

На правах рукописи



Коровин Михаил Олегович

**МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЛАТЕРАЛЬНОЙ
АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЁМКОСТНЫХ СВОЙСТВ
ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСНОГО
АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск - 2017

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: Конторович Владимир Алексеевич,
доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН

Официальные оппоненты: Мельник Игорь Анатольевич,
доктор геолого-минералогических наук,
Томский филиал АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», заместитель директора по научной работе (г. Томск)

Чашков Анатолий Васильевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
ПАО «НОВАТЭК», эксперт по петрофизике
департамента геологии, разработки и лицензирования месторождений (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Западно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии и геофизики» (г. Тюмень)

Защита диссертации состоится «20» декабря 2017 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.12 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу 634050, г. Томск, пр-т. Ленина 2а, ст.5, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53 и на официальном сайте <http://portal.tpu.ru/council/2802/worklist>

Автореферат разослан «___» октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Д 212.269.12, д. г.-м. н.



Исаев В.И.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция на протяжении более полувека является основным нефтегазодобывающим регионом России. Первый промышленный приток нефти в этом регионе был получен в 1957 г. на Березовской площади, расположенной на территории Тюменской области.

Завершающая стадия разработки и монотонное падение добычи нефти характеризуют большинство крупных нефтяных месторождений, открытых в Западной Сибири в 60-80-х годах прошлого столетия. В тоже время результаты геологоразведочных работ конца XX – начала XXI века свидетельствует о том, что этом регионе фонд крупных традиционных нефтеперспективных объектов практически исчерпан и в настоящее время на территории бассейна открываются в основном мелкие, в редких случаях средние по запасам месторождения.

Поддержание уровней добычи нефти в условиях отсутствия открытия новых крупных залежей углеводородов определяет необходимость, наряду с вводом в разработку мелких и средних месторождений, возвращаться к ранее неосвоенным ресурсам и разрабатывать методику наиболее полного извлечения нефти с применением новых технологий и учётом геолого-геофизических параметров, ранее не принимаемых во внимание.

К таким параметрам, оказывающим существенное влияние на коэффициент извлечения нефти (КИН) безусловно относится горизонтальная анизотропия фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов.

Несмотря на то, что в настоящее время большинство исследователей сходятся на том, что песчаные пласты-коллекторы являются неоднородными и уже в процессе осадконакопления формируются направления, являющиеся наиболее эффективными для потока флюида, при построении моделей продуктивных пластов показатели латеральной анизотропии практически не учитываются.

Недоучет анизотропии на стадии создания проекта разработки и в процессе эксплуатации месторождений негативно отражается на нефтеотдаче и недостаточной выработке запасов. Для оптимизации и повышения эффективности эксплуатации месторождений необходимо обладать данными об анизотропии на всех этапах разработки.

Настоящая работа посвящена созданию методики количественной оценки направления и величины горизонтальной анизотропии фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов, основанной на специализированном изучении керна скважин и объектноориентированном анализе материалов ГИС, что и определяет **актуальность** выполненного исследования.

Объектом настоящих исследований является Двуреченское месторождение. Выбор Двуреченского месторождения определялся следующими обстоятельствами:

1. Двуреченское месторождение хорошо изучено сейсморазведкой МОГТ, что позволяет осуществить построение кондиционной структурно-тектонической модели объекта.

2. На месторождении пробурено большое количество поисково-оценочных и эксплуатационных скважин, обеспеченных кондиционным комплексом ГИС.

3. Из основного продуктивного пласта Ю₁³ отобран большой объем кернового материала, позволяющий выполнить кондиционные аналитические исследования.

4. На объекте выполнены гидродинамические исследования, позволяющие оценить направления флюидопотоков.

В комплексе эти данные позволяют провести всесторонние геолого-геофизические исследования и выполнить экспертную оценку разработанной методики определения латеральной анизотропии коллектора.

Степень разработанности темы.

В настоящее время большинство исследователей (Владимиров И.В., Хисамутдинов Н.И., Михеев Ю.В., Абдульмянов С.Х., Гурбатова И.П., Жабреев И.П., Стуканогов Ю.А., Злобин А.А., Лебедев С.В., Юшков И.Р., Ковалёв В.С., Житомирский В.М.) сходятся на том, что песчаные пласты-коллекторы являются неоднородными и уже в процессе осадконакопления формируются направления, которые являются наиболее эффективными для потока флюида. В одной и той же точке пласта или его фрагменте наблюдается значительное различие проницаемости, определенной параллельно этому направлению и ортогонально по отношению к нему, что фактически подводит любого исследователя к описанию свойств коллектора с позиций фильтрационной анизотропии. Для количественной оценки этого явления удобно пользоваться эллиптической аппроксимацией пространственного распределения проницаемости и других взаимосвязанных с ней петрофизических параметров с целью получения пригодных для моделирования численных данных по ориентации зон улучшенной фильтрации и магнитуды анизотропии (соотношение максимальной и минимальной проницаемости).

Цель исследования: разработать методику оценки параметров (величина, направление) латеральной анизотропии фильтрационно-емкостных свойств продуктивного пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения по комплексу данных специализированного исследования керна и ГИС.

В диссертационной работе решалась следующая научная задача:

Разработка методики определения параметров (величина, направление) горизонтальной анизотропии терригенных коллекторов по комплексу материалов аналитических исследований керна и материалов геофизических исследований скважин (ГИС) и её апробация.

Решение задачи разделено на следующие этапы:

1. Анализ зависимостей Керн-Керн, определение петрофизических зависимостей, вычисление значений коэффициентов проницаемости и

водонасыщенности;

2. Пересчет коэффициентов пористости в коэффициенты проницаемости с учетом зависимостей Керн-Керн.

3. Анализ результатов специализированных аналитических исследований керн скважин, определение направлений и величины горизонтальной анизотропии проницаемости.

4. Расчет значений коэффициентов пористости по ГИС, сравнение полученных результатов с данными петрофизических исследований керн скважин.

5. Объектноориентированная интерпретация материалов ГИС, построение карт проницаемости и градиентов проницаемости, определение направлений и величины анизотропии проницаемости по ГИС.

6. Комплексный анализ результатов исследований керн и ГИС, определение направлений и величины анизотропии в отдельных блоках и на месторождении в целом, сопоставление полученных результатов с данными гидродинамических исследований

7. Комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов, анализ структурных особенностей строения исследуемой территории, построение изотропной и анизотропных геологических и гидродинамических моделей резервуара.

8. Сравнение расчетных данных по добыче нефти, воды и жидкости, полученных по изотропной и анизотропной моделям, с фактическими данными; оценка эффективности разработанной методики.

Научная новизна работы.

Разработана и апробирована основанная на изучении данных специализированного исследования керн и ГИС методика комплексного изучения латеральной анизотропии фильтрационно-емкостных свойств верхнеюрских терригенных коллекторов прибрежно-морского генезиса. Для песчаного пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения определены количественные характеристики анизотропии проницаемости, обуславливающие основные направления перетоков флюидов.

Для генерализованной оценки анизотропии фильтрационных свойств разработан алгоритм эллиптической аппроксимации петрофизических, геофизических и гидродинамических данных, обеспечивающий надежное определение величины и направления преобладающей проницаемости.

Построена анизотропная геологическая модель Двуреченского месторождения, учитывающая условия осадконакопления и структурно-тектонические особенности строения продуктивного пласта Ю₁³ и позволяющая учитывать пространственную неоднородность коллекторов при разработке месторождения и интенсификации добычи нефти.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанная методика оценки анизотропии фильтрационно-емкостных свойств терригенных коллекторов позволяет осуществлять построение анизотропных моделей на стадии разведки месторождения и

учитывать латеральную неоднородность пласта-коллектора уже при создании проекта разработки. Предложенные в работе методические приемы могут быть использованы при учете неоднородности терригенных коллекторов на большинстве нефтегазовых месторождений Западной Сибири.

Построенная автором анизотропная модель пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения может быть использована недропользователем на текущей стадии эксплуатации месторождения.

Учет латеральной анизотропии проницаемости коллекторов на разных стадиях эксплуатации месторождений позволяет осуществить планирование технико-экономических мероприятий, обеспечивающих увеличение нефтеотдачи и более полную выработку запасов продуктивных пластов.

Методология и методы исследования.

Методической основой является:

- палеомагнитное ориентирование керна, определение анизотропии магнитной восприимчивости, измерение времени пробега ультразвуковых колебаний, изучение литологической неоднородности пород методом морфологического анализа;
- стандартная интерпретация ГИС с последующим применением векторного и градиент-анализа карт распределения проницаемости;
- альтернативный подход (эллиптическое моделирование распределения параметров) к интерпретации результатов трассерных исследований;
- учёт анизотропных характеристик проницаемости при геологическом и гидродинамическом моделировании продуктивного пласта в современном программном обеспечении.

Положения, выносимые на защиту.

1. Магнитные и упругие параметры образцов керна, ориентировка слагающих породу зерен кварца, а также объектноориентированная интерпретация материалов ГИС с использованием градиентного и векторного анализа позволяют определять количественные характеристики направления и величины анизотропии проницаемости терригенных пород. Априорная анизотропная модель коллектора может быть построена уже на стадии разведки месторождения и в дальнейшем уточняться в интерактивном режиме по мере появления новых эксплуатационных скважин.

2. На Двуреченском месторождении основной продуктивный пласт Ю₁³ характеризуются отчетливо выраженной пространственной анизотропией фильтрационных свойств, обусловленной прибрежно-морской обстановкой осадконакопления. Азимуты простираения главных осей эллипсов анизотропии проницаемости в разных частях месторождения существенно отличаются: для северного и южного блоков основное направление анизотропии северо-западное, для центрального – северо-восточное. Малоамплитудные тектонические нарушения, контролируемые гидродинамически несвязанные блоки ограничивают перетоки флюидов и разделяют месторождение на секторы с различным направлением потока флюидов.

3. Анизотропная флюидодинамическая модель Двуреченского месторождения более точно, чем изотропная отражает закономерности перетоков флюидов по пласту Ю₁³. Параметры добычи эксплуатационных скважин при использовании анизотропной модели ближе к реальным показателям, отличаясь от них не более, чем на 3-5%, в отличие от изотропной модели, где ошибка составляет порядка 10%. Планирование мероприятий по увеличению нефтеотдачи следует осуществлять с учетом фильтрационной неоднородности пласта.

Характеристика исходных данных.

В основу диссертационной работы положены результаты геологических, геофизических, гидродинамических исследований продуктивного пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения.

В процессе выполнения работы использовано 1029 каротажных диаграмм по 189 скважинам, литолого-петрографическое описание керна, 773 определения фильтрационно-ёмкостных свойств образцов (открытая пористость, остаточная водонасыщенность, проницаемость, исследования капиллярных свойств) по 16 скважинам, 104 определения анизотропных магнитных и упругих параметров пространственно ориентированных палеомагнитным методом образцов пород по 4 скважинам, данные гидродинамических трассерных исследований по 19 скважинам. По всем видам исходных данных автором проведена количественная оценка анизотропии горизонтальной проницаемости коллектора и сопоставление полученных данных.

Степень достоверности результатов.

Данные по материалам изучения керна и геофизическим исследованиям скважин подтверждены фактическими гидродинамическими (трассерными) исследованиями.

Показатели добычи, полученные по анизотропной модели точнее отражают фактические показатели добычи по сравнению с изотропной моделью.

Большой объём исходной информации, полученной различными методами исследования, подтверждает надёжность полученных результатов.

Апробация результатов исследования.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в журналах из Перечня ВАК, 7 статей в сборниках материалов конференций и тематических сборниках:

- 73-я конференция и выставка EAGE, совместно с SPE EUROPEC, Вена, Австрия, 2011 г.
- VI региональная научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия. 2013 г.
- 75-я конференция и выставка EAGE, совместно с SPE EUROPEC, Лондон, Великобритания, 2013 г.

- Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче. Региональный конкурс студенческих и аспирантских работ Российско-Каспийского региона, Москва, Россия, 2014 г.

Личный вклад автора.

Автором сформулирована задача исследований. Автором разработана и апробирована методика комплексного изучения латеральной анизотропии фильтрационно-емкостных свойств верхнеюрских терригенных коллекторов прибрежно-морского генезиса.

Автором разработан алгоритм эллиптической аппроксимации петрофизических, геофизических и гидродинамических данных, обеспечивающий надежное определение величины и направления преобладающей проницаемости.

Автором проведено изучение ориентированных образцов керна, выполнена переобработка и переинтерпретация данных петрофизического изучения керна, геофизических и гидродинамических исследований скважин, построены уточненная геологическая и петрофизическая модели продуктивного пласта, определены параметры фильтрационной анизотропии, рассчитана анизотропная гидродинамическая модель.

Структура и объём диссертации.

Диссертация включает 108 страниц текста, 46 рисунков, 13 таблиц. Текстовая часть содержит введение, 4 главы, заключение. Библиографический список содержит 137 источников.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность за ценные советы и помощь научному руководителю, чл.-корр. РАН, д.г.-м.н. В.А. Конторовичу, к.г.-м.н. В.П. Меркулову, д.г.-м.н. В.Б. Белозёрову.

Содержание работы

Введение содержит актуальность темы, цель и задачи работы, новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе отражён анализ литературных источников, тематика которых соответствует изучению неоднородностей проницаемости продуктивных разрезов. Подробно рассмотрено влияние различных геологических факторов на фильтрационную анизотропию коллекторов терригенного типа.

Во второй главе содержится детальная характеристика Двуреченского месторождения с геологической, тектонической, фациальной, литологической и петрофизической позиций. Детально описаны верхнеюрские отложения, непосредственно принимающие участие в формировании пространства коллектора.

В третьей главе рассмотрена разработка методики по достоверному определению параметров анизотропии горизонтальной проницаемости (величины, направления) по результатам лабораторных исследований керна. Детально описана интерпретация петрофизических зависимостей и

специализированные исследования, включающие морфологический анализ ориентированных шлифов, исследования магнитных и акустических свойств образцов керна.

Решение проблемы состояло в комплексном анализе базы данных по керновому материалу, создании и обосновании петрофизических зависимостей, контролирующих распределение фильтрационно-ёмкостных свойств. Итоговые блоки данных применены для распределения параметров фильтрационной неоднородности по площади распространения пласта Ю₁³.

В четвертой главе детально описаны приёмы получения параметров анизотропии по методам геофизических исследований скважин. Проведена стандартная интерпретация данных ГИС, впоследствии использованная для построения карт распределения проницаемости, а также специализированные исследования градиентов проницаемости, позволяющие получить численную характеристику величины и направления анизотропии.

В пятой главе приведён анализ результатов гидродинамических исследований скважин, выполненных на исследуемом месторождении, для подтверждения достоверности определений анизотропии проницаемости по керновому материалу и геофизическим исследованиям скважин.

В шестой главе рассмотрены результаты геологического и гидродинамического 3D моделирования изотропной и анизотропной моделей. Проведён анализ сходимости моделируемых данных и реальной добычи, показывающий необходимость учёта анизотропии проницаемости при проектировании разработки месторождений.

В заключении описана последовательность решения задачи по вычислению пределов изменения анизотропных характеристик.

Обоснование защищаемых положений

1. Магнитные и упругие параметры образцов керна, ориентировка слагающих породу зерен кварца, а также объектноориентированная интерпретация материалов ГИС с использованием градиентного и векторного анализа позволяют определять количественные характеристики направления и величины анизотропии проницаемости терригенных пород. Априорная анизотропная модель коллектора может быть построена уже на стадии разведки месторождения и в дальнейшем уточняться в интерактивном режиме по мере появления новых эксплуатационных скважин.

Наличие неравномерно ориентированных по азимуту неоднородностей в структуре пород обуславливают образование направлений, по которым отмечается повышенные внутрипластовые и межпластовые перетоки углеводородов. Это подтверждается фактическими дебитами на разных месторождениях. Колебания значений дебитов, изменения режимов работы нагнетательных скважин, различия в фильтрационных свойствах пород – всё это также свидетельствует о существовании и непосредственном влиянии анизотропии свойств геологического разреза на величину проницаемости в

зависимости от направления. Анизотропия предопределяется ходом осадконакопления, последующими тектоническими воздействиями, процессами выщелачивания и карбонатизации.

В комплексе все эти факторы формируют неоднородность коллектора, и каждый из них в своей мере обуславливает упорядоченность текстурных и структурных особенностей пород-коллекторов, тем самым оказывая непосредственное влияние на физические свойства, и, естественно, на нефтеотдачу. Таким образом, для выбора наиболее эффективной системы разработки необходимо производить учёт и оценку влияния анизотропии пород на технологию эксплуатации месторождений. Для анализа неоднородностей необходимо проводить исследования на пространственно ориентированном керне. В этом случае возможно непосредственное определение фильтрационных свойств путём измерения проницаемости на специально выпиленных образцах. При подготовке экспериментальных образцов желательно заранее определить направление петрофизической анизотропии. В настоящей работе рассматривается методология комплексной оценки петрофизических параметров, позволяющих решать эту задачу. Работы по изучению анизотропии проводились автором с последующей обработкой полученной информации и дополнительными расчётами в период с 2006 по 2013 гг.

Последовательность решения проблемы представляется следующей:

1. Восстановление ориентировки керна является первым этапом при оценке анизотропии, т.к. позволяет выполнить изучение азимутального распределения улучшенных коллекторских свойств пространственно ориентированных образцов керна, извлечённого из продуктивного пласта.
2. Анализ литолого-петрофизических параметров, отражающих общую анизотропию коллектора.
3. Сопоставление полученных данных с геологическими особенностями пород коллекторов и фильтрационными свойствами.

Количественную оценку величины и направления анизотропии проницаемости представляется возможным определить с помощью исследований керна, геофизических исследований скважин, а также гидродинамических исследований. Для определения латеральной анизотропии коллектора в работе использовались магнитные (остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость) и акустические свойства пород.

По результатам магнитных исследований автором разработан алгоритм расчёта направления наилучшего изменения магнитной анизотропии. При этом эллиптическая модель наилучшим образом описывает характер анизотропии.

$$\sin^2(\beta-\alpha) \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2}\right) = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{a^2}$$

где a – значение большой полуоси эллипса; b – значение малой полуоси эллипса; β – угол, соответствующий точке с экспериментальными данными; x

– расчётное значение; α – угол, соответствующий углу наклона главной оси эллипса.

Разработанный и опробованный алгоритм позволяет при наличии одних только экспериментальных данных и соответствующих им углов определять направление индуктивной намагниченности зерна и строить эллиптическую модель магнитной восприимчивости с удовлетворительной точностью.

Пространственная ориентировка зерна в совокупности с эллиптической моделью однозначно выделяет упорядоченность структурных особенностей пород и анизотропию магнитных и упругих свойств в системах координат (географическая, магнитная).

По результатам *акустических* исследований рассчитывалась зависимость скорости ультразвуковых колебаний (УЗК) от угла с вычитанием константы скорости (рисунок 1). Дополнительным критерием оценки достоверности расчётов было сравнение результатов, полученных магнитным и акустическим методами (рисунок 1).

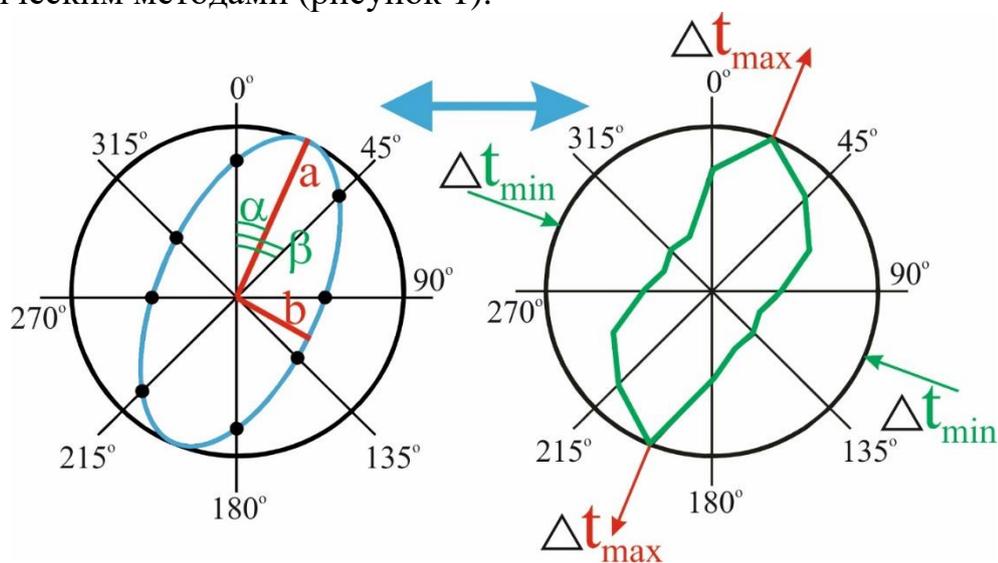


Рисунок 1. Сопоставление результатов магнитных (а – значение большой полуоси эллипса; b – значение малой полуоси эллипса; β – угол, соответствующий точке с экспериментальными данными; x – расчётное значение; α – угол, соответствующий углу наклона главной оси эллипсоида) и акустических (зависимость скорости ультразвуковых колебаний от угла с вычитанием константы скорости) методов

Выполненные на Двуреченском месторождении исследования показали, что по результатам изучения литологических, акустических и магнитных свойств коллектора выделяются одинаковые направления латеральной анизотропии и при этом азимуты простираения главных осей эллипсов анизотропии в разных частях месторождения существенно отличаются (рисунок 2).

Наиболее важный вывод, который следует из проведенного анализа сводится к тому, что направления улучшенной проницаемости в образцах зерна четко согласуются с ориентацией главных осей эллипсов магнитной и упругой (по времени пробега продольных волн) анизотропии. Одновременно в этих же направлениях формируется и определенная ориентация удлиненных зерен кварца (таблицы 1, 2).

Таблица 1. Направление главных осей эллипсов анизотропии

Участок	Азимутальное направление анизотропии			
	Магнитные	Акустические	Морфологический анализ кварца	Проницаемость
Северный	133°	141°	133°	130°
Центральный	44°	38°	44°	47°
Южный	112°	119°	112°	117°

Таблица 2. Соотношение осей эллипсов анизотропии

Участок	Соотношение K_{max}/K_{min}			
	Магнитные	Акустические	Морфологический анализ кварца	Проницаемость
Северный	1.89	1.98	1.87	1.86
Центральный	1.93	1.85	1.88	1.99
Южный	1.96	2.01	2.03	2.05

Учитывая незначительные затраты времени на получение данных об изменении магнитных и упругих параметров и их взаимосвязь с фильтрационными свойствами пород, эти исследования целесообразно проводить перед началом изучения проницаемости для определения оптимальных направлений выпиливания экспериментальных цилиндров. Учет пространственных ориентировок направлений улучшенной проницаемости снизит и неопределенность корреляционных уравнений пористость-проницаемость, обычно используемых в практике интерпретации данных геофизических исследований скважин.

Таким образом:

1. В результате проведенных исследований выявлено увеличение магнитных и упругих параметров изученных образцов по определенным направлениям, совпадающим с предпочтительной ориентировкой слагающих породу зерен, поровых пространств и направлениями максимальной проницаемости в песчаниках пласта Ю₁³.

2. Анализ пространственного изменения магнитной восприимчивости и времени пробега ультразвуковых колебаний в образцах горных пород даёт информацию о направлении анизотропии проницаемости. С помощью установленной корреляционной зависимости проницаемости и фактора Кёнигсбергера может быть проведена предварительная количественная оценка магнитуды анизотропии горизонтальной проницаемости.

3. Анизотропная структура порового пространства терригенного коллектора и существование направлений, наиболее благоприятных для процесса перетока флюидов, предопределены факторами процесса осадконакопления и могут быть надежно изучены на пространственно-ориентированных образцах литологическими и петрофизическими методами.

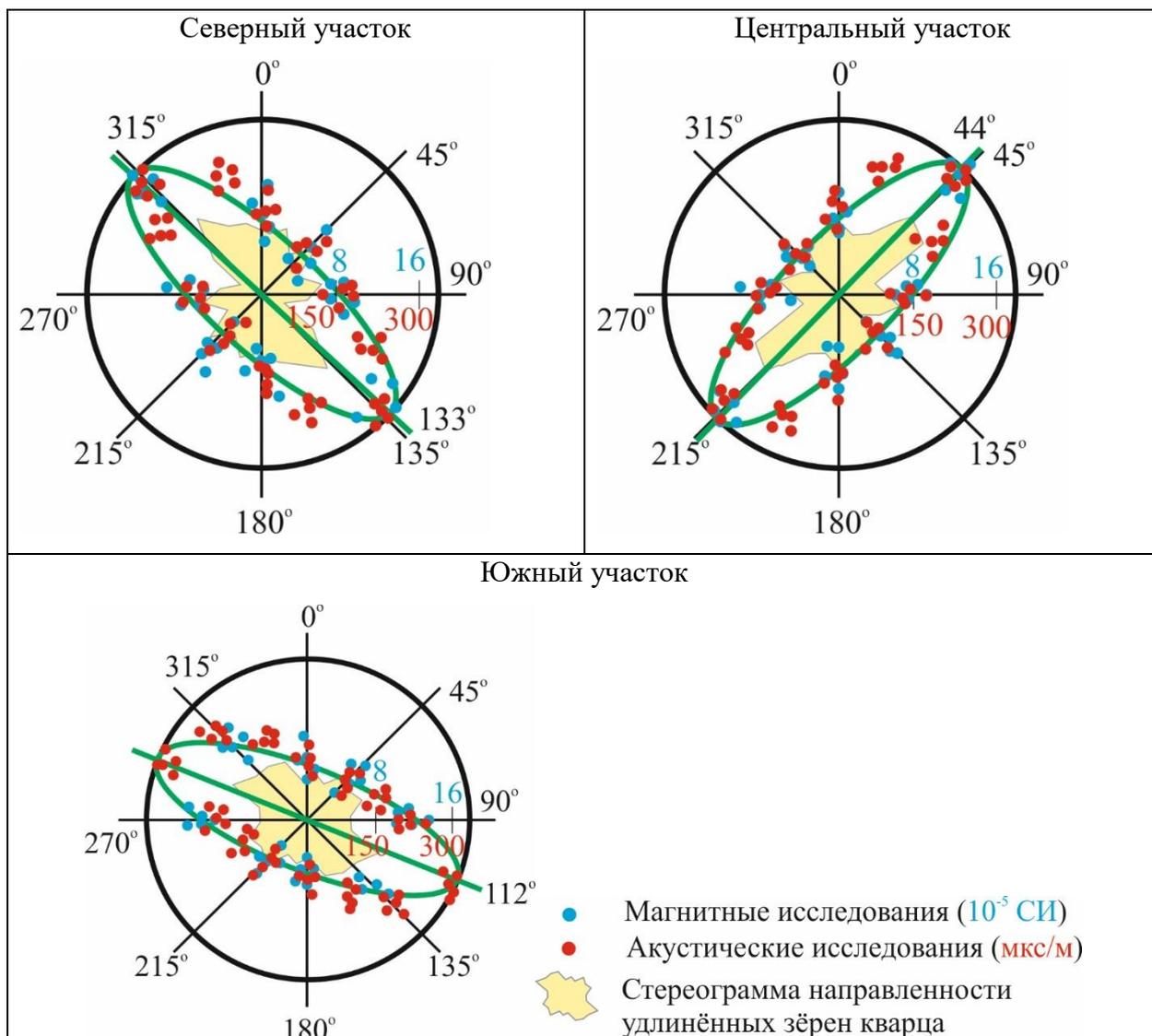


Рисунок 2. Полярные диаграммы распределения магнитной восприимчивости (горизонтальная ось, $\cdot 10^{-5}$ СИ), времени распространения ультразвуковых колебаний (горизонтальная ось, мкс/м) и ориентации удлинённых зёрен кварца по участкам месторождения. Азимуты главных осей анизотропии указаны по магнитным свойствам

В настоящей работе также предложена методика оценки латеральной неоднородности коллекторов по данным ГИС. В качестве основного критерия определения направления и величины анизотропии использован градиент (скорость изменения) проницаемости продуктивного пласта.

Проведенные исследования показали, что поведения градиентов проницаемости с использованием эллиптической аппроксимации отражает направления аппроксимирующих эллипсов по значениям градиентов и коэффициентов их сжатия, под которым понимается соотношение длин максимальной и минимальной осей эллипса.

В этом случае пространственная ориентация главной оси характеризует направление улучшенной проницаемости, а коэффициент сжатия может рассматриваться как магнитуда анизотропии проницаемости (K_{\max}/K_{\min}).

Результаты проведенного анализа показали, что на Двуреченском месторождении направления и показатели анизотропии варьируют по

площади в соответствии со структурно-тектонической схемой и литолого-фациальной зональностью, обладая разными показателями для северной, центральной и южной частей месторождения (рисунки 3, 4, таблица 3).

Таким образом, направления и величины анизотропии коллекторов, вычисленные по картам градиентов проницаемости и рассчитанные по результатам аналитических исследований керна скважин, на каждом из участков Двуреченского месторождения принципиально совпадают. В северном и южном блоках преобладает северо-западное направление, в центральном – северо-восточное.

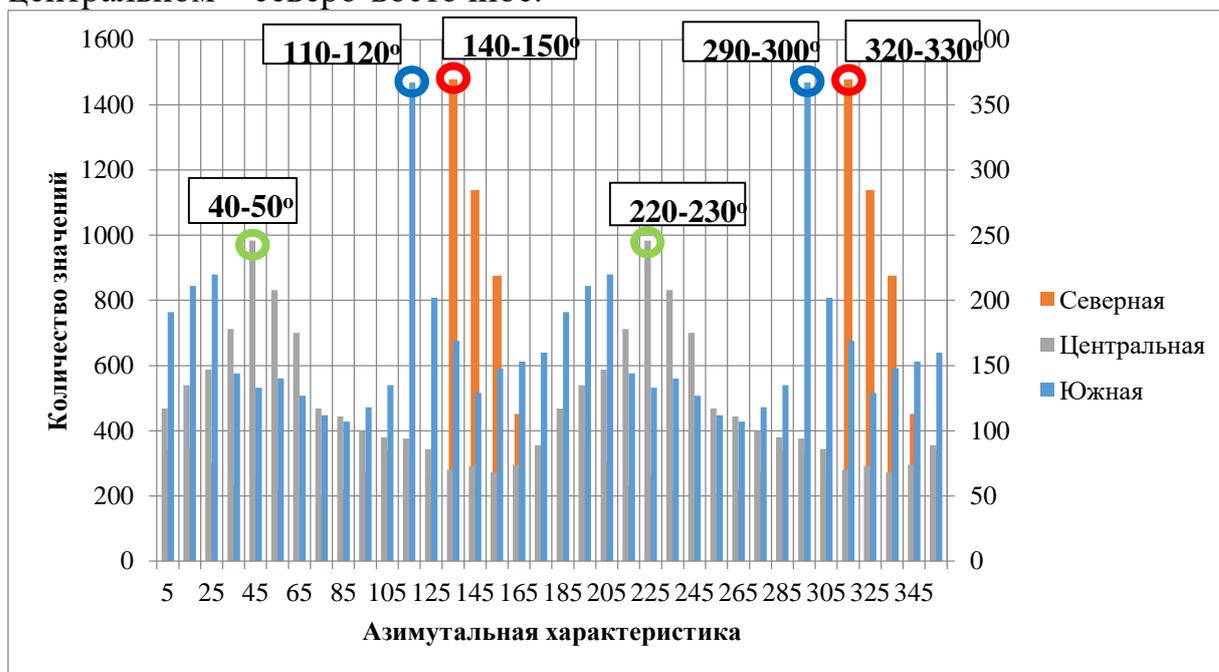


Рисунок 3. Гистограмма распределения горизонтальной проницаемости по данным ГИС

Таблица 3. Параметры анизотропии, определённые по керну и ГИС

Участок	Азимутальное направление анизотропии		Соотношение K_{max}/K_{min}	
	КЕРН	ГИС	КЕРН	ГИС
Северный	130°	140°	1.86	1.92
Центральный	47°	40°	1.99	1.89
Южный	117°	115°	2.05	1.98

Вывод: В целом, полученные данные показали, что уже на стадии интерпретации материалов ГИС можно определять значения проницаемости в точках скважин и с использованием карты градиентов проницаемости и векторного анализа оценить количественные характеристики направления и величины анизотропии. Достоверность оценок будет зависеть от кондиционности принятой технологии интерпретации данных ГИС и детальности карт проницаемости. Оценка латеральной анизотропии коллекторов с использованием объектноориентированной интерпретацией материалов ГИС может быть реализована уже на стадии разведки месторождения и в дальнейшем в интерактивном режиме уточняться по мере

появления новых эксплуатационных скважин. Вывод обосновывает первое защищаемое положение.

2. На Двуреченском месторождении основной продуктивный пласт Ю₁³ характеризуются отчетливо выраженной пространственной анизотропией фильтрационных свойств, обусловленной прибрежно-морской обстановкой осадконакопления. Азимуты простираения главных осей эллипсов анизотропии проницаемости в разных частях месторождения существенно отличаются: для северного и южного блоков основное направление анизотропии северо-западное, для центрального – северо-восточное. Малоамплитудные тектонические нарушения, контролирующие гидродинамически-несвязанные блоки ограничивают перетоки флюидов и разделяют месторождение на секторы с различным направлением потока флюидов.

Расчёты и выводы, полученные по данным исследования керна скважин и геофизических исследований скважин (ГИС) необходимо подтвердить самым достоверным способом – результатами гидродинамических исследований, выполненных на Двуреченском месторождении - трассерными исследованиями. Эти данные, направленные на анализ сообщаемости нагнетательных и добывающих скважин, позволяют получить независимую информацию об особенностях распределения потоков флюидов на территории месторождения и характеризуют анизотропию фильтрационных свойств коллектора. Широкий охват этими исследованиями площади месторождения (рисунок 4) гарантирует достоверность полученных результатов.

Основные задачи этого этапа исследований:

1. Изучение величины и направления анизотропии проницаемости по гидродинамическим данным.

2. Сопоставление результатов ГДИС с оценками, полученными по результатам анализа керна и ГИС; оценка эффективности предложенной методики определения латеральной анизотропии коллектора.

Фактический материал. На Двуреченском месторождении в период с 2005 по 2009 годы организацией ОАО «Томскнефть» ВНК была проведена серия индикаторных исследований с применением трассерной технологии в районах водонагнетательных скважин (рисунок 4).

При проведении исследований было использовано гидропрослушивание и отбор индикаторной жидкости, закачанной через нагнетательную скважину.

На этом этапе исследований объектом изучения также выступал пласт Ю₁³ Двуреченского месторождения.

Основными параметрами, которые изучаются при гидродинамических исследованиях являются время пробега меченой жидкости от нагнетательной скважины к наблюдательной, объем, максимальная и средняя скорость движения флюида. С помощью этих данных с привлечением информации о расположении скважин можно рассчитать фазовую проницаемость пласта и среднюю скорость движения меченой жидкости, которые и характеризуют

пространственную неоднородность и анизотропию фильтрационных свойств продуктивного пласта.

Средняя скорость движения и фазовая проницаемость между собой линейно связаны, в рамках настоящей работе для оценки анизотропии коллектора использованы величины фазовых проницаемостей.

В процессе анализа расчетные величины скорости массопереноса индикаторного вещества добывающих скважин в соотношении с местоположением нагнетательных скважин были сведены в единую полярную систему координат и вынесены на полярные диаграммы отдельно для каждого изучаемого участка Двуреченского месторождения (рисунок 4).

При выполнении этой процедуры все нагнетательные скважины были помещены в нулевую точку начала координат, а добывающие скважины, участвующие в эксперименте, распределены на плоскости координатной системы в соответствии с их реальным расположением. Длина полярного радиуса в этом случае соответствует величине проницаемости.

Данные, полученные как по отдельным скважинам, так и по каждому из участков месторождения отражают распределение проницаемости, которые в первом приближении могут быть аппроксимированы эллипсом. Расположение главных осей эллипсов, как и в рассмотренных ранее случаях, позволяют оценить направление преобладающей проницаемости. Полученные результаты распределения анизотропии, определенной по данным ГДИС, показаны на рисунке 4; в таблице 4 приведены азимутальные характеристики направлений преобладающей проницаемости по трем участкам Двуреченского месторождения.

Таблица 4. Направление изменения проницаемости

Участок	Направление анизотропии	Соотношение k_{\max}/k_{\min}
Северный	140°	1.95
Центральный	40°	1.91
Южный	115°	2.02

Эллиптические модели характеризуют направления максимального и минимального значения анизотропии. Пространственное представление изменения направления анизотропии по площади исследуемых участков Двуреченского месторождения приведено на рисунке 4).

При перемещении на север по направлению Южный-Центральный-Северный участки профиль преобладающей проницаемости изменяется по азимуту 115°-40°-140°. Лито-фациальная зональность строения изученной площади и пространственное распределение зон улучшенных коллекторов, определенное по данным геологических исследований, хорошо согласуется с результатами индикаторных исследований.

Сравнительный анализ данных по анизотропным свойствам пород Двуреченского месторождения, полученным в результате исследований керна, специализированной обработки и интерпретации материалов ГИС и ГДИС, показывает высокую степень сходимости данных, полученных разными методами (рисунок 5, таблица 5).

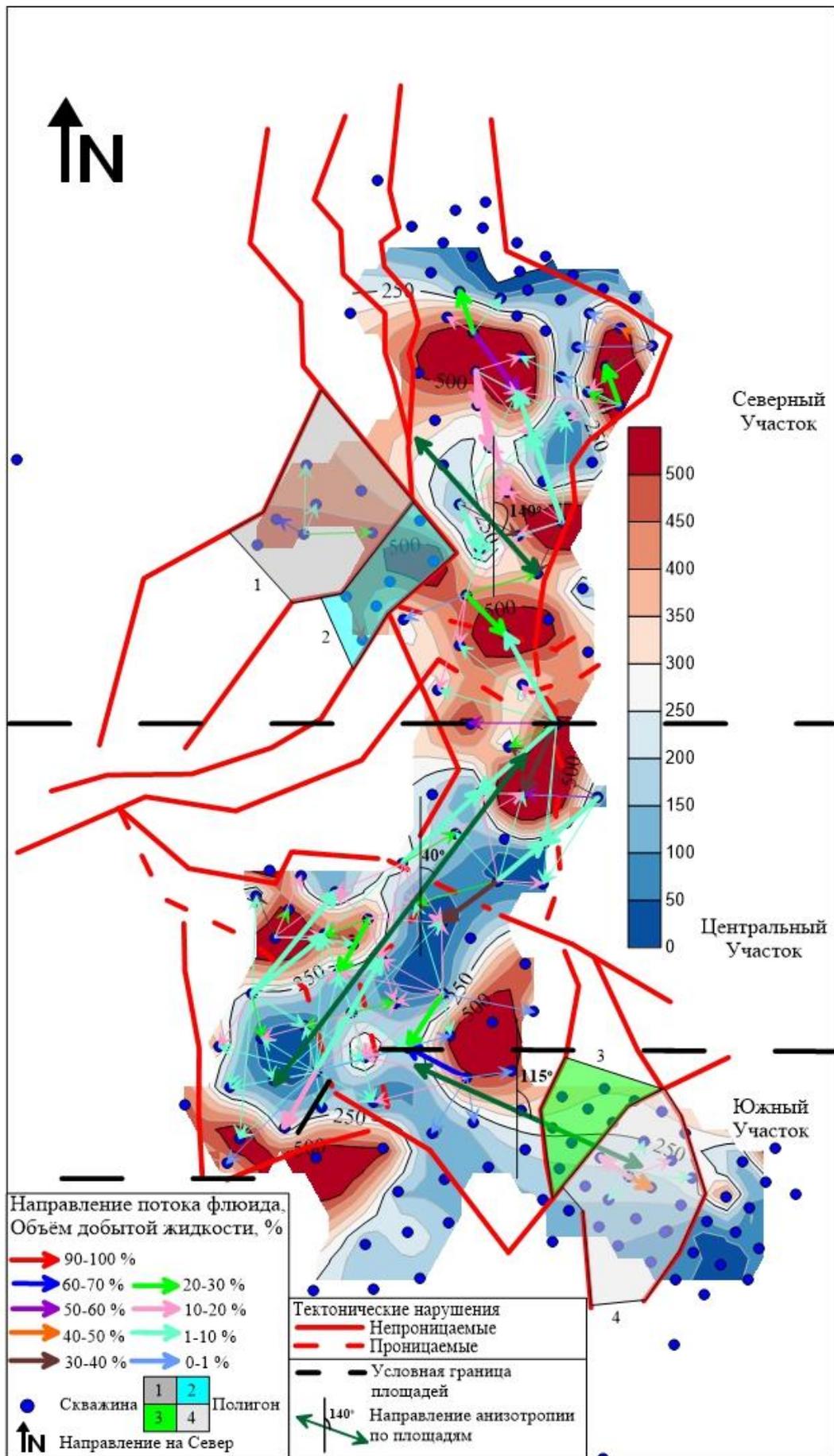


Рисунок 4. План изолиний проницаемости пласта Ю₁³ и векторная характеристика направления изолиний (проницаемость в мД)

Таблица 5. Направление изменения проницаемости по всем методам

Участок	Азимутальное направление анизотропии			Соотношение K_{max}/K_{min}			
	Магнитные	Акустические	ГИС/ГДИС	Магнитные	Акустические	ГИС	ГДИС
Северный	133°	141°	140°	1.89	1.98	1.92	1.95
Центральный	44°	38°	40°	1.93	1.85	1.89	1.91
Южный	112°	119°	115°	1.96	2.01	1.98	2.02

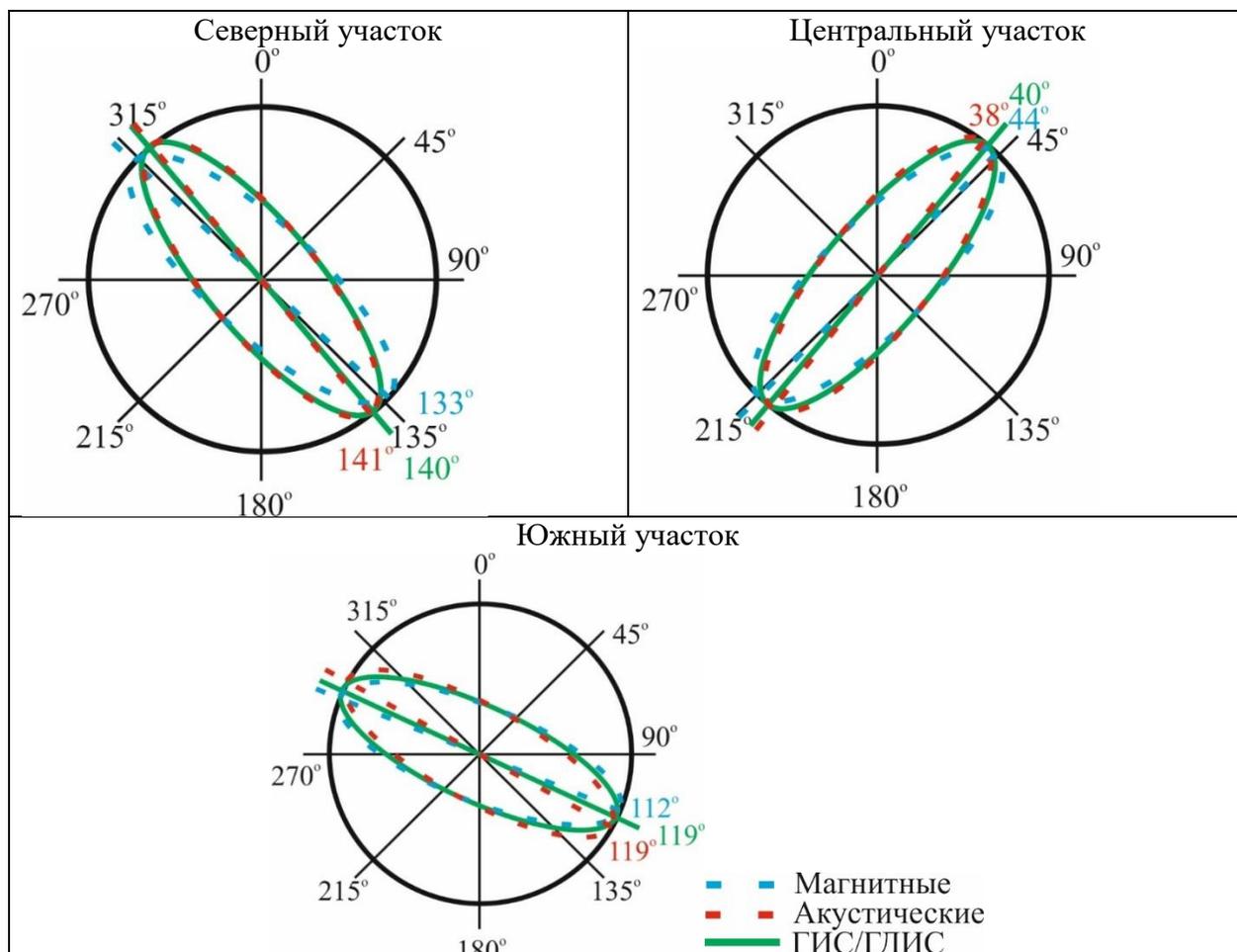


Рисунок 5. Совмещённые полярные диаграммы анизотропии петрофизических свойств коллекторов месторождения по керну, ГИС, ГДИС.

Следует отметить, что в этих же направлениях преимущественно ориентированы и выделяемые на месторождении малоамплитудные разрывные нарушения. Учитывая, что образование разломов сопровождается, как правило, формированием системы сколовых трещин, простирающихся в этом же направлении, улучшение фильтрационных свойств продуктивного пласта может быть частично обусловлено и тектоническими причинами.

Вывод: Результаты индикаторных исследований однозначно подтверждают наличие анизотропии проницаемости песчаного пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения и эффективность предложенной методики. Информация о величине и направлении анизотропии фильтрационных параметров коллекторов терригенного типа может быть независимо получена из нескольких источников (по данным аналитических исследований различных петрофизических параметров образцов керна, по материалам ГИС

и по результатам гидродинамических исследований). Вывод обосновывает второе защищаемое положение.

3. Анизотропная флюидодинамическая модель Двуреченского месторождения более точно, чем изотропная отражает закономерности перетоков флюидов по пласту Ю₁³. Параметры добычи эксплуатационных скважин при использовании анизотропной модели ближе к реальным показателям, отличаясь от них не более, чем на 3-5%, в отличие от изотропной модели, где ошибка составляет порядка 10%. Планирование мероприятий по увеличению нефтеотдачи следует осуществлять с учетом фильтрационной неоднородности пласта.

Полученные в процессе проведенных исследований материалы были использованы при построении 3D геологической и гидродинамической моделей.

Геологическая модель включает в себя геолого-геофизическая информацию, описывающую структурные особенности месторождения, мощности проницаемых слоев и прослоев, распределение петрофизических свойств коллектора (пористость, проницаемость, водонасыщенность) и местоположение водо-нефтяных контактов.

Гидродинамическая модель включает в себя все данные геологической модели и содержит дополнительную информацию о термобарическом состоянии залежи, фактических данных о геолого-технологических мероприятиях (гидроразрыв пласта, применяемые методы увеличения нефтеотдачи, ввод/вывод скважин, изменение режима работы скважин), фактических данных по добыче и закачке.

В настоящей работе было выполнено построение и сравнение изотропной и анизотропной моделей залежи пласта Ю₁³.

Для оценки кондиционности построенных моделей необходимо было провести сопоставление параметров, рассчитанных по изотропной и анизотропной моделям с фактическими данными разработки (накопленные показатели закачки воды, добычи нефти, воды, жидкости) и оценить степени влияния фактора анизотропии на эффективность выработки запасов.

В рамках проведенных исследований было проанализировано (рисунок 4):

- четыре полигона;
- три участка месторождения (северный, центральный и южный);
- всё месторождение в целом.

Всего было создано 16 моделей (8 по полигонам, 6 по участкам и 2 по месторождению в целом), что позволило сделать однозначное заключение о кондиционности расчётов, выполненных по изотропной и анизотропной моделям с учетом площади объекта.

Анализ полученных материалов позволяет отметить качественное соответствие всех сравниваемых графиков, для которых оценивающим статистическим фактором служат процентные отклонения расчетных и фактических (исторических) данных. Ошибки расчетных и фактических

данных при сопоставлении изотропной и анизотропной моделей приведены в таблице 6.

Приведённые в таблице 6 ошибки свидетельствуют о том, что погрешности анизотропной модели в 2.5 раза меньше, чем изотропной и составляют 3.78% против 9.41%.

Вывод: Показатели добычи по анизотропной модели ближе к фактическим показателям добычи по сравнению с изотропной моделью. Вывод обосновывает третье защищаемое положение.

Таблица 6. Ошибки при сопоставлении расчётных и фактических данных добычи

Адаптируемая область		Ошибка, %	
		Изотропная модель	Анизотропная модель
Полигон 1	По полигону	9.78	4.19
Полигон 2		9.47	3.91
Полигон 3		9.15	3.63
Полигон 4		9.84	3.35
Северная	По площади	9.76	4.34
Центральная		8.73	3.26
Южная		9.13	3.78
Месторождение в целом		9.41	3.78

Заключение

Проведённый комплекс научно-исследовательских работ по изучению и анализу анизотропных характеристик продуктивного пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения позволил сделать следующие основные выводы:

1. Гидродинамические (трассерные) исследования продуктивных горизонтов Двуреченского месторождения подтверждают существование неоднородных анизотропных пластов на макрогеологическом и фациальном уровнях, а также позволяют определить направление анизотропии проницаемости. Для получения достоверных данных необходимо применить эллиптическую аппроксимацию статистического распределения анизотропии проницаемости.

2. Вариации направлений потока флюидов в пласте-коллекторе контролируются распределением обстановок осадконакопления, которое находит отражение в ориентации зерен кварца. Это приводит к формированию отдельных зон с улучшенными фильтрационно-ёмкостными свойствами. Пространственное распространение этих зон варьирует в зависимости от зонального расположения фациальных обстановок. На Двуреченском месторождении с юга на север профиль преобладающей проницаемости изменяется по азимутам 115°-40°-140°.

3. Анализ результатов петрофизических исследований ориентированных образцов керна показал, что магнитные и упругие параметры породы, а также ориентировка слагающих породу зерен кварца, тесно связаны с фильтрационно-ёмкостными свойствами терригенных

коллекторов и позволяют определять количественные характеристики направления и величины анизотропии проницаемости терригенных пород.

4. Результаты объектноориентированной интерпретации материалов ГИС с использованием градиентного и векторного анализа дают довольно точную оценку азимутального направления и величины анизотропии фильтрационных свойств и могут быть использованы при геологическом и гидродинамическом моделировании.

5. Анизотропная флюидодинамическая модель более точно, чем изотропная отражает закономерности перетоков флюидов по пласту-коллектору. Расчетные параметры добычи эксплуатационных скважин при использовании анизотропной модели ближе к реальным показателям, отличаясь от них не более, чем на 3-5%, в отличие от изотропной модели, где ошибка составляет порядка 10%.

6. При геологическом и гидродинамическом моделировании необходимо принимать во внимание пространственное распределение анизотропии горизонтальной проницаемости, что обеспечит более точную сходимость расчетных и фактических данных разработки и более позволит более корректно прогнозировать объёмы выработки запасов во времени.

7. Априорные анизотропные модели продуктивных пластов необходимо получать уже на этапе разведки месторождения и в дальнейшем уточнять их в интерактивном режиме по мере появления новых эксплуатационных скважин.

Важнейшие результаты исследований:

- По комплексу данных аналитических исследований ориентированных образцов керна и материалов геофизических исследований скважин (ГИС) с использованием эллиптической аппроксимации и векторного анализа разработана методика количественной оценки латеральной анизотропии проницаемости терригенных коллекторов, которая может быть использована на большинстве месторождений Западной Сибири.

- Построены геологическая и гидродинамическая анизотропные модели пласта Ю₁³ Двуреченского месторождения, отвечающие современной стадии изученности объекта, которые могут быть использованы недропользователем на текущей стадии разработки для уточнения технологической схемы разработки с целью повышения нефтеотдачи.

Список основных публикаций по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Коровин М.О.** Специализированный анализ керна для изучения анизотропии коллекторов нефти и газа // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ). — 2014. — Т. 324, № 1: Науки о Земле. — [С. 87-92].

2. **Коровин М.О.** Направления фильтрации флюидов на месторождениях нефти юго-восточной части Каймысовского свода / **М.О. Коровин, В.П. Меркулов** // Газовая промышленность: научно-технический и

производственный журнал / Газпром. — 2014. — Спец. вып. (№ 708). — С. 90-94.

3. **Коровин М.О.** Определение количественных параметров фильтрационной анизотропии на основе комплексных данных геофизических и гидродинамических исследований скважин / Determination of filtration anisotropy quantitative characteristics on the basis of complex data of wells' geophysical and hydrodynamical studies / **М.О. Коровин**, В. П. Меркулов // Нефтепромысловое дело / Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности (ОАО ВНИИОЭНГ). — 2015. — № 1. — [С. 24-30].

В других изданиях:

4. **Korovin M.O.** Investigation of the Spatial Heterogeneity Petromagnetic Properties of Oil Fields Rocks // 73rd EAGE Conference & Exhibition: — 2011. — [P. 5534-5536].

5. **Коровин М.О.** Исследование анизотропии петромагнитных и акустических свойств коллекторов нефтяных месторождений / Сборник докладов VI региональной научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ТомскНИПИнефть», Томск, 2013.

6. **Korovin M.O.** Investigation of the Acoustic and Petromagnetic Anisotropy of Oil Fields Rocks // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE: EUROPEC 2013, London, June 10-13, 2013. - Лондон: EAGE, 2013 - p. 1-2.

7. **Korovin M.O., Merkulov V.P.** Formation evaluation and well-test analysis for complex interpretation of reservoir permeability distribution // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2014 - Vol. 21. - Issue 1. - p. 1-6 [991010-2014]

8. **Коровин М.О.** Определение параметров фильтрационной анизотропии и оценка её влияния на разработку Двуреченского месторождения / Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, Москва, 2014

9. **Korovin M.O.** Oil extraction optimization case: horizontal permeability heterogeneity evaluation and application / **М. О. Коровин**, V. P. Merkulov, S. Z. Gojkovic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2015. — Vol. 24: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress, 24–27 November 2014, Tomsk, Russia. — [012043, 9 p.].

10. **Korovin M.O.** Permeability inhomogeneity accounting in terms of efficient development strategy / **М. О. Коровин**, V. P. Merkulov, S. Z. Gojkovic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2015. — Vol. 24: Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress, 24–27 November 2014, Tomsk, Russia. — [012044, 8 p.].