

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Юсупов Ян Ильдарович

**Применение геолого-механической модели для обоснования
разработки залежей нефти тутлеймско-абалакского НГК
Красноленинского свода методами технической стимуляции**

Специальность 1.6.11 «Геология, поиски, разведка и
эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова)

- Научный руководитель** – *Калмыков Георгий Александрович* – доктор геолого-минералогических наук
- Официальные оппоненты** – *Тихоцкий Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук, директор ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)*
- Эдер Вика Георгиевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Геологический институт Российской академии наук (ГИН РАН)*
- Заграновская Джулия Егоровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ООО «Газпромнефть НТЦ»*

Защита диссертации состоится «31» мая 2024 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.016.8 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Главное здание МГУ, геологический факультет, аудитория 621.

E-mail: poludetkinaelena@mail.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3002>.

Автореферат разослан « » апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Е. Н. Полудеткина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. В настоящее время высокоуглеродистые формации рассматриваются не только как нефтематеринские породы, но и как потенциально продуктивные интервалы для добычи нефти и газа. Одним из таких перспективных объектов для добычи является тутлеймско-абалакский комплекс (ТАК) Западной Сибири. Согласно выполненной вероятностной количественной оценке, в области распространения ТАК сосредоточено до 130 млрд т запасов нефти. Данная категория запасов нуждается в формировании нестандартных подходов к поиску, разведке и добыче, внедрении новых методик и технологических решений. Несмотря на такие оптимистичные прогнозы запасов, совокупная добыча нефти из ТАК с момента его открытия до настоящего времени (около 55 лет) едва превышает 11 млн т.

Несмотря на большое количество методов, используемых при разработке ТАК, наиболее эффективным методом является бурение горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта (ГСМГРП). Одним из инструментов, позволяющих корректно спроектировать ГСМГРП, является геомеханическая модель.

Объектом исследований являются пласты тутлеймской и абалакской свиты (тутлеймско-абалакский комплекс) Красноленинского свода. Выбор связан с наличием притоков в обеих свитах, охарактеризованностью современными материалами ГИС и сейсмических данных, наличием кернового материала для исследований и т. д.

Целью работы является разработка методики прогнозирования интервалов в разрезе и перспективных зон на площади для бурения горизонтальных скважин с ГРП с использованием геолого-механической модели тутлеймско-абалакского комплекса на примере Красноленинского свода Западно-Сибирского НГБ.

Задачи:

1. Выявление особенностей геологического строения ТАК в пределах Красноленинского свода.
2. Исследование упруго-прочностных свойств пород ТАК в термобарических условиях. Выявление взаимосвязи геомеханических параметров с минерально-компонентным составом, ФЕС и др. Выделение литомеханических типов ТАК.
3. Построение геомеханической модели в программном комплексе, разработанном при непосредственном участии автора. Поиск и выделение в разрезе интервалов для технической стимуляции ГРП.

4. Прогнозирование перспективных зон на площади. Построение комплексной трехмерной модели на основе инверсии и результатов построения геомеханических моделей опорных скважин.
5. Создание модели устойчивости скважин. Построение и калибровка профилей напряжений. Оценка оптимальной плотности бурового раствора для бурения горизонтальных скважин.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу работы положены материалы исследований 12 скважин с данными керна, также более 100 скважин с материалами ГИС по Красноленинскому своду. База данных включает в себя 3D-сейсмические кубы акустических импедансов, данные широкополосной акустики, плотности, замеров пластового давления, давлений гидроразрыва пласта, испытаний скважин на приток, дел скважин, исследований керна. Литомеханическая типизация пород была проведена автором на основании самостоятельных литологических, геохимических, петрофизических, геомеханических исследований более 150 образцов из 12 опорных скважин. Автором был выполнен комплексный анализ результатов лабораторных исследований ФЕС, РФА, РЭМ, трехосных и одноосных испытаний, которые легли в основу выделения литомеханических типов пород тутлеймско-абалакского комплекса. Автор руководил и непосредственно участвовал в 5 НИР по построению геомеханических моделей ТАК. Авторские идеи и алгоритмы использовались при создании ПО для геомеханического моделирования.

Методы исследования. Литологическое направление работ позволило определить минерально-компонентный и химический состав пород. В части геохимического направления определен тип и содержание органического вещества, стадия катагенеза и оценен нефтегенерационный потенциал пород. В рамках петрофизического направления проводилась оценка ФЕС, скоростей пробега продольных и поперечных волн, плотности и т. д. Изучение геомеханических свойств позволило выявить условия, при которых происходила упругая, пластическая деформация, а также разрушение пород. Работа с сейсмическими материалами позволила распространить ключевые параметры в межскважинном пространстве.

Научная новизна. По данным комплексного исследования кернового материала разработаны критерии литомеханической типизации и обоснована зависимость свойств литомеханических типов от состава. Впервые для ТАК установлена связь между суммарной толщиной хрупких интервалов и начальными дебитами скважин, позволяющая выделять перспективные зоны для

бурения ГСМГРП. Разработана методика восстановления кривых плотностного и акустического каротажа для условий Краснотенинского свода, позволяющая в условиях недостатка/неполноты данных учесть в геомеханической модели наибольшее число скважин.

Защищаемые положения.

1. На основе обобщения исследований минерально-компонентного состава и геомеханических свойств образцов пород тутлеймско-абалакского комплекса выделены восемь литомеханических типов.
2. Наиболее хрупкими интервалами в разрезе тутлеймско-абалакского комплекса являются породы кремнистого литомеханического типа (кремнистые низкоглинистые массивные породы, радиоляриты) и породы карбонатного литомеханического типа (известняки бактериальные с наличием макротрещин).
3. Для тутлеймско-абалакского комплекса установлена связь между толщиной хрупких интервалов и начальными дебитами скважин, позволяющая выделять перспективные зоны для бурения горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Использование результатов исследований при проведении поисково-разведочных работ в отложениях верхнеюрской высокоуглеродистой формации для прогнозирования интервалов в разрезе и перспективных зон на площади для бурения горизонтальных скважин с ГРП.
2. Создание нового отечественного программного обеспечения для геомеханического моделирования, зарегистрированного в Едином реестре программ. Автор включен в 5 патентов на данное ПО.
3. Увеличение экономической эффективности технологии бурения ГС с МГРП за счет выделения в разрезе ТАК наиболее перспективных зон для технической стимуляции.
4. Снижение рисков бурения за счет оценки безопасного окна плотности раствора, в т.ч. с учетом зон неустойчивости, АВПД, поглощений и т. д.
5. Обоснование оптимального направления заложения ГСМГРП и устойчивости стенок скважин с учетом переориентации напряжений.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на международных и российских конференциях с 2015 по 2022 гг.:

1. Международных: ЛОМОНОСОВ, Москва, Россия, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023 г.; Новые идеи в геологии нефти и газа, Москва, Россия, 2019 г.т Техническая конференция SPE "Нефтегазовая геомеханика", Санкт-Петербург, 2019 г.; 72-я Международная молодежная научная конференция "Нефть и Газ 2018, Россия, Москва, 2018 г.,

2. Российских: Технологический форум по петрофизике, исследованиям керна и пластовых флюидов, геомеханике, Тюмень, 2022, 2023г. Научно-техническая конференция «Цифровые технологии в добыче углеводородов: цифровая независимость», Уфа, 2023 г. XVII Всероссийская конференция аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического профиля, Санкт-Петербург, 2019

Благодарности. Автор благодарен своему научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук Георгию Александровичу Калмыкову, заведующей кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых Ступаковой Антонине Васильевне и научному сотруднику Митронову Дмитрию Валентиновичу. Автор благодарен научным советникам Максиму Маркину и Александру Лопатину, а также сотрудникам ООО «Литосфера» Вадиму Ситак, Олегу Федорову, Марии Лопатиной, Ярославу Заглядину, Александре Солдатовой. Автор благодарен своей семье – супруге Алёне, детям – Алисе, Катерине и Алексу, а также родителям – Татьяне Алексеевне и Ильдару Усмановичу.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Общий объем составляет 110 страниц, включая 14 таблиц, 69 иллюстраций и список литературы из 111 наименований. Структура работы построена в соответствии с выполненными исследованиями и примерами их положительного применения на конкретных объектах. Защищаемые в работе положения отражают результат анализа исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Текущее состояние изучения ТАК и сбор данных для выполнения работы

Район исследований приурочен к *Красноленинскому* своду – положительной структуре первого порядка. Согласно Решению 6-го Межведомственного стратиграфического совещания, на изучаемой территории выделяются два структурно-вещественных мегакомплекса: доюрский фундамент и осадочный чехол. Структурная поверхность фундамента определяет строение нижних горизонтов осадочного чехла. Строение мелового комплекса во многом обуславливается уже седиментационными причинами, но для большинства структур все же характерна унаследованность развития.

Красноленинский свод соответствует ареалу распространения тутлеймской свиты. Тутлеймская свита подразделяется на две подсвиты – нижнюю и верхнюю. В изучаемом районе свита отличается от аналогов соседних областей в основном за счёт нижней подсвиты, которая сложена тонкоплитчатыми битуминозными аргиллитами. Толщина подсвиты 15–35 м. Верхняя подсвита сложена чёрными битуминозными аргиллитами, с плоским изломом, с незначительной слюдистостью. Подсвита согласно перекрывается отложениями фроловской свиты. Толщина подсвиты 7–15 м. Абалакская свита на Красноленинском своде представлена темно-серыми аргиллитами, глауконитовыми, с сидеритовыми конкрециями. Нередко отмечаются маломощные прослои глауконитов и глауконитизированных алевролитов. Часто в этой части разреза отмечается большое количество каверн и трещин. Отложения абалакской свиты прослеживаются на всей территории района. Толщина изменяется от 10 до 30 м.

В разрезе ТАК Красноленинского свода свиты выделяется 7 пачек, отличающихся по литологическому составу и фауне (Рис. 1).

Пачка АВ приурочена к отложениям абалакской свиты. Накопление пачки происходило в условиях внутреннего шельфа низкой динамики, в основном за счет гравитационного осаждения взвешенных частиц, что подтверждается наличием ростров белемнитов и ходов морских полихет. Наличие пирита может быть связано с неустойчивым окислительно-восстановительным балансом придонных вод. По составу пачка представлена глинистыми породами, алевролитами с включениями кальцита и сидерита. Пачка LB объединяет породы пачек 1–3 тутлеймской свиты (Рис. 1). Пачка 1 представлена однородными темно-серыми глинисто-кремнистыми породами. В пределах данной пачки в разрезах скважин встречаются радиоляритовые слои, часто приуроченные к ее кровле. Пачка 2 имеет схожий состав, отличается от первой фаунистическим

составом, и также может содержать значимые количества рассеянного кальцита и маломощные прослои радиоляритов. Пачка 3 сложена высококремнистыми породами и радиоляритами, которые часто вторично кальцитизированы. Пачка 4 представлена кероген-глинисто-кремнистыми породами, характеризуется высокими содержаниями $C_{орг}$ и высокой радиоактивностью, за счет чего отлично выделяется по кривой гамма-каротажа. Пачка 5 представлена кероген-глинисто-карбонатно-кремнистыми породами, характеризуется как присутствием биогенного карбоната, так и рассеянного. Пачка 6 отличается от пачки 5 резким ростом количества пирита (до 20–25%) в составе породы.

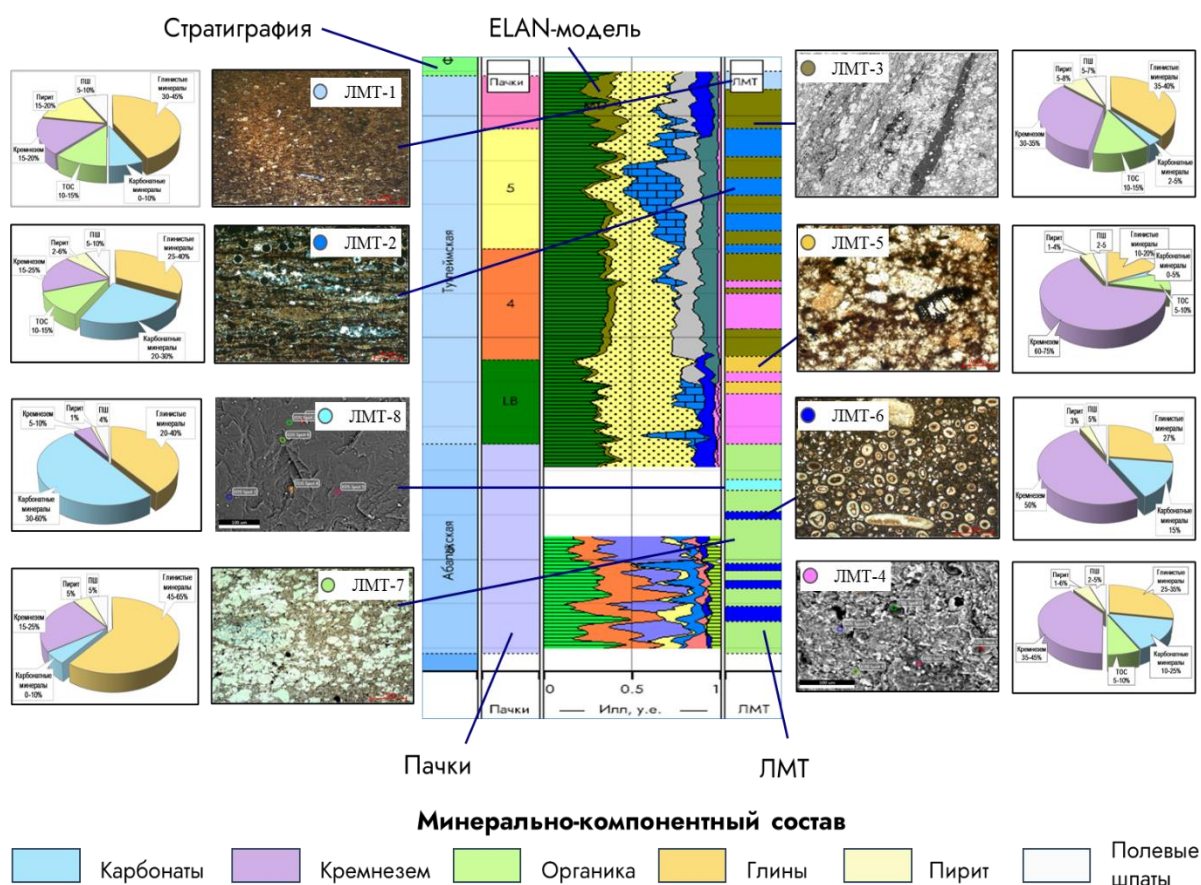


Рис. 1. Концептуальный разрез ТАК изучаемой площади

В рамках анализа и оценки исходной геолого-геофизической информации были выбраны 12 опорных скважин для построения геомеханической модели. Основанием выбора послужило наличие расширенного комплекса ГИС (в т. ч. широкополосная акустика, многорычажная кавернометрия и микросканеры), керны, испытаний скважин (замеры пластового давления и мини-ГРП), буровых событий и ежедневных рапортов по бурению (Рис. 2). На изучаемой площади также имеются трехмерные сейсмические данные (кубы интервальных скоростей и акустическая инверсия). Кроме этого имеются результаты испытаний скважин в интервалах объекта работ, как отдельно по тутлеймской и абалакской свитам, так и совместные испытания.

Номер скважины		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
ГНС	DEN	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	DTP	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	DTS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Плотность БР		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Керн		-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Замеры давлений		-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-
Испытания на разрыв		+	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+
Микроимиджеры		+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+
Буровые отчеты		-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-
Дела скважин		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-

Рис. 2. База исходных данных по скважинам для выполнения работы в пределах изучаемой площади

Глава 2. Литомеханическая типизация пород ТАК

В данной главе описана методика и результаты изучения минерально-компонентного состава, петрофизических и упругих свойств на керне. Всего автором было изучено и исследовано 150 образцов керна по 12 опорным скважинам из интервалов ТАК.

При выполнении работ с керном применялась схема исследований, учитывающая различные смежные направления: литологическое, геохимическое, петрофизическое, геомеханическое. Литологическое направление работ позволило определить минерально-компонентный и химический состав пород. В части геохимического направления определен тип и содержание органического вещества, стадия катагенеза и оценен нефтегенерационный потенциал пород. В рамках петрофизического направления проводилась оценка ФЕС, скоростей пробега продольных и поперечных волн, плотности и т. д. Изучение геомеханических свойств позволило выявить условия, при которых происходила упругая, пластическая деформация, а также разрушение пород. Геомеханические исследования керна проводились автором на установке для трехосного сжатия керна.

Результаты изучения минерально-компонентного состава были нанесены на четырехкомпонентную диаграмму (Рис. 3), предложенную Г.А. Калмыковым [Калмыков, 2016].

Результаты определения геомеханических свойств совместно с минерально-компонентной моделью сведены воедино и представлены на Рис. 4, из которого видно, что изученные породы можно сгруппировать по определенным признакам, а именно:

- Минерально-компонентный состав;
- Геомеханические свойства пород,
- Поведение под нагрузкой и условия, при которых происходила упругая, пластическая деформация, а также разрушение пород.

Для обобщения вышеприведенных наблюдений автором вводится понятие **литомеханического типа** пород (ЛМТ). Под литомеханическим типом понимается группа горных пород, имеющих сходное соотношение породообразующих компонентов, механических свойств и поведения под нагрузкой [Юсупов, 2024].

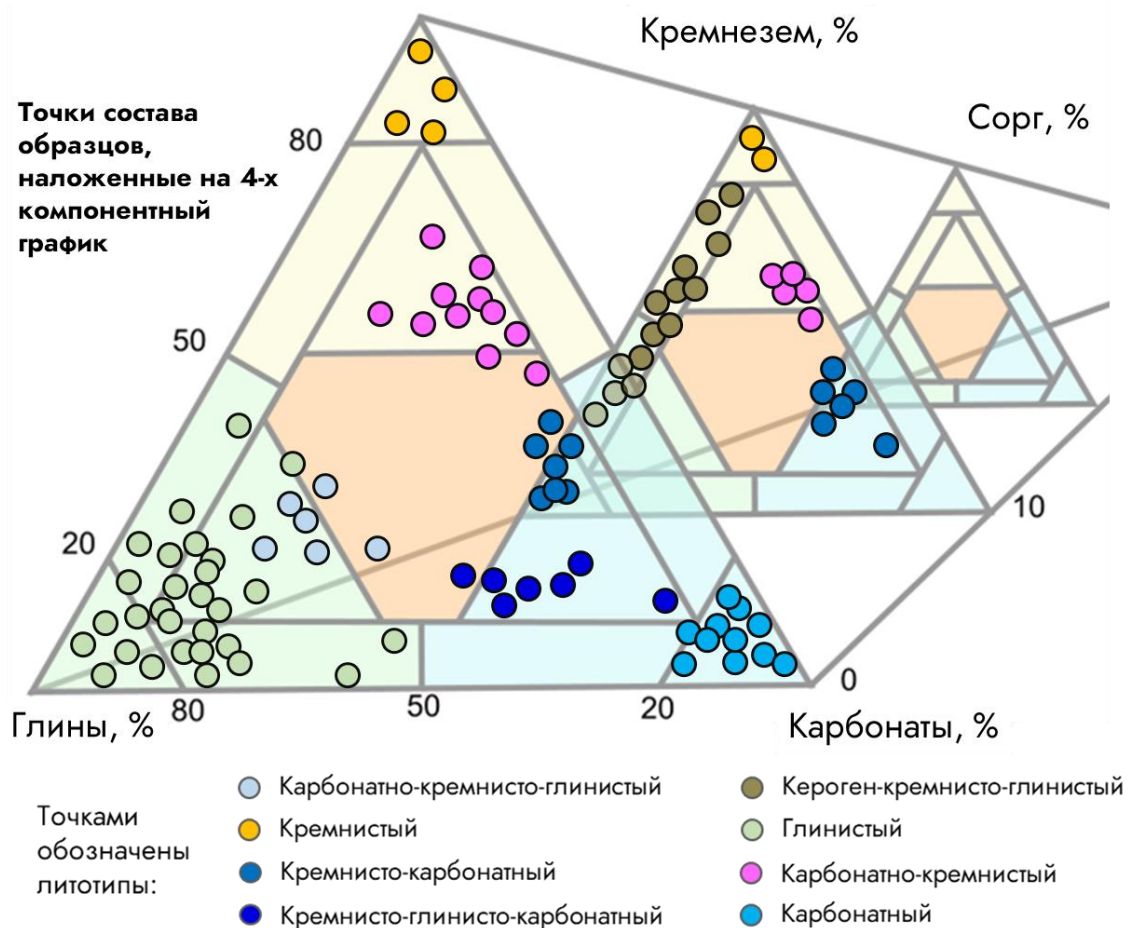


Рис. 3. 4-компонентная диаграмма минерально-компонентного состава

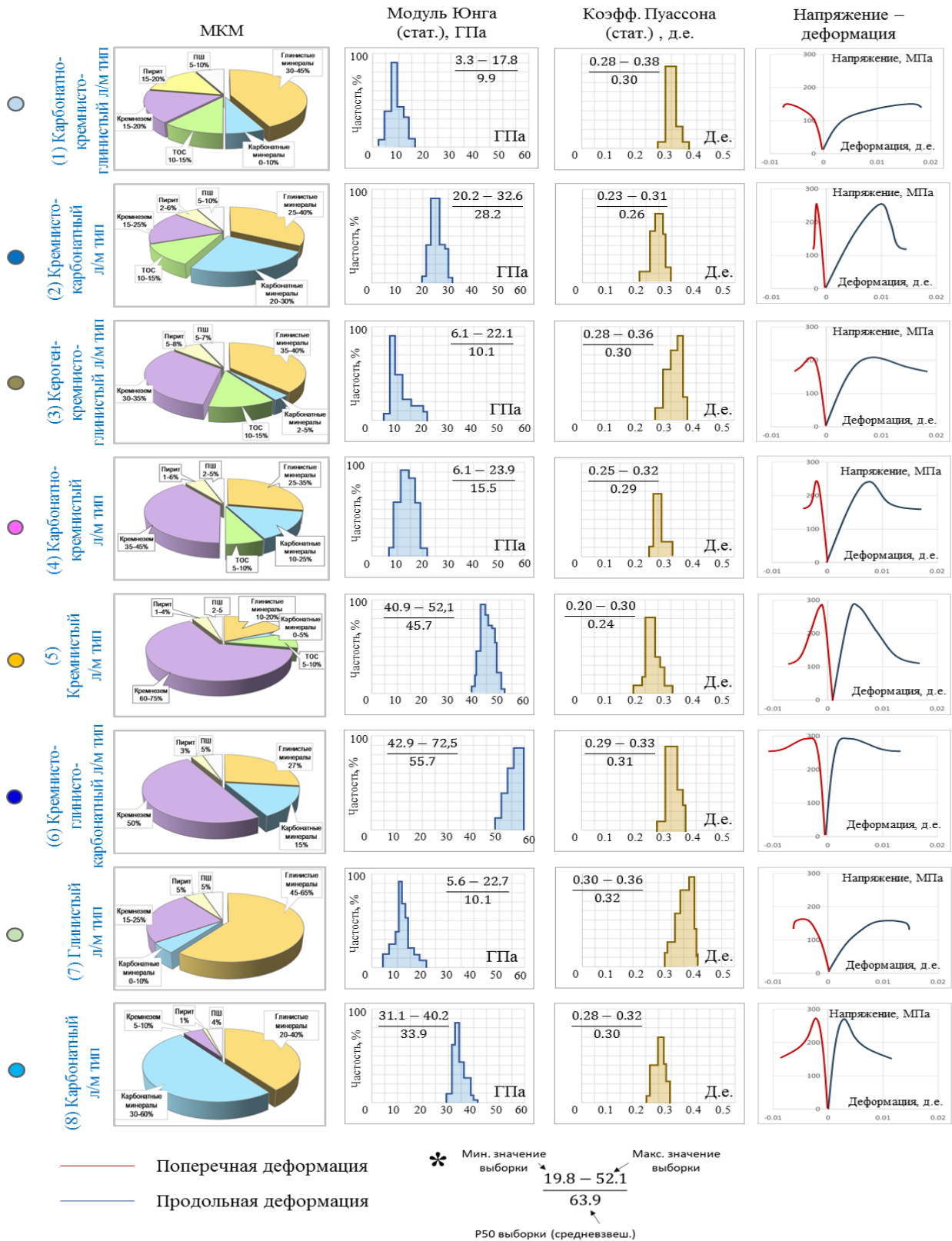


Рис. 4. Геомеханическая характеристика основных литомеханических типов ТАК [Юсупов, 2024]

Карбонатно-кремнисто-глинистый ЛМТ (1) представлен фосфатными линзами с плохо выраженной слоистостью с остатками рыб, онихитов, карбонатным и кероген-карбонатным цементом. Кремнисто-карбонатный ЛМТ

(2) представлен бежево-коричневыми и серыми карбонатизированными силицитами с реликтовой радиоляриевой структурой. Кероген-кремнисто-глинистый ЛМТ (3) представлен преимущественно аргиллитами, сильно битуминозными, с содержанием $C_{орг}$ II типа до 26%. Порода состоит из биогенного кремнезема (30–70%), $C_{орг}$ (более 15%), карбонатных минералов (15–35%), глинистых минералов (менее 15%). Литотип характеризуется высоким генерационным потенциалом. Кремнистый (силицит) ЛМТ (5) представлен коричневатато-темно-серыми кремнистыми (более 70%) низкоглинистыми (менее 10%) практически изотропными породами биоморфной радиоляриевой структуры, массивной текстуры. Кремнисто-глинисто-карбонатный ЛМТ (6) чаще всего встречается в средней части АС. Он представлен несколькими разновидностями, наиболее интересны известняк глинистый с примесью сидерита и доломита. Глинистый ЛМТ (7) представлен рыхлыми породами зеленоватого цвета с тонкослоистой текстурой и сложен преимущественно глинистыми минералами (>60%), из которых преобладает глауконит. Карбонатный ЛМТ (8) представлен известняками трещиноватыми, массивными, биотурбированными, кавернозными брекчеевидной структуры, нефтенасыщенные (Рис. 4).

Из приведенного выше вытекает **защищаемое положение №1**: На основе обобщения исследований минерально-компонентного состава и геомеханических свойств образцов пород ТАК выделены восемь литомеханических типов: (1) карбонатно-кремнисто-глинистый; (2) кремнисто-карбонатный; (3) кероген-кремнисто-глинистый; (4) карбонатно-кремнистый; (5) кремнистый; (6) кремнисто-глинисто-карбонатный; (7) глинистый; (8) карбонатный.

Глава 3. Разработка методики прогнозирования перспективных интервалов в разрезе для проведения ГРП

На основании результатов керновых исследований построены корреляционные зависимости между интервальными временами пробега продольных и поперечных волн, динамического и статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона (Рис. 5В), на основе которых из динамических модулей были рассчитаны статические.

Для прогнозирования перспективных интервалов для проведения ГРП в разрезе используется хрупкость. Хрупкостью называется параметр, характеризующий способность горной породы при определенных значениях напряжения образовывать трещины и последующую возможность сохранять их в раскрытом состоянии. С точки зрения подсчета запасов хрупкость является наиболее значимой геомеханической характеристикой [Временное методическое

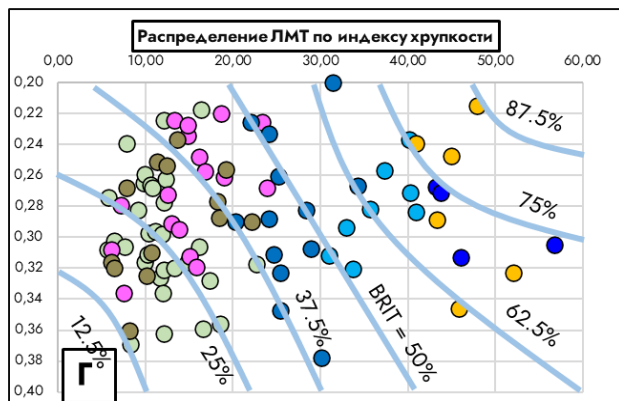
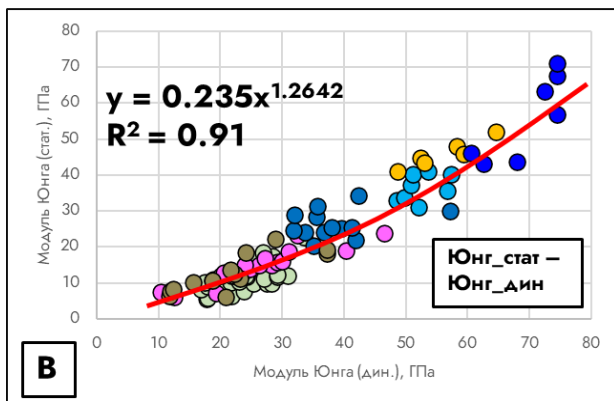
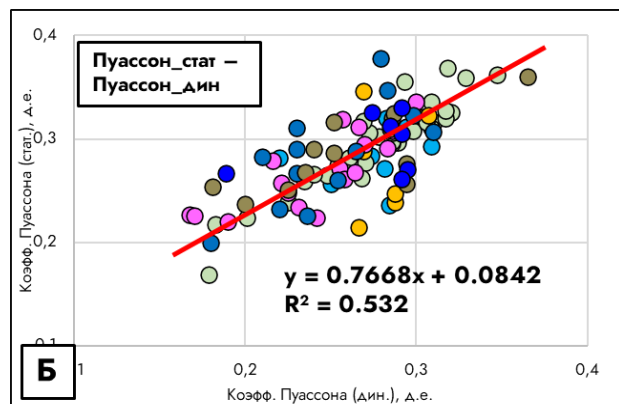
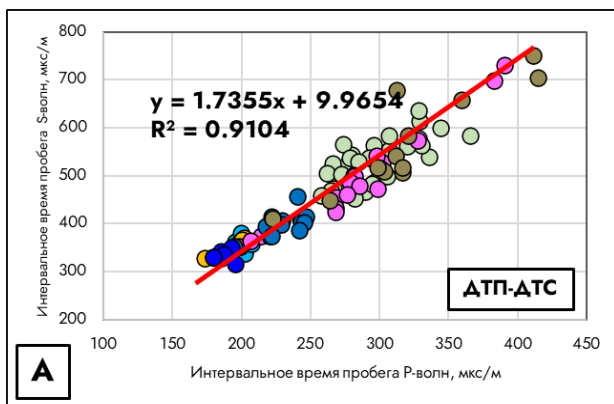
руководство, 2016]. Хрупкие интервалы разреза, обладающие лучшими емкостными свойствами, можно считать *технически стимулируемыми коллекторами* по Калмыкову [Калмыков, 2016]. В результате ГРП данные породы растрескиваются, и в них образуется система техногенных трещин, по которым становится возможной фильтрация пластовых флюидов. Породы же с низкой хрупкостью стоит рассматривать как барьеры трещины, в которой трещину ГРП создать и возможно, но за счет пластичности она, скорее всего, преждевременно закроется.

В настоящей работе рассматривается метод определения хрупкости по Рикману [Rickman, 2008].

Хрупкость

$$= \frac{\left(\frac{\text{ПУАС}_{\text{дин_макс}} - \text{ПУАС}_{\text{дин}}}{\text{ПУАС}_{\text{дин_макс}} - \text{ПУАС}_{\text{дин_мин}}} \right) + \left(\frac{\text{ЮНГ}_{\text{дин}} - \text{ЮНГ}_{\text{дин_макс}}}{\text{ЮНГ}_{\text{дин_макс}} - \text{ЮНГ}_{\text{дин_мин}}} \right)}{2} \quad (\text{д. е.})$$

$\text{ПУАС}_{\text{дин}}$ – коэффициент Пуассона, д. е., $\text{ПУАС}_{\text{дин_макс}}$ – макс. коэффициент Пуассона, д. е., $\text{ПУАС}_{\text{дин_мин}}$ – мин. коэффициент Пуассона в, д. е., $\text{ЮНГ}_{\text{дин}}$ – модуль Юнга, ГПа, $\text{ЮНГ}_{\text{дин_макс}}$ – макс. модуль Юнга в, ГПа, $\text{ЮНГ}_{\text{дин_мин}}$ – мин. модуль Юнга, ГПа.



Точками обозначены: ЛМТ-1 ЛМТ-2 ЛМТ-3 ЛМТ-4 ЛМТ-5 ЛМТ-6 ЛМТ-7 ЛМТ-8

ЛМТ – литомеханический тип

Рис. 5. Связь механических свойств с минерально-компонентным составом пород тутлеймско-абалакского комплекса: А) интервальное время пробега Р-волн, мкс/м – интервальное время пробега S-волн, мкс/м; Б) динамический модуль Юнга, ГПа – статический модуль Юнга, ГПа; В) статический модуль Юнга, ГПа – статический коэффициент Пуассона, д.е. Синими линиями показаны значения индекса хрупкости [Юсупов, 2024]

Хрупкость по Рикману стремится к 1, если порода характеризуется высоким модулем Юнга и низким коэффициентом Пуассона (Рис. 5Г). Низкие значения хрупкости приурочены к литомеханическим типам с высоким содержанием глин и органического вещества. Высокое содержание Сор_г приводит к снижению модуля Юнга и предела прочности, в то время как увеличение карбонатной и кремнистой составляющей приводит к их увеличению. Влияние текстурных особенностей на механические свойства однозначно – массивные породы характеризуются более высокими значениями механических свойств, в то время как слоистые и анизотропные разности являются более пластичными и слабопрочными. Из этого следует, что механико-прочностные свойства, а также степень их анизотропии являются функцией минерально-компонентного состава и текстурно-структурных особенностей пород.

	№ ЛМТ	Кол-во обр., шт.	ЛТ	SiO ₂ , %	Карбонаты, %	Глины, %	C _{орг} , %	ЮНГ _{ст}	ПУАС _{ст}
Тутлеймская	1	6	Карбонатно-кремнисто-глинистый	$\frac{17.1 - 25.6}{20.3}$	$\frac{11.5 - 24.6}{13.2}$	$\frac{52.7 - 69.1}{60.4}$	$\frac{3.3 - 8.8}{6.9}$	$\frac{3.3 - 17.8}{9.9}$	$\frac{0.28 - 0.38}{0.30}$
	2	13	Кремнисто-карбонатный	$\frac{21.1 - 45.0}{37.3}$	$\frac{41.4 - 59.1}{45.2}$	$\frac{2.7 - 19.6}{8.3}$	$\frac{5.6 - 17.9}{9.4}$	$\frac{20.2 - 32.6}{28.2}$	$\frac{0.23 - 0.31}{0.26}$
	3	13	Кероген-кремнисто-глинистый	$\frac{19.8 - 52.1}{40.1}$	$\frac{3.6 - 14.3}{6.3}$	$\frac{4.3 - 50.8}{32.1}$	$\frac{11.3 - 27.8}{17.1}$	$\frac{6.1 - 22.1}{10.1}$	$\frac{0.28 - 0.36}{0.30}$
	4	17	Карбонатно-кремнистый	$\frac{37.2 - 58.8}{53.9}$	$\frac{17.5 - 34.0}{27.3}$	$\frac{0.3 - 12.2}{3.3}$	$\frac{7.1 - 18.4}{10.9}$	$\frac{6.1 - 23.9}{15.5}$	$\frac{0.25 - 0.32}{0.29}$
	5	6	Кремнистый	$\frac{79.2 - 97.3}{88.9}$	$\frac{5.8 - 9.5}{7.3}$	$\frac{0.5 - 5.4}{1.8}$	$\frac{4.1 - 12.8}{6.0}$	$\frac{40.9 - 52.1}{45.7}$	$\frac{0.20 - 0.30}{0.24}$
Абалакская	6	7	Кремнисто-глинисто-карбонатный	$\frac{7.8 - 21.7}{10.5}$	$\frac{56.1 - 69.5}{60.9}$	$\frac{20.8 - 31.8}{25.7}$	$\frac{0.3 - 4.1}{1.2}$	$\frac{42.9 - 72.5}{55.7}$	$\frac{0.29 - 0.33}{0.31}$
	7	32	Глинистый	$\frac{3.3 - 7.8}{5.1}$	$\frac{8.7 - 14.9}{12.2}$	$\frac{63.1 - 93.7}{81.6}$	$\frac{0.1 - 4.7}{1.6}$	$\frac{5.6 - 22.7}{10.1}$	$\frac{0.30 - 0.36}{0.32}$
	8	11	Карбонатный	$\frac{2.7 - 8.6}{6.9}$	$\frac{76.0 - 99.4}{87.4}$	$\frac{1.5 - 6.4}{4.3}$	$\frac{0.3 - 8.8}{2.9}$	$\frac{31.1 - 40.2}{33.9}$	$\frac{0.28 - 0.32}{0.30}$

Рис. 6. Сводная таблица минерально-компонентных и механических характеристик выделенных литомеханических типов

Как видно из графика на Рис. 5А, к наиболее «медленным» литомеханическим типам относятся кремнисто-глинистые, кероген-глинисто-кремнистые и кероген-кремнисто-глинистые. В свою очередь высокая «медленность» Р- и S-волн обуславливает низкие значения модуля Юнга (Б) и, как следствие, низкие показания хрупкости (Рис. 5В, Рис. 6).

Далее литомеханические типы были определены по ГИС (Рис. 7). По каротажу также была рассчитана хрупкость, согласно которой наиболее перспективными интервалами для проведения технической стимуляции в разрезе тутлеймско-абалакского комплекса являются породы кремнистого литомеханического типа (кремнистые низкоглинистые массивные породы, радиоляриты) и породы карбонатного литомеханического типа (известняки бактериальные с наличием макротрещин). Хрупкость в данных породах превышает 0.4.

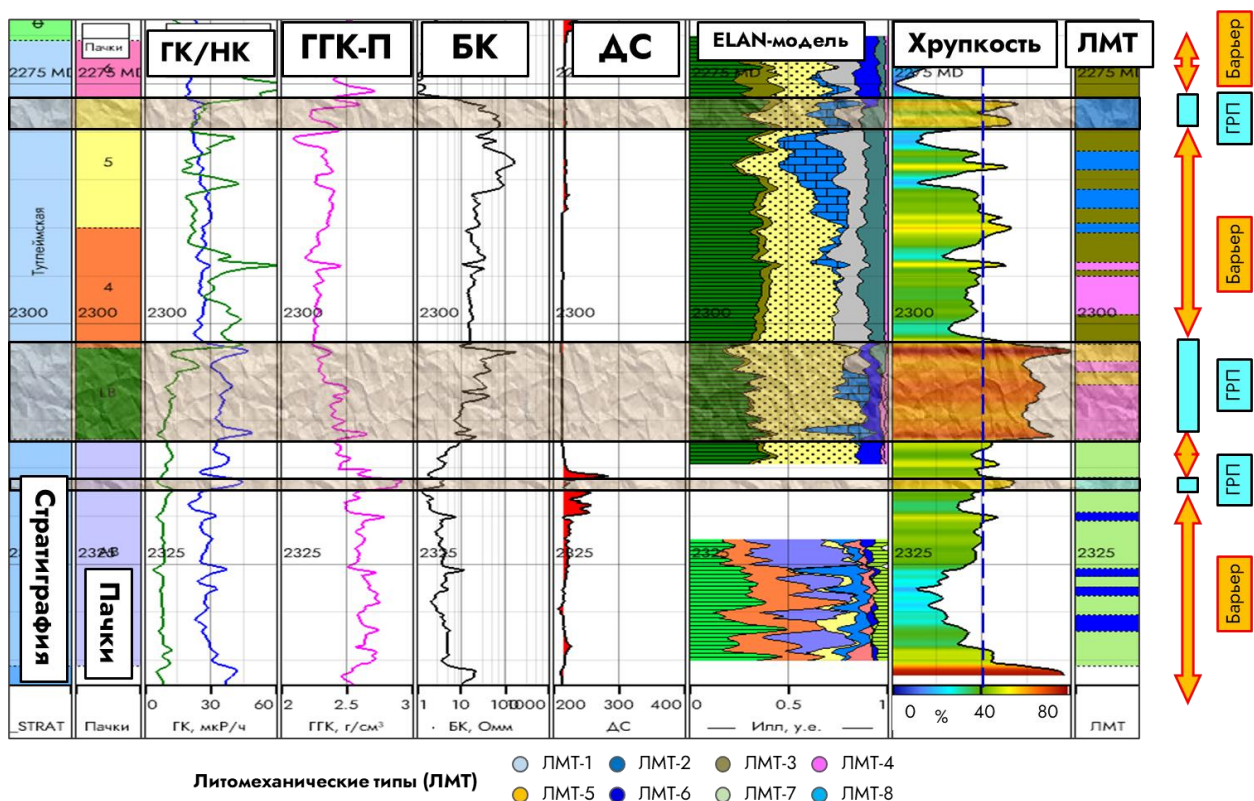


Рис. 7. Локализация перспективных интервалов в разрезе для технической стимуляции методом ГРП

Из приведенного выше вытекает **защищаемое положение №2**: наиболее хрупкими интервалами в разрезе ТАК являются породы кремнистого литомеханического типа (кремнистые низкоглинистые массивные породы, радиоляриты) и породы карбонатного литомеханического типа (известняки бактериальные с наличием макротрещин).

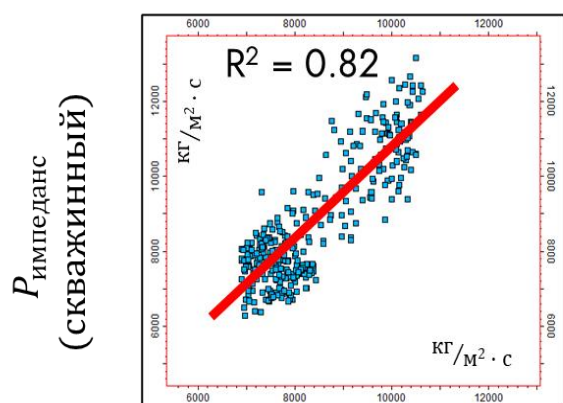
Глава 4. Разработка методики прогнозирования перспективных зон на площади

После того как выделены перспективные интервалы пород для проведения ГРП их необходимо оконтурить их на площади. Для оконтуривания перспективных зон для проведения ГРП в границах исследуемой площади привлекались данные ГИС в опорных скважинах и сейсмической синхронной инверсии. Установлены надежные зависимости между скважинным и сейсмическим продольным Р-импедансом ($R^2 = 0.82$, Рис. 8-1), скважинным и сейсмическим сдвиговым S-импедансом а также скважинной плотностью и сейсмическим продольным Р-импедансом ($R^2 = 0.85$, Рис. 8-2). При визуальном сравнении расчетов по ГИС и сейсмической инверсии (Рис. 8-3) также видна удовлетворительная сходимость между скважинным и сейсмическим продольным Р-импедансом.

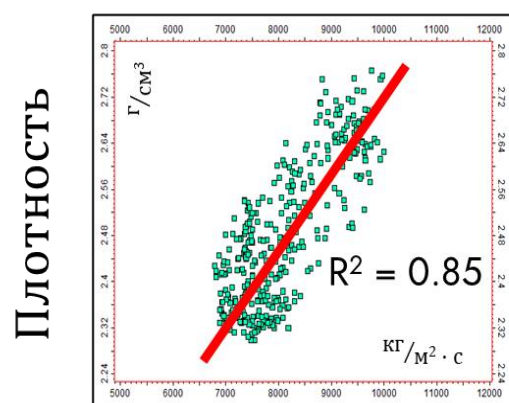
По полученным зависимостям были рассчитаны кубы скважинного Р-импеданса и S-импеданса и плотности. Наличие кубов скважинных импедансов и куба плотности позволило рассчитать кубы скоростей пробега Р-волн и S-волн, путем деления импедансов на плотность. Далее из кубов плотности, V_p и V_s , рассчитаны упругие модули (А, Б, В), из которых по формуле Рикмана получен куб хрупкости.

По полученному кубу хрупкости (Г) была построена карта средних значений ТАК (Рис. 10А). Средние значения хрупкости в точках скважин были сопоставлены с дебитами скважин (Рис. 10Б). На основании полученной корреляции между дебитами и хрупкостью была проведена отсечка хрупкости 0.4 д.е., т. к. скважины, расположенные в точках с хрупкостью менее 0.4 д.е., имеют незначительные притоки (менее 2 м³/сут). Скважины с хрупкостью более 0.4 в более приточные, дебиты достигают 170 т/сут. На Рис. 10В представлена корреляция начальных дебитов и толщин хрупких прослоев с отсечкой «Хрупкость > 0.4» в интервалах ТАК. Таким образом, толщина слоев в этих областях прямо связана с начальными показателями начальных дебитов скважин.

Из приведенного выше вытекает *защищаемое положение №3*: для ТАК установлена связь между суммарной толщиной хрупких интервалов и начальными дебитами скважин, позволяющая выделять перспективные зоны для бурения ГСМГРП.

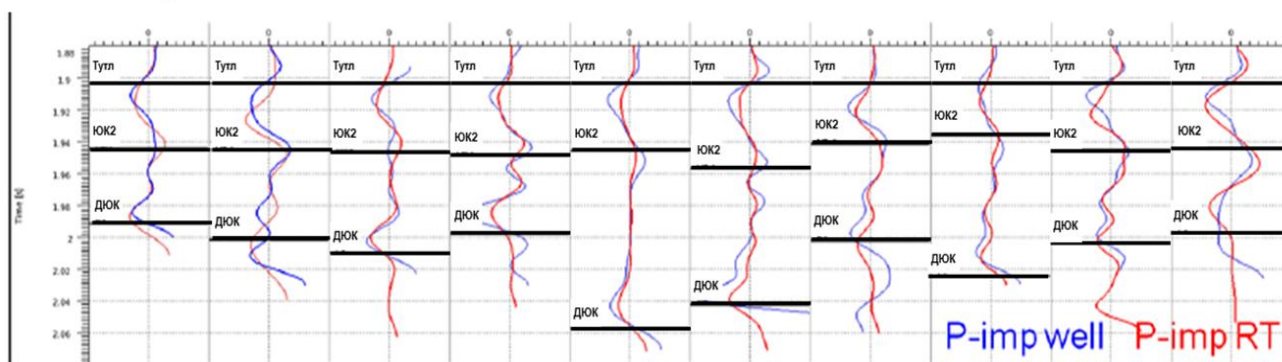


$P_{\text{импеданс}} \text{ (сейсмический)}$

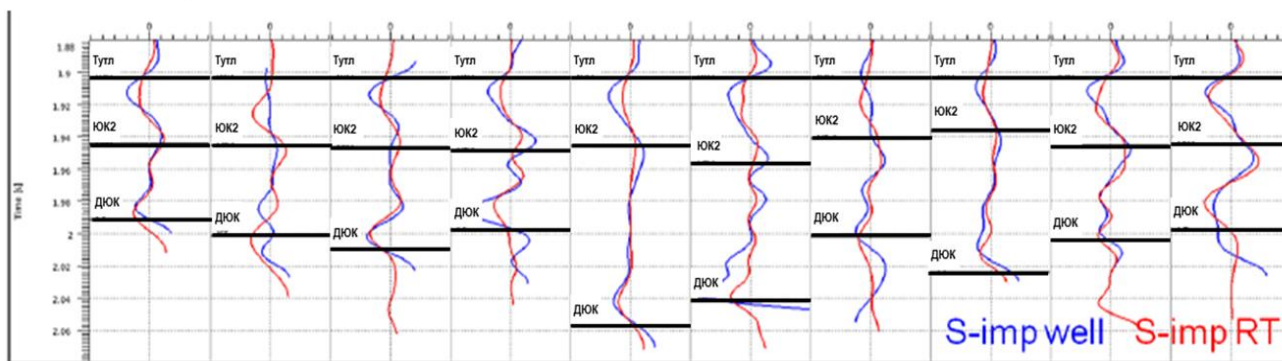


$P_{\text{импеданс}} \text{ (сейсмический)}$

Сравнение ПРОДОЛЬНОГО импеданса по ГИС и сейсмике



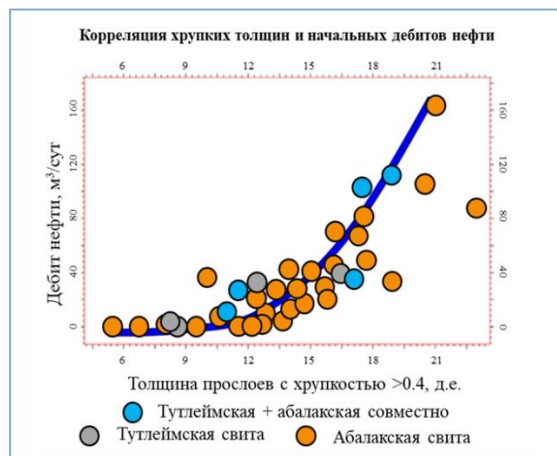
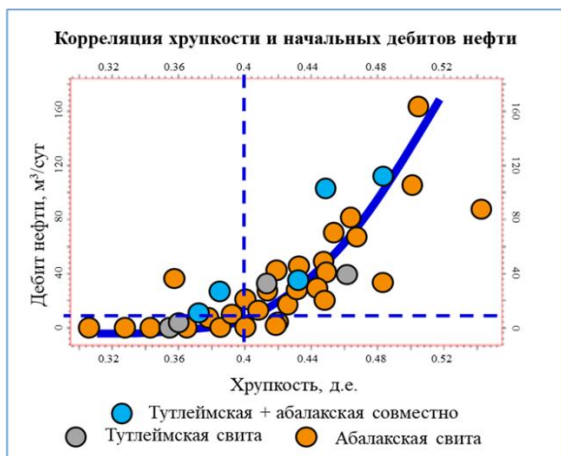
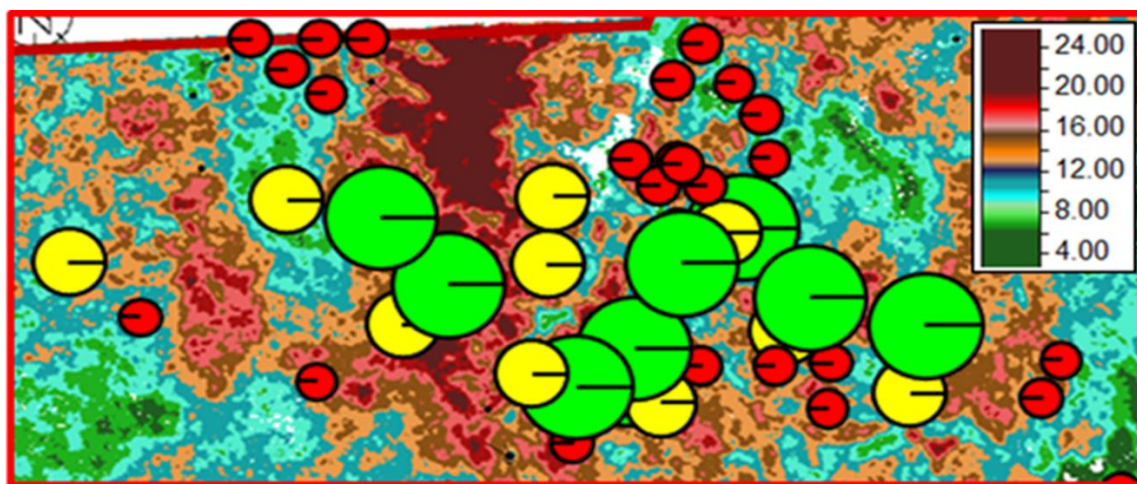
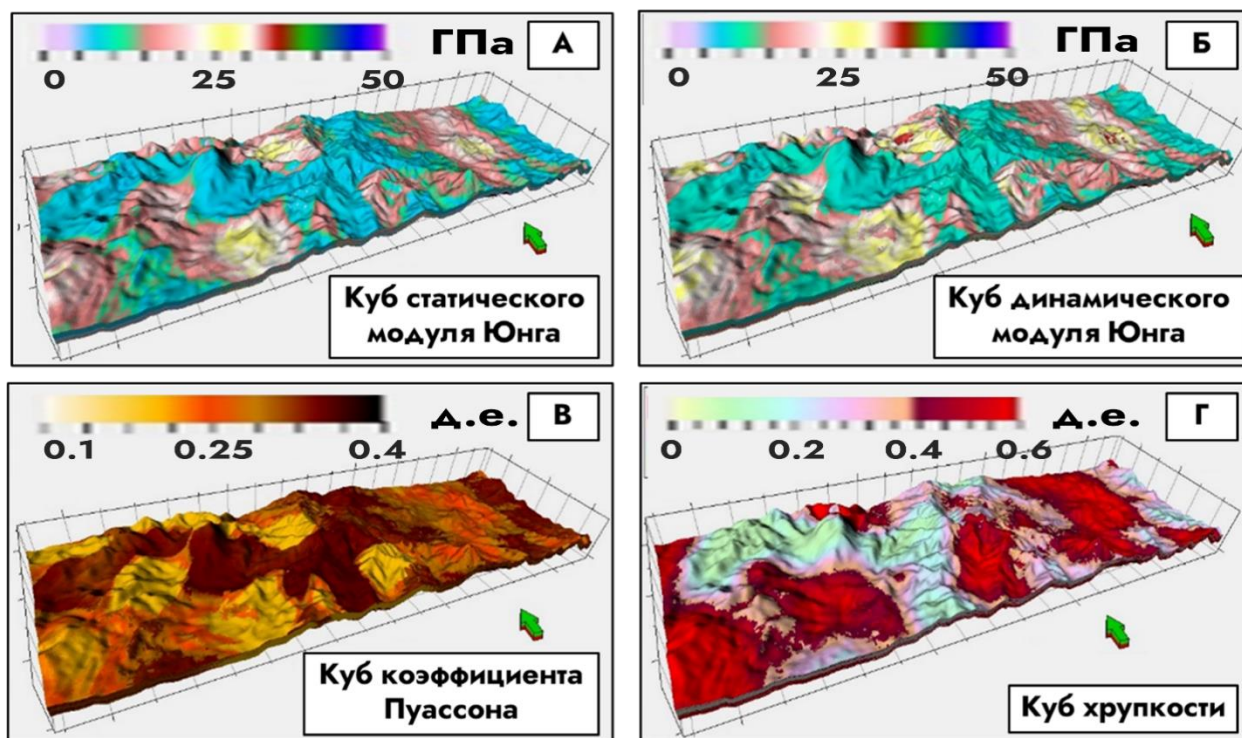
Сравнение СДВИГОВОГО импеданса по ГИС и сейсмике



■ $P_{\text{импеданс}} \text{ (сейсмический)}$

■ $P_{\text{импеданс}} \text{ (скважинный)}$

Рис. 8. 1 – корреляция скважинного и сейсмического продольного Р-импеданса; 2 – корреляция скважинной плотности и сейсмического продольного Р-импеданса; 3 – планшет с кривыми скважинного (красный) и сейсмического (синий) продольного Р-импеданса по линии скважин А-Б; 4 – линия скважин А-Б на карте площади



Дебиты нефти: ● 2-20 м³/сут ● >20 м³/сут ● Сухо или <2 м³/сут

Рис. 10. (А) Карта толщин хрупких прослоев тутлеймско-абалакского комплекса с нанесенными скважинами с наличием испытаний. Цвет на карте отражает суммарную толщину хрупких прослоев с хрупкостью более 0.4; (Б) Корреляция хрупкости и начальных дебитов нефти. Выделение отсечки по хрупкости; (В) Корреляция толщин хрупких прослоев и начальных дебитов нефти

Глава 5. Практическая значимость

В качестве практической значимости рассматривается решение двух концептуальных проблем с помощью геомеханической модели. Первая проблема связана с нестабильностью глинистых пород подошвенной части фроловской свиты, непосредственно над кровлей тутлеймской свиты. Для бурения через данные отложения важно корректно рассчитать диапазон плотности бурового раствора для избежания затяжек, посадок и прихватов. Вторая проблема связана с определением оптимальной траектории ГСМГРП в интервале ТАК.

Для геомеханического моделирования необходимой основой является специальный комплекс ГИС, который должен включать АКШ, ГГК-П, кавернометрию, ГК, БК и др. При этом исходные кривые ГИС должны охватывать весь разрез от дневной поверхности до забоя изучаемых отложений, т. к. рассчитываемые напряжения пород на определенной глубине зависят от веса вышележащих толщ, рассчитываемого по ГИС в этих толщах. Поскольку запись ГИС представлена не во всех интервалах скважин, было выполнено восстановление кривых акустических свойств и плотности [Юсупов, Калмыков, 2020].

Для оценки распределения напряжений вблизи стенки наклонной скважины применена методика Кирша [Kirsch, 1898]. На основе методики Кирша был выполнен расчет устойчивости ствола скважин, который представляет собой графики совмещенных градиентов давлений: градиентов горного и порового давления, градиентов обрушения, поглощения раствора и гидроразрыва пласта (Рис. 11). Модель устойчивости ствола скважины обобщает все ранее полученные результаты по расчету профилей порового давления, механических свойств, давлений гидроразрыва, профиля обрушения и т. д.

Основной интервал осложнений при бурении расположен в ослабленных глинистых породах основания фроловской свиты, непосредственно над кровлей тутлеймской свиты. Согласно проведенному анализу чувствительности, плотность бурового раствора при бурении фроловских глин непосредственно над тутлеймской свитой должна быть не менее 1.53-1.55 г/см³ (Рис. 11).

Направление бурения наклонно-направленной и горизонтальной скважины зависит от плана разработки месторождения. Необходимо выбирать

оптимальное направление траектории таким образом, чтобы сохранить устойчивость ствола скважины и выполнить поставленные задачи при ее эксплуатации. Оптимальное направление заложения ГС на изучаемой площади соответствуют азимуту минимального горизонтального напряжения S_{hmin} , равному 70-80°, т. к. это направление является самым оптимальным с точки зрения: а) стабильности ствола, б) максимизации искусственных трещин при проведении ГРП.

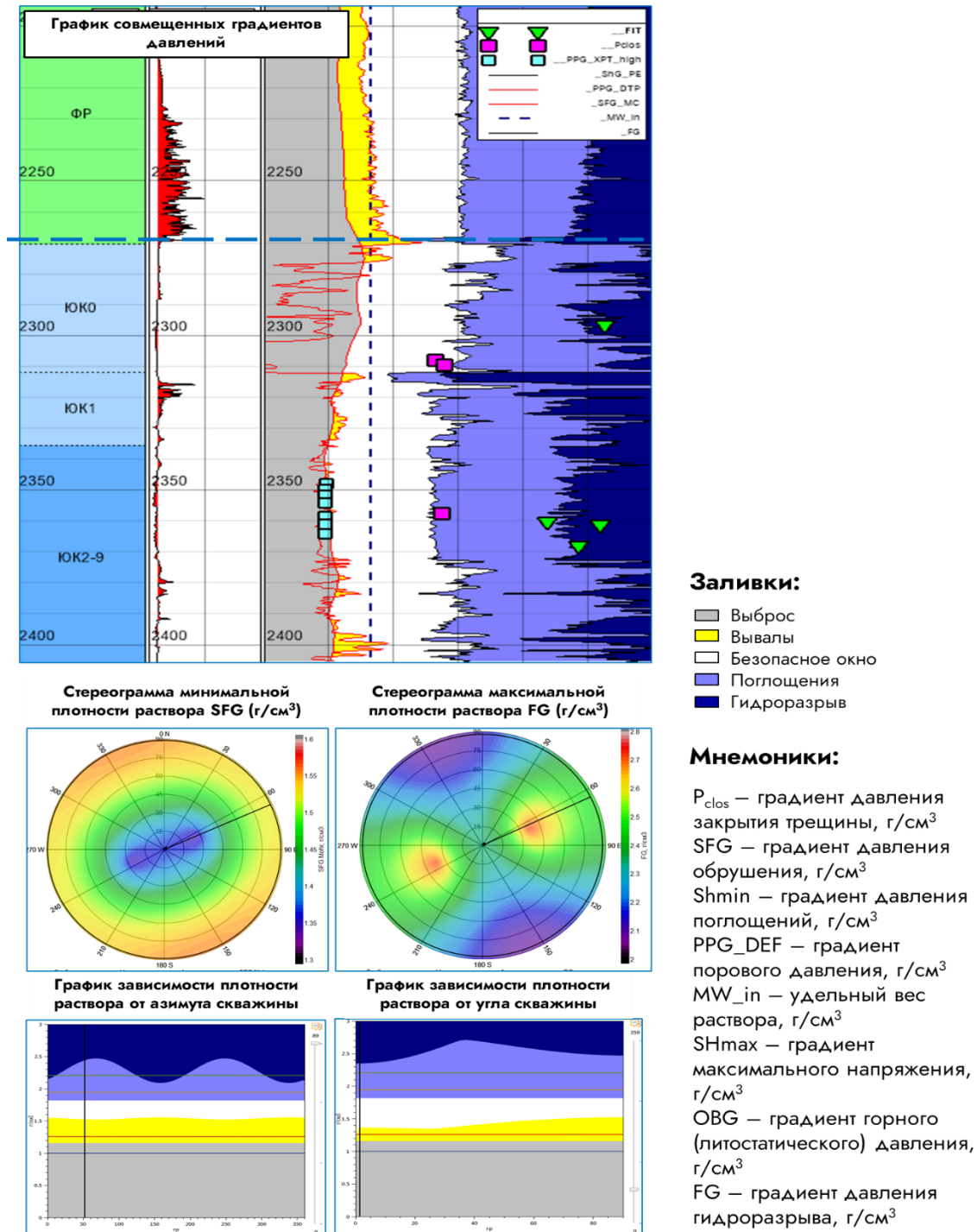


Рис. 11. Калибровка профилей минимального горизонтального напряжения и градиента ГРП

Заключение

1. Разработана методика прогнозирования интервалов в разрезе и перспективных зон на площади для бурения ГСМГРП с использованием геолого-механической модели ТАК.

2. На основе литомеханической типизации пород выделены восемь литомеханических типов в ТАК, каждый из которых обладает сходными геомеханическими свойствами и минерально-компонентным составом

3. Совместно с результатами определения преобразованности Сорг, давлений, ФЕС, минерально-компонентного состава изучение геомеханических свойств способствовало выделению в разрезе пород, склонных к эффективному разрыву и оценке условий для проведения успешного ГРП. Перспективными интервалами для технической стимуляции в разрезе ТАК являются породы кремнистого (5) и карбонатного (8) литомеханических типов как породы, обладающие наибольшей хрупкостью.

4. Хрупкие и нехрупкие интервалы разделяются отсечкой 0.4 д.ед., т. к. скважины, расположенные в точках с хрупкостью менее 0.4 д.е., имеют незначительные притоки (менее 2 м³/сут). Скважины с хрупкостью более 0.4 в более приточные, дебиты достигают промышленные значения.

5. Для ТАК установлена связь между толщиной хрупких интервалов и начальными дебитами скважин, позволяющая выделять перспективные зоны для бурения ГСМГРП.

6. Основной интервал осложнений при бурении расположен в ослабленных глинистых породах основания фроловской свиты, непосредственно над кровлей тутлеймской свиты. Согласно проведенному анализу стабильности ствола, рекомендуемая плотность бурового раствора при бурении фроловских глин не менее 1.53–1.55 г/см³.

7. Оптимальное направление заложения ГС на изучаемой площади соответствуют азимуту 70-80°

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете

МГУ по специальности 1.6.11:

1. **Юсупов Я.И.,** Калмыков Г.А. Петрофизическая подготовка данных ГИС для геомеханического моделирования на примере месторождения Краснотенинского свода (Западная Сибирь). ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 4. ГЕОЛОГИЯ. 2020;(6):103-109. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2020-6-103-109> (авторский вклад – 90%).
Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2022: 0.38 .

2. **Юсупов Я. И.,** Солдатова А. И., Заглядин Я.А, Калмыков Г.А. Литомеханическая типизация как основа выделения перспективных зон для бурения горизонтальных скважин и проведения ГРП на примере одного из месторождений Краснотеннинского свода. ГЕОФИЗИКА. 2024;(1)51-58. DOI: [10.34926/geo.2024.74.36.006](https://doi.org/10.34926/geo.2024.74.36.006) (авторский вклад – 80%). Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2022: 0.40.
3. **Юсупов Я. И.,** Солдатова А. И., Заглядин Я.А, Калмыков Г.А. Применение геомеханического моделирования для оптимизации траектории скважин при разработке тутлеймско-абалакского комплекса Краснотеннинского свода. ГЕОФИЗИКА. 2024;(1)59-66. DOI: [10.34926/geo.2024.15.91.007](https://doi.org/10.34926/geo.2024.15.91.007) (авторский вклад – 80%). Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2022: 0.40.