LIFT	Leading intelligent filter technology
SWAMI	Surface Wave Analysis Modeling and Inversion (Моделирование анализа поверхностных волн и инверсия)

Список литературы

1. Анисимов Р.Г., Мосяков Д.Е., Шалашников А.В., Фиников Д.Б. Повышение эффективности обработки больших объемов сейсмических данных // Геология нефти и газа. 2021. №3. С. 95–109.
2. Анискович Е.М., Кондрашков В.В. Определение сейсмической скорости методом параметрической развертки отображений // Геофизика. 2004. Спец. выпуск. С. 96–100.
3. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Воробьев В.Н. Непско-Ботуобинская антеклиза — новая перспективная область добычи нефти и газа на Востоке СССР // Наука. Новосибирск. 1986. 245 с.
4. Барс Ф.М., Карапетов Г.А. Обработка сейсмических данных в системе FOCUS // РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2002. 30 с.
5. Булдыгеров В.В. Геологическое строение Восточной Сибири // Иркутск: Иркут. гос. Ун-т. 2007. 151 с.
6. Булеев С.Е., Калиниченко Г.П., Ужакин Б.А., Сафронова О.Н., Вороновичева Е.М., Смирнов К.А. Применение передовых технологий обработки и миграции широкоазимутальных сейсмических данных в юго-западной части прикаспийской впадины // Приборы и системы разведочной геофизики. №2. 2016. С. 15–21.
7. Булычев А.А., Лыгин И.В., Мелихов В.Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки // Уч. пособие для студентов специализации «Геофизика». Москва. 2010. 164 с.
8. Вдовыкин Г.П. Геология Восточной Сибири (траппы и нефтеносность) // Монография. Москва. 2003. 62 с.
9. Волчкова В.А., Шишкина М.А. Лучевая сейсмическая томография синтетических данных, характерных для Западной Сибири: отработка алгоритма сейсмической инверсии с адаптивной параметризацией среды вейвлет-функциями, подбор параметров инверсии // Проблемы геокосмоса. Санкт-Петербург. 2021. С. 17–28.
10. Гаджиметов Р.А., Пьянков А.А. Сейсмическая томография как способ уточнения глубинно-скоростной модели аномалий верхней части разреза на примере месторождения Западной Сибири // Управление недрами как кросс-функциональный процесс. Тюмень. 2021. С. 82.
11. Гадыльшин К.Г., Чеверда В.А. Реконструкция глубинной скоростной модели упругой среды методом обращения полного волнового поля // Интерэкспо Гео-Сибирь: XIV Международный научный конгресс. Том 4. Новосибирск. 2018. С. 194–203.

12. Гадыльшин 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.
13. Гайдук А.В., Каширина Е.Г., Редькин Н.А., Данько Е.А., Филичев А.В., Петров А.Н. Закономерности развития перспективных карбонатных объектов в венд-кембрийском осадочном чехле южной части Сибирской платформы // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». №3. 2016. С. 28-31.
14. 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.
15. Гайдук А.В., Фомин А.Е., Твердохлебов Д.Н., Батищева А.М., Митюков А.В., Филичев А.В. Выявление перспективных на нефть и газ объектов в подсолевом карбонатном комплексе Непско-Ботуобинской антеклизы по результатам переобработки и переинтерпретации архивных данных МОГТ-2Д // Научно-технологический вестник ОАО «НК «Роснефть». №3. 2016. С. 44–48.
16. 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.
17. Горелик Г.Д. Компенсация влияния структурно-скоростных неоднородностей верхней части разреза на оценки эффективных скоростей отраженных волн // Дис. на соискания уч. степени канд.техн.наук. Санкт-Петербург. 2016. 123 с.
18. Горелик Г.Д., Сысоев А.П. Применение двухслойной модели для коррекции кинематики отраженных волн в задаче учета поверхностных неоднородностей // Технологии сейсморазведки. №3. 2015. С. 75–79.
19. 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. 2–8. RSCI. (0,43 п.л., авторский вклад 20%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,43.
20. Давлетханов Р. Т. Учет остаточных высокочастотных статических поправок в данных, соответствующих наблюдениям на неплоской линии приведения // Сейсмические технологии-2014. ЕАГО. Москва. 2014.3с.
21. Давлетханов Р.Т. Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отраженных волн, соответствующих пластовой модели среды //Дис. на соискания уч. степени канд.физ-мат.наук. Москва. 2017. 177 с.

22. Давлетханов Р.Т. Учет неоднородностей ВЧР статическими поправками или включение их в пластовую модель среды – что выбрать? // Технологии сейсморазведки. №1. 2015. С. 76–91.
23. Давлетханов Р.Т., Силаенков О.А. Учет влияния ВЧР на основе поверхностно-согласованной параметризации годографа отраженной волны // Технологии сейсморазведки. №3. 2016. С. 102–113.
24. Данько Е.А., Гайдук А.В., Твердохлебов Д.Н., Гогужева Е.И., Гринченко В.А., Мельников Р.С. Результаты применения глубинной миграции данных сейсморазведки 3Д в условиях Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство. №4. 2021. С. 48–51.
25. Денисов М.С., Фиников М.Б. Методы подавления кратных волн в сейсморазведке // Технологии сейсморазведки, №1, 2007.С. 5–16.
26. Долгих Ю.Н. Базовая модель верхней части разреза как фактор неединственности решения обратной кинематической задачи сейсморазведки МОВ-ОГТ // Технологии сейсморазведки. №4. 2011. С. 19–26.
27. Долгих Ю.Н. К вопросу о характере и значении остаточных погрешностей Ногт после учета неоднородностей мёрзлой толщи // Технологии сейсморазведки. №1. 2008. С. 46–47.
28. Долгих Ю.Н. Комплексная адаптивная технология кинематической инверсии данных сейсморазведки в условиях неоднородности верхней части разреза // Дис. на соискания уч. степени докт. геол.-мин. наук. Тюмень. 2017. 306с.
29. Долгова Е.И., Юхневич А.В., Сырчина Н.В., Гайдук А.В., Редькин Н.А., Жестков Д.Н. Сиквенс-стратиграфический и фациальный анализ вендских терригенных отложений на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении (Мирнинский свод Непско-Ботуобинской антеклизы) // Нефтяное хозяйство. №8. 2021. С. 12–16.
30. **Емельянова К.Л.** Особенности обработки архивных данных сейсморазведки 2Д на территории Восточной Сибири // XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018». 2018. С. 1-2. (0.14 п.л.)
31. **Емельянова К.Л.** Учет неоднородностей верхней части разреза при изучении продуктивных пластов на примере трехмерных сейсмических данных, полученных в условиях Поволжья. // Диплом бака. 2017. 60 с.
32. **Емельянова К.Л.** Эффективность применения сейсмогеологического моделирования для повышения надежности обработки сейсмических данных в условиях Восточной Сибири // Диплом маг. 2019. 111 с.

33. **Емельянова К.Л.**, Арутюнянц И.В., Твердохлебов Д.Н. Эффективность переобработки архивных данных 2Д сейсморазведки с использованием современных технологий // ГеоЕвразия-2018. С. 575–578. (0.28 п.л.)
34. **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.
35. **Емельянова К.Л.**, Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В. Технология восстановления верхней части разреза при помощи коррекции статических и кинематических поправок на основе сейсмогеологического моделирования в условиях Восточной Сибири // ГеоЕвразия-2021. Том 1. С. 67–70. (0.28 п.л.)
36. **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.
37. **Емельянова К.Л.**, Твердохлебов Д.Н., Арутюнянц И.В., Степанов П.Ю. Восстановление скоростной модели ВЧР на основе сейсмогеологического моделирования в условиях Восточной Сибири // ГеоЕвразия-2022. Том 3. С. 46–48. (0.21 п.л.)
38. Ефимов А.С., Смирнов М.Ю., Тригубович Г.М., Махнач Е.Н. Комплексование сейсморазведки и адаптивной 3Д-электроразведки М-ЗСБ и МТЗ при прогнозировании нефтегазовых коллекторов в Восточной Сибири // Нефть. Газ. Новации. №1. 2016. С. 35–41.
39. Жданович В.В., Ознобихин Ю.В., Монастырев Б.В. Изучение и компенсация искажающих свойств верхней части разреза в сейсморазведке // Геофизика. №6. 1997. С. 22–36.
40. Жемчугова В.А. Резервуарная седиментология карбонатных отложений // Геомодель-2014. Геленджик. 232с.
41. Жуков Н.Н., Никишин А.М., Петров Е.И., Фрейман С.И. Рифтовые системы Восточно-Сибирской континентальной окраины // Вестник московского университета. №5. 2020. С. 3–16.
42. Захарова Г.А. Методика выявления и учета временных сдвигов сейсмических отражений в районах сверхсложного строения верхней части разреза (на примере Восточной Сибири) // Автореферат дис. на соискания уч. степени канд.геол-мин.наук. Москва. 1995. 24 с.
43. Каныгин А.В., Ядренкина А.Г., Тимохин А.В., Москаленко Т.А., Гонта Т.В., Степанова Н.И., Сычев О.В., Маслова О.А. Региональная стратиграфическая схема ордовикских

- отложений Сибирской платформы (новая версия) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. № 5. 2016. С. 5–57.
44. Карандашов Д.А. Разработка и оптимизация методики коррекции аномалий в верхней части разреза в условиях Восточной Сибири // Дипломмаг. 2020. 74 с.
 45. Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке // М.: Недра. 2003. – 228 с.
 46. Козырев В.С., Королев Е.К. Интерактивная методика коррекции статических поправок для условий сложного строения верхней части разреза // Геофизика. №3. 1994. С. 13–19.
 47. Козырев В.С., Коротков И.П., Жуков А.П. Способы учета сложно построенной верхней части разреза в Западной Сибири // Технологии сейсморазведки. №3, 2014. С. 66–78.
 48. Коновальцева Е.С. Условия формирования и закономерности распространения пород-коллекторов нижневендских нефтегазоносных отложений центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы // Дис. на соискание уч. степени канд. геол.-мин. наук. Москва. 2014. 159 с.
 49. Коробкин В. С. Разработка комплексной методики повышения качества сейсмических изображений на основе компенсации влияния верхней части разреза для условий Восточной Сибири // Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Москва. 2020. 122 с.
 50. Коробкин В.С. Новые методики обработки сейсмических данных – путь к более качественному изображению, интерпретации и прогнозу // ПроГРЕсс. Сочи. 2021. С. 5.
 51. Коробкин В.С., Новиков Е.И., Накатсукаса М., Петрова М. Применение технологий QFWi и QPSDM для восстановления детального изображения среды, осложненной приповерхностным газом и системой разломных нарушений, на шельфе Сахалина // Геомодель-2020. Геленджик. С. 4.
 52. Коротков И.П., Козырев В.С. Применение метода интерактивной коррекции статических поправок для повышения достоверности геологической интерпретации // Технологии сейсморазведки. №2, 2011. С. 12–22.
 53. Коротков И.П., Кузнецов В.М., Шехтман Г.А., Череповский А.В. Особенности обработки данных многоволновой сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. №2. 2014. С. 51–69.
 54. Котова С.В., Ухлова Г.Д., Келлер Е.Г., Литаврин И.В. Анализ возможности картирования интрузивных тел по данным сейсморазведки в Восточной Сибири (на примере Мунтульского участка) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. №3. 2015. С. 82–88.
 55. Кочнев В.А., Гоз И.В. Возможности гравиметрии и магнитометрии при интерпретации сейсмических данных // Геофизика. №4. 2008. С. 28–33.

56. Кочнев В.А., Поляков В.С., Гоз И.В., Кульчинский Ю.В. Проблемы точности сейсморазведки в Восточной Сибири // Сейсмические исследования земной коры. Новосибирск. 2009.
57. Крючков В.Е., Скоробогатов В.А. Итоги, проблемы и перспективы поисково-разведочных работ на нефть и газ в Восточной Сибири // Новые идеи в геологии нефти и газа. Москва. 2019. С. 258–261.
58. Кутукова Н.М. Реконструкция геологического строения, условия формирования и прогноз углеводородных скоплений рифейских отложений Камовского свода Байкитской антеклизы Восточной Сибири (на примере Юрубчено-Тохомского месторождения) // Дис. на соискание уч. степени канд. геол.-мин. наук. Москва. 2020. 181 с.
59. Логинов Д.С. Геоинформационные методы составления и использования карт изученности и районирования геофизических полей // Геоинформационное картографирование в регионах России. Воронеж. 2015. С. 100–104.
60. Мироманов А.В. Прогнозирование физико-механических свойств верхней части разреза Восточной Сибири по данным геофизических наблюдений // Автореферат дис. на соискание уч. степени канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 1993. 18 с.
61. 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.
62. Мостовой Д.В., Лыгин И.В., Твердохлебов Д.Н., Молчанов А.Б., Гвоздик С.А., Мельников Р.С. Разработка подхода построения модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества обработки сейсморазведки // ГеоЕвразия-2021. Том 1. С. 75–78.
63. 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.
64. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Мельников Р.С. Комплексирование геофизических методов с целью выявления скоростных аномалий в разрезе и способы их компенсации: теория и практика // Научно-технический форум ООО «СамараНИПИнефть». Самара. 2021. С. 18–19.
65. Огородова И.В. Учет скоростной анизотропии пород верхней части разреза для повышения геологической эффективности сейсморазведки: на примере Пермского Прикамья // Дис. на соискание уч. степени канд. геол.-мин. наук. Пермь. 2012. 171 с.

66. Павленкин А.Д., Рослов Ю.В., Ефимова Н.Н., Кремлев А.Н. Способы изучения ВЧР и учета статических поправок // Технологии сейсморазведки. №3. 2008. С. 40–45.
67. Перевозчиков С.Н., Долгова Е.И., Гайдук А.В., Редькин Н.А. Восстановление обстановок осадконакопления вендских терригенных отложений непской свиты на эго-востоке Непско-Ботубинской антеклизы // Недропользование XXI век. №2. 2020. С. 28–35.
68. Переволоцкая Я.А., Чебурахин Ю.А., Конюшенко А.С. Алгоритм обработки сейсмического материала для проведения динамического анализа с целью изучения карбонатных коллекторов Припятского прогиба // Літасфера. №1. 2018. С. 30–37.
69. Реутовский В.С. Полезные ископаемые Сибири. Часть 1 // Санкт-Петербург. Типо-Литография А.Г. Розена (А.Е. Ландау). 1905. 509 с.
70. Романченко И.В., Королев Е.К., Королев А.Е., Уразаева Д.Н. Геостатистический подход к использованию данных МСК для определения длиннопериодных статических поправок при сложном строении ВЧР // Сейсмические технологии. Москва. 2016. С. 175–178.
71. Сальников А.С. Сейсмогеологическое строение земной коры платформенных и складчатых областей Сибири по данным региональных сейсмических исследований преломленными волнами // Дис. на соискание уч. степени докт.геол-мин.наук. Новосибирск. 2008. 283 с.
72. Семин Д.Г., Кошкарлов Э.Г., Милошевич С.С., Кузнецов М.А., Старицын М.Ф. Опыт реализации проекта по созданию суперкуба (Западная Сибирь) // Геофизика. №4. 2017. С. 76–85.
73. Серов С.Г., Гапоненко Е.С. Интрузивный магматизм, влияние на формирование генерационно-аккумуляционных углеводородных систем Байкитской антеклизы (Восточная Сибирь) // Управление недрами как кросс-функциональный процесс. Тюмень. 2021. С. 39.
74. Сысоев А.П. Коррекция кинематики отраженных волн с целью компенсации влияния переменного рельефа поверхности наблюдения // Технологии сейсморазведки. №1. 2008. С. 39–45.
75. Сысоев А.П. Прикладные задачи компенсации неоднородностей верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных // Новосибирск: ИНГГ СО РАН. 2011. 90 с.
76. Сысоев А.П., Янивец Р.Б. Влияние рельефа на оценки кинематических параметров отраженных волн // Геофизический вестник. №12. 2004. С. 10–15.
77. Твердохлебов Д.Н., Данько Е.А., Каширина Е.Г., Коробкин В.С., Филичев А.В., Гайдук А.В. Конечно-разностное сейсмогеологическое моделирование с целью повышения

- эффективности обработки и качества интерпретации сейсмических данных // Геофизика. №6. 2017. С. 10–18.
78. Твердохлебов Д.Н., Коробкин В.С., Данько Е.А., Каширина Е.Г., Филичев А.В., Гайдук А.В. Возможность подавление кратных волн на основе алгоритмов моделирования в условиях высокоскоростного разреза Сибирской платформы // Геофизика. №1. 2018. С. 2–14.
79. Тихонов А.А., Стив С. Пример сопоставления результатов построения модели ВЧР с использованием томографии и полноволновой инверсии // Сейсмические технологии-2017. С. 127–130.
80. Фоменко Н.Е. Комплексование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях // Учебное пособие. Южный федеральный университет: Ростов-на-Дону. 2016. 292 с.
81. Харитонов А.Л. Использование спутниковых и аэромагнитных геофизических методов для изучения глубинного строения морфоструктур центрального типа, образованных мантийными палео-плюсами на территории Восточной Сибири // International journal of professional science. №7. 2019. С. 81–87.
82. Чепиго Л.С., Лыгин И.В. Коррекция глубинно-скоростной модели на основе сейсмор-гравитационного моделирования // ГеоЕвразия-2021. Том 2. С. 156–158.
83. Черепанова К.В., Пормейстер Я.А., Долгова Е.И., Гайдук А.В., Чиргун А.С., Перевозчиков С.Н. Анализ фильтрационно-емкостных свойств и методика выделения кольцевых аномалий осинского горизонта Среднеботуобинского месторождения // Нефтяное хозяйство. №3. 2022. С. 8–11.
84. Черняк В. С. Отклик на аномалию мерзлоты в кинематических параметрах отраженных волн и оценка параметров мерзлотного пласта // Технологии сейсморазведки. №1. 2006. С. 33–38.
85. Черняк В.С., Гриценко С.А. Скоростной анализ в условиях неоднородной верхней части разреза, минимизирующий остаточные аномалии $V_{сдр}$ // Технологии сейсморазведки. №1. 2009. С. 53–55.
86. Шелохов И.А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели верхней части разреза // Дис. на соискание уч. степени канд.геол-мин.наук. Иркутск. 2021. 104 с.
87. 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.

88. Шелохов И.А., Буддо И.В., Смирнов А.С., Пьянков А.А., Татьяна Н.В. Уточнение скоростной модели верхней части разреза по данным нестационарных электромагнитных зондирований: результаты применения в Восточной Сибири //Георесурсы. №3. 2021. С. 60–72.
89. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина) // Новосибирск: ИГиГ СО РАН. 2007. 467 с.
90. Щетинина Н.В., Мамяшев В.Г. Изучение анизотропии геолого-геофизических параметров горных пород Восточной Сибири по данным керна и каротажа // Нефтепромысловое дело. №11. 2019. С. 26–31.
91. Юрчик И.И. Оценка гидрогеохимических условий разработки месторождений нефтии газа Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области: Лено-тунгусская нефтегазоносная провинция //Дис. на соискание уч. степени канд.геол-мин.наук. Санкт-Петербург. 2007. 194 с.
92. Archer S.H., Heathcote C. Can refraction arrival times be used to solve the long wavelength statics problem? // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 1985.C. 301–303.
93. Baixas F., Glogovsky V., Langsman S. An interactively constrained approach to long period static corrections // EAGE 59th Conference and Tech. Exh. The extended abstract. Volume 1. 1997. С. 8.
94. Borisov D., Gao F., Williamson P., Simons F., Tromp J. Robust surface-wave full-waveform inversion //SEG International Exposition and 89th Annual Meeting. 2019. С. 5005–5009.
95. Bridle R. Gaining a geostatistical advantage in near-surface modeling //SEG Annual Meeting. 2008. С. 1218–1222.
96. Douma H. Surface-wave inversion for near-surface shear-wave velocity estimation at Coronation field // SEG San Antonio Annual Meeting. 2011. С. 1411–1415.
97. Farrugia D., Paolucci E., D’Amico S., Galea P. Inversion of surface-wave data for subsurface shear-wave velocity profiles characterised by a thick buried low-velocity layer // Geophysical Journal International. 2016. С. 2007-2013.
98. 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.
99. Maupin V. Surface Wave Inversion //Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016
100. Peinado A. 3-D Refraction Statics: A Geostatistical Approach // 66th SEG meeting. 1996.C. 1654–1657.
101. Shearer P. Introduction of Seismology, Chapter 3 // The seismic wave equation. 2009. С. 412.

102. Vivieux J., Lambare G. Seismic numerical forward modeling; rays and waves // Institut des Sciences de la Terre, Université Joseph Fourier Grenoble I & CNRSCGG Veritas, Massy. France. 2007.
103. Xinxiang Li. Residual statics analysis using prestack equivalent offset migration // A thesis for the degree of Master of Science. Calgary, Alberta. 1999. 156c.
104. Yilmaz O. Seismic data processing // Society of Exploration Geophysicists. Tulsa. Volume 2. 1986. 526 c.
105. Yilmaz O., Doherty M. Stephen Seismic data analysis: processing, inversion and interpretation of seismic data // Society of Exploration Geophysicists, second edition, Tulsa. 2001.C. 1000.