

*На правах рукописи*



**Шелохов Иван Антонович**

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ  
ПРОГНОЗА СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА**

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков по-  
лезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЗК СО РАН, г. Иркутск)

**Научный руководитель:**

**Поспеев Александр Валентинович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии нефти и газа ФГБУН ИЗК СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Мироманов Андрей Викторович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры Прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем ФГБОУ ВО ИРНИТУ

**Долгих Юрий Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, ученый секретарь ООО «НОВАТЭК-НТЦ», г. Тюмень

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва

Защита состоится «12» мая 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull207/3027.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: [dobrynina@crust.irk.ru](mailto:dobrynina@crust.irk.ru). Тел: 8(3952)427000.

**Автореферат разослан 11 марта 2022 г.**

Ученый секретарь диссертационного совета Д.003.022.03, кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

## Общая характеристика работы

### *Актуальность темы.*

Современная нефтегазопроисковая сейсморазведка, ввиду особенностей параметров приема и возбуждения сигнала, не всегда способна восстановить достоверную информацию о скоростных характеристиках верхней части разреза. Данный факт оказывает прямое влияние на качество итоговых геологических моделей месторождений, находящихся в сложных поверхностных условиях. В рамках данной проблемы остро стоит необходимость в привлечении сторонних источников информации о верхней части разреза (ВЧР) в местах, где сейсморазведка не способна справиться своими силами.

При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях со сложными поверхностными условиями и неоднородной верхней частью разреза необходимо учитывать их влияние.

Источником такого влияния выступают скоростные аномалии, сосредоточенные в относительно тонком, но неоднородном по толщине приповерхностном интервале разреза.

Недоучёт влияния данных аномалий на форму отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях, ухудшению волновой картины во всем временном диапазоне, а также повлечет за собой большие неопределенности при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки.

В настоящей работе предлагается подход к восстановлению упругих свойств верхней части разреза по данным малоуглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ).

**Степень разработанности проблемы.** В связи с растущими объемами сейсморазведочных работ 2D и 3D проблема корректного восстановления скоростной модели ВЧР стоит достаточно остро. Существует ряд классических методик для прогноза скоростной модели ВЧР и расчета статических поправок.

Учет небольших аномалий ВЧР сопряжен с целым рядом трудностей. Как правило, такая задача решается очень приближенно [Armstrong, 2001; Armstrong et al., 2001; Jones, 2010]. Геометрия распространения лучей всех отраженных волн в районе аномалии ВЧР искажается. Зона влияния аномалии ВЧР составляет приблизительно половину длины расстановки от каждой границы аномалии. В реальных условиях зона влияния ВЧР распространяется еще дальше за счет зоны Френеля, ведь речь идет скорее о прохождении фронта волны, а не гипотетических лучей. Кроме того, типовые методы анализа скоростей и обработки данных во временной области обеспечивают обработку всех трасс на сейсмограмме общей глубинной точки/общей средней точки ОГТ/ОСТ с использованием одинаковой скоростной функции 1D, следовательно, типовые методы обработки во временной области не решают задачу учета влияния ВЧР.

**Целью работы** является повышение точности построения глубинно-скоростной модели верхней части разреза путем применения данных нестационарных электромагнитных зондирований.

### **Основные задачи исследования:**

- обоснование петрофизических предпосылок к восстановлению акустических характеристик разреза из геоэлектрических;
- разработка эффективной технологии восстановления скоростной характеристики ВЧР из геоэлектрической модели, полученной по данным мЗСБ;
- калибровка и апробация разработанной технологии на синтетических и экспериментальных данных.

### **Объект исследования**

В данной работе объектом исследования является сложнопостроенная верхняя часть разреза. Предметом исследования при этом выступают упругие и геоэлектрические свойства ВЧР.

#### ***Методологическая основа и методы***

Применяемые в работе методы исследования состояли из математического моделирования, различных методов интерпретации данных, основанных на применении статистических процедур, атрибутного анализа посредством Гильберт преобразований. Выполнялся качественный анализ путем построения трехмерных геолого-геофизических моделей. Точность моделей оценивалась путем применения метода кросс-валидации.

#### ***Фактический материал***

В основу диссертационной работы положены материалы, собранные автором за время работы в ООО «СИГМА-ГЕО». К данным материалам можно отнести более 30000 физических наблюдений мЗСБ в различных районах Восточной и Западной Сибири. Также были использованы результаты сейсморазведочных работ и материалы геофизических исследований скважин (ГИС) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП), полученные в различных условиях Восточной и Западной Сибири.

#### ***Защищаемые положения***

1. Факторами, определяющими в неоднородной верхней части осадочного разреза связь между удельным электрическим сопротивлением и скоростью продольной волны, являются пористость, глинистость, температура и водонасыщенность породного массива.

2. Прогнозировать скоростную модель возможно на основе корреляционных связей «удельное электрическое сопротивление – скорость продольной волны», полученных для конкретных геологических условий верхней части разреза.

3. Расчет скоростной модели верхней части разреза на основе геоэлектрической модели, полученной по данным мЗСБ с применением уравнения Фауста, повышает точность структурных построений и увеличивает уровень амплитуды сейсмического сигнала за счет учета динамических аномалий верхней части разреза при обработке материалов сейсморазведки.

#### ***Научная новизна и теоретическая значимость работы***

Для различных геологических условий Восточной и Западной Сибири обобщены и систематизированы петрофизические зависимости для скорости продольной волны и УЭС. Выполнено петрофизическое моделирование для обоснования связи между  $V_p$  и УЭС через петрофизические параметры  $K_p$ ,  $K_{gl}$ ,  $K_v$ .

Предложено использование метода малоуглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в качестве дополнительного источника информации об упруго-скоростных характеристиках верхней части разреза (ВЧР), а также ее геолого-структурных особенностях. Для решения данной задачи предложено привлечение эмпирической зависимости Фауста для перехода от удельного электрического сопротивления (УЭС), определенного по данным ЗСБ, к скоростям продольных волн. Указанный подход позволяет существенно прирастить информацию о ВЧР и, как следствие, повысить точность обработки данных сейсморазведки, которая, в свою очередь, оказывает решающее влияние на точность построения геологической модели целевых нефтегазонасных интервалов.

Впервые для различных геологических условий Восточной и Западной Сибири удалось адаптировать уравнение Фауста для применения к данным ЗСБ. Проведена апробация подхода на ряде месторождений Восточной и Западной Сибири.

#### ***Практическая значимость исследования.***

Предложенная в работе методика расчета скоростных моделей на основе данных мЗСБ позволяет снижать неопределенности сейсмической глубинно-скоростной модели и, как следствие, повышать точность структурных построений и глубинной миграции. На примере математического моделирования показана эффективность применения методики для повышения точности структурной модели.

Геологическая эффективность проведенных исследований состоит в повышении точности восстановления геологической модели и достоверности прогноза.

Основные выводы исследования найдут практическое применение в производственных и научных организациях, осуществляющих деятельность в сфере обработки и интерпретации данных сейсморазведки.

Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество обработки данных сейсморазведки и увеличить точность картирования пород геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

***Соответствие диссертации паспорту научной специальности 25.00.10.***

Диссертационная работа представляется по научной специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Согласно паспорту научной специальности **25.00.10** работа соответствует пунктам №14, 16, 22.

Пункт № 14: «Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей», так как изучаются подходы к интерпретации материалов зондирования становлением поля в ближней зоне.

Пункт № 16: «Использование геолого-геофизических данных для построения геологических, гидродинамических и геодинамических моделей месторождений», так как в процессе исследований уточняются структурные построения, которые являются неотъемлемой частью геологической модели.

Пункт № 22: «Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей», так как в рамках работы анализируются петрофизические связи между УЭС и скоростью продольной волны, производится моделирование откликов от заданных коэффициентов пористости, водонасыщенности и глинистости.

**Личный вклад:**

1. Обоснованы петрофизические предпосылки и определены граничные условия для перехода от геоэлектрических свойств к акустическим, для различных геологических условий Восточной и Западной Сибири обобщены и систематизированы петрофизические зависимости для скорости продольной волны и УЭС. Выполнено петрофизическое моделирование для обоснования связи между  $V_p$  и УЭС через петрофизические параметры  $K_p$ ,  $K_{gl}$ ,  $K_v$ ;
2. Обоснован граф расчета скоростных моделей из геоэлектрических моделей.
3. Обоснованы процедуры калибровки эмпирических коэффициентов уравнения Фауста.
4. Выполнено математическое моделирование для оценки фактической эффективности методики.
5. Проведена апробация на ряде месторождений Восточной и Западной Сибири.

Работы по сбору и систематизации геолого-геофизических данных выполнены непосредственно автором совместно со специалистами ООО «СИГМА-ГЕО» к.г.-м.н. И.В. Буддо, Н.В. Мисюркеевой и др. Разработка подхода к восстановлению скоростных характеристик ВЧР на основе данных мЗСБ выполнялась под непосредственным руководством д.г.-м.н., проф. А.В. Поспеева.

Обоснование, тестирование и внедрение в производство предлагаемых методических подходов проведено автором данной работы. Программирование

математических процедур для пересчета УЭС в скорости продольных волн осуществлено Л.В. Суоровым и А.С. Кочневым.

#### ***Апробация работы***

Результаты научных исследований по защищаемой теме опубликованы автором лично или в соавторстве в 15 работах, из них 4 – в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 – патент Российской Федерации, результаты работы опубликованы в международном отраслевом журнале «First Break».

Представленные в диссертации научные и практические результаты апробировались на семинарах, выставках и конференциях различного уровня: Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Геонауки-2014: актуальные проблемы изучения недр»; международная научно-практическая конференция «Инженерная геофизика 2017», 79 th EAGE Conference & Exhibition 2017, международная научно-практическая конференция «Геобайкал 2018»; Всероссийская науч.-техн. конференция с международным участием «Геонауки-2018: актуальные проблемы изучения недр»; международная научно-практическая конференция «Инженерная геофизика и рудная геофизика 2019»; международная научно-практическая конференция «Углеродородный потенциал Дальнего Востока 2019»; международная научно-практическая конференция «ПроГРРесс-2019».

#### ***Благодарности***

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.г.-м.н., профессору А.В. Поспееву за постоянное внимание и консультационную помощь при подготовке диссертационной работы.

За постоянные наставления и активное участие в формировании научных взглядов и интересов, а также участие в разработке технологии автор благодарен главному геофизику ООО «СИГМА-ГЕО» к.г.-м.н. Буддо И.В.

За всестороннюю поддержку при подготовке научной работы автор благодарен исполнительному директору ООО «СИГМА-ГЕО» М.В. Шарлову и генеральному директору ООО «СИГМА-ГЕО» к.т.н. Агафонову Ю.А.

Автор выражает благодарность за поддержку и продвижение технологии начальнику центра по работе в Восточно-Сибирском регионе, ООО «ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ», к.г.-м.н., доценту Смирнову А.С.

За ценные рекомендации по итоговому представлению графики автор благодарен главному научному сотруднику лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности д.г.-м.н. Суворову В.Д.

За всестороннюю редакторскую поддержку автор благодарит заместителя начальника отдела маркетинга ООО «СИГМА-ГЕО» Немцеву Д.Б.

#### ***Связь работы с научными проектами.***

Настоящее исследование стало возможным при финансовой поддержке по программе «мегагрантов» по постановлению р220 Правительства РФ № 075-15-2019-1883.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 110 страниц текста, 66 рисунков и список литературы из 90 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования и научная задача, изложены главные результаты, выносимые на защиту, дается характеристика их новизны и достоверности.

**Глава 1. ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МОВ ОГТ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОПОСТРОЕННОЙ ВЧР**

При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях со сложными поверхностными условиями и неоднородной верхней частью разреза необходимо учитывать их влияние на материалы сейсморазведки. Источником такого влияния выступают скоростные аномалии, сосредоточенные в относительно тонком, но неоднородном по толщине приповерхностном интервале разреза. Недоучёт влияния данных аномалий на форму отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях, ухудшению волновой картины во всем временном диапазоне, а также повлечет за собой большие неопределенности при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки.

Территория Восточной Сибири, на которой сосредоточено большое количество крупных нефтегазовых месторождений, характеризуется сложными условиями как поверхностного возбуждения упругих колебаний, так и сложно-построенной ВЧР. К наиболее яркому примеру осложнений ВЧР можно отнести резкопересеченный рельеф и выходы трещиноватых карбонатных пород на дневную поверхность [Пьянков и др., 2019].

На сейсмических разрезах такие аномалии характеризуются полной или частичной потерей корреляции отражающих горизонтов (ОГ), а также искажением морфологии ОГ из-за резкопересеченного рельефа.

Наряду с резкопересеченным рельефом необходимо отметить наличие в ВЧР карбонатного карста, зачастую флюидонасыщенного. Разрезы, осложненные данной аномалией, характеризуются областями полной или частичной потери корреляции ОГ.

Области распространения многолетнемерзлых пород (ММП) занимают около 5 млн. км<sup>2</sup> территории России [Brown et al., 1997]. Значительное количество разведанных месторождений России: как рудных, так и нерудных, также сосредоточено в области распространения ММП.

Одним из немаловажных вопросов является вопрос влияния ММП на ухудшение качества материалов сейсморазведочных работ при поисках нефти и газа на территории Западной Сибири.

При расчете статических поправок традиционными методами (путем сглаживания вариаций времен годографа) на разрезе возникают искусственные синклинали. Комбинация глубоких низкочастотных вариаций статических задержек с интенсивным полем помех, затрудняющих прослеживание отражений, создает трудноразрешимую ситуацию [Табаков и др., 2016].

ВЧР в реальных условиях может характеризоваться одновременно несколькими видами неоднородностей. В связи с этим учет таких неоднородностей является весьма актуальным для корректного прогнозирования геологического разреза.

Резкие изменения рельефа поверхности наблюдений, мощностей и скоростей упругих волн в ВЧР приводят к тому, что времена прихода отраженных волн на сейсмической записи в разных точках профиля наблюдений резко меняются. Если это влияние не исправить, то в таком случае оси синфазности отраженных волн будут сильно искажены. Повысить качество таких сейсмических записей возможно только путем поканального введения специально рассчитанных компенсирующих временных сдвигов – статических поправок.

Поправки за влияние локальных изменений свойств ММП определяются рядом классических способов, один из них - замена слоя после проведения детального скоростного анализа. Значения скоростей для расчета поправок за ММП снимаются по траектории прослеживания горизонтов, связанных с мерзлотой, или по условному уровню ниже ММП.

Важнейшими практическими характеристиками изменчивости статических поправок является пространственная частота и амплитуда. Условно, по пространственной

частоте выделяют короткопериодные, среднeperиодные и длиннопериодные статические поправки.

Традиционным решением проблемы ВЧР является введение в сейсотрассы длиннопериодных статических поправок. Однако введение таких поправок влечет за собой появление ложных структурных элементов и искажение временного разреза. Существуют различные традиционные методики расчета статических поправок.

Помимо традиционных методов расчета статических поправок все чаще привлекают несейсмические методы для получения дополнительной информации о верхней части разреза. Существуют подходы по применению несейсмических методов для прогноза скоростной модели ВЧР, разработанные специалистами АО «Иркутскгеофизика», СНИИГГиМС, ООО «Северо-Запад».

## **Глава 2. ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

Для осуществления перехода от одного физического свойства к другому нужно обосновать наличие устойчивых взаимосвязей между параметрами, а также обосновать их граничные условия.

Наиболее распространена модель УЭС, предложенная Арчи [Archie, 1942]. Согласно модели, вводится понятие параметра объемной пористости, являющегося соотношением удельного сопротивления породы к УЭС насыщающего поровое пространство проводящего флюида.

Параметр пористости, в свою очередь, рассматривается как функция коэффициента пористости. Суть модели Арчи состоит в том, что электрическая проводимость горных пород обеспечивается только флюидом, заполняющим поровое пространство. В случае, если поровые каналы образуют систему прямолинейных продольных проводников, параметр пористости оказывается обратно пропорционален коэффициенту пористости.

Глиносодержащие горные породы характерны для сравнительно молодых терригенных геологических разрезов, которые в ходе развития не подвергались существенной литификации. Слабосцементированные породы в этом случае могут быть представлены в виде смеси песка с пористостью до 30–40 % и глины. При прохождении электрического тока происходит сочетание влияния объемной проводимости за счет движения ионов в массе песка и поверхностной, характерной для глин. Первый фактор подчиняется закону Арчи, причем коэффициент извилистости для песка может составлять 1.05–1.15.

Для чистых глин зависимость между сопротивлением среды и минерализацией поровой воды сложнее. При малой минерализации основное влияние оказывает поверхностная проводимость, обеспечивающая собственное сопротивление глин порядка 2.5 Ом·м. Для ультрапресных поровых вод даже небольшое количество глинистого материала обеспечивает величину сопротивления примерно равную сопротивлению чистых глин, делённому на долю глин в породе. Несмотря на то, что в зависимости от структуры заполнения глинами порового пространства песка, сопротивление породы может несколько меняться, А.А. Рыжовым [Рыжов, Судоплатов, 1990] построены номограммы зависимости сопротивления песчано-глинистой породы от минерализации порового флюида, основанные на среднестатистических петрофизических данных.

Многолетняя мерзлота является типичным природным явлением для северных регионов России и других стран. Причиной ее формирования является наличие отрицательного баланса тепловой энергии территорий. В этом случае глубинного тепла не хватает для круглогодичного поддержания положительных температур ниже зоны сезонного влияния. В зависимости от климатического сезона мерзлые породы могут распространяться в толще от дневной поверхности до подошвы мерзлоты либо покрываться сезонно-талым слоем, толщина которого максимальна в конце лета.



### Петрофизическая модель упругих свойств

В 1956 г. и в последующих публикациях Уайли и др. предложили эмпирическое отношение скорость-пористость для пористой среды, наполненной минерализованным флюидом.

При использовании данного уравнения следует учитывать многочисленные допущения и условия. Несмотря на это, оно активно используется. Когда какое-либо допущение нарушается, многие авторы предлагают вводить эмпирические поправки за глинистость и смешанную литологию.

Для уточнения эмпирического уравнения Уайлли Раймером и др. было предложено соотношение скорость-пористость [Mavko et al., 2009; Sheriff, 2002].

Эмпирические преобразования часто ценны не только для получения прямых оценок свойств пород. Эти преобразования раскрывают также функциональные связи между переменными. Например, они могут дать представление об относительных колебаниях скоростей Р- и S-волн, вызываемых изменением объема пор и глинистости.

Для глинистого разреза существуют эмпирические соотношения между скоростью, пористостью и содержанием глины полученные по результатам ультразвуковых измерений на 75 образцах хорошо сцементированных песчаников. Измерения проводились при различных значениях эффективного давления и водонасыщенности [Han et al., 1986].

Если принять  $1 \text{ МПа} = 145 \text{ psi}$  и градиент эффективного давления  $= 0,5 \text{ psi/фут}$ , измерения при 40 МПа и 5 МПа будут соответствовать глубинам приблизительно 3600 м и 450 м соответственно.

В отношении рассматриваемых хорошо сцементированных песчаников можно сделать несколько выводов:

- зависимость скорости от глубины меньше выражена для хорошо сцементированных, чем для несцементированных песчаников;
- при увеличении процента пористости или объема глины скорость падает приблизительно в 2,5 раза больше для пористости, нежели для объема глины;
- при увеличении процента пористости или объема глины коэффициент Пуассона растёт;
- коэффициент Пуассона уменьшается с глубиной.

Из данного уравнения вытекает одно интересное петрофизическое свойство чистых песчаников, что стало возможным благодаря разделению набора данных на несколько категорий. Уравнения для чистых песчаников были выведены с использованием всего 10 образцов чистого песчаника. Однако, при выведении уравнений для глинистых песчаников были использованы все образцы, включая образцы чистого песчаника. Приведенные выше уравнения для чистого песчаника не имеют глинистой компоненты. Тем не менее, скорости в чистых песчаниках также могут рассчитываться с использованием уравнения для глинистых песчаников при  $C = 0$ .

В рассчитанных значениях коэффициента Пуассона наблюдается существенная разница, обусловленная использованием того или другого уравнения. Хан и др. отметили петрофизическую значимость этой разницы: «...очень небольшой объем глины (1% или несколько объемных процентов) значительно уменьшает модули упругости песчаников». Уменьшение более выражено для модуля сдвига, нежели для модуля объемного сжатия. В типичном классическом бассейне большинство песчаных пластов содержит небольшой объем глины. Таким образом, для чистых песчаников должно наблюдаться значительное снижение коэффициента Пуассона по сравнению с окружающими глинистыми песчаниками [Mavko et al., 2009; Sheriff, 2002].

Известно, что основные дисперсные и пористые влагонасыщенные породы в талом состоянии располагаются в следующий ряд (в порядке возрастания скорости рас-

пространения в них продольных упругих волн): песок, супесь, суглинок, глина, песчаник, мергель, мел, известняк. В зависимости от влажности, структуры и текстуры каждая из этих пород характеризуется определенными диапазонами значений  $V_p$ , которые могут частично перекрываться, однако выделенный ряд обособляется достаточно четко. Для мерзлых пород подобная классификация может быть построена только при учете влияния температуры, льдистости и напряженного состояния. Иначе породы разного литологического состава невозможно разделить даже по средним значениям скорости. Определяющей является температура породы. Для фиксированных значений температуры можно дать скоростную классификацию мерзлых пород, характеризующую многообразие их свойств в зависимости от литологического состава. [Джурик, 1972; Джурик, 1973].

### **Модель связи «скорость-УЭС». Зависимость Фауста**

Для того, чтобы от геоэлектрических свойств пород перейти к акустическим, возможно использование эмпирических зависимостей. Зависимость между удельным электрическим сопротивлением и скоростью продольных волн впервые была представлена Л. Фаустом в 1951 г. Актуальность работы обусловлена необходимостью расчета карт средних скоростей продольных сейсмических волн для решения задачи структурных построений.

В 1953 г. Л. Фауст описывает результаты вычислений скорости уже с учетом влияния литологической составляющей [Faust, 1953]. Для учета литологии использовались данные электрического каротажа. В ходе экспериментов сопоставлялись значения скорости продольных волн, полученных по данным сейсмического каротажа, и значения удельного сопротивления горной породы. В результате анализа была получена формула.

## **Глава 3. ОСНОВЫ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

Метод ЗСБ является одним из геофизических методов, традиционно применяющихся в России при решении широкого круга геологических задач: от изучения верхней части разреза до поисков и разведки месторождений углеводородов. Большой вклад в разработку теории метода, методики работ и обработки результатов ЗСБ был внесен учеными А.Н. Тихоновым, Л.Л. Ваньяном, С.А. Шейнманном, Б.И. Рабиновичем и др., а также G.V. Keller, J.R. Wait, L. Buselli, C.H. Stoyer и др.

Метод относится к группе индуктивной электроразведки с искусственными источниками электромагнитных полей.

Работы методом ЗСБ проводятся с применением индуктивной установки, состоящей из незаземленных квадратных генераторной и приемных петель различного размера. Установка с индуктивным возбуждением бывает двух видов: с вынесенной за пределы генераторной приемной петлей (Q-q) и соосными приемно-генераторными петлями, т.н. установка «петля в петле» (Qq). Использовать комбинированную соосно-разнесенную установку, когда от одной генераторной петли измеряется сигнал на соосной и разнесенной приемных петлях. В ходе проведенных исследований длина стороны генераторной петли составляла 100 м, приемной – 10 м. Использовались разносы, равные 0 и 100 м. Сила тока в генераторной петле изменялась от 1 до 40 А.

Диапазон исследуемых глубин составил 10-700 м.

## **Глава 4. ПРОГНОЗ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРЕЗА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ мЗСБ**

Была проанализирована возможность применения данного эмпирического уравнения для восстановления акустических свойств разреза по данным мЗСБ.

Принципиальная схема расчета скоростной модели ВЧР на основе данных мЗСБ через эмпирические зависимости Фауста представлена на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

По наблюдаемым в поле (экспериментальным) данным выполняется инверсия (решение обратной задачи геофизики). Количественная инверсия заключается в численном моделировании горизонтально-слоистой среды, параметры которой увязываются с данными ГИС, бурения. С целью минимизации влияния принципа эквивалентности количественная интерпретация материалов ЗСБ проводится в несколько шагов, каждый из которых вносит свой вклад в качество получаемого результата. Первым шагом интерпретации электроразведочных данных является сбор априорной геолого-геофизической информации. На этом шаге анализируется информация по скважинам глубокого бурения, располагающимся на исследуемой площади. Изучаются данные ГИС скважин, определяются региональные проводящие и высокоомные маркерные горизонты, осуществляется литолого-стратиграфическая привязка слоев. По сети скважин определяется выдержанность по мощности и простиранию опорных горизонтов. Изучаются проявления магматизма и тектонической активности, оказывающие влияние на строение изучаемой территории, характер электромагнитного поля. Определяется гидрогеологическая характеристика района работ.

На втором шаге осуществляется построение структурных карт по опорным горизонтам, определяется положение известных геологических структур и разрывных нарушений. Также выполняется оценка распределения электрических характеристик разреза участка работ, осуществляется подбор структуры первоначальной геоэлектрической модели в соответствии с построенными структурными картами. Данный этап призван помочь увязать по разрезу основные горизонты, полученные в результате бурения скважин, и добиться литолого-стратиграфической привязки геоэлектрических слоев модели.

Третий шаг включает в себя инверсию сигналов становления и построение геоэлектрических разрезов. На этом шаге геоэлектрические параметры разреза определяются с использованием программы интерпретации Model 3 (Суров, Шарлов, Агафонов, 2011).

Чтобы перейти непосредственно к пересчету геоэлектрических моделей в скоростные, необходимо выполнить расчет и калибровку эмпирических коэффициентов уравнения Фауста. Подход был детально рассмотрен в работе (Shelokhov et al., 2018). Для расчета коэффициентов использовалась опорная скважина. Основное требование для такой скважины – наличие акустического каротажа в как можно более широком диапазоне глубин, начиная от первых метров. Альтернативным вариантом является применение данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Коэффициенты уравнения считаются подобранными в том случае, когда удается добиться максимальной сходимости наблюдаемых и расчетных значений  $V_p$ . Необходимо добиться таких комбинаций коэффициентов, которые бы удовлетворяли условиям выдержанности в рамках одной литологической разности, но при этом обеспечивали бы максимальную сходимость наблюдаемых значений и расчетных  $V_p$  по всей глубине модели. Для оценки сходимости в данном случае используется коэффициент корреляции степенной функции (уравнение Фауста), выступающий в данном случае некой функцией невязки.

После настройки уравнения производится массовый пересчет геоэлектрических моделей и формирование куба скоростей ВЧР.

## **Глава 5. ОЦЕНКА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛОГЛУБИННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ МЕТОДОМ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА**

### *Восточная Сибирь. Ангаро-Ленская ступень*

Геологический разрез Восточной Сибири является крайне сложным объектом для изучения основным инструментом разведочной геофизики – сейсморазведкой. Причиной этого является значительная изменчивость литологии ВЧР, резкопересеченный рельеф, наличие ММП, невыдержанных по простиранию водоносных горизонтов, тектонических нарушений и других факторов, крайне осложняющих обработку материалов сейсморазведки (Кочнев и др, 2009; Пьянков, 2016).

При проведении сейсморазведочных работ методом общей глубинной точки (МОВ ОГТ) 3D в пределах Верхнеленского сводового поднятия (Вахромеев и др., 2019) получены полевые материалы, подтверждающие актуальность вышеперечисленных проблем. Недоучёт данных факторов в скоростной модели ВЧР неминуемо приведет к ошибкам кинематической обработки.

Исследуемая территория находится на юге Сибирской платформы. Разрез характеризуется сложными тектоническими условиями: наличием складчатости и многочисленных разрывных нарушений. Съёмка МОВ ОГТ выполнялась по следующей методике: шаг между линиями приема -150 м и шаг между пунктами приема - 25 м. Шаг между линиями возбуждения - 300 м, между пунктами возбуждения – 50 м. Источник колебаний взрывной, установка - центральная, симметричная, «крест».

Верхняя часть разреза участка исследований сложена породами среднего и верхнего кембрия, отложениями ордовика.

Мощность мерзлой толщи в пределах изучаемой территории изменяется в восточном направлении с 20 до 30 м.

Верхняя часть разреза слабо дифференцирована по акустическим свойствам. Ее мощность достигает первых сотен метров. При неглубоком залегании этой толщи в самой верхней ее части наблюдается плавное возрастание скорости от 1800-2000 м/с на глубине 20-30 м, до 4000 м/с на глубине 200-300 м. В целом, средние значения скорости продольных волн в ВЧР достаточно стабильны и изменяются в пределах 3880-4840 м/с.

По геоэлектрическим характеристикам первый от поверхности горизонт характеризуется высоким сопротивлением 500-2000 Ом·м и отождествляется с породами четвертичной системы. Далее по разрезу залегают породы усть-кутской свиты нижнего ордовика со значениями УЭС от 60 до 500 Ом·м. Отложения верхоленской и илгинской свит характеризуются относительно пониженными значениями УЭС: 50-150 Ом·м.

Для условий юга Сибирской платформы характерны несколько основных неоднородностей верхней части разреза (Пьянков, 2016). Основной из них является резкопересеченный рельеф с каньонообразными долинами рек (гористый, сильно расчлененный), имеющий очень крутые склоны, которые создают неблагоприятные поверхностные сейсмогеологические условия для проведения сейсмических исследований. Для территории исследования характерен перепад абсолютных отметок от 700 до 1350 м, что соответствует крайне резко расчлененному рельефу.

Анализируя волновую картину, отмечается, что морфология отражающих горизонтов соответствует границам смены скоростей в скоростной модели, которые, в свою очередь, соответствуют морфологии поверхности рельефа.

Для расчета коэффициентов использовались данные ВСП по опорной скважине. В результате подбора было получено 3 набора коэффициентов для каждой литологической разности.

По полученным моделям были рассчитаны статические поправки. Статические поправки, полученные по данным первых вступлений, изменяются от 10 до 110 мс.

Анализ временных разрезов (Рис.1) показывает, что на этапе учета статических поправок за рельеф и среднепериодных поправок отмечается существенное улучшение прослеживаемости отражающих горизонтов при использовании модели по данным мЗСБ. На разрезе, полученном с использованием модели по данным первых вступлений, отмечается наличие аномалий-теней, проходящих через весь разрез. На разрезе, полученном по данным мЗСБ, такие аномалии удается частично подавить.

Полученные результаты свидетельствуют о повышении качества суммарных разрезов до учета короткопериодной составляющей при использовании скоростной модели по данным мЗСБ.

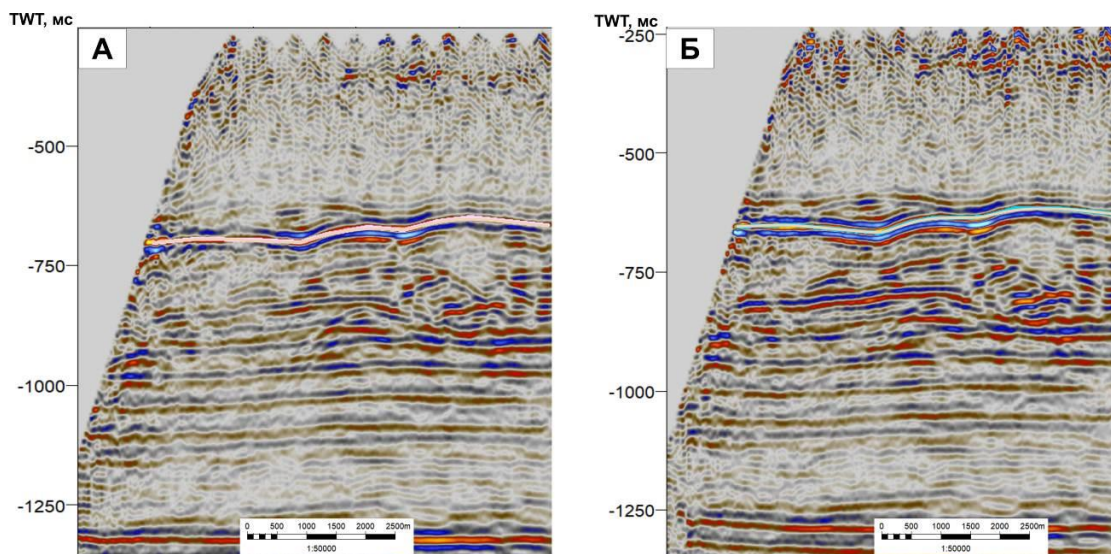


Рис.1 Сопоставление суммарных временных разрезов с учетом короткопериодной составляющей: А – полученный с учетом данных первых вступлений, Б – полученный с учетом данных мЗСБ.

### ***Западная Сибирь. Средне-Ямальский мегавал***

Исследования МОВ ОГТ 3D и мЗСБ проводились на площади 726 кв. км по совмещенной сети наблюдений. Съёмка МОВ ОГТ 3D выполнялась по следующей методике: шаг между линиями приема – 150 м, между пунктами приема – 25 м, шаг между линиями возбуждения – 300 м, между пунктами возбуждения – 50 м. Источник колебаний – вибрационный, установка - центральная, симметричная, «крест».

По данным электроразведочных работ мЗСБ отмечается высокая дифференцированность верхней части разреза до глубины около 500 м. До глубины 200-250 м отмечается высокоомный слой, связываемый с распространением ММП. Под руслами рек и озерами отмечаются зоны протайки, характеризующиеся по данным мЗСБ низкими значениями сопротивления. Четко фиксируется граница перехода пород из мерзлого состояния в талое. Отмечается значительное сокращение ММП, вплоть до полного отсутствия, при переходе в транзитную зону (акваторию). В целом отмечается резкая изменчивость подошвы ММП.

Верхняя часть разреза территории исследования осложнена наличием неравномерной толщи многолетнемерзлых пород высокой степени льдистости. Толща ММП

осложнена распространением сквозных и несквозных таликовых зон. Часть территории исследования проходит по транзитной зоне. Немаловажным фактом является наличие в толще ММП линз криопэггов.

Все эти факторы отражаются на временных разрезах областями полной или частичной потери корреляции ОГ, а также искажением тренда структурных поверхностей.

Для построения модели скоростной ВЧР выполняется расчет и калибровка эмпирических коэффициентов уравнения Фауста. Для расчета коэффициентов необходимо наличие акустического каротажа или данных ВСП.

На основе полученных зависимостей была получена 3D скоростная модель ВЧР. По полученной скоростной модели были рассчитаны статические поправки и произведен ввод полученных поправок в суммарные временные разрезы.

Для сравнения использовались два варианта расчёта поправок: от значений рельефа и по данным мЗСБ.

На разрезах, полученных без учета данных мЗСБ (Рис.2 А, Б), наблюдается нарушение осей синфазности или образование искусственных синклиналей в области перехода из континентальной части к транзитной зоне. При использовании модели мЗСБ данные скоростные аномалии удается учесть (Рис.2 В).

### **Заключение**

Основные результаты проведенных исследований заключаются в разработке подхода к использованию данных нестационарных электромагнитных зондирований для уточнения скоростной модели ВЧР и последующего ее учета при обработке материалов сейсморазведки, а также апробации данного подхода на ряде месторождений Восточной и Западной Сибири.

Разработан методический подход, применение которого повышает информативность сейсморазведочных данных за счет использования материалов мЗСБ.

Посредством применения указанной методики удалось улучшить амплитудные характеристики сейсмических трасс и точность структурных построений, как следствие – повысить точность построения геологических моделей месторождений нефти и газа.

Для Восточной Сибири разработанная методика позволяет повысить уровень амплитуды и когерентности сейсмической записи. Данные факторы позволяют поднять качество итоговой сейсмо-геологической модели.

В Западной Сибири удалось добиться более точных структурных построений за счет учета скоростных неоднородностей ВЧР, связанных с транзитной зоной.

Геологическая эффективность проведенных исследований состоит в повышении точности восстановления геологической модели и достоверности прогноза.

Основные выводы исследования найдут практическое применение в производственных и научных организациях, осуществляющих деятельность в сфере обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество обработки данных сейсморазведки и увеличить точность картирования пород геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

В целом, проведенные исследования позволяют расширить область применения малоглубинной электроразведки. С учетом результатов проведенной работы намечаются следующие направления использования электроразведочных данных для повышения качества материалов сейсморазведки:

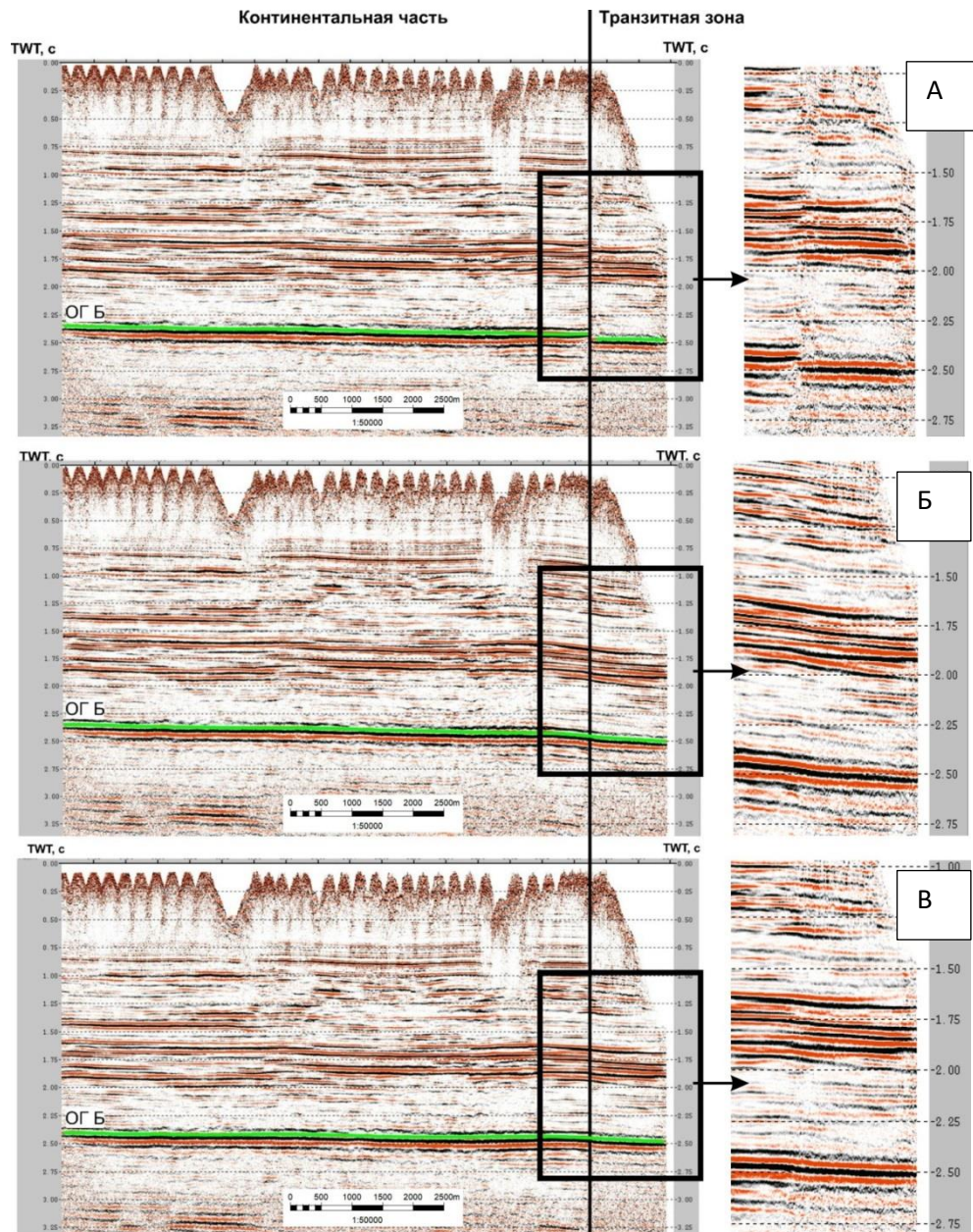


Рис.2 Сейсмические разрезы: А – скоростная модель по первым вступлениям преломленных волн, Б – статические поправки от значений рельефа, В – скоростная модель по данным мЗСБ

1. Использование скоростной модели ВЧР по данным мЗСБ для минимизации неопределенности ВЧР при кинематической инверсии данных МОВ ОГТ.
2. Построение скоростной модели по данным глубинных ЗСБ и ее последующий учет при глубинной миграции и построении глубинно-скоростной модели (ГСМ).
3. Совместная инверсия скоростной модели по данным мЗСБ и лучевой томографии для комплексного уточнения модели ВЧР.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В журналах перечня ВАК:**

1. Шарлов М.В., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А. Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой Fastsnap. // Приборы и системы разведочной геофизики № 2. Саратов. 2017. С. 8 – 23.
2. 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 № 1-2. Саратов. 2018, 58-68 с.
3. Шелохов И.А., Буддо И.В., Смирнов А.С., Шарлов М.В., Агафонов Ю.А. Способ расчета статических поправок / патент, № 2722861 от 09.07.2019. – М.: Роспатент, 2019
4. Шелохов И.А., Буддо И.В., Смирнов А.С., Пьянков А.А., Татьянин Н.В. Уточнение скоростной модели верхней части разреза по данным нестационарных электромагнитных зондирований: результаты применения в Восточной и Западной Сибири. Георесурсы, 23(3), с. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.15>

## **В рецензируемых научных журналах:**

1. Sharlov M.V., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A. and Agafonov Yu.A. Transient electromagnetic surveys for high resolution near-surface exploration: basics and case studies. First break. Vol 35, No 9, September 2017 pp. 63 – 71.
2. Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S., Sharlov M.V., and Agafonov Yu.A. Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. First Break, Vol 36, № 10, September 2018, pp. 47-51.