

На правах рукописи



ДАНИЛОВСКИЙ Кирилл Николаевич

**ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ И
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ
БОКОВОГО СКАНИРУЮЩЕГО КАРОТАЖА
В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ
НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Глинских Вячеслав Николаевич,

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН.

Официальные оппоненты:

Симонов Константин Васильевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «ФИЦ Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ИВМ СО РАН, ведущий научный сотрудник;

Антонов Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, Новосибирский технологический центр компании Baker Hughes, ведущий исследователь.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень).

Защита состоится 20 мая 2021 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конф.-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Ак. Коптюга, 3;

факс: (383) 330-28-07;

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/danilovskii2021>.

Автореферат разослан 26 марта 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.068.03
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331629



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – сигналы бокового сканирующего каротажа (БКС) в процессе бурения наклонно-направленных скважин, вскрывающих нефтенасыщенные коллекторы терригенных разрезов Западной Сибири.

Актуальность исследования. За последние десятилетия при разработке нефтяных месторождений как за рубежом, так и в России происходит повсеместный переход в бурении от вертикальных скважин к наклонно-направленным скважинам с горизонтальным завершением. Бурение наклонно-направленных скважин имеет ряд преимуществ: существенно увеличивается зона дренирования нефтеносного пласта, появляется возможность кустового бурения, а также бурения многоствольных скважин. За счёт появления наклонно-направленного бурения значительно усложняется и расширяется круг задач промысловой геофизики.

При наклонно-направленном бурении применяют геонавигацию – оперативную корректировку траектории скважины с целью её удержания в целевом нефтеносном пласте. Решение о корректировке траектории принимается непосредственно в процессе бурения на основе интерпретации каротажных данных, получаемых в реальном времени от приборов, входящих в состав буровой колонны. В настоящее время в России всё более широкое распространение приобретает новый отечественный комплекс приборов каротажа в процессе бурения «ЛУЧ-М», разработанный на Научно-производственном предприятии геофизической аппаратуры «Луч» (НПП ГА «Луч», г. Новосибирск) совместно с Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГТ СО РАН, г. Новосибирск). Наряду с зондами, выполняющими традиционные скважинные геофизические измерения, комплекс включает в себя первый отечественный прибор БКС в процессе бурения. Интерпретация данных БКС является одним из передовых способов, используемых в мире при геонавигации наклонно-направленных нефтяных скважин.

При создании нового прибора требуется анализ возможностей и ограничений его применения, а также оценка его пространственного разрешения. Из-за малой радиальной глубинности измерения БКС особенно подвержены влиянию скважинных условий измерения: смещения прибора относительно оси скважины и удельного электрического сопротивления (УЭС) промывочной жидкости вокруг него, что необходимо учитывать для повышения достоверности результатов интерпретации измерений БКС.

Детектирование границ пластов на имиджах УЭС, получаемых в процессе бурения, является ключевым этапом при проведении геонавигации. Зачастую эта задача решается вручную, что может приводить к неточным результатам из-за недостаточных опыта и квалификации геолога-интерпретатора. В настоящее время нефтяные компании оперируют большими объёмами данных, в том числе и скважинных геофизических измерений. Один инженер может отвечать за бурение сразу нескольких скважин, одновременно анализируя данные каротажа, поступающие в реальном времени. Сложившаяся ситуация приводит к необходимости создания и программной реализации алгоритмов обработки и интерпретации данных БКС для детального изучения нефтяных коллекторов.

Исходя из вышесказанного, актуальность исследования связана с установлением возможностей и ограничений нового прибора БКС в процессе бурения, разработкой новых способов обработки и интерпретации имиджей УЭС, а также их программной реализацией, что представляет значительный интерес для решения задач геонавигации наклонно-направленных скважин.

Цель исследования – повышение достоверности и оперативности интерпретации результатов измерения методом бокового сканирующего каротажа в наклонно-направленных скважинах путём анализа возможностей и ограничений метода, учёта скважинных условий измерения и создания алгоритмов автоматической обработки и интерпретации имиджей УЭС.

Научная задача исследования – разработать программно-методическое обеспечение интерпретации данных бокового сканирующего каротажа в наклонно-направленных скважинах на основе анализа результатов трёхмерного численного моделирования сигналов бокового сканирующего каротажа и применения искусственных нейронных сетей (ИНС).

Методы исследования и фактический материал

Основными методами исследования являются трёхмерное численное моделирование сигналов БКС в геологических разрезах, вскрытых наклонно-направленными скважинами, а также их обработка при помощи свёрточных ИНС.

Для расчёта сигналов БКС используется современное верифицированное программно-алгоритмическое обеспечение численного моделирования постоянных электрических полей, разработанное в ИНГГ СО РАН на основе конечно-элементного подхода. Изучаемые геоэлектрические модели характеризуются параметрами, типичными для нефтяных коллекторов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Численная обработка данных бокового сканирующего каротажа выполнена с использованием программно-алгоритмических средств, разработанных лично соискателем и в соавторстве, на основе свёрточных ИНС, сопровождается оценками точности и внутренним тестированием.

Фактический материал для опробования алгоритмов и программ – синтетические и практические данные бокового сканирующего каротажа, в том числе из девяти наклонно-направленных скважин с пяти месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Защищаемые научные результаты

1. По результатам трёхмерного численного моделирования установлены основные особенности сигналов бокового сканирующего каротажа в наклонно-направленных скважинах с оценкой пространственного разрешения метода, на основе полученных зависимостей предложен способ учёта влияния эксцентриситета прибора.

2. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение численной обработки и интерпретации данных нового прибора бокового сканирующего каротажа в процессе бурения на основе свёрточных искусственных нейронных сетей, обученных на реалистичных синтетических данных для детектирования границ пластов на имиджах УЭС при геонавигации наклонно-направленных скважин.

Научная новизна

1. По результатам анализа сигналов бокового сканирующего каротажа, рассчитанных в трёхмерных геоэлектрических моделях с учётом реальных размеров и конструктивных параметров прибора:

- выявлены основные особенности сигналов бокового сканирующего каротажа в наклонно-направленных скважинах и установлены их связи с параметрами геоэлектрических моделей: углами наклона границ слоёв относительно скважины, характерными размерами трещин и каверн;

- установлено влияние скважинных условий измерения на результаты интерпретации данных бокового сканирующего каротажа, указывающее на необходимость учёта эксцентриситета прибора в скважине, при этом установлено незначительное влияние УЭС промывочной жидкости при использовании проводящих глинистых и полимерных буровых растворов;

- оценено пространственное разрешение нового прибора бокового сканирующего каротажа в процессе бурения, показана зависимость радиальной глубинности измерений от пространственного распределения УЭС в среде, установлено различие вертикального и азимутального разрешения прибора из-за несимметричной фокусировки тока.

2. С использованием современных математических средств: трёхмерного численного моделирования постоянных электрических полей, алгоритма генерации шума Перлина и свёрточных искусственных нейронных сетей:

– создан набор данных для обучения искусственных нейронных сетей, содержащий реалистичные синтетические имиджи УЭС и учитывающий истинные параметры пространственной ориентации границ геоэлектрических слоёв;

– разработаны и программно реализованы алгоритмы подавления случайных помех и детектирования границ пластов на имиджах УЭС, позволяющие оперативно обрабатывать имиджи УЭС произвольной длины с высокой точностью.

Личный вклад соискателя состоит в проведении численного моделирования и анализе его результатов, разработке и программной реализации алгоритмов для обработки данных бокового сканирующего каротажа. Соискателем выполнена обработка и интерпретация синтетических и практических данных бокового сканирующего каротажа с применением разработанных алгоритмов, сделаны выводы, сформулированы основные положения диссертационной работы, подготовлены публикации по теме диссертации, сделаны устные доклады на научных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость

По результатам анализа синтетических сигналов бокового сканирующего каротажа в наклонных скважинах при наличии эксцентриситета прибора выявлены их особенности, учёт которых при интерпретации позволяет повысить точность при определении углов наклона границ пересекаемых пластов для построения адекватной геонавигационной модели.

Выполненная оценка пространственного разрешения нового прибора бокового сканирующего каротажа в процессе бурения даёт возможность выбора оптимальной плотности данных (вертикального и азимутального шага дискретизации), передаваемых на поверхность в реальном времени в условиях низкой пропускной способности гидравлического канала связи.

Разработанные на основе свёрточных искусственных нейронных сетей алгоритмы подавления случайных помех и детектирования границ пластов на имиджах УЭС обеспечивают высокое быстродействие без применения высокопроизводительных устройств и могут использоваться для геонавигации наклонно-направленных скважин в реальном времени.

Полученные результаты используются в ИНГГ СО РАН и НПП ГА «Луч» для интерпретации данных исследования в наклонно-направленных скважинах комплексом приборов каротажа в процессе бурения «ЛУЧ-М».

Апробация работы и публикации

Представленные результаты известны научному сообществу, докладывались и получили одобрение специалистов на всероссийских и международных конференциях: LXXX ежегодной конференции и выставке EAGE (Копенгаген, 2018), V Всероссийской молодёжной научно-практической школе-конференции «Науки о Земле. Современное состояние» (Шира, Хакасия, 2018), IX Сибирской научно-практической конференции молодых учёных по наукам о Земле (Новосибирск, 2018), XIV и XV Международной научной конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь» (Новосибирск, 2018, 2019), XIV Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных (Томск, 2019), XI Международном симпозиуме стран ЭПШП и ЕАЭС «Новая техника и технологии ГИС для нефтегазовой промышленности» (Новосибирск, 2019), IX Международной геолого-геофизической конференции «Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы» (Санкт-Петербург, 2020), а также на научных семинарах в ИНГГ СО РАН (2018–2020 гг.).

Результаты диссертационной работы отражены в 11 научных работах, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня научных изданий, рекомендованных Минобрнауки России для публикации результатов диссертаций и 8 публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций.

Научные исследования проводились по проекту НИР на 2017–2020 гг. (№ IX.128.3.1), по договору с НПП ГА «Луч» (416-03) и научно-исследовательскому гранту «УМНИК» Фонда содействия инновациям.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, включающего 125 источников. Объём работы – 120 страниц, в том числе включая 49 рисунков и 5 таблиц.

Благодарности

Автор благодарит академика РАН, д.т.н. М.И. Эпова за помощь и поддержку при проведении научных исследований, директора ИНГГ СО РАН д.т.н., проф. И.Н. Ельцова, а также сотрудников д.т.н. К.В. Сухорукову, к.т.н. А.Ю. Соболева, к.т.н. М.Н. Никитенко, к.т.н. Г.В. Нестерову, к.ф.-м.н. И.В. Сурадину, к.т.н. И.В. Михайлова, А.М. Петрова за ценные советы и конструктивную критику.

Автор отдельно благодарит Г.Н. Логинова за обстоятельные консультации по вопросам программирования и применения методов машинного обучения, а также В.И. Самойлову за важные методические рекомендации и консультации по оформлению диссертационных материалов.

Автор крайне признателен к.ф.-м.н. О.В. Нечаеву за разработку и программную реализацию алгоритма, который является фундаментом диссертации, а также за отзывчивость при обсуждении особенностей его работы.

Автор выражает признательность генеральному директору НПП ГА «Луч» К.Н. Каюрову, а также исполнительному директору В.Н. Еремину и начальнику конструкторского отдела А.Н. Петрову, без участия которых настоящая работа не состоялась бы.

Автор благодарен профессорско-преподавательскому составу кафедры геофизики ГГФ НГУ: д.ф.-м.н., профессору Ю.А. Дашевскому, д.г.-м.н., профессору Н.О. Кожевникову, д.г.-м.н., профессору В.Д. Суворову, д.г.-м.н. Н.Н. Неведровой, д.т.н., профессору Ю.Н. Антонову, к.ф.-м.н. А.А. Дучкову, к.т.н. В.В. Потапову за полученные знания и формирование научных интересов.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН В.Н. Глинских за постоянное внимание, ценные советы, помощь и поддержку на всех этапах работы над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении определяется объект исследования, обосновывается актуальность, ставятся цель и научная задача, указываются методы исследования и фактический материал, защищаемые научные результаты, научная новизна и личный вклад, теоретическая и практическая значимость, апробация результатов работы.

Глава 1. Метод бокового сканирующего каротажа: развитие, применение, численное моделирование, алгоритмы обработки и интерпретации

В первой главе представлен детальный аналитический обзор исследований, посвящённых развитию методов геонавигации наклонно-направленных скважин, развитию аппаратурной, программно-алгоритмической и методической базы метода БКС.

В разделе 1.1 анализируется развитие методов геонавигации скважин, обусловленное повсеместным переходом от вертикального бурения к бурению наклонно-направленных скважин с горизонтальным завершением.

В разделе 1.2 выполнен анализ развития методов сканирующего каротажа от первых скважинных наклономеров до приборов БКС в процессе бурения, применяемых для геонавигации наклонно-направленных скважин.

Раздел 1.3 посвящен литературному обзору современных методов обработки и интерпретации данных БКС, а также результатов исследований

по их численному моделированию. Рассматривается традиционный подход к интерпретации имиджей УЭС, автоматические алгоритмы их обработки и детектирования границ пластов.

Проведённый анализ открытых публикаций позволяет сделать следующие выводы. Проблема изучения особенностей сигналов БКС в наклонно-направленных скважинах на основе трёхмерного численного моделирования слабо освещена в открытых литературных источниках. Кроме того, для получения корректных результатов анализа синтетических диаграмм численное моделирование сигналов БКС необходимо проводить с учётом конструктивных особенностей прибора, для чего необходимы новые исследования в этом направлении.

Также в последние десятилетия множество исследований посвящается разработке алгоритмов автоматического детектирования границ пластов на имиджах сканирующего каротажа. Основные недостатки разрабатываемых подходов заключаются в высокой ресурсоёмкости используемых алгоритмов, а также в неучёте изменчивости радиальной глубинности исследования метода БКС в зависимости от УЭС изучаемой среды. В то же время для преодоления этих проблем автору диссертации видится перспективным применение трёхмерного численного моделирования наряду с современными методами машинного обучения, которые хорошо зарекомендовали себя при решении широкого круга задач, в том числе и в области обработки и интерпретации имиджей сканирующего каротажа.

Глава 2. Сигналы БКС по результатам трёхмерного численного моделирования

Вторая глава посвящена анализу результатов трёхмерного численного моделирования сигналов нового прибора БКС в процессе бурения: изучается связь сигналов БКС с параметрами геоэлектрических моделей, влияние скважинных условий измерения, а также оценивается пространственное разрешение прибора.

В **разделе 2.1** приводится описание прибора БКС в процессе бурения, а также алгоритма трёхмерного численного моделирования его сигналов.

Принцип работы прибора основан на методе микробокового каротажа, где ток измерительного электрода фокусируется с помощью дополнительных экранирующих электродов (Рисунок 1), что делает возможным детальное геоэлектрическое изучение разреза. Прибор выполняет измерения в процессе бурения, когда буровая колонна вращается, при этом контролируется азимутальное положение измерительного электрода в скважине. Каротажные данные, полученные в ходе обработки измерений прибора, представляются в виде развёртки по стенке скважины (имиджа).



Рисунок 1 – Внешний вид прибора БКС, входящего в состав комплекса «ЛУЧ-М» для каротажа в процессе бурения

Численное решение прямой задачи БКС выполняется при помощи метода конечных элементов в трёхмерной постановке, при этом учитываются конечные размеры прибора, а также высокий контраст электрофизических параметров прибора и среды [Глинских, Даниловский, Нечаев, 2018]. Разработанный алгоритм позволяет оперативно проводить моделирование сигналов прибора в различных реалистичных геоэлектрических моделях сред с достаточной для практических задач точностью вычислений.

В **разделе 2.2** проводится численное моделирование для установления связи сигналов БКС с параметрами геоэлектрических моделей: углами наклона границ слоёв относительно скважины, характерными размерами пересекаемых трещин и каверн.

На основе анализа результатов трёхмерного численного моделирования установлены связи синтетических сигналов БКС с параметрами трёхмерных геоэлектрических моделей: углом наклона границ слоёв и трещин, характерным размером каверн, УЭС элементов геоэлектрических моделей [Даниловский, Глинских, Нечаев, 2018; Danilovskiy, Glinskikh, Nechaev, 2018]. Выполненное исследование показывает, что помимо определения геометрических характеристик напластования и выявления трещиноватости прибор БКС имеет высокий потенциал для решения задач выявления вторичной пористости и текстурного анализа прискважинной области. Кроме того, продемонстрирована возможность применения прибора БКС в предлагаемой конфигурации для решения задач геонавигации наклонно-направленных скважин в тонкослоистых нефтяных коллекторах путём определения положения и пространственной ориентации границ пропластков по имиджам УЭС [Даниловский, Нечаев, 2018].

В **разделе 2.3** представлены результаты исследования влияния скважинных условий измерения (эксцентриситета прибора и УЭС бурового раствора в скважине) на имиджи УЭС и на результаты их интерпретации.

Путём анализа результатов трёхмерного численного моделирования с применением разработанного алгоритма автоматического детектирования границ пластов на имиджах УЭС, исключая субъективность интерпретации, установлено влияние скважинных условий измерения на сигналы

БКС и на результаты их интерпретации [Даниловский, 2018]. Результаты анализа показывают, что смещение прибора к нижней части скважины сильнее всего влияет на показания краевых секторов имиджа, соответствующих верхней части скважины. Неучёт эксцентриситета приводит к завышению амплитуд детектируемых синусоид, соответствующих границам пластов (Рисунок 2), а следовательно, к занижению значений восстанавливаемых углов наклона границ относительно скважины. Ошибка определения угла наклона при этом может достигать 6.9° и уменьшается с увеличением зенитного угла скважины. Кроме того, установлено влияние УЭС бурового раствора в скважине на сигналы БКС и на результаты их интерпретации, при этом показано, что такое влияние минимально при использовании проводящих глинистых и полимерных растворов.

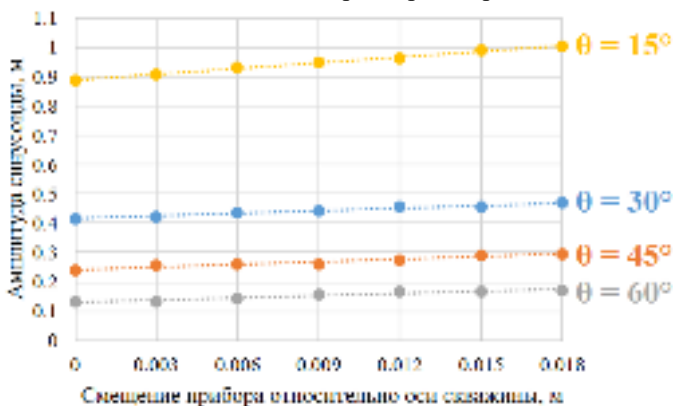


Рисунок 2 – Амплитуда синусоиды на имидже УЭС в зависимости от эксцентриситета прибора для разных углов пересечения скважины и границы геoeлектрических слоёв, подобранная с применением автоматического алгоритма

В разделе 2.4 выполнена оценка пространственного разрешения прибора БКС в процессе бурения на основе анализа результатов трёхмерного численного моделирования. В случае БКС пространственное разрешение прибора определяют три характеристики: радиальная глубинность, вертикальное разрешение и азимутальное разрешение.

Трёхмерным численным моделированием установлено, что в рассмотренных геoeлектрических моделях средняя радиальная глубинность прибора БКС варьируется от 0.08 до более чем 0.20 м в зависимости от пространственного распределения УЭС [Даниловский, Глинских, Нечаев, 2019]. Кроме того, установлено, что радиальная глубинность не зависит от размера измерительного электрода БКС.

Для оценки вертикального и азимутального разрешения прибора БКС с применением разработанного алгоритма обработки изображений построены реалистичные геоэлектрические модели и проведено трёхмерное численное моделирование сигналов БКС (Рисунок 3) [Даниловский, 2019]. Анализ результатов численного моделирования показывает, что вертикальное разрешение прибора БКС в процессе бурения не превышает 0.05 м, а азимутальное – 0.10 м (50° для скважины с диаметром 0.22 м). Неравенство этих характеристик обуславливается несимметричной фокусировкой прибора в вертикальной и азимутальной плоскостях.

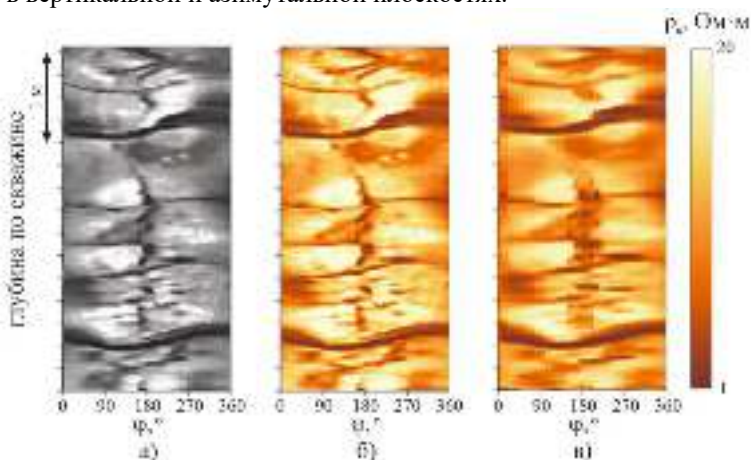


Рисунок 3 – а) имидж УЭС, полученный в результате измерений прибором MicroScore [MicroScore. Боковой ..., 2012], б) распределение УЭС в околоскважинном пространстве геоэлектрической модели, в) имидж УЭС, полученный в результате численного моделирования

Глава 3. Обработка и интерпретация данных БКС на основе свёрточных искусственных нейронных сетей в процессе бурения для геонавигации

Третья глава посвящена разработке способов обработки и интерпретации имиджей УЭС на основе свёрточных ИНС: подавления случайных помех и автоматического детектирования границ пластов.

В разделе 3.1 проводится масштабное трёхмерное численное моделирование измерений БКС с последующей их аугментацией. Полученный таким образом набор данных в дальнейшем используется для обучения ИНС.

Для обучения ИНС создаётся набор данных большого объёма, который включает в себя имиджи УЭС, полученные при пересечении скважи-

ной геоэлектрических слоёв с различным УЭС и по-разному ориентированными в пространстве границами (Рисунок 4а). Двадцать случайно сгенерированных геоэлектрических моделей среды содержат от 14 до 96 слоёв, при этом УЭС слоёв распределены логнормально и варьируются от 1 до 500 Ом·м. Полученные в результате численного моделирования синтетические сигналы прибора (кажущиеся УЭС) затем логарифмируются, поскольку для обучения ИНС эффективнее использовать нормально распределенные величины. Углы и азимуты падения границ в моделях меняются плавно и варьируются, соответственно, от 0° до 89° и от 0° до 359° . Всего получено более 2000 м синтетических имиджей в моделях из более чем 700 геоэлектрических слоёв. Все данные представлены с шагом дискретизации измерений по глубине 0.1 м в 16 азимутальных секторах (Рисунок 4б). Для преобразования полученных данных в формат, пригодный для обучения и тестирования работы ИНС, исходные синтетические имиджи и соответствующие им положения границ геоэлектрических слоёв делятся на отрезки. При этом 85 % полученной выборки используется для обучения, а 15 % – для тестирования работы ИНС. Для расширения обучающей выборки проводится аугментация данных [Danilovskiy, Loginov, Nechaev, 2020]. К отрезкам имиджей, входящих в обучающую выборку, применяется операция последовательного кругового сдвига на один отсчет по азимуту, что позволяет увеличить объём исходной выборки в 16 раз (по числу азимутальных секторов прибора) (Рисунок 4в).

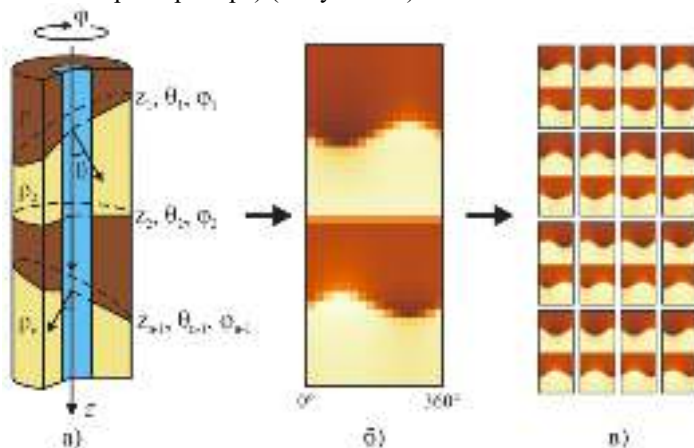


Рисунок 4 – Схема получения набора данных для обучения ИНС: а) геоэлектрическая модель, в которой рассчитываются сигналы БКС, б) имидж УЭС, полученный в результате трёхмерного численного моделирования, в) имиджи УЭС, полученные в результате аугментации

Представленный подход к созданию обучающего набора данных позволяет получить синтетические имиджи УЭС в геоэлектрических моделях, где скважина пересекает границы с любыми возможными параметрами (z , θ , φ), при этом для каждой границы известны их истинные значения. Применение аугментации позволяет значительно сократить время, необходимое для получения набора данных, достаточного для обучения глубоких ИНС. Полученный таким образом набор данных может быть адаптирован под конкретную задачу и используется далее для обучения свёрточных ИНС, применяемых для решения двух задач: подавления случайных помех и поточечного детектирования геоэлектрических границ на имиджах УЭС.

В **разделе 3.2** выполнена разработка и программная реализация алгоритма подавления случайных помех на имиджах УЭС на основе свёрточного автокодировщика.

К исходным синтетическим имиджам БКС добавляется нормально распределённый шум, при этом дисперсия шума возрастает с увеличением кажущегося УЭС, что типично для гальванических методов. При помощи ИНС с архитектурой свёрточного автокодировщика решается задача регрессии, где по входным зашумлённым сигналам восстанавливаются истинные сигналы без шума. Из-за потерь при кодировании сигналы восстанавливаются с ошибками, для минимизации которых в процессе обучения ИНС подбираются такие свёрточные фильтры, чтобы отбирать наиболее важные признаки, исключая случайные помехи. Качество работы разработанного алгоритма оценивается на основе индекса структурного сходства SSIM (от англ. structure similarity) истинных и восстанавливаемых значений [Image quality assessment ..., 2004]. Для отложенных данных, не задействованных непосредственно при обучении ИНС, SSIM составляет 0.95, что говорит о высоком качестве работы алгоритма.

В **разделе 3.3** выполнена разработка и программная реализация алгоритма автоматического детектирования границ пластов на имиджах УЭС на основе полносвёрточной ИНС.

При помощи полносвёрточной ИНС решается задача поточечной бинарной классификации измерений на имиджах УЭС [Программное обеспечение ..., 2019б]. Каждой точке имиджа УЭС ставится в соответствие один из двух классов: «граница» или «не граница», при этом в качестве «ответов» используется разметка границ, построенная по параметрам геоэлектрической модели, в которой рассчитываются сигналы БКС. Детектирование границ пластов на практических имиджах УЭС осложняется наличием латеральных неоднородностей электрофизических свойств пластов, присутствием неровностей стенки скважины и каверн, а также другими факторами, которые являются помехами для разрабатываемого алгоритма. Для

того чтобы преобразовать синтетические имиджи УЭС в псевдопрактические применяется шум Перлина – математический алгоритм, использующийся для генерации текстур псевдослучайным методом, при этом не требующий серьёзных вычислительных мощностей [Perlin, 1985]. После получения оптимальных значений свёрточных фильтров в результате обучения ИНС, разработанный алгоритм используется для детектирования границ пластов на имиджах УЭС, которые не были задействованы в процессе обучения. Качество классификации оценивается на основе ряда метрик, наиболее представительной из которых является F-мера [Sasaki, 2007]. В результате тестирования получено значение F-меры более 0.66, что говорит о высоком качестве классификации в условиях зашумлённых данных.

В разделе 3.4 проводится апробация разработанных алгоритмов подавления случайных помех и детектирования границ пластов на практических данных БКС из скважин Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Анализируемый практический материал включает в себя данные БКС из наклонно-направленных скважин, пробуренных на пяти месторождениях Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (Ай-Пимском, Жумажановском, Сайгатинском, Фёдоровском и Южно-Нюрымском), вскрывающих терригенные отложения мелового возраста. Анализ и интерпретация имиджей УЭС осложняется тем, что наклонно-направленное бурение скважин проводилось с использованием винтовых забойных двигателей (ВЗД). Во-первых, при использовании ВЗД непосредственно в процессе корректировки траектории скважины буровая колонна не вращается, что приводит к невозможности проведения измерений БКС в различных азимутальных направлениях. Во-вторых, образующаяся в процессе ненаправленного роторного бурения поверхность стенки скважины характеризуется значительными неровностями, что проявляется на имиджах УЭС.

Разработанные с использованием современных математических средств и программно реализованные алгоритмы подавления случайных помех и детектирования границ пластов объединены вместе для обработки практических данных (Рисунок 5). Применение алгоритма подавления случайных помех является опциональным, поскольку не на всех данных присутствуют ярко выраженные помехи, при этом применение алгоритма в наклонно-направленных скважинах осложнено наличием крупных интервалов, в которых нет азимутальных измерений.

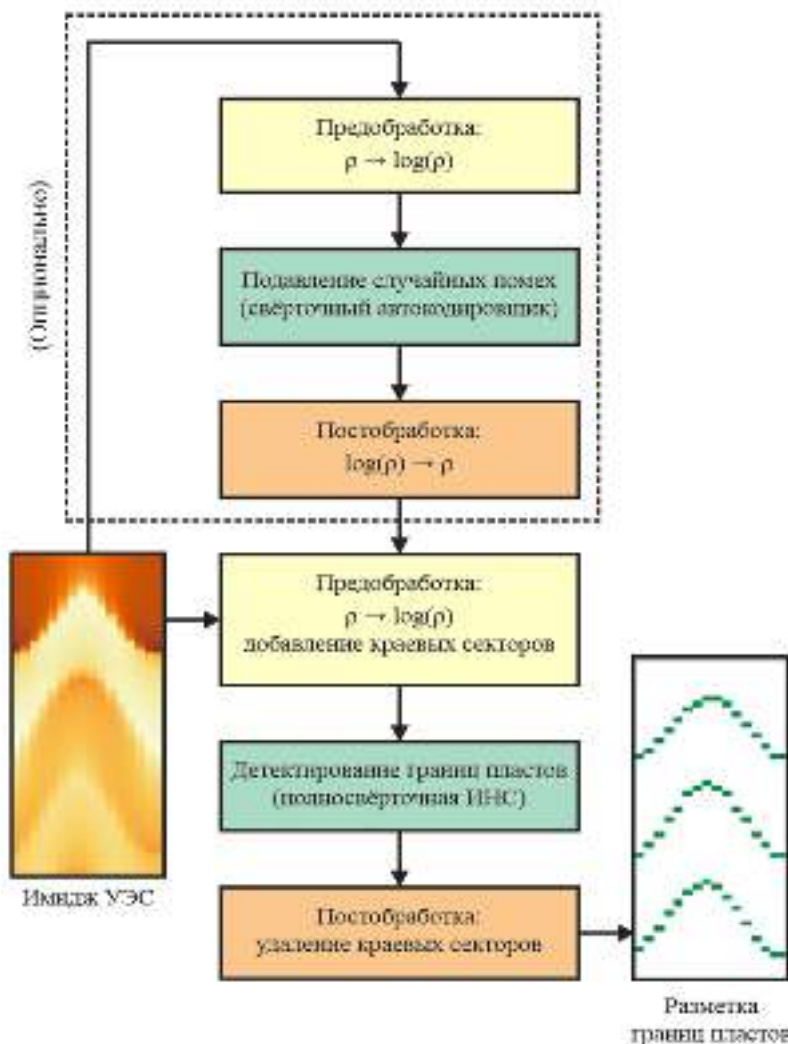


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритмов подавления случайных помех и детектирования границ пластов на имиджах УЭС

С применением разработанных алгоритмов проводится обработка практических данных БКС, полученных в ходе испытаний прибора в скважинах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Результаты применения алгоритма подавления случайных помех на изображениях УЭС, полученных в субвертикальной скважине Жумажановского нефтяного месторождения приведены на Рисунке 6. Анализ результатов показывает, что, как и при обработке синтетических данных, в восстановленных изображениях УЭС сохраняется информация о пространственной ориентации границ вскрытых скважиной пластов, при этом подавляются случайные помехи.

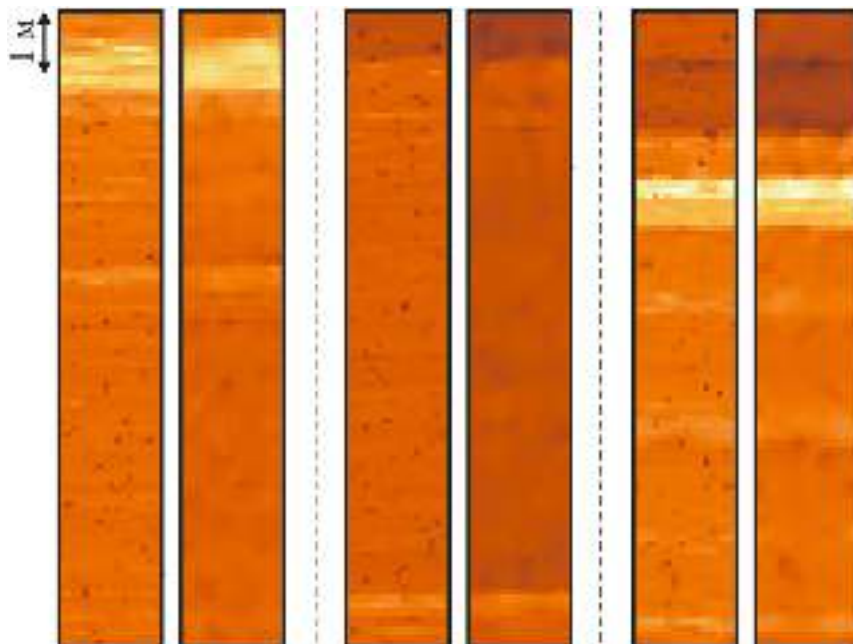


Рисунок 6 – Исходные изображения УЭС, полученные в субвертикальной скважине (слева), и результат их обработки сверточным автокодировщиком для подавления случайных помех (справа)

Результаты применения алгоритма детектирования границ пластов на изображениях УЭС, полученных в наклонных скважинах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, приведены на Рисунке 7. Анализ результатов применения алгоритма показывает, что, как и при детектировании границ пластов на синтетических данных, наиболее надежно выделяются границы контрастных по УЭС слоёв, при этом на получаемой в результате применения алгоритма разметке практически отсутствуют ложноположительные результаты внутри слоёв. Границы пластов детектируются с достаточной точностью для проведения дальнейшей интерпретации.

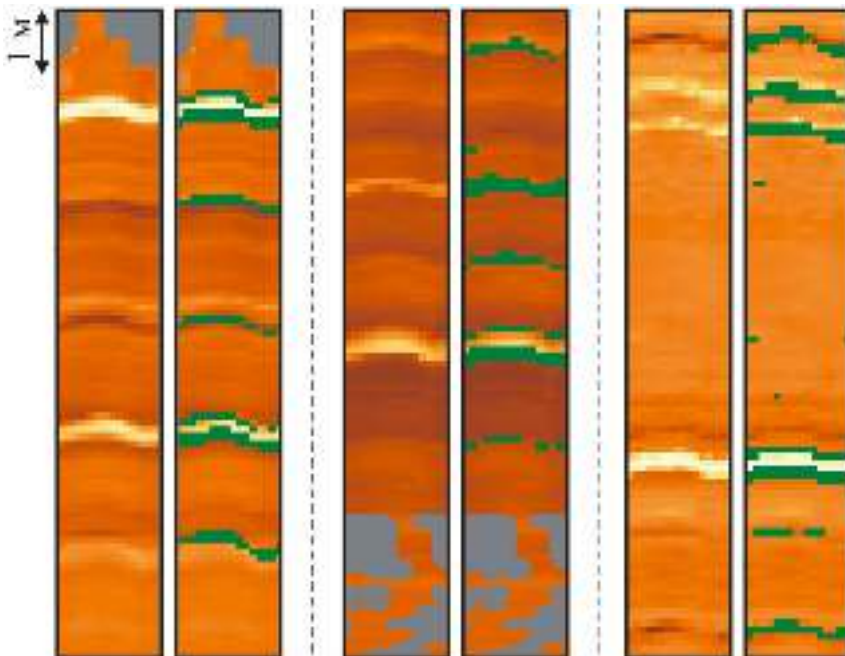


Рисунок 7 – Имиджи УЭС, полученные в наклонных скважинах с зенитным углом от 30° до 70° (слева), и те же имиджи УЭС с детектированными на них границами пластов (справа). Серым цветом показаны пропущенные точки измерений

Таким образом, результаты применения разработанных алгоритмов подавления случайных помех и детектирования границ пластов на имиджах УЭС на примере практических данных из скважин Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции показывают их высокую эффективность, несмотря на то, что имиджи УЭС получены в скважинах, пробуренных с применением ВЗД. Разработанные алгоритмы позволяют оперативно обрабатывать большие объёмы данных (доли секунды в расчёте на скважину), что обуславливает возможность их применения при проведении геонавигации наклонно-направленных скважин в рамках специально разрабатываемого программного обеспечения [Телеметрические системы ..., 2017; Программное обеспечение ..., 2019а].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное программно-методическое обеспечение численной обработки и интерпретации данных БКС в процессе бурения наклонно-направленных скважин является новым и имеет ряд преимуществ.

Во-первых, с применением исключаяющего субъективность интерпретации алгоритма детектирования геоэлектрических границ детально исследовано влияние скважинных условий измерения (эксцентриситета прибора и УЭС промывочной жидкости) на результаты интерпретации имиджей УЭС. Учёт скважинных условий измерения позволяет повысить точность определения углов наклона границ пластов, пересекаемых скважиной, что необходимо для проведения высокоточной геонавигации.

Во-вторых, на основе анализа результатов трёхмерного численного моделирования выполнена детальная оценка пространственного разрешения нового прибора БКС в процессе бурения, учитывающая неравенство вертикального и азимутального разрешения в силу несимметричной фокусировки тока. Полученная оценка даёт возможность выбора оптимальной плотности измерений (вертикального и азимутального шага дискретизации), передаваемых на поверхность непосредственно в процессе бурения для повышения информативности данных.

В-третьих, предложен оригинальный подход к созданию набора данных для обучения ИНС, решающих задачи обработки и интерпретации имиджей УЭС, на основе трёхмерного численного моделирования. Применение аугментации данных даёт возможность значительно сократить время выполнения ресурсоёмких вычислений и не требует использования высокопроизводительных устройств. Добавление в имиджи УЭС из обучающей выборки шума Перлина позволяет получить реалистичные псевдопрактические данные и увеличивает надёжность работы обучаемых на них ИНС.

В-четвёртых, разработанные на основе свёрточных ИНС алгоритмы подавления случайных помех и детектирования границ пластов на имиджах УЭС обеспечивают быстрое действие вычислений и высокую точность. Использование в качестве обучающих данных синтетических сигналов БКС, рассчитанных в геоэлектрических моделях с известными параметрами, увеличивает надёжность и повышает обоснованность заключений о строении геологического разреза. Кроме того, преимуществом разработанных алгоритмов является возможность обработки имиджей УЭС произвольной длины за счет отсутствия в архитектуре ИНС полносвязных слоёв.

Таким образом, использование разработанного программно-методического обеспечения обработки и интерпретации данных БКС в процессе бу-

рения позволяет более точно и оперативно получать информацию об ориентации границ пластов, вскрываемых скважинами, повышает эффективность изучения поисковых объектов и может использоваться при геонавигации наклонно-направленных скважин в реальном времени.

Несомненно, исследовательские работы по развитию метода БКС в процессе бурения должны быть продолжены. Необходимо исследовать влияние анизотропии УЭС горных пород на сигналы БКС и дополнить программно-методическое обеспечение её учётом. Перспективным направлением является разработка быстрого аналога прямой задачи БКС в наклонно-направленных скважинах на основе свёрточных ИНС, которая обусловит создание программы автоматизированной инверсии. Требуются более широкие опытно-промышленные испытания прибора в наклонно-направленных скважинах Западной и Восточной Сибири, в том числе пробуренных с применением РУС. Также важной глобальной задачей является разработка методик комплексирования интерпретации данных БКС и стандартных методов каротажа для оценки петрофизических параметров нефтяных коллекторов, вскрытых наклонно-направленными скважинами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Телеметрические системы каротажа: программно-методическое обеспечение в процессе бурения наклонного-горизонтальных скважин / В.Н. Глинских, ..., **К.Н. Даниловский** [и др.] // *Neftegaz.RU.* – 2017. – Вып. 10. – С. 42–49.
2. Глинских В.Н. Трёхмерное численное моделирование сигналов азимутального микробокового каротажа в процессе бурения / В.Н. Глинских, **К.Н. Даниловский**, О.В. Нечаев // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений.* – 2018. – № 10. – С. 32–39.
3. Программное обеспечение на основе web-технологий для геонавигации нефтегазовых скважин / **К.Н. Даниловский** [и др.] // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* – 2019. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 5–17.

Публикации в материалах конференций

4. **Даниловский К.Н.** Разработка пластового LWD-микроимиджера УЭС: обзор известных решений и результаты численного моделирования / К.Н. Даниловский, В.Н. Глинских, О.В. Нечаев // XIV Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо Гео-Сибирь 2018» (Новосибирск, 23–27 апреля 2018): сборник материалов. – Новосибирск, 2018. – Т. 3. – С. 108–115.
5. **Danilovskiy K.** 3D Modelling of the New Resistivity Microimaging Tool Signals for Logging While Drilling [Электронный ресурс] / K. Danilovskiy, V. Glinskikh, O. Nechaev // The 80th EAGE Conference and Exhibition 2018 (Copenhagen, Denmark, 11–14 June 2018): extended abstracts. – Copenhagen, 2018. – Document ID: Paper Tu SP2 01.
6. **Даниловский К.Н.** Моделирование сигналов электрического LWD-микроимиджера применительно к задаче геонавигации горизонтальных скважин // К.Н. Даниловский, О.В. Нечаев // V Всероссийская молодёжная научно-практическая школа-конференция «Науки о Земле. Современное состояние» (Хакасия, 30 июля–5 августа 2018): материалы конференции. – Новосибирск, 2018. – С. 23–25.
7. **Даниловский К.Н.** Оценка влияния условий измерения на результаты интерпретации данных азимутального микробокового каротажа в процессе бурения / К.Н. Даниловский // IX Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 19–23 ноября 2018): сборник материалов. – Новосибирск, 2018. – С. 165–167.
8. **Даниловский К.Н.** Сигналы электрического микроимиджера для каротажа в процессе бурения по результатам трёхмерного численного мо-

делирования / К.Н. Даниловский // XXIII Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 8–12 апреля 2019 г.): труды симпозиума. – Томск, 2019. – Т. 2. – С. 282–284.

9. **Даниловский К.Н.** Оценка пространственного разрешения прибора бокового сканирующего каротажа в процессе бурения по результатам численного моделирования / К.Н. Даниловский, В.Н. Глинских, О.В. Нечаев // XV Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо Гео-Сибирь 2019» (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.): сборник материалов. – Новосибирск, 2019. – Т. 2. – С. 89–94.

10. Программное обеспечение для геонавигации скважин по данным каротажа в процессе бурения на основе алгоритмов численной инверсии и искусственных нейронных сетей / **К.Н. Даниловский** [и др.] // XI Международный симпозиум стран ЭПШП и ЕАЭС «Новая техника и технологии ГИС для нефтегазовой промышленности» (Новосибирск, 16–20 сентября 2019): сборник докладов. – Новосибирск, 2019. – Т. 2. – С. 256–263.

11. **Danilovskiy K.** Automatic Geoelectric Boundaries Detection on the Resistivity Images Based on 3D Numerical Simulation and Convolutional Neural Network [Электронный ресурс] / K. Danilovskiy, G. Loginov, O. Nechaev // The 9th Saint Petersburg International Conference and Exhibition (Saint Petersburg, November 16–19, 2020): extended abstracts. – Saint Petersburg, 2020. – Document ID: Paper 15.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 19.02.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 100. Зак. № 193

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3