

На правах рукописи



БОГДАНОВ Олег Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФЛЮИДАЛЬНЫХ СИСТЕМ  
ОБВОДНЯЮЩИХСЯ ЗАЛЕЖЕЙ СЕНОМАНА НАДЫМ-ПУР-  
ТАЗОВСКОГО РЕГИОНА**

25.00.12 – Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью  
«ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук  
Скоробогатов Виктор Александрович

**Официальные оппоненты:**

д.г.-м.н. Якушев Владимир  
Станиславович – профессор кафедры  
разработки и эксплуатации газовых и  
газоконденсатных месторождений РГУ  
нефти и газа (НИУ) имени И.М.  
Губкина.

к.г.-м.н. Карнаухов Сергей Михайлович  
– советник генерального директора  
ООО «Инновационные нефтегазовые  
технологии».

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет».

Защита диссертации состоится «22» мая 2019г. в «15» часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.01, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу: 142717, Московская область, Ленинский район, сельское поселение Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте <http://www.vniigaz.gazprom.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. г.-м. н.



Соловьев Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В 60х – начале 70х г.г. прошлого века на севере Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (ЗСНГБ), в Ямало-Ненецком автономном округе в пределах Надым-Пур-Тазовского региона (НПТР) был открыт ряд уникальных и гигантских по запасам газосодержащих месторождений с залежами в кровле сеномана: Уренгойское, Заполярное, Медвежье, Ямбургское и др. Опыт их промышленной эксплуатации определяет проблемы, которым требуется уделять повышенное внимание.

Использование традиционных технологий разработки газовых залежей, приуроченных к сеноманскому ярусу, приведет к тому, что коэффициент извлечения газа (КИГ) не превысит значений 0.85-0.87, при потенциальной величине 0.90-0.92. Наряду с падением пластового давления и защемлением газа, во многом, этому способствует преждевременное обводнение скважин, разрушение пласта-коллектора, образование песчаных пробок и т.д. В такой ситуации, роль прогноза возможных осложнений эксплуатации на начальных этапах освоения ещё не разрабатываемых газовых залежей на Ямале, Гыдане и других областях сложно переоценить.

Также остаются актуальными работы по дальнейшему изучению геологического строения эксплуатируемых залежей, в том числе на основании комплексирования результатов текущих съемок полевой геофизики со скважинными данными и информацией, полученной в ходе анализа материалов разработки целевых объектов.

### Степень разработанности темы

Особенности геологического строения газовой залежи и окружающего водонапорного бассейна, системы разработки и контроля освоения определяют коэффициент конечного извлечения углеводородного сырья. Изучение геологического строения гигантских сеноманских газовых залежей началось в 60х годах прошлого века. Неоценимый вклад в исследования геологического строения продуктивных отложений месторождений природного газа севера ЗСНГБ внесли ученые и геологи В.С. Бочкарев, А.М. Брехунцов, Ф.Г. Гурари, С.В. Гольдин, Э.М. Галимов, В.И. Ермаков, В.П. Казаринов, Ю.Н. Карогодин, А.Э. Конторович, Н.Х. Кулахметов, Н.С. Моргунов, В.Д. Наливкин, Н.Н. Немченко, С.Г. Неручев, И.И. Нестеров, В.Т. Подшибякин, Л.И. Ровнин, Н.Н. Ростовцев, М.Я. Рудкевич, В.Н. Сакс, Ф.К. Салманов, В.А. Скоробогатов, А.А. Трофимук, Ф.З. Хафизов, В.И. Шпильман, Ю.Г. Эрвье, А.С. Фомичев, Г.Г. Шемин и др.

Изначально считалось, что строение сеноманского резервуара достаточно однородно, а высокие начальные пластовые давления позволят достичь, в

условиях водонапорного режима, газоотдачи в 93-95 %. При детальном изучении залежей строение их оказалось более сложным. Это связано с рядом факторов, в том числе, с наличием в разрезе непроницаемых пластов, простирающие которых, в условиях сеноманского разреза, зачастую не прослеживаются по скважинным и, тем более, сейсмическим данным.

Фактический материал, накопленный за годы разработки газовых месторождений севера ЗСНГБ, по энергетическому состоянию, режимам работы залежей, динамике обводнения продуктивных пластов, технологическим режимам работы скважин позволяет выполнить уточнение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов. На основе анализа результатов газодинамических и геофизических исследований в эксплуатационных и наблюдательных скважинах выделены слои, которые по своим емкостным характеристикам классифицируются в качестве коллекторов, но газонасыщенность которых практически не изменилась в процессе эксплуатации залежей.

Падающие уровни ежегодной добычи на уникальных месторождениях НПТР и рост числа обводнившихся скважин диктуют необходимость долгосрочного прогнозирования процессов обводнения залежи. Изучение и анализ литературных данных показывает недостаточность исходных данных, в том числе о геологическом строении водоносной толщи горных пород, подстилающих сеноманскую газовую залежь, и положении газоводяного контакта (ГВК) в межскважинном пространстве, для гидродинамического моделирования процессов разработки.

Проблемам моделирования обводнения водоплавающих газовых залежей месторождений Западной Сибири посвящены труды известных авторов: С.Н. Бузинова, Ю.Н. Васильева, П.А. Гереша, О.М. Ермилова, С.Н. Закирова, В.П. Ильченко, В.Н. Корценштейна, А.Н. Лапердина, А.С. Малыха, В.Н. Маслова, Ю.А. Перемышцева, В.Ф. Перепеличенко, А.И. Пономарева, Н.Г. Степанова, Е.В. Шеберстова, В.Н. Щелкачева, А.И. Ширковского и др. Гравиметрический мониторинг процесса разработки газовой залежи и построение геологических моделей локальных псевдофлюидоупоров и флюидоупоров призваны существенно снизить неопределенности гидродинамического моделирования.

#### Цель работы

Геолого-промысловое моделирование объектов разработки в сеномане Надым-Пур-Тазовского региона Западной Сибири для прогнозирования условий их обводнения.

#### Основные задачи исследования

1. Анализ фильтрационных и емкостных характеристик продуктивных отложений.

2. Разработка графа вероятностной оценки фильтрационных свойств отложений сеноманского яруса.
3. Выделение в разрезе слоев коллекторов, газонасыщенность которых не изменилась в процессе разработки залежи по результатам контрольных геофизических исследований скважин.
4. Выделение геолого-промысловых факторов, влияющих на скорость обводнения исследуемых залежей.
5. Создание моделей локальных псевдофлюидоупоров и флюидоупоров внутри газовых залежей сеномана.
6. Разработка методики комплексной интерпретации данных гравиметрического мониторинга и промыслово-геофизических исследований скважин, контролирующих процесс обводнения залежи.
7. Прогнозирование особенностей обводнения газовых залежей сеноманского яруса.

#### Научная новизна

Проведено обобщение данных геофизических и газодинамических исследований скважин. В сеноманском интервале разреза конкретных месторождений выделены слои, по емкостным характеристикам классифицируемые в качестве коллекторов, но газонасыщенность которых практически не изменилась в процессе эксплуатации залежи.

Проведен анализ результатов определения ФЕС пород сеноманского интервала разреза. Построена вероятностная модель проницаемости продуктивных отложений, подтверждающая наличие высокоёмких слоев, не участвующих в формировании дренажной системы скважин.

Установлено влияние геометрии непроницаемых прослоев на особенности продвижения газоводяного контакта в процессе разработки залежи. Показано, что учет характера распространения локальных флюидоупоров в составе продуктивных отложений позволяет контролировать и прогнозировать процесс дальнейшего обводнения газовых залежей. На основании выявленных закономерностей распространения локальных псевдофлюидоупоров и флюидоупоров актуализированы литолого-флюидалные модели сеноманских залежей Ямбургского, Уренгойского и Заполярного месторождений.

Для повышения надежности определения подъема газоводяного контакта в межскважинном пространстве и, следовательно, качества литолого-флюидалного моделирования, выполнено комплексирование материалов гравиметрического мониторинга и скважинных геолого-геофизических данных.

#### Практическая значимость

Результаты выделения интервалов потенциальных неколлекторов были использованы при актуализации литолого-флюидальной модели сеноманской залежи Юбилейного месторождения.

Модели локальных псевдофлюидоупоров и флюидоупоров сеноманских залежей Ямбургского и Заполярного месторождений используются в геологической службе ООО «Газпром добыча Ямбург».

Гравиметрический мониторинг разработки сеноманских залежей в настоящее время проводится на территориях Бованенковского, Ямсовейского, Юбилейного и Заполярного месторождений.

Методика комплексной интерпретации данных гравиметрических и скважинных исследований по определению текущего положения ГВК вошла как составная часть в Стандарт организации СТО Газпром добыча Ямбург 3.1-315-2011 «Проведение наземного гравиметрического мониторинга разработки сеноманских газовых залежей месторождений ООО «Газпром добыча Ямбург».

#### Методы диссертационного исследования

В диссертационной работе при решении поставленных задач использовались методы статистической обработки результатов петрофизических исследований керна и интерпретации данных ГИС, выполненных в рамках подсчетов запасов газа по сеноманским залежам НПТР, по методикам, утвержденным в ГКЗ РФ.

Геофизические и газодинамические исследования в скважинах выполнены в соответствии с «Технической инструкцией по проведению геофизических исследований в скважинах», утвержденной в 1984 г. и «Технической инструкцией по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах», утвержденной в 2001 г. (РД 153-39.0-072-01).

Гравиметрические наблюдения, обработка и интерпретация результатов съемок проводились в соответствии со Стандартом организации СТО Газпром добыча Ямбург 3.1-315-2011 «Проведение наземного гравиметрического мониторинга разработки сеноманских газовых залежей месторождений ООО «Газпром добыча Ямбург».

#### Защищаемые положения

1. Геолого-промысловое обоснование выделения газоносных пластов, газонасыщенность которых не снижалась в процессе эксплуатации залежи (неработающие «коллекторы»).

2. Дифференциация локальных псевдофлюидоупоров и флюидоупоров в сеноманской газовой залежи, в том числе на основе вероятностной оценки проницаемости продуктивных отложений, для повышения достоверности

литолого-флюидалных моделей и, соответственно, надёжности прогнозирования процессов обводнения.

3. Методика комплексной интерпретации скважинных геолого-геофизических данных и гравиметрических наблюдений, обеспечивающая возможность оценки обводнения сеноманских газовых залежей в межскважинном пространстве.

#### Публикации и апробация работы

Основные положения работы были опубликованы в одиннадцати статьях в периодических изданиях, в том числе в восьми из перечня, рекомендованного ВАК. Результаты отдельных исследований по теме диссертации докладывались на Международных научно-практических конференциях «Геомодель 2007 и 2008», «Тюмень 2015 и 2017. Новые технологии для старых провинций», II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы освоения месторождений углеводородов».

Апробация результатов отдельных исследований проводилась на секциях НТС ООО «Газпром добыча Уренгой», ООО «Газпром добыча Ямбург», ООО «Газпром добыча Надым» и ООО «Газпром Георесурс».

#### Объекты исследования и фактический материал

В работе обобщены геолого-геофизические и геолого-промысловые материалы по газовым залежам сеномана Большого Уренгоя, Ямбургского, Заполярного, Юбилейного и Ямсовейского месторождений.

В основу диссертационной работы положены:

- анализ результатов петрофизических исследований керна по 5.7 тысячи образцов, отобранных из отложений сеноманского яруса северной части ЗСНГБ;
- материалы контрольных геофизических исследований скважин (ГИС), проведенных с целью определения текущего положения ГВК, по 257 наблюдательным скважинам;
- материалы газодинамических исследований (ГДИ), проведенных в 80 эксплуатационных скважинах;
- данные гравиметрических съемок, выполненных на территориях Заполярного и Ямсовейского месторождений в 2008-2013 г. г.;
- построенные автором геологические модели залежей сеноманского яруса Большого Уренгоя, Ямбургского и Заполярного месторождений.

#### Личный вклад автора

Автором проводилась систематизация и обобщение результатов геологических, геофизических и промысловых исследований с целью контроля за разработкой сеноманских залежей месторождений севера Западной Сибири.

Выполнена вероятностная оценка проницаемости продуктивных отложений на основании комплексного анализа петрофизических исследований керна, интерпретации промыслово-геофизических материалов и промыслово-геологических данных.

Проведен анализ результатов ГИС и ГДИ по простаивающему и действующему фонду эксплуатационных скважин с целью определения механизма обводнения различных участков сеноманских залежей. На основании полученных результатов автором разработаны рекомендации по построению моделей локальных флюидоупоров сеноманских залежей севера Западной Сибири.

Автор принимал участие в создании методики гравиметрического мониторинга процесса разработки ряда сеноманских залежей севера ЗСНГБ (Заполярье, Ямсовейское, Бованенковское и др.) в части комплексирования гравиметрических и скважинных исследований.

#### Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения; содержит 143 страницы, 54 рисунка и 9 таблиц. Список литературы включает 181 наименование.

Автор выражает искреннюю благодарность д.г.-м.н. Филиппову Виктору Павловичу, под руководством которого началась работа над диссертацией. За оказанную помощь при работе над диссертацией, ценные советы и консультации автор выражает признательность д.г.-м.н. Скоробогатову Виктору Александровичу, д.г.-м.н. Страхову Павлу Николаевичу, д.г.-м.н. Полякову Евгению Евгеньевичу, д.г.-м.н. Соловьеву Николаю Николаевичу, д.г.-м.н. Фоменко Владимиру Григорьевичу, д.г.-м.н. Резванову Рашиту Ахмаевичу, д.э.н. Андроновой Ирине Владимировне, к.г.-м.н. Кирсанову Сергею Александровичу, к.г.-м.н. Сапожникову Алексею Борисовичу, к.г.-м.н. Писклову Сергею Сергеевичу, Иванову Сергею Александровичу, Еланскому Михаилу Юрьевичу, Гарееву Камиллю Рустэмовичу, а также своим коллегам из НПФ «Инжиниринговый центр» ООО «Газпром Георесурс», АО «Пангея» и ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг».

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, приведены защищаемые научные положения и результаты, освещена апробация результатов и практическая значимость исследований.



## **1. Особенности геологического строения сеноманских залежей севера Западной Сибири**

В первой главе диссертации рассмотрены особенности геологического строения сеноманских залежей газовых месторождений севера Западной Сибири, приведены геофизические и газодинамические характеристики коллекторов и методы их определения, описаны основные проблемы при проведении подсчетов запасов газа. Также рассмотрены методы контроля за процессом разработки и основные проблемы, возникающие в ходе освоения сеноманских залежей.

Альб-сеноманский комплекс газоносен на пятидесяти месторождениях НПТР, а также на ряде месторождений Ямала, Гыдана, Обской губы и шельфа Карского моря, начальные запасы газа составляют 30 трлн.м<sup>3</sup>, в том числе накопленная добыча превысила к началу 2018 г. 18 трлн.м<sup>3</sup>.

Сеноманские залежи севера Западной Сибири имеют сходное геологическое строение. Это пластово-массивные газовые залежи. Они составляют более 70% от общего числа открытых на сегодняшний день. Всего среди сеноманских газовых месторождений преобладают залежи без тектонических осложнений - 86%. Покрышкой для сеноманских залежей служит мощная (до 500-800 м) толща глин турон-нижнеолигоценового возраста. Общая песчанистость сеноманской толщи в интервале кровля – начальное положение ГВК изменяется от 53-60 до 80% и более.

Сеноманские отложения на территории севера Западной Сибири представлены в основном песчано-алевритовыми разностями пород, слабосцементированными, характеризующимися открытой пористостью до 44% и газопроницаемостью до 7 мкм<sup>2</sup> и более. Встречаются также прослои, представленные чередующимися песчано-алевритовыми разностями с глиной, которые в большинстве случаев сильно алевритистые, переходящие в алевролиты. Распространение маломощных карбонатных прослоев по площади залежей не выдерживается, коллекторами они не являются и четко выделяются по качественным признакам ГИС.

Установлено, что наличие пластов заглинизированных песчаников или пластов с тонким переслаиванием в сеноманском разрезе не только определяет появление ошибки оценки запасов газа объёмным методом, но и существенно влияет на разработку залежи. Выделение таких пластов по анализу технологических режимов работ скважин и методам ГИС является актуальной задачей доразведки месторождений в процессе их освоения.

## **2. Анализ степени отработки газоносных пластов в процессе эксплуатации сеноманских залежей**

Рассмотрены методы определения уровня ГВК в скважинах, их основные достоинства и недостатки. Приведены методы выделения «потенциальных неколлекторов» в обводнившейся и газонасыщенной частях разреза по ретроспективным исследованиям ГИС и ГДИ, оценены емкостные и фильтрационные свойства таких пластов.

С целью повышения эффективности освоения залежей целесообразно проведение исследований методом трехзондового нейтрон-нейтронного каротажа (З-ННКт). Сопоставление начальной и текущей газонасыщенности, определённой по З-ННКт, в сеноманских скважинах Ямбургского месторождения показало, что текущая газонасыщенность пластов в обводнившейся части разреза достигает существенных значений и по отдельным пластам превышает 50% (рис. 1а). Наряду с этим, на диаграмме выделяется область пластов-коллекторов, газонасыщенность которых практически не изменилась в процессе эксплуатации, которые, в основном, относятся к V классу (по А.А. Ханину) (рис. 1б). Данный факт говорит о том, что для пластов-коллекторов были некорректно определены либо граничные значения, либо эффективные толщины.

Был проведён анализ геолого-геофизической информации по наблюдательным и эксплуатационным скважинам, накопленной более чем за 40 лет разработки сеноманских залежей, с целью выделения пластов-коллекторов, газонасыщенность которых не изменилась в процессе разработки месторождения.

Для выделения неработающих пластов-коллекторов на качественном уровне были разработаны две методики:

- по нормализованным временным замерам НГК в обводнённой части залежи выделялись слои-коллекторы, в которых в процессе разработки показания вторичной гамма-активности не изменились;
- по анализу результатов газодинамических исследований (ГДИ) в эксплуатационных скважинах, проведённых с целью определения профиля притока, выделялись слои-коллекторы, которые при проведении всех исследований, за период эксплуатации скважины не включались в работу.

Выделение неработающих интервалов проводилось на основе анализа результатов ГИС и ГДИ, выполненных в эксплуатационных скважинах Юбилейного НГКМ за весь период эксплуатации. ФЕС неработающих слоев определялись по результатам интерпретации данных ГИС в открытом стволе, выполненных по методикам, утверждённым при подсчётах запасов газа в ГКЗ РФ.

При выделении коллекторов в обводнившейся части разреза критерием оценки отработки слоев послужили показания фоновых и текущих замеров

нейтронных методов каротажа, приведенных к единым показателям путем нормализации кривой по отношению к фоновому замеру.

Средняя пористость слоев, газонасыщенность которых не изменилась в процессе разработки, составляет 28.5%. Среднее удельное электрическое сопротивление (УЭС) по выделенным неработающим пластам составило 7.8 Ом\*м.

По результатам ГДИ скважин в перфорированной части сеноманских скважин выделялись интервалы, которые за весь период эксплуатации скважины не включались в работу. Как правило, большая часть слабогазоотдающих или неработающих пластов находится в нижних частях перфорированных интервалов. Это связано с тем, что на забое скапливаются пластовая вода и продукты разрушения коллекторов. Для исключения ошибок в определении ФЕС неработающих пластов, коллекторы, находящиеся под уровнем жидкости или ниже отметок остановки приборов, были исключены из выборки. При анализе так же не рассматривались результаты определения профиля притока в скважинах, где интервалы перфорации перекрыты НКТ, хотя выделения работающих интервалов в таких скважинах возможно методами шумо- и термометрии, данные получаемые по ним, крайне неточные.

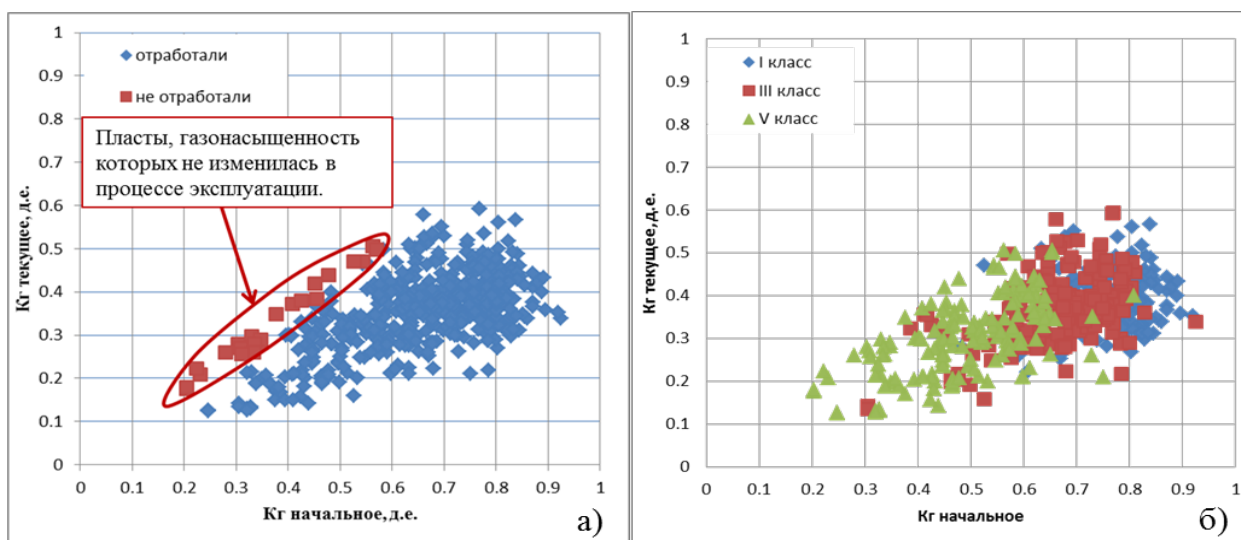


Рис. 1. Сопоставление начальной и текущей газонасыщенности пластов-коллекторов обводнившейся части разреза (а) и коллекторов различных классов (б) сеноманской залежи Ямбургского месторождения

Среднее значение пористости неработающих интервалов в газонасыщенной части разреза составило 29%, что хорошо согласуется с результатами определения средней пористости неработающих пластов в водонасыщенной части разреза. Среднее УЭС – 10.21 Ом\*м, а газонасыщенность -  $K_g = 0.62$ .

### 3. Фильтрационно-емкостные характеристики неработающих пластов

В третьей главе приведены результаты статистического анализа ФЕС выделенных ранее неработающих газом интервалов.

Анализ емкостных характеристик неработающих интервалов (рис. 2) показал, что пористость выделенных пластов изменяется от 26 до 31%, а наиболее вероятный  $K_p=28\%$ . Две трети неработающих интервалов (67.1%) характеризуются пористостью ниже 28%.

Типизация коллекторов сеноманских залежей севера ЗСНГБ и последующее установление непересекающихся границ по емкостным характеристикам для каждого из типов (табл.1) показывают, что большая часть неработающих интервалов относится к переслаиванию ухудшенных коллекторов с начальным градиентом давления и к переслаиванию ухудшенных коллекторов с неколекторами (группы 4-5).

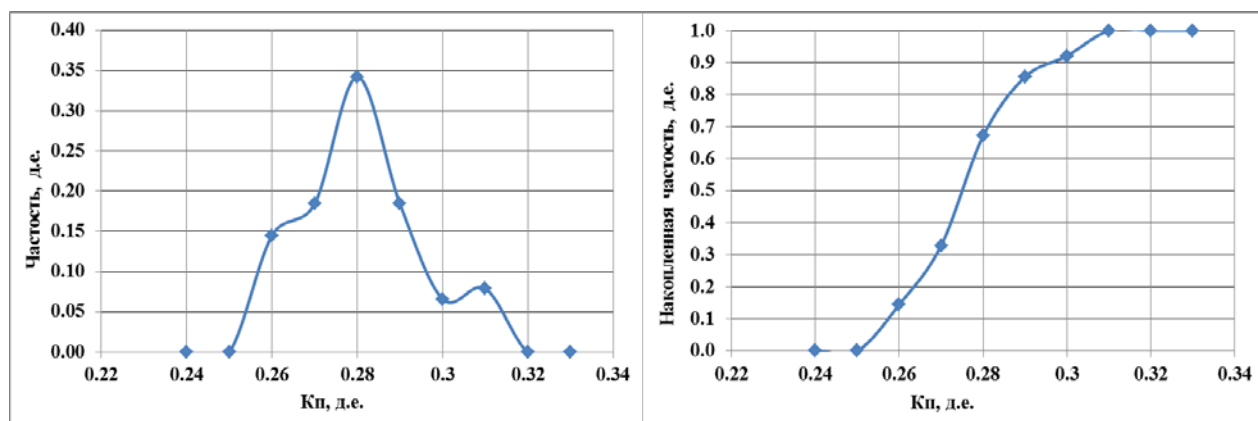


Рис. 2. Вероятностное и интегральное распределение пористости неработающих пластов сеноманской залежи Юбилейного НГКМ

Включение неработающих коллекторов в эффективные толщины может быть связано с рядом причин, как технологического - инерционность и ограниченное разрешение скважинных приборов, вследствие чего происходит недоучет тонкой слоистости разреза, так и методического характеров - различные масштабы исследований неоднородностей по данным керна и ГИС, а также использование обобщенных петрофизических зависимостей для различных групп коллекторов.

Таблица 1. Границы групп коллекторов по емкостным параметрам

№ групп	Характеристика коллекторов	$K_p$ мин., д.е.	$K_p$ макс., д.е.	$K_p$ ср., д.е.
1а	Суперколлектор	0.39	0.45	0.396
1б	Улучшенный	0.36	0.39	0.371
2	Хороший	0.32	0.36	0.34

№ групп	Характеристика коллекторов	Кп мин., д.е.	Кп макс., д.е.	Кп ср., д.е.
3	Ухудшенный	0.28	0.32	0.301
4	Переслаивание ухудшенных коллекторов с начальным градиентом давления	0.24	0.28	0.258
5	Переслаивание ухудшенных коллекторов с начальным градиентом давления и неколлекторов	0.18	0.24	0.212

Одной из основных причин завышения эффективных толщин по разрезу скважин является недоучет фильтрационных характеристик коллекторов. На сегодняшний день не существует общепринятых методов ГИС для прямого определения проницаемости пласта. Как правило, для залежей северной части ЗСНГБ, приуроченных к продуктивным отложениям сеноманского яруса, коэффициент проницаемости рассчитывают на основании петрофизических зависимостей от пористости или остаточной водонасыщенности. В то же время, исследования, проведенные на коллекциях керна, отобранного из отложений сеноманского яруса в пределах северной части ЗСНГБ, показывают (рис. 3), что проницаемость коллекторов с пористостью менее 28% изменяется в широких пределах от 0.0001 до 3 мкм<sup>2</sup>.

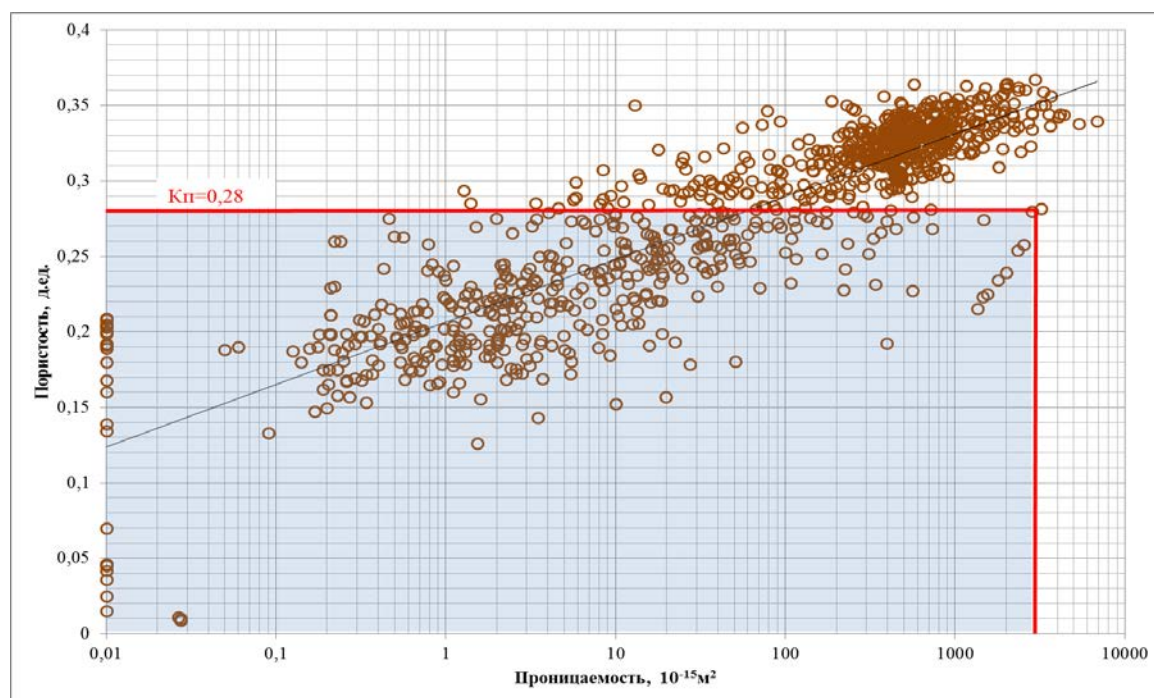


Рис. 3. Сопоставление проницаемости и пористости образцов керна из сеноманского интервала разреза Ямбургского месторождения

Расчет долевого участия коллекторов различных классов в формировании фильтрующей системы пласта может быть осуществлен с использованием

вероятностных методов. Как было показано в работе В.С. Славкина (1996 г.), наилучшим образом связь между вероятностью отнесения породы к коллекторам и пористостью для различных пороговых значений проницаемости аппроксимируется формулой 1:

$$P_K^{\text{кern}} = 1 - \exp[-\exp(A \times K_{\text{п}}^{\text{кern}} - B)] \quad (1)$$

где  $P_K^{\text{кern}}$  - вероятность отнесения образца к коллекторам, д. ед.;

$K_{\text{п}}^{\text{кern}}$  - пористость, определенная по керну, д. ед.,

$A, B$  - коэффициенты пропорциональности.

Данная формула была использована для аппроксимации результатов лабораторных исследований керна сеноманского яруса северной части ЗСНГБ (рис. 4а).

Для корректного использования зависимостей, полученных в лабораторных условиях, при интерпретации геофизических материалов необходим переход на более высокий иерархический уровень. Это связано с тем, что минимальный объем, в котором определяется пористость методами ГИС, на несколько порядков превосходит объем образца. С этой целью пласт виртуально разбивается на «N» условных одинаковых образцов, размеры которых соизмеримы с параметрами образца, исследуемого в лабораторных условиях. С помощью генератора случайных чисел каждому образцу задается величина пористости ( $K_{\text{пор}i}$ ), исходя из двух положений:

- в пласте существует логнормальное распределение пористости;
- отклонение от среднего значения пористости не превышает 50%.

На основании зависимости (формула 1) можно оценить вероятность преодоления критического значения проницаемости  $i$ -го образца ( $P_{Ki}$ ), которая позволила бы отнести его к разряду коллекторов соответствующего класса. В первом приближении, вероятность формирования фильтрующей системы в пласте можно оценить по формуле 2:

$$P_K^{\text{пл}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Ki}}{N} \quad (2)$$

Таким образом, вероятность того, что проницаемость при данной пористости будет не менее порогового значения, определенного для соответствующего класса коллекторов, аппроксимируется формулой 3 (рис. 4б):

$$P_K^{\text{пл}} = 1 - \exp[-\exp(C \cdot K_{\text{пор}}^2 + D \cdot K_{\text{пор}} + E)] \quad (3)$$

где  $P_K^{\text{пл}}$  - вероятность существования проницаемости пласта не менее порогового значения соответствующей совокупности классов, д. ед.;

$K_{\text{пор}}$  - пористость пласта, д. ед.;  
 $C, D, E$  - коэффициенты пропорциональности.

По результатам проведенной оценки получаем, что при пористости слоя 0.2, традиционно принимаемой граничной для коллекторов сеноманского яруса, только 60% его толщины будет характеризоваться значением проницаемости выше 0.1 мД, а вероятность наличия проницаемых прослоев в пластах закономерно снижается с уменьшением пористости.

Процесс разработки газовой залежи во многом регулируется перепадом давлений в системе «скважина-пласт». Высокие депрессии увеличивают дебиты газа, но при этом приводят к разрушению коллекторов в прискважинной зоне пласта. По этой причине эксплуатация многих скважин проводится на режимах «падающих» депрессий. В этих условиях газ из низкопроницаемых коллекторов не поступает в скважину и, со временем, оказывается защемленным. Таким образом, часть слоев залежей сеноманского яруса, характеризующихся по емкостным характеристикам как коллекторы, при существующих режимах разработки по своим фильтрационным характеристикам не способны отдавать газ, т.е. фактически их сложно классифицировать в качестве коллекторов. Долю таких пород необходимо учитывать при проведении пересчетов запасов газа для каждой отдельной залежи рассматриваемого региона, в том числе основываясь на результатах анализов ГИС и ГДИ.

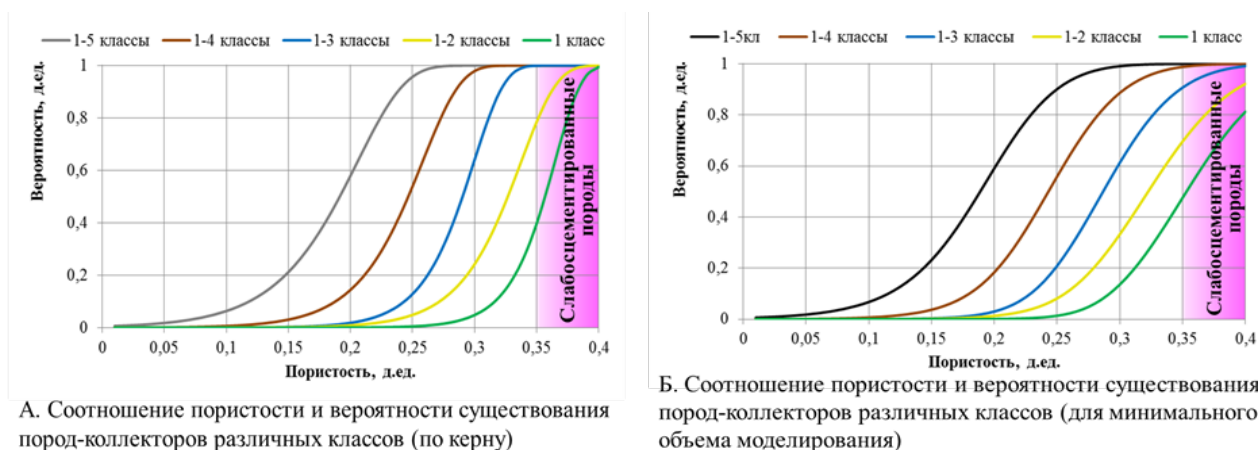


Рис. 4. Зависимость вероятности существования коллекторов различных классов от пористости пород продуктивной части сеномана Ямбургского месторождения

#### 4. Создание моделей внутренних флюидупоров сеноманских залежей севера Западной Сибири

В четвертой главе рассмотрен процесс обводнения сеноманских залежей, по скважинным данным показана зависимость скорости подъема ГВК от ФЕС

обводнившихся пород, предложена методика построения вспомогательных геологических моделей внутренних псевдофлюидоупоров и флюидоупоров, а также приведены примеры прогноза обводнения различных участков залежи и скважин в отдельности на построенных моделях.

Результаты геофизических и геолого-промысловых исследований наблюдательных и добывающих скважин наглядно демонстрируют неравномерный подъем ГВК в различных частях сеноманских газовых залежей крупнейших месторождений, конфигурация которого, как правило, не соответствует картам падения пластового давления.

Несовпадение зон пьезоминимумов с максимальными отметками подъёма ГВК и различная скорость внедрения фронта воды по площади залежи позволяют сделать предположение о наличии в массивном природном резервуаре сеноманского продуктивного горизонта достаточно выдержанных по площади флюидоупоров.

Проведенный анализ данных ГИС по определению текущего положения ГВК в наблюдательных скважинах Заполярного, Уренгойского, Юбилейного, Ямбургского и Ямсовейского месторождений показал:

- непроницаемые пропластки в большинстве случаев препятствуют продвижению подошвенных вод в залежь;
- скорость внедрения подошвенных вод в залежь зависит не только от ФЕС пород на границе «газ-вода», но и от латерального распространения слабопроницаемых литотипов.

Детальный анализ каротажных материалов не позволяет выделить явные и выдержанные флюидоупоры в виде глин в разрезе сеноманских отложений. В то же время, в разрезе сеномана выделяются пласты заглинизированных песчаников и алевролитов ( $K_p < 28\%$ ), характеризующихся пониженными значениями УЭС ( $8 \div 12 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) и газонасыщенности ( $K_g < 45\%$ ). Эти заглинизированные разности можно считать псевдофлюидоупорами, не проявлявшими себя столь активно в масштабе геологического времени, когда низкая скорость фильтрации не могла сдерживать формирование сеноманских газовых залежей. Однако, в масштабе темпов отбора, достигнутых в первые десятки лет разработки залежей, пласты заглинизированных песчаников и алевролитов могут играть роль локальных и зональных флюидоупоров. Выделение зон с различной, из-за геологических условий, скоростью подъёма ГВК позволяет реализовать дополнительную модель флюидоупоров залежи (рис. 5).

Совместный анализ карт текущего положения ГВК и геологических профилей из модели флюидоупоров, проведенных через зоны минимальных и максимальных отметок контакта, показал, что пониженные значения ГВК



приурочены к мощным непроницаемым слоям или к глинистым пропласткам сравнительно небольшой мощности, выдержанным по латерали. Максимальные значения отметок ГВК приурочены к зонам с распространением мощных пачек коллекторов.

Таким образом, геологическая модель внутренних флюидоупоров сеноманской залежи позволяет:

- объяснить несовпадение участков максимального подъёма ГВК с зонами пьезоминимумов,
- прогнозировать дальнейшее внедрение фронта подошвенных вод в сеноманскую залежь;
- прогнозировать обводнение скважин для проведения опережающих водоизоляционных работ.

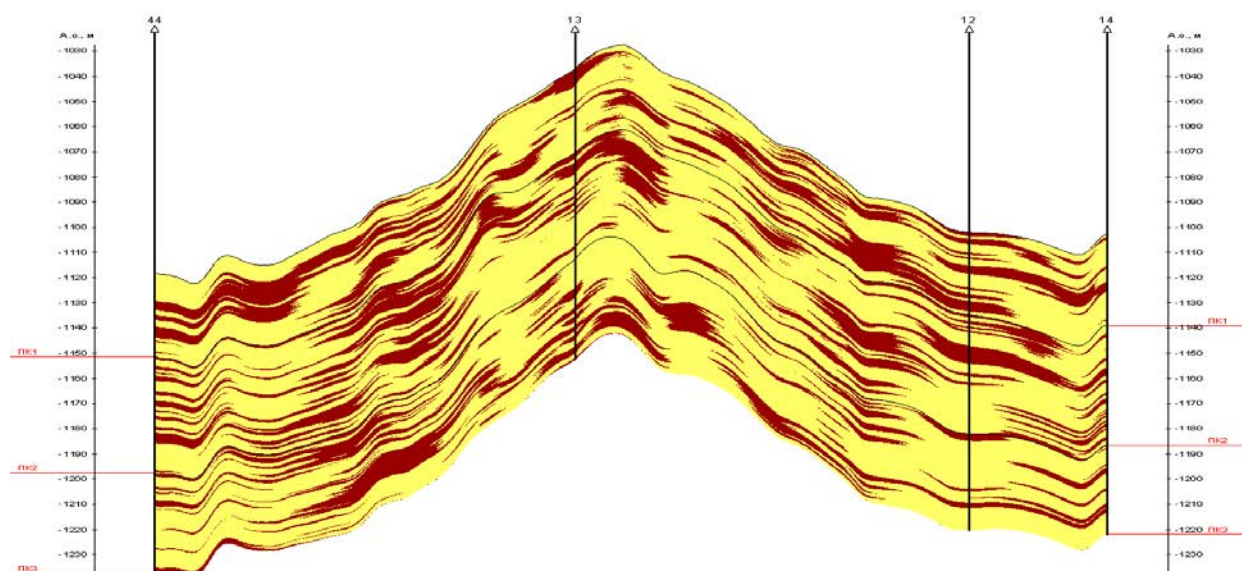


Рис. 5. Профиль по линии скважин 44–13–12–14 из модели флюидоупоров Ямбургского месторождения

## 5. Мониторинг процесса обводнения сеноманских залежей природного газа методом гравиметрических исследований

В пятой главе приводится методика комплексной интерпретации скважинных данных и гравиметрических наблюдений, позволяющая отслеживать процесс обводнения по площади сеноманской газовой залежи. Показана возможность решения обратной задачи гравиразведки с использованием геологических моделей залежей и результатов промысловых геофизических исследований.

Гравиметрический мониторинг позволяет сократить строительство наблюдательных скважин. Методика комплексной интерпретации скважинных

данных и гравиметрических наблюдений позволяет минимизировать погрешности определений изменений положений ГВК, в том числе в межскважинном пространстве.

Гравиметрический мониторинг заключается в повторных измерениях значений силы тяжести на стационарных закрепленных пунктах, выполняемых с необходимой периодичностью. Физической основой метода являются изменение плотности породы вследствие замещения газа водой в поровом пространстве и изменение плотности газа в залежи в процессе её эксплуатации. Соответственно, величина наблюдаемого изменения силы тяжести будет складываться из гравитационного эффекта от той части коллектора, из которой газ вытеснен водой, и уменьшения гравитационного поля, обусловленного падением плотности газа в залежи.

Для моделирования гравитационного эффекта, обусловленного изменением пластовых условий между этапами мониторинга, используются данные об изменении пластового давления и положения ГВК, получаемые по результатам промысловых исследований скважин. После учета гравитационного эффекта от падения пластового давления, рассчитанное изменение силы тяжести будет отражать внедрение пластовых вод в залежь.

На следующем этапе результаты гравитационного моделирования в виде карт изменения уровня ГВК и данных по пунктам мониторинга анализируются совместно с данными определения положения ГВК в скважинах.

Построение комплексных карт подъёма ГВК совместно по скважинным и гравиметрическим данным проводится в несколько этапов. На каждом этапе проводится анализ достоверности данных. Основным критерием анализа является подтверждаемость полученных результатов в соседних точках мониторинга, качество нормализации кривых НГК и оценка скважинных условий. Результатом являются комплексные карты подъёма ГВК за период между двумя последними этапами и за всё время проведения гравиметрического мониторинга.

Уточнение положения ГВК в межскважинном пространстве позволяет выделить зоны, не вовлеченные в процесс разработки (рис. 6). Комплексирование наземных и скважинных методов геофизики позволяет планировать мероприятия по извлечению ресурсов из этих зон, что в конечном итоге приведет к снижению остаточных запасов газа в залежи.

## 6. Выделение геолого-промысловых факторов, влияющих на скорость обводнения сеноманских залежей в процессе их разработки, с целью повышения коэффициента извлечения газа

В шестой главе приведен фактический материал и рассмотрены факторы, влияющие на скорость обводнения сеноманских залежей севера Западной Сибири, которые могут быть определены в процессе разработки залежей.

Сеноманские залежи газа севера ЗСНГБ эксплуатируются в условиях водонапорного режима. От скорости продвижения законтурной или подошвенной воды в сеноманскую залежь зависит темп падения пластового давления. Уменьшение эффективных газонасыщенных толщин, связанное с подъемом ГВК, обводнение скважин, защемление газа в низкопористых коллекторах снижают показатели разработки.

Для оценки интенсивности обводнения залежи рассчитываются карты средней скорости подъема ГВК. Для построения этих карт используются карты подъема ГВК и данные о времени начала внедрения в залежь пластовой воды. Анализ карт средних скоростей подъема ГВК позволяет сделать выводы о механизме обводнения залежи, выделить на площади участки с различной интенсивностью внедрения пластовых вод.

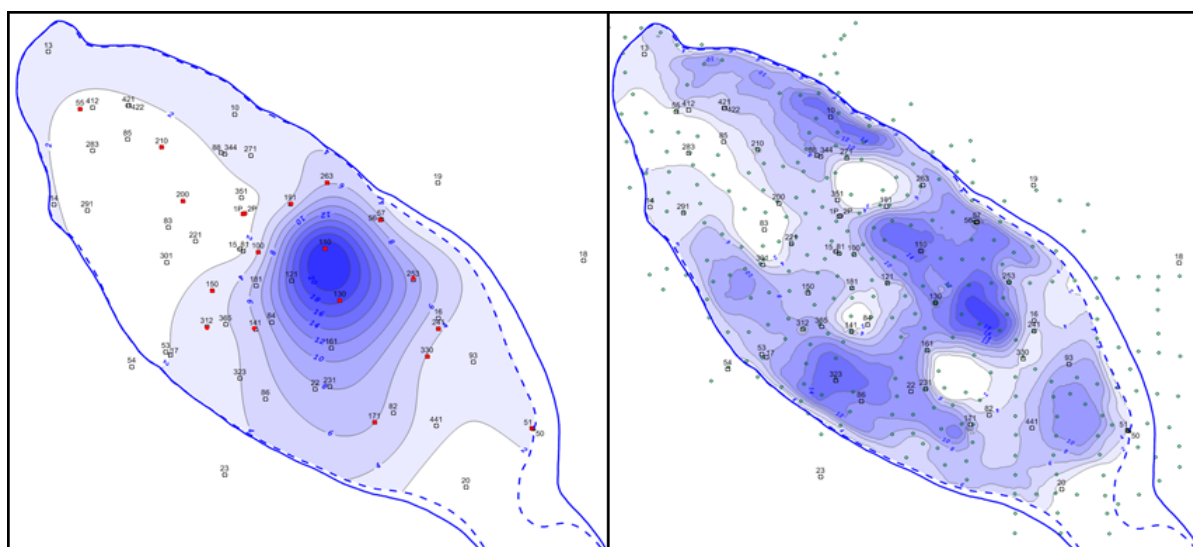


Рис. 6. Сопоставление карт текущего положения ГВК, построенных по данным ГИС (а) и по комплексу гравиметрических и скважинных данных (б).

Ямсовейское месторождение

Более точную информацию о процессе обводнения залежи несут статистические распределения средней скорости обводнения. Они позволяют прогнозировать характер дальнейшего подъема ГВК. Группирование участков по наиболее вероятным скоростям позволяет выделить зоны с различными механизмами обводнения.

Для точного прогнозирования обводнения сеноманских залежей необходим учет большого числа факторов, влияющих на характер подъема ГВК, которые можно объединить в три группы:

1. Особенности геологического строения залежи;
2. Технологические особенности разработки залежи;
3. Техническое состояние скважин.

В группе причин, влияющих на скорость подъема ГВК и связанных с геологическим строением залежи, можно выделить следующие основные факторы:

- литологическая неоднородность газонасыщенной толщи;
- наличие зон разрывных нарушений.

Скорость обводнения залежи зависит от ФЕС пород на разделе «газ-вода», а также от характера распространения слабопроницаемых пород (глава 4), следовательно, использование моделей флюидоупоров и анализ карт песчаности над текущим положением ГВК позволяют прогнозировать процесс обводнения залежи.

Анализ изменений по площади удельной продуктивности и абсолютно свободного дебита газа скважин Западно-Таркосалинского месторождения показал, что скважины с повышенными значениями рассматриваемых параметров в плане полностью совпадают с зоной тектонических нарушений. Повышение дебита в приразломной зоне происходит за счет увеличения проницаемости, обусловленной развитием процессов тектонической трещиноватости. Связь подъема ГВК с наличием зон повышенной проводимости была показана на примерах сеноманских залежей Уренгойского, Ямсовейского и Ямбургского месторождений.

Группу технологических особенностей эксплуатации можно подразделить на две подгруппы:

- период эксплуатации скважин, кустов, УКПГ;
- объем отобранного газа, пластовое давление, депрессия.

При прочих равных условиях, существует прямая связь времени ввода в эксплуатацию УКПГ или куста с величиной подъема ГВК. Особенно это заметно при сравнении подъёмов ГВК в пределах больших интервалов времени и расстояний между УКПГ.

Период эксплуатации залежи, в свою очередь, оказывает прямое влияние на объем отобранного газа и обратное - на пластовое давление.

Зависимость характера подъема ГВК от технического состояния скважин может быть дифференцирована на две подгруппы:

- нарушенность колонны и цементного кольца в процессе строительства и эксплуатации;
- разрушение призабойной зоны в результате выноса песка.

Каждая из этих подгрупп имеет свои особенности, но их действие влияет на скорость подъема ГВК.

Разрушение призабойной зоны и образование песчаных пробок по своему механизму равносильно разрыхлению коллекторов, что в конечном итоге приводит к увеличению скорости внедрения воды, с одной стороны, и нарушению сцепления цементного камня с породой с другой. Кроме разрушения коллектора, одновременно может происходить вынос и глинистых частиц, как цементирующих коллекторы, так и образующих прослой глины. Конечный эффект от этих процессов – увеличение скорости подъема ГВК, поступление в ствол скважин воды и их остановка.

### **Заключение**

В рамках диссертационной работы была проанализирована геолого-геофизическая и промысловая информация по крупнейшим сеноманским залежам газа НПТР. Были получены следующие основные результаты:

1. В разрезе отложений сеноманского яруса выделены слои, характеризующихся по емкостным свойствам как коллекторы, но по своим фильтрационным характеристикам не способные отдавать газ в промышленных масштабах.

2. Проницаемость неработающих интервалов изменяется в широких пределах от 0.01 до 3 мкм<sup>2</sup> и более. Разработанный граф вероятностной оценки фильтрационных свойств отложений сеноманского яруса подтверждает наличие высокоёмких слоев, не участвующих в формировании дренажной системы скважин.

3. Геологические модели распространения локальных псевдофлюидоупоров и флюидоупоров позволяют контролировать положение непроницаемых слоев и, соответственно, прогнозировать процесс обводнения сеноманских залежей.

4. Гравиметрический мониторинг позволяет контролировать положение ГВК в межскважинном пространстве и выделять различные механизмы обводнения залежей. Показана возможность решения обратной задачи гравиразведки с использованием геологических моделей залежей и результатов промысловых и геофизических исследований скважин.

5. Комплексирование гравиметрических и скважинных исследований позволяет выделить зоны, не вовлеченные в процесс освоения, и планировать мероприятия по повышению эффективности разработки залежи.

6. Обоснованы причины неравномерного обводнения сеноманских залежей. Проведенный анализ позволил выделить факторы, влияющие на скорость подъема ГВК.

Несмотря на то, что рассмотренные в работе месторождения в настоящее время находятся на стадиях падающей добычи, обобщение исторических данных, проведенное в ходе диссертационного исследования, может быть применено для оптимизации проектов разработки сеноманских залежей, которые в настоящее время вводятся в эксплуатацию и будут определять энергетический потенциал страны в ближайшем будущем (Ямал, Гыдан, Обская и Тазовская губы и др.).

#### **Основные положения опубликованы в следующих работах:**

1. Илюшин В.В., Фоменко В.Г., Аксенов С.Я., Богданов О.А. Моделирование газовых и газоконденсатных месторождений и подземных хранилищ газа в режиме реального времени по данным геолого-геофизических исследований // Каротажник, 2008. - № 9(174). - С.36-44.

2. Богданов О.А., Еланский М.Ю., Лещёва С.Б. Взаимосвязь фильтрационных и емкостных свойств отложений неокома (на примере Ямбургского и Заполярного месторождений) // Каротажник, 2011. - № 11 (209). - С. 65-76

3. Кирсанов С.А., Ахмедсафин С.К., Богданов О.А. Использование гравиметрических наблюдений для контроля процесса обводнения при разработке месторождений природного газа // Вестник ЦКР Роснедра, 2012. - №6. - С. 2-8.

4. Богданов О.А., Иванов С.А. Создание моделей флюидоупоров сеноманских залежей севера Западной Сибири для мониторинга процессов разработки // Вестник ЦКР Роснедра, 2012. - №6. - С. 32-39.

5. Еланский М.Ю., Богданов О.А. Петрофизическая основа определения абсолютной проницаемости неокомских отложений Ямбургского и Заполярного месторождений углеводородов по данным геофизики // Каротажник, 2013. - № 1(223). - С. 13-23.

6. Богданов О.А. Выделение пластов с малоизмененным характером насыщения продуктивных отложений в процессе разработки газовых залежей // Наука и техника в газовой промышленности, 2016. - № 3 (67). - С. 40-45.

7. Богданов О.А., Сапожников А.Б., Страхов П.Н. Типизация причин, определяющих эволюцию геологического строения разрабатываемых залежей углеводородов // В книге: Нефтегазовый комплекс: проблемы и

инновации. Тезисы научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Тянь В.К. - 2016. - С. 45.

8. Богданов О.А., Страхов П.Н. Оценка фильтрационных свойств терригенных отложений сеноманского яруса северной части Западной Сибири при построении геологических моделей залежей углеводородов // Наука и техника в газовой промышленности, 2017. - № 1 (69). - С. 3-8.

9. Страхов П.Н., Филиппов В.П., Колосков В.Н., Сапожников А.Б., Богданов О.А., Мусихин К.В. Влияние глубины залегания продуктивных отложений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на их фильтрационно-ёмкостные неоднородности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2017. - №8. - С. 28-32.

10. Филиппов В.П., Страхов П.Н., Колосков В.Н., Богданов О.А., Сапожников А.Б., Костенко О.В., Мусихин К.В., Шуваев А.О. Анализ проблем освоения трудно извлекаемых запасов углеводородов в процессе геологоразведочных работ // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков, 2018. - №1. - С. 6-9.

11. Богданов О.А., Маглеванная П.С. Иванов С.А., Богданов А.О. Уточнение фильтрационных свойств коллекторов с целью повышения достоверности геологической модели ачимовской залежи одного из месторождений Западно-Сибирской НГП // Наука и техника в газовой промышленности, 2018. - № 8 (76). - С. 3-11.

Подписано к печати «    » апреля 2019 г.

Заказ №

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ».