

Автономная некоммерческая образовательная организация  
высшего образования  
«Сколковский институт науки и технологий»

*На правах рукописи*



**ПОПОВ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ**

**РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕПЛОВОЙ ПЕТРОФИЗИКИ ДЛЯ  
ИЗУЧЕНИЯ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ И  
НЕТРАДИЦИОННЫМИ ЗАПАСАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных  
ископаемых

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук  
Баяк И.О.

Москва 2019 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕПЛОЙ ПЕТРОФИЗИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ И НЕТРАДИЦИОННЫМИ ЗАПАСАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	12
1.1. Повышение необходимости в данных о тепловых свойствах пород при решении актуальных задач нефтегазовой науки и индустрии и возможные пути улучшения качества этих данных.....	12
1.2. Анализ изученности тепловых свойств пород низкопроницаемых коллекторов углеводородов.....	20
1.3. Возможности и ограничения традиционных методов и средств измерений тепловых свойств пород при теплофизических исследованиях месторождений углеводородов.....	24
1.4. Совершенствование метода и аппаратуры оптического сканирования для исследований полноразмерного керна и стандартных образцов пород как путь к развитию экспериментальной базы нефтегазовой тепловой петрофизики.....	33
1.4.1. Основы метода оптического сканирования и традиционные области его применения.....	33
1.4.2. Актуальность создания метода непрерывного профилирования тепловых свойств керна скважин.....	39
1.4.3. Основные требования к совершенствованию метода оптического сканирования применительно к исследованиям полноразмерного керна и стандартных образцов пород месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов.....	42
ВЫВОДЫ.....	47
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕПЛОЙ ПЕТРОФИЗИКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ.....	49
2.1. Методика измерений тепловых свойств без применения покрытий для выравнивания оптических характеристик образцов керна и стандартных образцов пород.....	50
2.2. Методика измерений тепловых свойств с выравниванием оптических характеристик поверхности образцов при помощи пленочного покрытия.....	59
2.3. Повышение эффективности метода оптического сканирования путем модификации параметров режима измерений для создания метода непрерывного теплофизического профилирования керна скважин.....	61

2.3.1. Анализ температурного поля образцов пород при вариациях геометрических параметров источника тепла .....	62
2.3.2. Адаптация режима нагрева образцов пород к особенностям непрерывного профилирования тепловых свойств на керне коллекторов с нетрадиционными ресурсами углеводородов .....	67
2.3.3. Увеличение скорости сканирования как путь к повышению эффективности метода непрерывного теплофизического профилирования керна .....	74
2.3.4. Влияние перехода к эллиптической форме области нагрева и повышения скорости сканирования на метрологические характеристики измерений тепловых свойств пород.....	76
2.4. Оценка глубины зоны зондирования при теплофизическом профилировании керна методом оптического сканирования.....	87
2.5. Анализ пространственной разрешающей способности при профилировании тепловых свойств пород.....	91
ВЫВОДЫ.....	93
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ.....	95
3.1. Необходимость разработки новых лазерных приборов оптического сканирования..	95
3.2. Разработка лазерных установок оптического сканирования для профилирования тепловых свойств.....	97
3.3. Теплофизические исследования стандартных образцов пород .....	105
3.4. Определение тепловых свойств минеральной матрицы карбонатных пород .....	109
3.5. Анализ взаимосвязи теплопроводности и общего содержания органического вещества для пород баженовской свиты .....	111
3.6. Оценка степени тепловой анизотропии пород, обусловленной контрастом теплопроводности органического вещества и минеральной матрицы пород .....	120
3.7. Результаты исследований вариаций свойств пород в пределах образца на основе регистрации 2D распределения теплопроводности .....	122
3.8. Методика исследований ориентации неизометричного пустотного пространства пород на примере изучения керна Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6.....	129
3.9. Корректировка теоретической модели Лихтенеккера по результатам исследований стандартных образцов пород на примере карбонатных пород.....	138
3.10. Контроль свойств образцов пород в процессе лабораторных петрофизических исследований .....	142
ВЫВОДЫ.....	148

ГЛАВА 4. МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОРОД НА КЕРНЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ И НЕТРАДИЦИОННЫМИ ЗАПАСАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	150
4.1. Метод непрерывного теплофизического профилирования керна.....	151
4.2. Результаты непрерывного теплофизического профилирования керна оценочных скважин пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения.....	154
4.3. Связь результатов теплофизического профилирования с пористостью по данным ГИС.....	160
4.4. Степень тепловой неоднородности образцов пород как информативный параметр при анализе неоднородности разреза скважин.....	167
4.5. Определение тепловых свойств минеральной матрицы по результатам теплофизического профилирования керна и каротажа пористости.....	174
4.6. Взаимосвязь вариаций теплопроводности с вариациями скорости продольной упругой волны и плотности пород.....	178
4.7. Определение общего содержания органического вещества по результатам профилирования теплопроводности образцов пород баженовской свиты и доманиковой формации.....	181
4.7.1. Пути преобразования результатов измерений теплопроводности в данные об общем содержании органического вещества.....	182
4.7.2. Преобразование результатов измерений теплопроводности в данные об общем содержании органического вещества на основе теоретической модели эффективной теплопроводности.....	189
4.7.3. Результаты определения общего содержания органического вещества по результатам профилирования теплопроводности и сравнение с данными пиролиза.....	191
4.8. Использование измерений тепловых свойств для обоснованного отбора образцов керна для лабораторных исследований и контроля за изменениями их свойств в процессе петрофизических работ.....	204
ВЫВОДЫ.....	205
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ КЕРНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ И ДОМАНИКОВОЙ ФОРМАЦИИ.....	207

5.1. Применение метода непрерывного теплофизического профилирования керна для исследований месторождений углеводородов в баженовской свите и доманиковой формации.....	209
5.1.1. Виды информации о тепловых свойствах пород, регистрируемой при непрерывном профилировании керна .....	209
5.1.2. Обобщенные характеристики тепловых свойств пород баженовской свиты и вмещающих толщ .....	211
5.1.3. Обобщенные характеристики тепловых свойств пород доманиковой формации и вмещающих толщ .....	217
5.2. Сопоставление тепловых свойств пород баженовской свиты и доманиковой формации.....	221
5.3. Связь вариаций теплопроводности с вариациями скоростей упругих волн пород баженовской свиты.....	224
5.4. Повышение качества изучения анизотропии пород путем сочетания акустического каротажа и измерений теплопроводности на керне .....	227
5.5. Связь теплопроводности с плотностью и естественной радиоактивностью.....	231
ВЫВОДЫ .....	237
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	239
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	241

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

Рост требований к объему и качеству данных о тепловых свойствах пород-коллекторов и вмещающих пород обусловлен развитием тепловых методов добычи углеводородов, бассейнового моделирования, необходимостью расширения круга горных пород, используемых для изучения геологического строения месторождений углеводородов. Несмотря на важность исследований пород баженовской свиты и доманиковой формации, до последнего времени оставались малоизученными такие их базовые физические свойства, как теплопроводность, объемная теплоемкость, степень тепловой анизотропии, вариации этих свойств в масштабах месторождений и образцов пород. Актуальными являются задачи повышения качества данных о тепловых свойствах пород для повышения надежности оценок теплового потока, интерпретации результатов термометрии в скважинах. Решение этих задач требует развития экспериментальной базы тепловой петрофизики.

К важным задачам по повышению эффективности методов тепловой петрофизики относятся: переход к регистрации детального распределения комплекса тепловых свойств вдоль скважин, совершенствование аппаратно-методической базы для неразрушающих измерений тепловых свойств на керне и стандартных образцах пород, создание новых возможностей для определения тепловых свойств минеральной матрицы пород, информация о которых необходима при бассейновом моделировании и термогидродинамическом моделировании тепловых методов добычи тяжелых нефтей.

В условиях отсутствия эффективных решений для измерений тепловых свойств в скважинах актуальной стала разработка метода неразрушающего непрерывного профилирования тепловых свойств на всем полноразмерном керне скважин, что особенно важно при изучении пластов высоконеоднородных и анизотропных пород небольшой мощности, характерных для баженовской свиты и доманиковой формации. Такой метод, при установлении корреляционных связей этих свойств с другими свойствами пород, повысит качество исследований других свойств пород, таких как пористость, содержание органического вещества, состав порового флюида, скорости упругих волн, геомеханические свойства и др.

**Целью работы** является повышение надежности результатов решения таких важных задач, как термогидродинамическое моделирование тепловых методов добычи углеводородов, бассейновое моделирование, петрофизическое обеспечение работ по поиску, разведке и разработке месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными ресурсами углеводородов путем повышения качества экспериментальных данных о свойствах пород.

**Основными задачами работы**, в соответствии с поставленной целью, являются:

1. Развитие аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики на основе метода оптического сканирования путем усовершенствования режима измерений, подходов к подготовке образцов пород, разработки новых приборов, расширяющих области применения методов тепловой петрофизики.
2. Разработка метода непрерывного теплофизического профилирования керна скважин и создание возможности для комбинирования его с другими методами поточного профилирования свойств керна.
3. Разработка подходов к получению данных об общем содержании органического вещества, пористости, анизотропии и ряде других свойств пород месторождений углеводородов на основе применения усовершенствованной аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики и комплексирования теплофизических данных с данными ГИС.
4. Применение усовершенствованной аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики для теплофизических исследований месторождений трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов углеводородов.

#### **Научная новизна работы**

1. Установлены параметры режима измерений тепловых свойств пород-коллекторов методом оптического сканирования и разработаны способы подготовки образцов пород к измерениям, значительно уменьшающие тепловое и механическое воздействие на образцы керна, обеспечивающие их сохранность на стадиях подготовки и проведения измерений, не снижающие качество измерений и повышающие их производительность.
2. Разработаны автономный лазерный модуль оптического сканирования для комплексирования высокоразрешающего непрерывного теплофизического профилирования полноразмерного керна с механическим скретч-тестированием и профильными гамма-спектрометрическими исследованиями полноразмерного керна и мобильная лазерная установка оптического сканирования для измерений тепловых свойств пород на стандартных образцах пород, мелких фрагментах керна и синтетических образцах, используемых при исследованиях шлама.
3. Разработан метод изучения трещиноватости пород путем анализа вариаций главных значений тензора теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии при сочетании измерений на сухих и флюидонасыщенных образцах.
4. Разработан метод непрерывного бесконтактного высокоразрешающего теплофизического профилирования керна скважин и предложены подходы к обработке результатов его применения в совокупности с данными ГИС.

5. Разработан метод определения общего содержания органического вещества в породах баженовской свиты и доманиковой формации и регистрации его детальных пространственных вариаций вдоль скважин по результатам профилирования теплопроводности на керне.

6. Разработаны методы экспериментального определения тепловых свойств минеральной матрицы пород при сочетании исследований стандартных образцов пород, непрерывного профилирования тепловых свойств на керне и материалов ГИС.

7. По результатам обширных экспериментальных исследований с применением предложенных параметров измерений и новой аппаратурно-методической базы получены представительные данные о тепловых свойствах пород баженовской свиты и доманиковой формации, включая степень анизотропии и разномасштабной неоднородности пород.

Новизна результатов автора подтверждается, в частности, двумя патентами на изобретения.

### **Защищаемые научные положения**

1. Эллиптическая форма области нагрева, повышение скорости сканирования, и разработанные способы подготовки образцов пород к измерениям тепловых свойств обеспечивают снижение температуры нагрева образцов пород, повышение скорости измерений и сохранность образцов без ухудшения метрологических характеристик измерений методом оптического сканирования.

2. Лазерные приборы оптического сканирования обеспечивают комбинирование теплофизического профилирования с поточным профилированием свойств керна при помощи спектрального гамма-каротажа на керне и скретч-тестирования, измерения на стандартных образцах пород, а также позволяют характеризовать ориентацию неизометричного пустотного пространства и осуществлять систематический контроль изменений свойств образцов в процессе лабораторных петрофизических исследований.

3. Метод непрерывного высокоразрешающего профилирования тепловых свойств керна позволяет регистрировать распределение общего содержания органического вещества пород баженовской свиты и доманиковой формации вдоль скважин с высокой пространственной разрешающей способностью, а также определять вариации теплопроводности минеральной матрицы вдоль скважин для традиционных коллекторов.

4. Породы баженовской свиты и доманиковой формации обладают выраженной разномасштабной неоднородностью тепловых свойств. Коэффициент тепловой анизотропии этих пород изменяется в широких пределах как с глубиной, так и для различных образцов.

### **Личный вклад автора состоит в следующем:**

- усовершенствование метода оптического сканирования путем разработки новых режимов измерений и способов подготовки образцов пород к измерениям;

- участие в разработке автономного лазерного модуля оптического сканирования;
- разработка мобильного лазерного прибора оптического сканирования;
- разработка и внедрение метода непрерывного теплофизического профилирования керна скважин;
- проведение международного метрологического тестирования приборов оптического сканирования с традиционными средствами для измерений теплопроводности пород;
- расширение области применения тепловой петрофизики для анализа ориентации неизометричного пустотного пространства, определения тепловых свойств минеральной матрицы пород, общего содержания органического вещества, анализа вариаций вдоль скважин пористости, плотности, скоростей упругих волн и ряда других свойств пород в сочетании с данными ГИС;
- применение новых разработок для контроля изменений свойств образцов в процессе лабораторных петрофизических исследований;
- организация и участие в теплофизических исследованиях пород месторождений углеводородов на стандартных образцах и полноразмерном керне при помощи разработанной аппаратурно-методической базы тепловой петрофизики;
- участие в обработке, анализе и интерпретации результатов измерений комплекса тепловых свойств пород нефтяных месторождений.

**Практическая ценность работы** заключается в повышении эффективности методов тепловой петрофизики за счет повышения качества и объема информации о тепловых свойствах пород, установления новых связей тепловых свойств с другими свойствами пород, создания условий для формирования представительных баз данных о тепловых свойствах пород месторождений углеводородов для термогидродинамического моделирования резервуаров тяжелых нефтей при тепловых методах добычи и моделирования осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем. В период 2015-2019 гг. защищаемые разработки применены для изучения 30 месторождений, 13875 образцов керна для 44 скважин, вскрывших породы баженовской свиты, доманиковой формации и пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения тяжелой нефти. Результаты применения разработок автора использованы нефтяными компаниями РФ и рядом других организаций в 2015-2019 гг. для изучения месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов.

#### **Реализация и внедрение результатов исследований**

Описанные в диссертации аппаратурно-методические разработки автора применяются в Центре добычи углеводородов Сколковского института добычи углеводородов и явились основой работ по тепловой петрофизике, выполненных Центром по договорам с организациями ООО «Газпромнефть НТЦ», Филиалы ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермьНИПИнефть»,

«ПечорНИПИнефть», «КогалымНИПИнефть», ООО "Тюменский нефтяной научный центр", ООО «Самаранипинефть», ООО «НОВАТЭК» и для АО «НПЦ «Недра».

### **Апробация работы**

Основные положения работы докладывались на следующих научных форумах: International conference “Heat Flow and the Structure of the Lithosphere”, Trest, Czech Republic, 1996; Геотермическая конференция стран СНГ «Тепловое поле Земли и методы его изучения», Москва, 1997 г.; 14-я, 16-я, 17-я, 18-я, 19-я, 20-я Научно-практические конференции EAGE «Геомодель» (Геленджик, 2013-2018); Conference of Society of Petroleum Engineers - SPE Heavy Oil Conference, Calgary, Canada, 2013; 47<sup>th</sup> US Rock Mechanics. Geomechanics ARMA Symposium, USA, 2013; V World Heavy Oil Congress, New Orlean, USA, March 2014; International Petroleum Technology Conference IPTC-8, Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 December 2014; 21<sup>st</sup> World Petroleum Congress, Moscow, 2014; VIII Всероссийское литологическое совещание «Эволюция осадочных процессов в истории Земли», Москва, 2015; ISRM International Symposium EUROCK-2016, Cappadocia, Turkey, 2016; XXI Научно-практическая конференция «Новые ГИС технологии для нефтегазовых компаний», Уфа, 2016; конференция SPE «Разработка месторождений с карбонатными отложениями», Москва, 2017; совместные научно-практические семинары EAGE/SPE «Наука о сланцах: проблемы разведки и разработки», Москва, 2017 и 2019; Международный семинар TheOR-2018, Ченгду, КНР, 2018 г.

### **Публикации**

Результаты работы автора отражены в подготовленных им лично или с его участием в 10 отечественных научных статьях в журналах из списка ВАК, 4 статьях в зарубежных журналах, индексируемых в базах Web of Science и SCOPUS, 7 расширенных тезисах докладов в сборниках трудов конференций EAGE, ARMA и ISRM, индексируемых в базе SCOPUS, 2 патентах РФ, в разделе монографии.

Одна статья опубликована при единоличном авторстве, в 12 статьях и одном патенте автор работы является первым автором.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 256 страниц текста, 101 рисунок, 19 таблиц и библиографию из 184 наименований.

Автор глубоко благодарен научному руководителю д.ф.-м.н И.О. Баяк за большую помощь в работе и подготовке диссертации. Автор выражает искреннюю признательность директору Центра по добыче углеводородов Сколковского института науки и технологий к.х.н. М.Ю. Спасенных и профессору д.ф.-м.н. Ю.А. Попову за помощь в постановке задач и

проведении исследований, геологу Центра Р.А. Ромушкевич за геологический анализ коллекций, сотрудникам центра к.т.н. Е.М. Чехонину, к.г.-м.н. Н.Н. Богданович, к.г.-м.н. Е.В. Козловой, к.ф.-м.н. А.О. Гончарову и инж. А.П. Лазаренко за помощь в работе. Автор также считает своим долгом выразить благодарность профессору Сколтеха Д.В. Писаренко, к. ф.-м.н. С.С. Сафонову и к.т.н. А.В. Паршину за поддержку при организации исследований в период 2012-2015 гг. Автор благодарен М.И. Щербакову и руководимым им сотрудникам компании за конструкторскую помощь при разработке одного из лазерных приборов оптического сканирования. Быстрое внедрение разработок автора в нефтяную геофизику было бы невозможно без поддержки Д.Е. Заграновской (ООО «Газпромнефть НТЦ»), к.г.-м.н. В.П. Стенина, к.г.-м.н. И.П. Гурбатовой (ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»), профессора МГУ д.г.-м.н. Г.А. Калмыкова, которым автор выражает благодарность.

# **ГЛАВА 1. НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕПЛОВОЙ ПЕТРОФИЗИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ И НЕТРАДИЦИОННЫМИ ЗАПАСАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Развитие работ в области поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов в последние 15-20 лет привело к существенному повышению актуальности исследований, направленных на получение представительной информации о тепловых свойствах пород-коллекторов и вмещающих пород, что связано с расширением круга задач, решение которых требует надежных данных об этих свойствах пород. С этим связана и необходимость совершенствования аппаратурно-методической базы для экспериментальных исследований тепловых свойств, так как прежняя экспериментальная база перестала соответствовать возросшим требованиям к качеству экспериментальных данных о тепловых свойствах пород.

Обоснованию необходимости развития экспериментальной базы тепловой петрофизики и выбору путей ее развития применительно к современным задачам поиска, разведки и разработки месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов посвящена настоящая глава.

## **1.1. Повышение необходимости в данных о тепловых свойствах пород при решении актуальных задач нефтегазовой науки и индустрии и возможные пути улучшения качества этих данных**

На современном этапе следующие актуальные задачи нефтяной науки и промышленности требуют надежной информации о тепловых свойствах пород-коллекторов и вмещающих породах:

- гидродинамическое моделирование резервуаров высоковязких нефтей при методах добычи с разогревом пласта [8, 29, 36, 97, 98];
- моделирование температурного поля резервуаров с целью интерпретации результатов температурного мониторинга месторождений высоковязкой нефти при тепловых методах добычи [98];
- интерпретация результатов термометрии в скважинах оценка параметров теплопередачи в скважинах [77, 85];
- обеспечение исходными данными о тепловых свойствах пород работ по моделированию осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем [11, 34, 77, 125, 130, 159];
- геотермические исследования нефтегазоносных областей [34, 109, 129];

- использование тепловых свойств пород как одних из базовых физических свойств горных массивов для повышения эффективности изучения геологического строения месторождений углеводородов [35, 77, 108, 109, 125];

- привлечение новых технологий для повышения информативности исследований низкопроницаемых коллекторов (породы баженовской свиты, доманиковой формации и др.) [4, 77, 124, 125, 134, 137, 163, 177, 178, 180, 181];

- изучение анизотропии пород месторождений как важного фактора для месторождений с низкопроницаемыми коллекторами, а также в целях поддержки работ, обеспечиваемых широкополосным акустическим каротажем, в условиях, когда размытость стенок скважин не позволяют получать данные об анизотропии пород при помощи акустических методов каротажа [24];

- определение вертикальных вариаций плотности кондуктивного теплового потока при геотермических исследованиях, направленных на получение данных о глубинном тепловом потоке, необходимых для моделирования осадочных бассейнов и нефтегазовых систем [20, 21, 22];

- интерпретация вертикальных вариаций плотности кондуктивного теплового потока с целью получения информации о влиянии палеоклимата на тепловой режим недр, влиянии вариаций тепловых свойств пород как возможных причин рефракции теплового потока, анализа процессов тепломассопереноса в недрах [12, 18, 34, 40, 44, 46, 47, 48, 52, 77, 95, 96, 99, 100, 101, 105, 125, 140].

При решении большинства перечисленных задач требуются данные как о теплопроводности, так и об объемной теплоемкости (или температуропроводности) горных пород. Это является существенной особенностью современной тепловой петрофизики, так как ранее в годы активного развития фундаментальной геотермии основной проблемой являлось накопление экспериментальной информации о плотности теплового потока, который определялся прямым методом, требующим, помимо данных о градиенте температуры и теплогенерации пород, лишь экспериментальных данных об их теплопроводности. Последнее обстоятельство привело к тому, что ранее сформированные базы данных об объемной теплоемкости и средства для ее измерений оказались по своему качеству далекими от современных требований [161].

Работы по моделированию осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем требуют надежных данных о комплексе тепловых свойств пород и тепловом потоке. Геотермические исследования, проведенные в 1985-2010 гг. в рамках программ сверхглубокого континентального научного бурения в СССР, РФ и за рубежом, значительно изменили методику определений теплового потока и показали необходимость детальной регистрации вертикальных вариаций

теплопроводности пород и теплового потока и новых оценок глубинного теплового потока, что требует регистрации вертикальных вариаций теплопроводности пород (с шагом отбора керна 1-3 м, а желательно и с получением данных о непрерывном распределении теплопроводности вдоль скважин) и обязательного учета анизотропии пород [74, 75, 147].

При гидродинамическом моделировании и моделировании осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем серьезную проблему создает необходимость получения исходных данных о задании теплопроводности и объемной теплоемкости минеральной матрицы пород [11, 129], что до последнего времени являлось весьма серьезной, трудноразрешимой проблемой и не могло быть осуществлено достаточно надежным путем.

Известно, что теплопроводность и объемная теплоемкость относятся к числу базовых физических свойств пород и могут играть важную роль при изучении геологического строения месторождений углеводородов [108, 109]. Однако использование тепловых свойств в этих целях до самого последнего времени было существенно ограничено в связи с отсутствием представительных баз данных о тепловых свойствах осадочных пород, серьезными трудностями при получении экспериментальных данных о пространственных вариациях тепловых свойств пород в пределах месторождений, крайним недостатком данных о тепловой анизотропии и разномасштабной неоднородности резервуаров. Указанные проблемы во многом связаны с отсутствием практически значимых результатов по созданию теплового (т.е. направленного на измерения тепловых свойств) каротажа в скважинах [41] и возможности непрерывного профилирования тепловых свойств на керне при исследованиях месторождений.

Значимость изучения тепловых свойств пород месторождений углеводородов с низкопроницаемыми коллекторами высока в связи с тем, что, как и при добыче высоковязких нефтей, в качестве потенциальных или реально применяемых методов добычи рассматриваются различные методы теплового воздействия на пласт [8]. Это определяет высокую важность получения надежных данных о комплексе тепловых свойств пород, которые при всех подобных методах добычи определяют тепловой режим резервуаров и, следовательно, правильный выбор и оптимизацию технологии добычи и надежность оценки ее эффективности. Возможность высокой анизотропии свойств пород низкопроницаемых коллекторов выдвигает специфические требования к проведению исследований тепловых свойств пород, так как в таком случае получение представительных данных о степени анизотропии и ее пространственных вариациях в пределах месторождений с нетрадиционными ресурсами в баженовской свите и доманиковой формации является обязательным.

Указанные выше проблемы с часто имеющейся в настоящее время неопределенностью данных о тепловых свойствах сказываются при моделировании осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем, так как практикуемые при этом оценки теплопроводности пород при

помощи теоретических моделей приводят к значительным погрешностям в исходных данных, что может приводить к серьезным ошибкам в результатах моделирования.

Таким образом, обеспечение гидродинамического и бассейнового моделирования надежными экспериментальными данными о тепловых свойствах пород является одним из путей к повышению надежности результатов моделирования.

Проблему обеспечения вышеуказанных задач данными о тепловых свойствах пород можно разделить на две практически самостоятельные задачи. Задача 1 заключается в получении представительных данных о пространственных вариациях тепловых свойств пород с учетом их разномасштабной неоднородности, анизотропии, влияния вариаций пористости и состава поровых флюидов при атмосферных условиях. Задача 2 состоит в определении влияния пластовых термобарических условий – температуры и давления – на тепловые свойства пород. Большинство работ в области экспериментальной тепловой петрофизики и геотермии посвящены решению задачи 1, которая сама по себе актуальна во всех случаях, когда требуется изучение тепловых свойств геологических объектов. Решение задачи 2 представляет собой, по сути, достаточно самостоятельное направление в тепловой петрофизике [38, 39, 49, 85, 90, 106, 139]. При решении задачи 2 часто ограничиваются введением характерных поправок на пластовые условия, известных по литературным данным [165]. В тех случаях, когда информация о тепловых свойствах требуется для изучения неоднородности и анизотропии пород месторождений углеводородов и других геологических объектов на стадиях их разведки, достаточными являются исследования тепловых свойств при атмосферных условиях. Даже в случаях, когда имеются необходимость и возможность измерений тепловых свойств при пластовых условиях, измерения при атмосферных условиях имеют важное значение, так как именно детальные результаты этих измерений позволяют осуществить обоснованный отбор образцов керн и участков в пределах этих образцов с учетом неоднородности, степени анизотропии и вариаций пористости пород для изготовления малых образцов специальных форм и размеров для последующих лабораторных измерений при пластовых условиях [153, 164].

Совершенствованию аппаратурно-методической базы для решения задачи 1, разработке методических приемов для применения этой базы при изучении осадочных пород и применению усовершенствованной базы для исследования месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными ресурсами углеводородов посвящена настоящая работа.

В настоящее время возможны следующие принципиальные подходы к получению данных о тепловых свойствах пород:

- тепловой каротаж с измерениями тепловых свойств при помощи скважиной аппаратуры [7, 41, 118, 133];

- оценка тепловых свойств по результатам измерений температуры в скважине во время переходных тепловых процессов в ней [108, 115];
- оценка тепловых свойств по результатам определения равновесного градиента температуры и по данным о кондуктивном тепловом потоке на изучаемом интервале глубин [115, 164];
- использование теоретических моделей тепловых свойств, позволяющих осуществлять оценку тепловых свойств по данным о минеральном составе, тепловых свойствах породообразующих минералов, пористости, геометрических характеристиках порового пространства, тепловых свойствах порового флюида [113, 114, 122, 127, 135];
- использование баз данных, позволяющих получать данные о тепловых свойствах определенного типа пород по результатам прежних измерений [19, 109];
- оценка тепловых свойств по результатам измерений других физических свойств при условии наличия данных о корреляционных связях тепловых и других свойств [171, 182];
- измерения тепловых свойств на буровом шлеме или на неконсолидированных породах [164];
- измерения на керне [19, 21, 46, 47, 102, 119, 161].

Наиболее активные усилия для разработки и реализации метода теплового каротажа для измерений теплопроводности были предприняты в Германии, когда бурение сверхглубокой скважины КТВ пришлось осуществлять без отбора керна [118] и в Финляндии для измерений в скважинах малого диаметра (50 мм) [133]. В первом случае прибор прошел стадию тестирования, но для практических целей в дальнейшем не нашел применения, так как измерения при помощи данного прибора требовали длительной остановки зонда, пакерования и удаления скважинной жидкости из пространства между пакерами, заполнения межпакерного пространства специальным тиксотропным высоковязким веществом, исключая конвекцию при нагреве зонда при теплофизических измерениях. Прибор для измерений в скважинах малого диаметра периодически используется в Финляндии на практике для измерений теплопроводности. Попытки модифицировать его для дополнительных измерений температуропроводности [41] и для скважин большего диаметра успеха не принесли. Другие многочисленные попытки создания скважинных зондов для измерений тепловых свойств оказались практически безуспешными во многом из-за комбинации серьезных отрицательных факторов: значительного возмущения температурного поля в скважине конвекцией скважинного флюида, возникающей при включении нагревателя, высокой продолжительности процесса измерений, низкого качества результатов измерений и ряда других причин [41]. В настоящее время измерения тепловых свойств в скважинах применительно к задачам поиска, разведки и разработки месторождений углеводородов в РФ и за рубежом практически не проводятся.

Несмотря на большое разнообразие теоретических моделей для определений тепловых свойств неоднородных сред [122], в настоящее время теоретическое моделирование не обеспечивает требуемое качество данных об эффективной теплопроводности осадочных горных пород в отличие, например, от упругих свойств [5, 110, 111]. Так, в работах [102, 119] показано, что отличие оценок теплопроводности по различным теоретическим моделям часто находится в диапазоне 100-500 %. Наиболее распространенная в геотермии и тепловой петрофизике теоретическая модель Лихтенеккера (среднего геометрического) [135], не способна учесть анизотропию пород, не адаптирована для осадочных пород-коллекторов и не может обеспечить удовлетворительное качество оценок их теплопроводности [59, 148]. В то же время, в настоящее время основой введения исходных данных о тепловых свойствах пород для бассейнового и гидродинамического моделирования является именно использование теоретических моделей теплопроводности и объемной теплоемкости [102, 119, 129], что приводит к серьезным неопределенностям в результатах моделирования. Дополнительная проблема в этих случаях связана с необходимостью задания тепловых свойств минеральной матрицы пород, что само по себе до самого последнего времени являлось трудноразрешимой задачей. Как показано в работах [102, 119], ввод исходных данных о тепловых свойствах пород по результатам на основе оценок по теоретическим моделям теплопроводности и объемной теплоемкости, используемым в данных симуляторах, вместо использования надежных экспериментальных данных приводит к значительным погрешностям в исходных данных об этих свойствах при гидродинамическом моделировании тепловых методов добычи высоковязких нефтей. В итоге это приводит к значительным ошибкам (до 60-75%) в оценках достигаемой добычи и необходимых объемов теплоносителя при разработке тепловых методов добычи [83, 102, 119, 149]. Гидродинамическое моделирование добычи нефти при закачке в скважины холодной воды проводится в большинстве случаев с применением тех же гидродинамических симуляторов, также связано с необходимостью задания исходных данных о комплексе тепловых свойств минеральной матрицы пород и использованием теоретических моделей тепловых свойств, в связи с чем сталкивается с вышеуказанными серьезными трудностями. Получение надежных экспериментальных данных является необходимым и в этом случае.

Использование ранее полученных экспериментальных данных и созданных баз данных о тепловых свойствах пород-аналогов достаточно распространено в практике тепловой петрофизики и геотермии. Вместе с тем, даже незначительные изменения в минеральном составе, пористости, геометрии порового и трещиноватого пространства, анизотропии, составе порового флюида могут значительно, на десятки процентов, изменять как теплопроводность, так и объемную теплоемкость осадочных пород. Существующие базы данных по тепловым свойствам осадочных пород характеризуются, как правило, следующими серьезными недостатками: (1)

крайне незначительный объем данных об объемной теплоемкости/температуропроводности, (2) крайне малый объем данных о тепловой анизотропии пород, (3) отсутствие подробного литологического описания изучавшихся коллекций пород, (4) отсутствие данных об изменениях тепловых свойств пород при изменениях свойств порового флюида в полном спектре его возможных вариаций (газ, вода, нефть, различная нефтенасыщенность), (5) отсутствие данных об изменениях тепловых свойств при вариациях пористости. В связи с этим, несмотря на значительный объем ранее проведенных экспериментальных исследований тепловых свойств осадочных пород, проведение экспериментальных исследований на коллекциях образцов пород для вновь изучаемых месторождениях является необходимым.

Наличие информации об устойчивых тесных связях между тепловыми свойствами пород и другими физическими свойствами пород (пористость, скорости упругих волн, электрические свойства и др.) могло бы служить для прогноза тепловых свойств по результатам измерений других свойств. Однако в настоящее время такие данные являются труднодоступными, объем публикаций на данную тему достаточно ограничен и возможные вариации в минеральном составе, пористости, трещиноватости, анизотропии, составе поровых флюидов не позволяют в большинстве реальных случаев использовать такой подход для получения достаточно надежных данных о тепловых свойствах осадочных пород, в связи с чем прогнозирование тепловых свойств пород на основе корреляционных связей [31] также требует проведения исследований с обеспечением надежных экспериментальных данных о комплексе свойств пород.

В практике экспериментальных геотермических исследований известен подход, когда теплопроводность пород определяют из уравнения Фурье для кондуктивного стационарного процесса теплопроводности по измеренным значениям градиента температуры и плотности кондуктивного теплового потока [115]:

$$\lambda = \frac{q}{|\text{grad}T|}, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  - теплопроводность пород,  $q$  – плотность кондуктивного теплового потока,  $\text{grad} T$  – градиент температуры. Однако на практике такой подход может быть применен лишь в случаях, когда с достаточно высокой точностью определена плотность кондуктивного теплового потока, что является на практике труднорешаемой задачей. Кроме того, в данном случае затруднена регистрация вертикальных вариаций теплопроводности с пространственной разрешающей способностью в несколько десятков сантиметров, что часто необходимо при изучении геологического строения месторождений. Это является причиной того, что в практике петрофизических и геотермических исследований данный подход применяется крайне редко.

Предложено достаточно много вариантов подходов для определений теплопроводности пород горных массивов при регистрации пространственно-временных вариаций температуры

при измерениях температуры в скважинах. Однако на практике подобные подходы практически не применяются.

Общим серьезным недостатком вышеописанных методов определений тепловых свойств является то, что в большинстве случаев они могут предоставить информацию лишь о теплопроводности и не позволяют получать достаточно надежных данных об объемной теплоемкости пород при насыщении их разными флюидами и при разной пористости.

В итоге, несмотря на разнообразие возможных подходов по определению тепловых свойств пород, на практике в подавляющем большинстве случаев при необходимости получить возможно более надежные данные о теплопроводности, объемной теплоемкости (температуропроводности), степени тепловой анизотропии пород используют лабораторные измерения при атмосферных условиях на образцах пород. В этих случаях для измерений используются образцы полноразмерного керна, извлекаемого при бурении скважин, его малогабаритные дубликаты, получаемые при распиловке керна вдоль его оси (так называемые «горбушки»), стандартные образцы пород (цилиндры диаметром 30 мм и высотой 30 мм или других размеров) или образцы специальных размеров и форм, изготовленные из керна специально для измерений тепловых свойств. Известны немногие случаи, когда измерения теплопроводности осуществляют на неконсолидированных породах или буровом шламе [164, 175].

Вместе с тем, широко используемые для экспериментальных исследований традиционные методы и средства измерений тепловых свойств на образцах пород обладают серьезными недостатками, подробно анализируемыми в разделе 1.3. Действующий ГОСТ 25499-82 «Породы горные. Метод определения коэффициента теплопроводности» [14] требует изготовления «плоскопараллельных дисков диаметром от 40 до 50 мм и толщиной от 4 до 5 мм или квадратиков со стороной от 40 до 50 мм и толщиной от 4 до 5 мм для мелко- и среднезернистых горных пород» [14]. Кроме того, «поверхность образцов должна быть ровной, гладкой, без трещин, вмятин, царапин, посторонних включений и прочих дефектов». Указанные требования трудновыполнимы для высокопористых и трещиноватых пород-коллекторов, в особенности в случаях, когда образцы пород необходимо насыщать флюидами. Практически невыполнимым является и требование данного ГОСТа использовать для измерений два одинаковых образца породы ввиду того, что в большинстве случаев породы существенно неоднородны даже на уровне образцов керна.

## **1.2. Анализ изученности тепловых свойств пород низкопроницаемых коллекторов углеводородов**

Надежные данные о тепловых свойствах пород имеют важное значение для работ по поиску, разведке и разработке месторождений с нетрадиционными ресурсами углеводородов, в число которых входят месторождения, расположенные в баженовской свите и доманиковой формации. Это связано с перспективой добычи расположенных здесь углеводородов с нагревом продуктивных пластов и необходимостью контроля за их тепловым режимом при помощи температурного мониторинга.

Вместе с тем, объем исследований тепловых свойств пород доманиковой формации и баженовской свиты в РФ до последнего времени был крайне мал. Исследования тепловых свойств пород баженовской свиты и пород коллекторов низкопроницаемых коллекторов углеводородов за рубежом также проводились в незначительном объеме. Так, за рубежом общий объем коллекций образцов горных пород аналогов баженовской и доманиковой свит, изучавшихся при помощи традиционных методов и средств измерений, не превысил 250-300 образцов. Во многом эти работы сдерживались существенно ограниченными возможностями традиционных средств для экспериментальных исследований тепловых свойств нефтяных сланцев.

До 2014 г. в РФ и за рубежом практически не проводились работы с целью применения детальных данных о комплексе тепловых свойств пород низкопроницаемых коллекторов углеводородов в рамках работ по разведке месторождений с нетрадиционными ресурсами углеводородов. Исследования были направлены, в основном, на решение следующих задач [2, 93, 107, 124, 134, 137, 163, 167, 177, 178, 180, 181]:

- задача 1 - установление диапазонов вариаций теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости для различного рода моделирования резервуаров, требующего исходных данных о тепловых свойствах пород;
- задача 2 - выявление основных факторов, определяющих вариации тепловых свойств пород;
- задача 3 - сопоставление диапазонов вариаций тепловых свойств пород для различных месторождений с нетрадиционными ресурсами углеводородов;
- задача 4 - исследования корреляций тепловых свойств с другими свойствами пород.

При исследованиях с целью решения указанных задач в большинстве случаев применялись традиционные методы измерений, разработанные в промышленной теплофизике: метод «разделенного стержня» и метод линейного источника, для которых в полной мере характерны недостатки, описанные ниже в разделе 1.3.

В таблице 1.1 приведены результаты исследований зависимости теплопроводности сланцев от содержания керогена, приведенные в работе [4] и соответствующие решению задач 1,

2 и 4. Из таблицы 1.1 следует, что теплопроводность сланцев существенно зависит от содержания керогена. По данным таблицы 1 нами построен график (рисунок 1.1), позволяющий сделать оценку теплопроводности керогена, поскольку при содержании керогена, приближающейся к 100%, теплопроводность сланцев приближается к теплопроводности керогена. Согласно нашим результатам экстраполяции данных работы [4] (рисунок 1.1), при содержании керогена, близком к 100%, теплопроводность сланцев, а следовательно и теплопроводность керогена, не выходит за границы диапазона 0,08-0,17 Вт/(м·К) (рисунок 1.1).

Таблица 1.1. Зависимость теплопроводности сланцев от содержания керогена [4].

**Теплопроводность сланца в зависимости от содержания керогена и температуры,  $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$**

Содержание керогена, %	Теплопроводность сланца в порошке при температурах, $\text{°C}$				Теплопроводность сланца в куске при температурах, $\text{°C}$			
	0	20	50	100	0	20	50	100
5	0,320	0,326	0,335	0,350	0,527	0,538	0,554	0,582
10	0,190	0,196	0,205	0,220	0,317	0,328	0,344	0,372
15	0,147	0,153	0,162	0,177	0,247	0,258	0,274	0,302
20	0,125	0,134	0,140	0,155	0,212	0,223	0,240	0,267
25	0,112	0,118	0,127	0,142	0,191	0,202	0,218	0,246
30	0,103	0,109	0,118	0,133	0,177	0,188	0,204	0,232
35	0,097	0,103	0,112	0,127	0,167	0,178	0,194	0,222
40	0,092	0,098	0,107	0,122	0,160	0,171	0,188	0,215
45	0,089	0,095	0,104	0,119	0,154	0,165	0,182	0,209
50	0,086	0,092	0,101	0,116	0,149	0,160	0,176	0,204
55	0,084	0,090	0,099	0,114	0,145	0,156	0,172	0,200
60	0,082	0,088	0,097	0,112	0,142	0,153	0,170	0,197
65	0,080	0,086	0,095	0,110	0,139	0,150	0,166	0,194
70	0,079	0,085	0,094	0,109	—	—	—	—
80	0,076	0,082	0,091	0,106	—	—	—	—
90	0,074	0,080	0,089	0,104	—	—	—	—

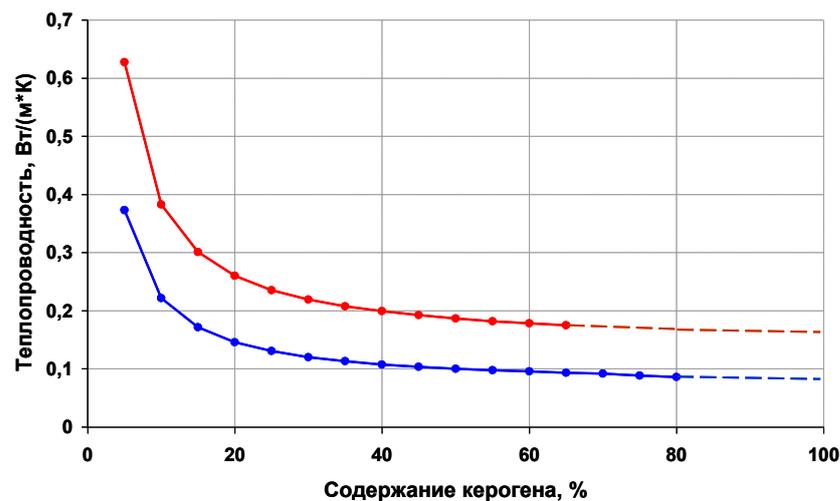


Рисунок 1.1. – Зависимость теплопроводности сланцев от содержания керогена, построенная автором по данным работы [4], приведенным в таблице 1.1 (данные из таблицы 1.1 приведены на данном рисунке в единицах СИ). Синий цвет – результаты измерений на порошке, красный цвет – результаты измерений на твердых образцах пород. Пунктирные линии дополнены по результатам экстраполяции для прогноза теплопроводности керогена (в случаях, когда его концентрация достигала бы 100 %)

На рисунке 1.2 приведены опубликованные в работе [163] результаты исследований зависимости теплопроводности сланцев формации Грин Ривер (Green River) от плотности (левая панель на рисунке 1.2) и содержания органического вещества (правая панель на рисунке 1.2). Данные на рисунке 1.2 подтверждают определяющую роль содержания органического вещества для значений теплопроводности и показывают тесную связь теплопроводности с плотностью, что, по нашему мнению, также обусловлено влиянием содержания органического вещества, поскольку его плотность ( $\sim 1,3 \text{ г/см}^3$  согласно данным работы [91]) существенно отличается от плотности минеральной матрицы пород ( $2,3\text{-}2,7 \text{ г/см}^3$ ). Данные на правой панели рисунка 1.2 хорошо соответствуют вышеприведенным данным из работы [4] о сильной зависимости теплопроводности от содержания органического вещества. В работе [163] авторы, проводившие измерения методом линейного источника [161], измеряли и анализировали компоненту теплопроводности  $\lambda_{//}$  вдоль напластования и параметр  $(\lambda_{//}\cdot\lambda_{\perp})^{1/2}$ . Согласно особенностям данного метода, параметр  $(\lambda_{//}\cdot\lambda_{\perp})^{1/2}$  представляет собой «кажущуюся» теплопроводность, которая представляет собой результат измерений методом линейного источника в случае, когда линейных зонд ориентируют на поверхности образца перпендикулярно плоскости напластования. Интересно, однако, что авторы работы [163] при своих исследованиях не использовали возможность определять теплопроводность  $\lambda_{\perp}$  и не оценивали коэффициент тепловой анизотропии сланцев по полученным ими результатам измерений.

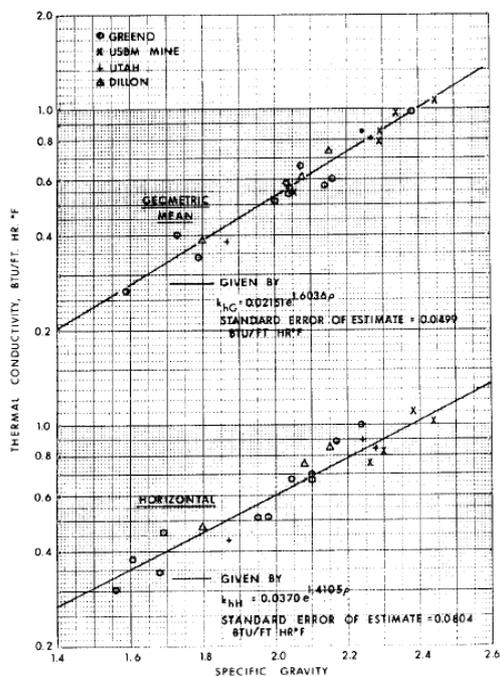


Fig. 3—Values of the horizontal and geometric mean thermal conductivity measured at room temperature as a function of specific gravity.

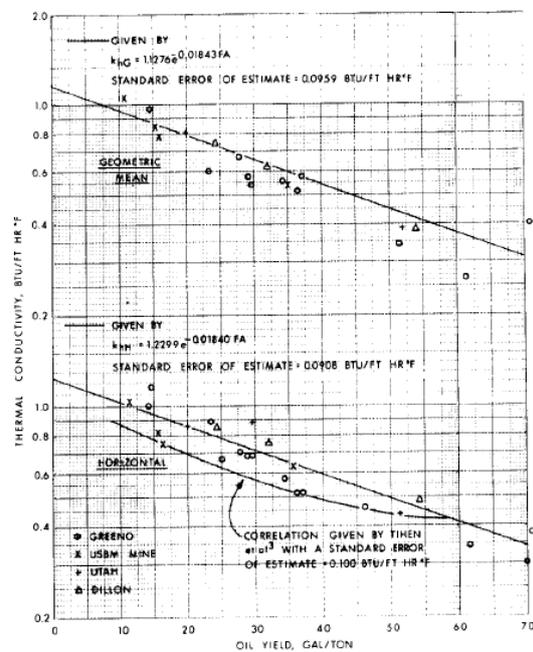


Fig. 4—Values of the horizontal and geometric mean thermal conductivity measured at room temperature as a function of oil yield.

Рисунок 1.2. – Результаты исследований зависимости теплопроводности сланцев от плотности (левая панель) и содержания органического вещества (в галлонах на тонну, правая панель) [163]. Оригинальные подписи на английском языке приведены с целью обеспечить читателю более полный доступ к информации, содержащейся в публикации-оригинале.

Зависимость теплопроводности сланцев формации Грин Ривер от содержания органического вещества установлена и в исследованиях, описанных в [167] (рисунок 1.3). Следует заметить, что в работе [167] не исследовалась и не учитывалась тепловая анизотропия сланцев, что, хотя и для недостаточно представительных коллекций образцов пород, было учтено в работах [22, 61, 65, 71, 163] и что было подробно изучено автором для пород баженовской свиты и доманиковой формации (глава 5).

Отдельные исследования тепловых свойств нефтяных сланцев в РФ были направлены на накопление данных о диапазонах вариаций теплопроводности баженовской свиты и связи данных вариаций с особенностями минерального состава и структурно-текстурных особенностей пород. Так, А.Д. Дучковым, Л.С. Соколовой и сотрудниками руководимой ими научной группы в разные годы была изучена теплопроводность нескольких достаточно представительных коллекций образцов пород баженовской свиты [2, 22, 93]. Некоторые работы были посвящены обобщению ранее полученных данных, например, работа [107].

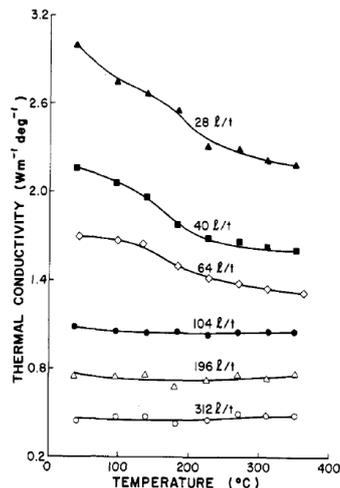


Figure 1. Dependence of thermal conductivity on temperature for Utah shales. Oil yield is shown as the parameter.

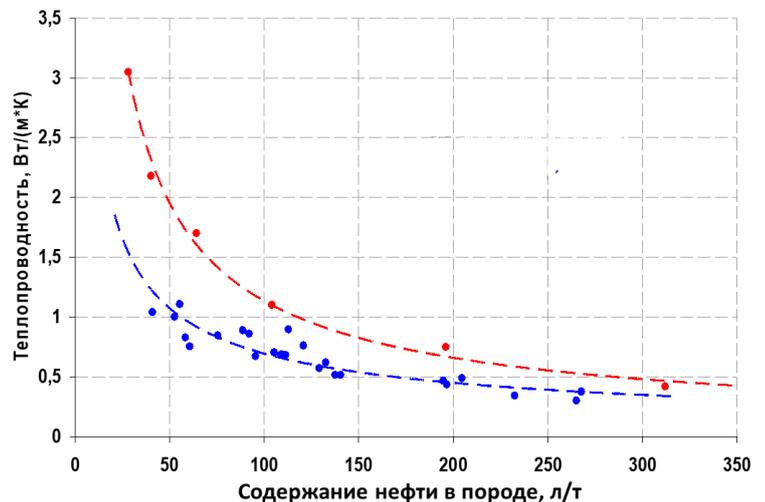


Рисунок 1.3. – Левая панель - данные о зависимости теплопроводности сланцев формации Грин Ривер (Green River) от температуры при разном содержания нефти в породе (“oil yield” в литрах на тонну) согласно результатам измерений [167]. Правая панель: синий цвет – зависимость теплопроводности от содержания нефти в породах, построенные автором по результатам измерений, приведенным в работе [163] и на рисунке 1.2 и отраженным синими точками на правой панели; красный цвет – зависимость теплопроводности от содержания нефти в породах, построенные автором по результатам измерений, приведенным в работе [163] и на левой панели рисунка 1.3 и отраженным красными точками на правой панели.

В 1990-е годы тепловые свойства пород баженовской свиты изучались нами в рамках работ Научно-исследовательской лаборатории геотермии Московского геологоразведочного института при помощи технологии оптического сканирования на коллекции образцов керна, отбиравшихся приблизительно через каждые 2-3 м вдоль Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6 в рамках Программы континентального научного бурения [74].

Целенаправленные исследования тепловых свойств пород низкопроницаемых коллекторов сначала баженовской свиты, а затем и доманиковой формации были начаты нами в 2014 г. (раздел 3.3, глава 5).

Охарактеризованное выше наличие связи теплопроводности с содержанием органического вещества для пород низкопроницаемых коллекторов углеводородов, в частности, делает целесообразным создание метода непрерывного профилирования керна скважин, пробуренных в подобных коллекторах, например, в баженовской и доманиковой свитах, поскольку это могло бы, при создании подходов для преобразования данных о теплопроводности в данные содержания органического вещества, обеспечить высокоразрешающую непрерывную регистрацию вариаций содержания органического вещества вдоль скважин. Это существенно дополнило бы возможности применяемых в настоящее время методов решения такой задачи, основанных на измерениях путем пиролиза образцов [28, 36], применении гамма-каротажа [43], технологии Lithoscanner [136] и др., которые не могут обеспечить в настоящее время необходимую детальность данных о вариациях содержания органического вещества вдоль скважин.

### **1.3. Возможности и ограничения традиционных методов и средств измерений тепловых свойств пород при теплофизических исследованиях месторождений углеводородов**

Наиболее распространенными и часто применяемыми методами измерений теплопроводности горных пород являются методы разделенного стержня (divided-bar technique) [37, 128, 164, 170] и линейного источника или цилиндрического зонда (line-source technique) [84, 128, 164, 169, 170, 175]. Реже применяются метод «горячего диска» [184], метод Паркера [138], метод тепловых волн [131], сравнительный метод [32, 92]. На протяжении многих лет в ходе реализации теоретических моделей, положенных в основу этих методов, разработаны разновидности коммерческих приборов. В Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук многие годы для петрофизических и геотермических исследований успешно применяется тепловой компаратор, разработанный А.Н. Калининым [25] и внедренный в практику геолого-геофизических исследований А.Д. Дучковым и Л.С. Соколовой [26]. Оригинальным является метод измерений тепловой активности (другое название свойства – тепловая инерция или по-английски thermal effusivity) твердых тел [17].

Помимо указанных методов и средств измерений на практике в геолого-геофизических работах для исследований тепловых свойств горных пород применяются многие другие аппаратурно-методические разработки, созданные за многие десятилетия развития

экспериментальной базы тепловой петрофизики и геотермии [23, 32, 33, 37, 49, 50, 88, 98, 116]. Большинство этих разработок создавалось в основном для изучения промышленных материалов, которые, во отличие осадочных пород:

- в большинстве случаев являются однородными и изотропными,
- хорошо механически обрабатываются при подготовке образцов к измерениям и полируются до необходимой степени чистоты поверхности,
- стабильны по своим физическим свойствам в технологическом процессе их создания,
- не требуют применения высокопроизводительных средств измерений,
- допускают высокое давление для прижатия измерительных зондов к изучаемым образцам материалов, что, вместе с возможностью высококачественной полировки поверхности образцов, позволяет практически исключить влияние теплового сопротивления на границах зонд-образец, способное серьезно исказить результаты измерений теплопроводности.

Воспроизводимость технологических процессов при создании промышленных материалов обеспечивает высокую стабильность физических свойств материалов, в связи с чем при теплофизических исследованиях промышленных материалов не являются необходимыми высокая производительность измерений тепловых свойств, высокая массовость измерений, их неразрушающий характер, учет и характеристика анизотропии и разномасштабной неоднородности материалов. При изучении свойств промышленных материалов не является серьезной проблемой также необходимость продолжительной механической обработки образцов с приданием им необходимых форм и размеров.

Перечисленные факторы не относятся к осадочным породам. В связи с указанными причинами в большинстве случаев при изучении недр применение традиционных средств измерений тепловых свойств пород, особенно при изучении высокопористых, трещиноватых, анизотропных, обладающих разномасштабной неоднородностью, часто слабоконсолидированных осадочных пород, не может удовлетворить ряд важных требований, предъявляемых к методам и средствам измерений тепловых свойств пород коллекторов месторождений углеводородов.

Основные причины несоответствия требований нефтяной тепловой петрофизики при изучении пород–коллекторов месторождений углеводородов и реальных возможностей традиционных подходов к измерениям тепловых свойств твердых тел заключаются в следующем:

- традиционная аппаратно-методическая база не может обеспечить измерений на полноразмерном керне без механической обработки образцов, что практически исключает возможность массовых измерений и регистрацию разномасштабных пространственных вариаций тепловых свойств в резервуаре;

- практически отсутствует возможность измерений на стандартных образцах пород (наиболее распространенные - цилиндрические образцы размерами 30x30 мм), которые являются основой стандартных лабораторных петрофизических исследований;

- даже лучшие из традиционных средств измерений дают чаще всего невысокое метрологическое качество измерений на образцах высокопористых и трещиноватых осадочных пород в связи с существенным искажающим влиянием теплового сопротивления между образцами пород и компонентами измерительного прибора (нагреватели и датчики температуры), что, как установлено, приводит к серьезным систематическим погрешностям (во многих случаях 30-50%) при измерениях теплопроводности осадочных пород; согласно данным А.Н. Калинина, А.Д. Дучкова и Л.С. Соколовой, исключением в этом отношении является тепловой компаратор [25, 26];

- серьезной проблемой при исследованиях тепловых свойств осадочных пород является опасность частичного или полного разрушения изучаемых высокопористых, трещиноватых или слабоконсолидированных образцов осадочных пород при прижатии к ним компонентов измерительного прибора (часто – до 25 бар), что необходимо для снижения упоминавшегося влияния контактного теплового сопротивления; особенно серьезно данная проблема снижает возможность измерений на одних и тех же высокопористых, трещиноватых или слабоконсолидированных образцах пород при различных флюидах в поровом пространстве (воздух, нефть, вода), так как риск частичного или полного разрушения для флюидонасыщенных образцов осадочных пород существенно возрастает;

- практически отсутствует возможность одновременных измерений теплопроводности и объемной теплоемкости (температуропроводности) на одних и тех же образцах пород; для измерений объемной теплоемкости используют калориметры, однако такой подход сопряжен с рядом серьезных недостатков: калориметры обеспечивают измерения удельной теплоемкости, что приводит к необходимости дополнительных измерений плотности для тех же образцов пород, необходим отбор специальных проб, что приводит к частичному разрушению зерна, изучаемые образцы имеют незначительный объем (в основном - не более несколько кубических сантиметров), т.е. являются недостаточно представительными в условиях существенной неоднородности пород, процесс измерений является продолжительным (несколько часов), современные калориметры (компаний-производителей Netzsch, Cetaram, TA Instrument и др.) относятся к дорогостоящей технике;

- практически отсутствует возможность измерений главных значений теплопроводности анизотропных пород; подход с измерениями на двух (при 2D модели анизотропии) или трех (при 3D модели анизотропии) образцах, изготавливаемых из одного образца зерна, рекомендуемый при измерениях методом разделенного стержня [115], не дает удовлетворительного качества

измерений, так как эффект анизотропии искажается или полностью подавляется влиянием неоднородности образцов пород, к тому же в таком случае исходный образец керна подвергается разрушению; принципиально существующая возможность изучать анизотропию при помощи метода линейного источника [164, 175] ограничена, поскольку при нагреве образца линейным зондом регистрация температуры осуществляется точечным (локальным) датчиком температуры, что приводит к серьезному искажающему влиянию неоднородности пород;

- отсутствуют возможности оценки и учета неоднородности изучаемых образцов пород, так как либо определяется некая средняя теплопроводность (например, при измерениях методом «горячего диска»), либо результаты измерений подвержены существенному влиянию того, что показания точечного датчика температуры существенно зависят от его расположения на неоднородном образце породы (например, при измерениях методами разделенного стержня или линейного источника);

- необходимость тщательной механической обработки (полировки) плоских поверхностей для снижения теплового контактного сопротивления между образцом породы и измерительным зондом существенно увеличивает продолжительность процесса подготовки образцов, а для высокопористых или трещиноватых образцов не может дать необходимого качества обработки и к тому же приводит к частичному разрушению или изменению свойств образцов; необходимость нанесения на поверхность образцов слоя смазки для улучшения теплового контакта приводит к проникновению смазывающего вещества в высокопористые и трещиноватые образцы, что искажает их свойства и часто препятствует другим последующим петрофизическим измерениям на этих образцах;

- необходимость изготовления образцов специальной формы и необходимых размеров, значительная продолжительность работ по подготовке этих образцов и проведению измерений существенно ограничивают возможность измерений на представительных по объему выборки коллекциях керна, что исключает возможность детальной регистрации неоднородности разреза месторождения как вдоль отдельных скважин или интервалов глубин, так и по площади месторождений, т.е. значительно снижает возможности тепловой петрофизики при изучении геологического строения месторождений углеводородов;

- имеются серьезные трудности с метрологической характеристикой измерений; метрологическая аттестация при помощи сертифицированных рабочих мер (технические стекла, керамика, металлы, плотные породы – например, мрамор) не обеспечивают надежной оценки качества измерений на образцах осадочных пород, так как не контролируется влияние критического фактора - контактного сопротивления между измерительными зондами и изучаемыми образцами пород;

- ограничена возможность измерений в необходимых диапазонах вариаций теплопроводности (0,5-7 Вт/(м·К)) и объемной теплоемкости (1-4 МДж/(м<sup>3</sup>·К)) с обеспечением полной погрешности измерений (неопределенности) не хуже  $\pm 5\%$  для теплопроводности и  $\pm 8\%$  – для объемной теплоемкости (при доверительной вероятности 0,95).

Указанные проблемы являются причиной того, что ранее полученные данные о теплопроводности пород, полученные при помощи традиционных средств измерений, часто являются недостаточно представительными и метрологически недостаточно обоснованными [161].

В период 1990-2013 нами неоднократно проводились исследования, целью которых являлась оценка качества измерений теплопроводности пород при помощи традиционных средств измерений и сравнение с качеством измерений методом оптического сканирования. Такие работы выполнялись автором:

- при экспериментальных исследованиях теплопроводности пород, проводившихся в 1996 г. в Ганновере совместно с Институтом прикладных геонаук Лейбница (Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA, Германия) более чем на 1200 образцах керна скважин в рамках научного проекта, организованного при поддержке INTAS;

- путем измерений на сертифицированных образцовых мерах теплопроводности в Институте прикладных геонаук Лейбница (Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA, Ганновер, Германия, 1996 г.);

- при круговом сличении результатов измерений теплопроводности, выполненных в ходе Международной конференции по геотермии в г. Трешт (Чехия, 1996 г.) на 35 образцах промышленных материалов и кристаллических пород, ранее изученных 25 лабораториями разных стран и доставленных представителями этих лабораторий для кругового сличения (метрологического сравнительного тестирования) на конференцию, куда для проведения новых измерений на этих же образцах был нами доставлен разработанный при участии автора прибор оптического сканирования (рисунок 1.4);



Рисунок 1.4. – Прибор оптического сканирования для измерений тепловых свойств горных пород

- путем круговых сличений измерений, проводившихся автором в центре GFZ Potsdam (German Research Centre for Geosciences, Потсдам, Германия) в 1996 г. совместно с проф. Э. Хюнгесом и д-ром У. Зайпольдом на сертифицированных образцовых мерах теплопроводности и коллекциях пород, включавших более 90 образцов, в рамках научного проекта, организованного при поддержке Немецкого научного фонда DFG;

- путем сравнения результатов измерений теплопроводности, проведенных прибором ИТ-Лямбда-400 сотрудниками организации «Недра», и результатов измерений автора при помощи прибора оптического сканирования на коллекции из 46 образцов пород, вскрытых сверхглубокой Уральской научной скважиной СГ-4 (1996 г.);

- при круговом сличении результатов измерений теплопроводности, выполненных автором на приборе ТК-04 (компания-производитель ТеКа, Германия) [175] и приборе оптического сканирования [76] на коллекции сертифицированных образцов промышленных материалов и образцах горных пород (2013 г.) (рисунок 1.5);

- при круговом сличении результатов измерений теплопроводности, проведенных автором приборами KD2Pro (производитель Decagon devices, США) и оптического сканирования на коллекции сертифицированных образцов промышленных материалов и образцах горных пород (2013 г.).

На рисунке 1.5 приведены результаты измерений теплопроводности для коллекции из 35 образцов твердых тел, включающей промышленные материалы (4 образца керамики и технических стекол) и плотные кристаллические горные породы (30 образцов). По оси ординат представлены результаты измерений, проведенных ранее при помощи традиционных контактных методов (разделенного стержня – “divided bar”, линейного источника – “line source”, горячего диска - “hot disk” и др.) на этих образцах в 25 лабораториях университетов США, Германии, Канады, Италии, Швейцарии, Португалии, Словении, Бразилии, Польши, Белоруссии, Института геофизики Чехии, Геологической службы Финляндии, Геологической службы США, Института прикладных геонаук (GGA, Германия), научного центра GFZ Potsdam (Германия) и др. По оси абсцисс показаны результаты, полученные автором во время конференции при измерениях теплопроводности тех же образцов на полевом приборе оптического сканирования, разработанном и доставленном при участии автора на конференцию. Доставленные на конференцию образцы пород были охарактеризованы их владельцами как образцы с наиболее надежными результатами измерений. На рисунке 1.5 представлены результаты измерений только тех 35 образцов, которые по результатам измерений на приборе оптического сканирования были охарактеризованы как изотропные. Из рисунка 1.5 следует, что для всех четырех образцов керамики и технических стекол отмечено достаточно хорошее совпадение результатов измерений (теплопроводность 1,19-1,35 Вт/(м·К)). Для 21 образца горных пород (68% от

коллекции из 31 изотропного образца пород) расхождение результатов выходит за диапазон  $\pm 10\%$ , среднее расхождение результатов для всех образцов оставило  $27\%$ , максимальное расхождение результатов составило  $91\%$ . Обращает на себя внимание то, что для всех случаев с расхождением результатов более  $\pm 10\%$  наблюдается занижение результатов измерений традиционными методами по отношению к результатам метода оптического сканирования. Характерно, что после завершения конференции от ряда участников описываемого эксперимента автору поступили сообщения о том, что они предприняли более тщательную полировку поверхностей образцов, возвращенных в соответствующие лаборатории, после чего расхождение результатов их измерений с данными, полученными методом оптического сканирования, значительно уменьшилось. Этот факт и систематическое занижение результатов измерений традиционными методами свидетельствуют о существенном влиянии контактного теплового сопротивления на результаты измерений для горных пород. Заметим, что все лаборатории, представившие образцы для эксперимента, относятся к числу наиболее опытных в области измерений теплопроводности пород и представили для эксперимента наименее проблемные образцы пород, что соответствовало, по мнению представителей лабораторий, наиболее надежным результатам измерений в лабораториях.

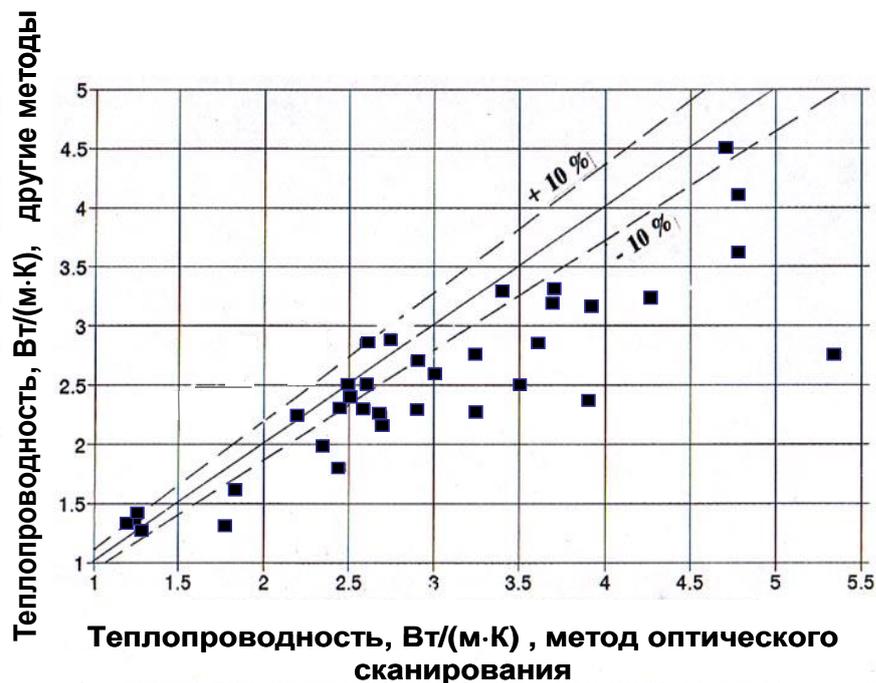


Рисунок 1.5 – Результаты измерений теплопроводности изотропных образцов горных пород (31 образец), керамики и технических стекол (4 образца) методом оптического сканирования и другими методами.

Для остальных 12 из 44 образцов, доставленных на конференцию, при измерениях методом оптического сканирования была установлена существенная анизотропия при коэффициенте анизотропии в диапазоне 1,2-1,6. Для всех этих образцов методом оптического сканирования были определены главные значения тензора теплопроводности. Вместе с тем, при

измерениях традиционными методами на этих образцах в лабораториях положение главных осей теплопроводности не принималось во внимание и влияние анизотропии не учитывалось даже при измерениях методом разделенного стержня. В итоге во всех этих случаях определялась некая неопределенная, «кажущаяся» теплопроводность, не имеющая при таком подходе определенного физического смысла. В связи с этим проведение сравнений этих результатов с данными метода оптического сканирования результатов было сочтено некорректным и нецелесообразным.

На рисунке 1.6 приведены результаты автора по тестированию прибора ТК-04, реализующего метод линейного источника и выпускаемого компанией ТеКа (Германия) [175]. Создание прибора и начало его производства относится к периоду бурения скважины – пилота сверхглубокой скважины КТВ и основного ствола скважины КТВ. В основе работы прибора лежат оригинальные технические решения, полученные в лаборатории скважины КТВ сотрудниками Технического университета Берлина и научного центра GFZ Potsdam при создании новой аппаратурно-методической базы для измерений теплопроводности на керне и шламе при бурении основного ствола КТВ и скважины – пилота [164]. Прибор ТК-04 предназначен для измерений теплопроводности твердых тел в диапазоне 0,1 – 10 Вт/(м·К) при атмосферных давлениях и температуре.

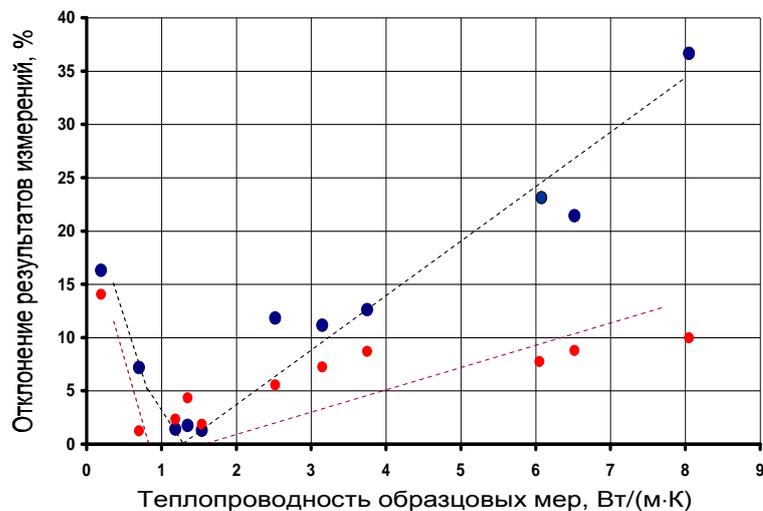


Рисунок 1.6. – Результаты метрологического тестирования прибора ТК-04 по образцовым мерам теплопроводности. Синий цвет (точки, отражающие результаты измерений, и пунктирная линия регрессии) соответствует относительному отклонению результатов измерений от значения теплопроводности образцовых мер, красный цвет соответствует относительной случайной погрешности измерений (оцененной при доверительной вероятности 0,95).

Согласно технической документации, сопровождающей прибор ТК-04, систематическая погрешность измерений теплопроводности прибором не должна превышать 2%, случайная погрешность не должна быть более 1,5%, при этом доверительная вероятность, которой соответствуют приведенные значения погрешностей, не указана. Прибор комплектуется одной

образцовой мерой теплопроводности - образцом керамического материала ST 1.6 с теплопроводностью 1,60 Вт/(м·К) [175].

Метрологическое тестирование прибора ТК-04 осуществлялось нами путем многократных измерений теплопроводности на образце материала ST 1.6, прилагаемого в комплекте к прибору ТК-04, и на 9 образцовых мерах теплопроводности из набора образцовых мер, созданного нами в 1990-е годы и использованного в последующие годы для метрологических испытаний различных приборов для измерений теплопроводности и температуропроводности [161]. Образцовые меры включали в себя следующие материалы: оргстекло (теплопроводность 0,195 Вт/(м·К) [87, 89, 161]), технические стекла ТФ-1 (0,701 Вт/(м·К)), К8 (1,094 Вт/(м·К)), ЛК-5 (1,185 Вт/(м·К)) [89, 161]), сертифицированные ВНИИМ им. Менделеева, образцы белого мрамора (2,75 и 3,15 Вт/(м·К)), материал Pyroceram (BCR 724) (3,78 Вт/(м·К)), титановый сплав ВТ-6 (6,52 Вт/(м·К)). Для расширения диапазона тестирования дополнительно использовался монокристалл кварца (горный хрусталь), теплопроводность которого для главных осей теплопроводности стабильна и хорошо известна [161]: главные значения тензора теплопроводности монокристалла кварца составляют 6,05 Вт/(м·К) для главных осей «*a*» и «*b*» и 10,7 Вт/(м·К) для главной оси «*c*». При ориентации линейного источника прибора ТК-04 вдоль оси «*a*» или «*b*» корректное измеренное значение «кажущейся» теплопроводности должно составлять 8,05 Вт/(м·К) [161]. Для каждой образцовой меры теплопроводности проводилось не менее 15 измерений, по результатам которых оценивалась относительная случайная погрешность измерений.

Как следует из рисунка 1.6, в области значений теплопроводности 1,1 – 1,6 Вт/(м·К), близкой к теплопроводности прилагаемого к прибору образца материала ST 1.6, систематическая и случайная погрешности измерений в целом соответствуют заявляемым метрологическим характеристикам прибора. Однако с удалением теплопроводности изучаемых образцов как в сторону ее уменьшения, так и в сторону увеличения происходит значительное увеличение случайной и систематической погрешностей измерений. Так, в диапазоне теплопроводности 2,5 – 3,8 Вт/(м·К), характерном для диапазона теплопроводности большинства осадочных пород, случайная погрешность составляет  $\pm(5,5 - 9)\%$ , а систематическая погрешность составляет 11 – 13 %. В диапазоне теплопроводности 6 - 6,5 Вт/(м·К), соответствующем теплопроводности плотных или пористых водонасыщенных кварцевых песчаников случайная погрешность составляет  $\pm(7,5 - 9)\%$ , а систематическая погрешность 21 – 23 %.

Характерные проблемы, выявленные при метрологическом тестировании приборов, реализующих традиционные методы измерений, как правило, усугубляются при измерениях тепловых свойств высокопористых и трещиноватых осадочных пород. Это связано с тем, что в

этих случаях становится проблематичным, как указывалось выше, (1) выполнить необходимую полировку поверхностей образцов пород и (2) обеспечить достаточное давление измерительного зонда на образцы из-за опасности их разрушения или изменения свойств. Нанесение жидкости или геля на поверхность образцов для уменьшения теплового контактного сопротивления с последующим необходимым приложением давления приводит, как указывалось, к их проникновению в образцы, что может достаточно существенно изменять свойства таких образцов и искажать впоследствии результаты других стандартных петрофизических измерений.

Отметим, что все методы и средства измерений, упоминавшиеся выше в связи с проводившимися метрологическими исследованиями, к тому же не предназначены для исследований объемной теплоемкости (температуропроводности) пород и не обеспечивают соответствующих измерений.

Приведенный выше анализ особенностей подавляющего большинства традиционных методов и средств измерений и их метрологическое тестирование, выполнявшееся нами в течение достаточно продолжительного времени (1994-2013), показали наличие многих серьезных проблем при попытках удовлетворить современные требования к качеству измерений при помощи традиционных методов и средств измерений применительно к современным задачам изучения резервуаров углеводородов, требующим большого объема надежных данных о тепловых свойствах осадочных пород.

Как показали исследования, проведенные в 1990–2000-е годы нами и другими исследователями, существенными преимуществами для исследований тепловых свойств горных пород, и особенно осадочных пород, обладает метод оптического сканирования [161].

#### **1.4. Совершенствование метода и аппаратуры оптического сканирования для исследований полноразмерного керна и стандартных образцов пород как путь к развитию экспериментальной базы нефтегазовой тепловой петрофизики**

Подход к измерениям комплекса тепловых свойств с использованием подвижных источников тепловой энергии и датчиков температуры был предложен в начале 1980-х годов [67]. Практически сразу этот подход был реализован в экспериментальной установке для измерений тепловых свойств на керне [76].

##### **1.4.1. Основы метода оптического сканирования и традиционные области его применения**

Метод оптического сканирования основан на нагреве поверхности твердого тела непрерывно действующим концентрированным оптическим источником тепловой энергии,

движущимся по поверхности тела с постоянной скоростью, и регистрации избыточной температуры нагреваемой поверхности инфракрасными радиометрами на участках поверхности, движущихся со скоростью источника тепла (рисунок 1.7). Для создания теоретических моделей метода измерений теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости было использовано соотношение, описывающее избыточную температуру  $\Delta T$  нагреваемой поверхности полубесконечного тела в подвижной прямоугольной системе координат, начало которой совмещено с источником нагрева [86]:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \frac{q}{4c\rho(\pi a)^{3/2}} \cdot \exp\left[-\frac{vx}{2a}\right] \cdot \int_0^t \frac{\exp\left[-\frac{v^2 t'}{4a} - \frac{R^2}{4at'}\right]}{(t')^{3/2}} dt' \quad , \quad (1.2)$$

где  $x, y, z$  – координаты,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $t$  – момент времени после включения источника,  $q$  – мощность источника,  $v$  – скорость сканирования,  $c$  и  $\rho$  – соответственно удельная теплоемкость и плотность образца,  $a$  – температуропроводность образца.

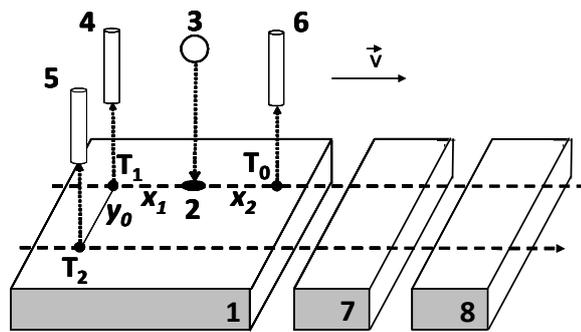


Рисунок 1.7. – Схема расположения оптического источника тепла и инфракрасных датчиков температуры относительно исследуемого образца горной породы. 1 – исследуемый образец, 2 – пятно нагрева, 3 – оптический источник тепла, 4, 5, 6 – инфракрасные датчики температуры, 7, 8 – образцовые меры теплопроводности и температуропроводности (эталонные образцы),  $v$  – скорость движения оптического источника тепла и инфракрасных датчиков температуры относительно исследуемого образца и образцовых мер теплопроводности и температуропроводности.

После включения источника по прошествии некоторого времени, называемого периодом теплонасыщения, устанавливается квазистационарный режим нагрева тела, при котором избыточная температура на поверхности тела в рассматриваемой точке подвижной системы координат, начало которой совмещено с центром пятна нагрева, достигает своего предельного значения, определяемого соотношением [86], следующим из (1.2):

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \cdot \exp\left[-\frac{v(x+R)}{2a}\right] \quad , \quad (1.3)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность тела.

Как следует из (1.3), избыточная предельная температура в точке, следующей по линии нагрева вслед за источником тепла и характеризующейся координатами  $x, y, z$ , при условиях  $x < 0, y = 0, z = 0$  определяется соотношением:

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi\lambda|x|} \quad (1.4)$$

Как видно из формулы (1.4), при постоянной мощности источника и расстоянии  $|x|$  от источника до точки измерения температуры избыточная температура зависит только от теплопроводности изучаемого материала. Таким образом, если непрерывно действующим источником постоянной мощности нагревать расположенные в ряд один за другим исследуемые образцы горных пород, то регистрируемые при  $|x| = const$  избыточные предельные температуры образцов будут обратно пропорциональны их теплопроводности.

При экспериментальной реализации теоретических моделей метода оптического сканирования для измерений тепловых свойств образцов горных пород при помощи подвижного оптического источника тепла (лазер, специальная лампа с фокусирующим отражателем) осуществляют последовательный нагрев одного или нескольких помещенных в ряд образцов исследуемых пород и двух образцовых мер теплопроводности и температуропроводности (эталонных образцов) с известными теплопроводностью и температуропроводностью (рисунок 1.7). В процессе нагрева регистрируют электрические сигналы подвижных инфракрасных датчиков температуры, соответствующие температурам нагреваемых поверхностей исследуемых образцов пород и двух эталонных образцов как до нагрева, так и сразу после нагрева [67, 161].

По результатам регистрации разностей электрических сигналов, соответствующих избыточным температурам нагреваемых поверхностей образцов пород и эталонных образцов, и по известным значениям теплопроводности и температуропроводности эталонных образцов определяют теплопроводность и температуропроводность каждого образца породы. Теплопроводность каждого исследуемого образца  $\lambda$  определяют при помощи соотношения [67, 161]

$$\lambda = \frac{\lambda_{R1} \cdot (T_{2R1} - T_{1R1}) + \lambda_{R2} \cdot (T_{2R2} - T_{1R2})}{2(T_2 - T_1)}, \quad (1.5)$$

где  $\lambda_{R1}$  и  $\lambda_{R2}$  – теплопроводность соответственно эталонных образцов R1 (образец 7 на рисунке 1.7) и R2 (образец на рисунке 1.7),  $T_1$  и  $T_2$  – температуры поверхности образца, регистрируемые соответственно датчиками 4 и 6,  $T_{R1}$ ,  $T_{R2}$  – температуры поверхности эталонных образцов R1 и R2, регистрируемые соответственно датчиками 4 и 6.

В связи с пропорциональностью разности сигналов  $\Delta U$  радиометров, регистрирующих температуру нагретой поверхности и начальную температуру поверхности, избыточной температуре нагрева поверхности из (1.5) следует [153]:

$$\lambda = \frac{\lambda_{R1} \cdot \Delta U_{1R1} + \lambda_{R2} \cdot \Delta U_{1R2}}{2\Delta U_1}, \quad (1.6)$$

где  $\lambda$  - теплопроводность исследуемого образца породы,  $\lambda_{R1}$  и  $\lambda_{R2}$  – теплопроводность соответственно эталонных образцов 7 и 8 (рисунок 1.7),  $\Delta U_1$  – разность электрических сигналов, соответствующих разности температур  $T_1$  и  $T_0$  на поверхности образца 1 и поверхности других исследуемых образцов пород и зарегистрированных соответственно датчиками температуры 4 и 6,  $\Delta U_{1R1}$  и  $\Delta U_{1R2}$  – разности электрических сигналов соответственно для эталонных образцов 7 и 8, при этом  $\Delta U_{1R1}$  соответствует разности температур  $T_{1R1}$  и  $T_{1R0}$ , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 4 и 6 на поверхности эталонного образца 7, а  $\Delta U_{1R2}$  соответствует разности температур  $T_{2R1}$  и  $T_{2R0}$ , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 4 и 6 на поверхности эталонного образца 8.

При измерениях методом оптического сканирования температуропроводность исследуемых образцов пород определяют при помощи соотношения [67]

$$a = \frac{a_{R1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_{R1} \cdot (T_{3R1} - T_{1R1})}{\lambda_{R2} \cdot (T_{3R2} - T_{1R2})}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_{R1} \cdot (T_{3R1} - T_{1R1})}{\lambda_{R2} \cdot (T_{3R2} - T_{1R2})}\right) + \frac{a_{R2} - a_{R1}}{a_{R2}} \cdot \ln\left(\frac{\lambda \cdot (T_3 - T_1)}{\lambda_{R1} \cdot (T_{3R1} - T_{1R1})}\right)} \quad (1.7)$$

В связи с пропорциональностью разности сигналов  $\Delta U$  радиометров, регистрирующих температуру нагретой поверхности и начальную температуру поверхности, избыточным температурам на поверхности образцов [64][67] из соотношения (1.7) следует соотношение для определения температуропроводности образцов [67, 161]:

$$a = \frac{a_{R1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_{R1} \cdot \Delta U_{2R1}}{\lambda_{R2} \cdot \Delta U_{2R2}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_{R1} \cdot \Delta U_{2R1}}{\lambda_{R2} \cdot \Delta U_{2R2}}\right) + \frac{a_{R2} - a_{R1}}{a_{R2}} \cdot \ln\left(\frac{\lambda \cdot \Delta U_2}{\lambda_{R1} \cdot \Delta U_{2R1}}\right)}, \quad (1.8)$$

где  $a$  - температуропроводность исследуемого образца 1 (или других исследуемых образцов пород, последовательно расположенных в один ряд вдоль линии сканирования),  $a_{R1}$  и

$a_{R2}$  – температуропроводность соответственно эталонных образцов 7 и 8,  $\Delta U_2$  – разность электрических сигналов, соответствующих разности температур  $T_2$  и  $T_0$  на поверхности образца 1 и поверхности других образцов исследуемых пород и зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6,  $\Delta U_{2R1}$  и  $\Delta U_{2R2}$  – разности электрических сигналов соответственно для эталонных образцов 7 и 8, зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6, при этом  $\Delta U_{2R1}$  соответствует разности температур  $T_{2R1}$  и  $T_{1R0}$ , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6 на поверхности эталонного образца 7, а  $\Delta U_{2R2}$  соответствует разности температур  $T_{2R1}$  и  $T_{2R0}$ , зарегистрированных соответственно датчиками температуры 5 и 6 на поверхности эталонного образца 8.

Объемную теплоемкость  $C$  образцов пород определяют по данным о теплопроводности и температуропроводности при помощи известного соотношения:

$$C = \frac{\lambda}{a}. \quad (1.9)$$

После завершения каждого сканирования компьютер, входящий в состав установки, обрабатывает сигналы датчиков температуры и в итоге предоставляет следующую информацию для каждого изучаемого образца:

- 1) профили тепло- и температуропроводности и локальные значения этих свойств вдоль линии сканирования;
- 2) коэффициент тепловой неоднородности  $\beta$ .

Коэффициент тепловой неоднородности  $\beta$  определяется как разница между максимальным и минимальным значениями теплопроводности вдоль данной линии сканирования, отнесенная к среднему значению теплопроводности для данной линии сканирования. Этот параметр используется для характеристики степени тепловой неоднородности образцов.

Наиболее серьезные усовершенствования технологии оптического сканирования относятся к периоду 1994-1996 гг. [151], когда благодаря предложенной автором форме пятна нагрева, отличной от круговой, стало возможным осуществлять измерения главных значений тензора теплопроводности при помощи полевой установки, предназначенной для измерений на полноразмерном керне в условиях кернохранилищ. Положительной особенностью полевого варианта установки оптического сканирования является то, что ее работа основана на использовании в качестве источника тепла специальных электроламп со встроенным отражателем, не требующих, в отличие от существовавших в те годы лазерных источников непрерывного действия средней мощности, специального охлаждения, не чувствительных к

попаданию пыли и частиц пород на их выходную поверхность, обеспечивающих простоту замены источника тепла при выходе его из строя. Благодаря этой особенности полевой вариант установки может обеспечивать измерения в условиях кернохранилищ даже на слабо консолидированных породах и при повышенной запыленности в помещении, препятствующей нормальной работе оптических элементов системы оптического сканирования [45].

Важным достоинством метода оптического сканирования является возможность проведения измерений путем сканирования цилиндрической поверхности образцов. Такое сканирование может осуществляться вдоль образующей на цилиндрической поверхности полноразмерного керна. Данный вариант сканирования обеспечивает профилирование нескольких образцов керна, расположенных в ряд один за другим на рабочей платформе вместе с двумя (или больше) образцовыми мерами тепловых свойств. Именно таким образом нами были выполнены массовые измерения теплопроводности пород, вскрытых при бурении Уральской, Тюменской и Воротиловской сверхглубоких скважин [74, 75, 147, 156, 160].

При сканировании вдоль прямой линии на поверхности анизотропного образца измеряемое значение теплопроводности  $\lambda_{app}$  определяется следующим соотношением [161]:

$$\lambda_{app} = \sqrt{\lambda_A \cdot \lambda_B \cdot \cos^2 \gamma + \lambda_A \cdot \lambda_C \cdot \cos^2 \beta + \lambda_B \cdot \lambda_C \cdot \cos^2 \alpha}, \quad (1.10)$$

где  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  – главные значения тензора теплопроводности образца,  $\alpha, \beta, \gamma$  – углы между линией сканирования и соответственно главными осями теплопроводности А, В и С.

При сканировании вдоль трех взаимно непараллельных прямых 1 – 3, для каждой из которых определены углы  $\alpha, \beta, \gamma$  с известными главными осями теплопроводности, измеряют значения так называемой «кажущейся» теплопроводности - соответственно  $\lambda_{app1}, \lambda_{app2}, \lambda_{app3}$ . Как показано в [161], решая систему из трех уравнений, каждое из которых следует из формулы (1.10), с тремя неизвестными  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ , определяют главные значения тензора теплопроводности  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ .

При изучении образцов с 2D анизотропией, например, в случае, когда для образца с ориентированной микротрещиноватостью или слоистостью, имеем  $\lambda_A = \lambda_B, \lambda_A \neq \lambda_C$ . В таком случае для определения значений  $\lambda_A = \lambda_B$  и  $\lambda_C$  достаточно двух сканирований. Наиболее простой для измерений случай имеет место, когда плоскость для сканирования параллельна главной оси теплопроводности С и перпендикулярна плоскости, в которой расположены главные оси теплопроводности А и В. В таком случае два сканирования – сканирование 1 вдоль оси С и сканирование 2 перпендикулярно оси С - обеспечивают определение главных значений теплопроводности  $\lambda_A = \lambda_B$  и  $\lambda_C$  из соотношений:

$$\lambda_{app 1} = (\lambda_A \cdot \lambda_B)^{1/2} \quad (1.11)$$

$$\lambda_{app 2} = (\lambda_A \cdot \lambda_C)^{1/2}, \quad (1.12)$$

где  $\lambda_{app 1}$  – результата измерений при сканировании вдоль линии 1 (рисунок 1.8, левая панель), а  $\lambda_{app 2}$  – результат измерений при сканировании вдоль линии 2 (рисунок 1.8, правая панель).

Из уравнений (6) и (7) с учетом  $\lambda_A = \lambda_B$  получают [161]

$$\lambda_A = \lambda_B = \lambda_{app 1} \quad (1.13)$$

и

$$\lambda_C = (\lambda_{app 2}^2) / \lambda_A. \quad (1.14)$$

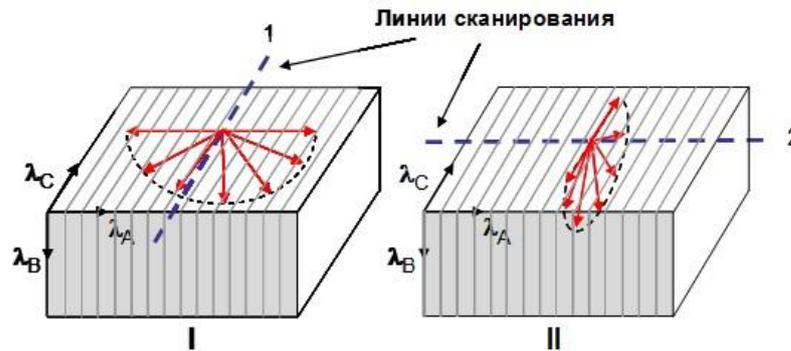


Рисунок 1.8. – Определение главных значений тензора теплопроводности для образца с 2D-моделью анизотропии ( $\lambda_A = \lambda_B$  и  $\lambda_C \neq \lambda_A$ ,  $\lambda_C \neq \lambda_B$ ) путем двух сканирований.

#### 1.4.2. Актуальность создания метода непрерывного профилирования тепловых свойств керна скважин

Как показали наши предыдущие исследования, включавшие в себя массовые измерения тепловых свойств на керне глубоких научных скважин [74, 75, 162], теплопроводность пород горных массивов, включая осадочные породы, может характеризоваться вариациями в многие десятки процентов даже в пределах нескольких сантиметров, а часто и в пределах 5-10 мм. В пределах интервалов глубин, вскрытых скважиной, вариации теплопроводности могут достигать первых сотен процентов [74, 75]. В условиях, когда для подавляющего большинства методов геофизических исследований скважин характерна пространственная разрешающая способность 10-60 см, непрерывное профилирование таких базовых физических свойств пород, какими являются теплопроводность и объемная теплоемкость, могло бы послужить основой создания нового геофизического метода для изучения резервуаров углеводородов. Такой метод мог бы быть особенно эффективным при изучении маломощных геологических объектов, какими, в частности, часто являются отложения баженовской свиты и доманиковой формации.

На современном этапе петрофизических исследований резервуаров углеводородов необходимо решение следующих задач:

(1) обеспечение измерений тепловых свойств на образцах полноразмерного керна с регистрацией тепловой неоднородности образцов керна при повышенной пространственной разрешающей способности с целью совмещения теплофизического профилирования со скретч-тестированием керна [174] (при этом необходимо обеспечить повышенную пространственную разрешающую способность теплофизического профилирования - до 0,2 мм) или замены последнего, а также для обеспечения возможности совмещения теплофизического и гамма-спектрометрического профилирования полноразмерного керна;

(2) обеспечение возможности массовых измерений комплекса тепловых свойств на стандартных образцах пород (цилиндры диаметром и высотой 30 мм) и мелких кусках дробленого керна (с характерным размером от 10 мм) в условиях кернохранилищ при помощи транспортабельной портативной установки оптического сканирования с возможностью вариаций параметров режима измерений в зависимости от формы, длины, ширины и толщины изучаемых образцов пород, необходимой глубины теплофизического зондирования и решаемых задач теплофизических исследований;

(3) создание технологии непрерывной регистрация тепловых свойств и тепловой неоднородности для всех образцов полноразмерного керна вдоль скважин с высоким пространственным разрешением (до первых миллиметров, а в некоторых случаях и до первых десятых долей миллиметров) с комплексированием результатов теплофизического профилирования с данными ГИС.

Прежние научно-технические решения в области тепловой петрофизики не обеспечивали решение ни одной из указанных трех задач. В этой связи в рамках данной работы потребовалось развитие метода оптического сканирования до уровня, обеспечивающего решение каждой из указанных задач при обеспечении возможности измерений комплекса тепловых свойств и необходимого метрологического уровня измерений. Каждая из данных трех указанных задач является новой в практике тепловой петрофизики. Решение этих задач может обеспечить получение столь же высокодетальной информации о вариациях и других свойствах пород резервуаров при условии установления тесных корреляционных связей тепловых свойств с другими свойствами пород.

Решение указанных задач в рамках настоящей работы потребовало изучения возможности адаптировать параметры режима измерений (скорость сканирования, мощность источника тепла, геометрические характеристики пятна нагрева) для обеспечения комплекса требований, перечисленных ниже в разделе 1.4.3.

В условиях необходимости повышения качества исследований месторождений с традиционными и низкопроницаемыми коллекторами разработка и внедрение новой технологии непрерывного бесконтактного неразрушающего профилирования тепловых свойств на всем

керне вдоль изучаемых скважин может не только впервые обеспечить детальные прецизионные непрерывные данные о пространственных вариациях таких базовых физических свойств пород, какими являются тепловые свойства, но и может обеспечить новые данные о корреляционных связях тепловых свойств с другими свойствами пород для повышения качества данных о расширенном комплексе свойств пород. Получение непрерывных профилей тепловых свойств впервые открывает возможность совместной обработки и геолого-геофизической интерпретации данных о пространственных вариациях свойств пород, регистрируемых стандартными методами ГИС, и данных о непрерывном детальном распределении тепловых свойств вдоль скважин.

Результаты непрерывного неразрушающего бесконтактного высокоразрешающего теплофизического профилирования керна и стандартных образцов пород в условиях кернохранилищ могут привести к качественному повышению информативности работ по тепловой петрофизике путем решения следующих задач при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов:

- создание представительных баз исходных данных по тепловым свойствам для моделирования осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем;
- создание представительных баз исходных данных по тепловым свойствам для гидродинамического моделирования резервуаров с высоковязкими нефтями и нетрадиционными ресурсами углеводородов при тепловых методах добычи на этапах разработки технологий добычи и их оптимизации, а также при оценке запасов;
- получение представительных данных о корреляциях тепловых свойств с другими свойствами пород;
- детальное профилирование общего содержания органического вещества ( $C_{org}$ ) вдоль скважин путем преобразования высокодетальных профилей теплопроводности в непрерывные профили  $C_{org}$ ;
- получение дополнительной информации об упруго-прочностных свойствах и акустической анизотропии в случаях, когда интерпретация данных акустического каротажа для этой цели невозможна или затруднена;
- дополнение метода механического скретч-тестирования керна, имеющего серьезные ограничения при изучении легкоразрушаемых пород баженовской свиты, для детальной (с пространственной разрешающей способностью не хуже 1 мм) регистрации неоднородности пород вдоль скважин;
- повышение детальности исследований маломощных геологических объектов;
- повышение разрешающей способности геофизических методов исследования скважин путем комплексирования их данных с результатами непрерывного высокоразрешающего профилирования тепловых свойств пород на керне;

- более обоснованный отбор образцов керна и участков в пределах отобранных образцов керна для изготовления стандартных образцов пород для лабораторных петрофизических исследований;

- уточнение глубинной привязки интервалов долбления полноразмерного керна.

Решение указанных задач в случае создания и внедрения метода непрерывного теплофизического профилирования керна повысит эффективность петрофизических исследований коллекторов с высоковязкой нефтью и коллекторов с нетрадиционными ресурсами углеводородов, какими являются породы баженовской и доманиковой свит.

В случаях измерений тепловых свойств при пластовых условиях, когда решаются задачи формирования баз данных для бассейнового моделирование, определения теплового потока, гидродинамического моделирования тепловых методов добычи, 4D моделирования тепловых свойств резервуара (3D – пространственные вариации тепловых свойств, четвертое измерение – вариации тепловых свойств по времени при разогреве пласта), непрерывное профилирование тепловых свойств на керне обеспечит обоснованный отбор керна и участков отобранных образцов керна для выбуривания стандартных образцов пород, на которых при помощи специальных средств будут выполняться дополнительные измерения для изучения зависимости тепловых свойств пород от повышенных температуры и давления.

#### **1.4.3. Основные требования к совершенствованию метода оптического сканирования применительно к исследованиям полноразмерного керна и стандартных образцов пород месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов**

Применение метода оптического сканирования и реализующего его приборов при изучении керна нефтегазовых месторождений для решения выше сформулированных задач 1, 2 и 3 (раздел 1.4.2) характеризуется существенной спецификой [45] по сравнению с предыдущей практикой применения прошлых аналогичных разработок, в частности - для изучения керна глубоких и сверхглубоких научных скважин [45, 53, 74, 75].

Усовершенствование полевого варианта прибора оптического сканирования с целью создания на его основе метода непрерывного теплофизического профилирования на керне требует оптимизации и контроля совокупности параметров режима его работы, включающей рабочую базу (расстояние между пятном нагрева и областью регистрации температуры позади пятна нагрева), температурную разрешающую способность датчиков температуры, их постоянную времени, отношение сигнал-шум, диапазон мощности источника нагрева образцов, форму и размеры пятна нагрева, стабильность мощности источника нагрева, с учетом задач

исследований, а также требований к сохранности изучаемых образцов керна и метрологическим характеристикам результатам измерений.

Исследования пород баженовской свиты и доманиковой формации требуют особой осторожности при выборе режима нагрева образцов пород концентрированными оптическими источниками тепла во избежание нежелательных изменений органического вещества при повышенных температурах. Вместе с тем, вопросам анализа температурного режима образцов в области пятна нагрева до настоящего времени необходимое внимание не уделялось. Чрезмерно высокая температура поверхности образцов керна в пятне нагрева (от 70°C и выше) может приводить к нежелательным преобразованиям органического вещества, активной тепловой конвекции поровых флюидов в области высоких температурных градиентов, искажающей результаты измерений, разрушению пластиковой пленки, которой предложено покрывать поверхность керна вместо краски для выравнивания оптических характеристик поверхностей образцов керна и образцовых мер тепловых свойств при реализации новой методики измерений описанной в 2.2 [64]. Уменьшение температуры нагрева керна поможет не только снизить тепловое воздействие на органическое вещество для пород баженовской свиты и доманиковой формации, но и позволит избежать тепловой конвекции флюидов в нефте- и водонасыщенных образцах пород традиционных коллекторов. Для этого необходимо изучить возможность перераспределения энергии оптического излучения источника в пятне нагрева образцов.

Наиболее целесообразно проводить непрерывное теплофизическое профилирование на полноразмерном керне сразу после его распаковки или сразу после отпиливания от керна малогабаритных дубликатов («горбушек»), так как необходимо создать условие для максимального сохранения поровых флюидов. С этой целью, а также для обеспечения наименьшего воздействия на керн, предотвращения его локального перегрева и исключения чрезмерного теплового воздействия на кероген и другие виды органического вещества необходимо корректно задавать и контролировать уровень мощности оптического источника тепловой энергии, скорость сканирования, оптимизировать сочетание температурной разрешающей способности, постоянной времени инфракрасных датчиков температуры и пространственной разрешающей способности при теплофизическом профилировании.

Разработка и реализация метода непрерывного профилирования всего керна изучаемых скважин потребует массовых измерений в условиях кернохранилищ, что делает крайне желательным значительное повышение скорости сканирования, которая в предыдущих разработках составляла 2-4,5 мм [67]. Повышение скорости сканирования позволит сократить срок проведения теплового каротажа с непрерывным профилированием всего полноразмерного керна, протяженность которого для одной скважины может составлять несколько сотен метров.

Вместе с тем, изменения формы пятна нагрева и мощности источника тепла, скорости сканирования и других параметров режима измерений не должны повлечь за собой снижение качества измерений теплопроводности и температуропроводности/объемной теплоемкости. Это делает особенно важными метрологический анализ и оценки качества измерений тепловых свойств, так как переход от кругового нормально-распределенного пятна нагрева [67] к другой его форме с целью понижения максимальной температуры нагрева образцов путем повышает степень неадекватности экспериментальных и теоретических моделей метода оптического сканирования и может привести к существенному повышению систематической погрешности. Снижение же температуры нагрева за счет простого уменьшения мощности источника недопустимо в связи с неизбежным в таком случае возрастанием случайной погрешности измерений. В связи с относительно небольшими диапазонами тепловых свойств пород в пределах месторождений для обеспечения достаточно высокого динамического диапазона регистрации вариаций тепловых свойств (определяемого, в основном, отношением «полезный сигнал/шум датчиков температуры») при задании новых режимов нагрева образцов и более высоких скоростей сканирования необходимо обеспечить прецизионный уровень измерений теплопроводности (с общей погрешностью не более  $\pm 4\%$ ) и достаточно высоким качеством измерений температуропроводности (не более  $\pm 5\%$ ) и объемной теплоемкости (не более  $\pm 6\%$ ) (все – при доверительной вероятности 0,95).

Технология непрерывного теплофизического профилирования керна должна предусматривать возможность измерений как на плоской поверхности, образующейся при отпиливании от керна малогабаритных дубликатов («горбушек») или при срезе керна на его торце, так и на цилиндрической поверхности керна в случаях, когда отсутствует возможность измерений на малогабаритных дубликатах полноразмерного керна («горбушках»).

Для детальной регистрации неоднородности пород и обеспечения пространственной разрешающей способности, значительно превышающей разрешающую способность стандартных методов и средств геофизических исследований скважин, необходимо добиться пространственной разрешающей способности при профилировании теплопроводности на уровне 1-2 мм. Для получения информации о неоднородности пород, сопоставимой по детальности с механическим скретч-тестированием керна [174], необходимо обеспечить возможность теплофизического профилирования с пространственной разрешающей способностью вплоть до 0,2 мм.

В подавляющем большинстве случаев не допускается нанесение на поверхность образцов осадочных пород – как полноразмерного керна, так и стандартных образцов – жидкой краски (быстросохнущей эмали), которая необходима для выравнивания оптических характеристик (коэффициент поглощения и коэффициент излучения) всех изучаемых образцов пород и

образцовых мер теплопроводности и температуропроводности и которая всегда наносилась ранее как нами, так и другими исследователями на образцы пород [76] при измерениях их тепловых свойств методом оптического сканирования. Причиной данного серьезного ограничения является то, что если при исследованиях плотных пород краска-эмаль может быть при необходимости удалена с поверхности образцов, то для пористых и трещиноватых осадочных пород-коллекторов нанесение краски сопровождается ее проникновением в поры и трещины. Хотя наружный сплошной слой краски, необходимый для обеспечения необходимой точности измерений тепловых свойств методом оптического сканирования, оставляет обычно 25-50 мкм, ее проникновение в поры и трещины является достаточно серьезным и может достигать глубины 2-3 мм. В таком случае удаление краски с учетом достаточно глубокого слоя ее проникновения наносит существенный, часто недопустимый ущерб для зерна. При использовании размывающих флюидов сам такой флюид проникает в образцы еще глубже, что лишает смысла применение такого подхода к очистке образцов зерна. Оставлять же краску недопустимо, так как ее наличие в порах и трещинах может приводить к существенным изменениям других свойств образцов пород. Выполнение перечисленных условий исключает покраску поверхности зерна нитроэмалью, что являлось до сих пор обязательным этапом применения технологии оптического сканирования, но вместе с тем не допускается собственниками зерна – нефтегазовыми компаниями и недропользователями. Таким образом, необходимым этапом развития методов тепловой петрофизики при изучении месторождений углеводородов является разработка новых методик выравнивания и учета вариаций оптических характеристик поверхностей образцов пород при исследованиях их тепловых свойств методом оптического сканирования.

Для обеспечения необходимой представительности изучаемых объемов пород следует контролировать толщину рабочего слоя или глубину теплофизического зондирования. Обеспечение достаточно значительной глубины теплофизического зондирования необходимо с целью минимизировать влияние возможно нарушенного приповерхностного слоя зерна при бурении (2-4 мм) и вызванного этим изменения свойств данного приповерхностного слоя образцов. Вместе с тем, необходимость измерений тепловых свойств на тонких образцах, как например на синтетических образцах при измерениях тепловых свойств на шламе [146], должна обеспечивать возможность гибкой вариации параметров режима, что не обеспечивалось при использовании полевой установки оптического сканирования с применением электролампы в качестве источника тепла. Создание нового портативного, легко транспортируемого прибора оптического сканирования на основе полупроводникового лазера должно обеспечить решение данных задач с быстрой оптимизацией режимов измерений при массовых измерениях как в лабораториях, так и в условиях зернохранилищ, куда такой прибор мог бы быть легко доставлен.

Таким образом, разработка новых приборов для измерений комплекса тепловых свойств в сочетании с высокоразрешающей регистрацией неоднородности образцов пород требует оптимизации комплекса параметров режима работы прибора, включающего выбор и задание необходимых рабочей базы, температурной разрешающей способности датчиков температуры, постоянной времени, отношения сигнал-шум, необходимого и достаточного диапазона мощности источника нагрева образцов, формы и размеров пятна нагрева, стабильности мощности источника нагрева. При совершенствовании аппаратурно-методической базы оптического сканирования требуется обеспечение необходимого уровня метрологических характеристик измерений тепловых свойств – теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, коэффициента тепловой анизотропии – и текущего контроля метрологических характеристик теплофизических измерений.

Вслед за созданием технологии непрерывного профилирования тепловых свойств на керне скважин необходимо обеспечить ее применение на месторождениях углеводородов и выполнить следующие виды исследований:

- регистрация и интерпретация непрерывных профилей теплопроводности высокого разрешения (~1 мм) вдоль каждой изучаемой скважины для характеристики разномасштабной неоднородности пород разрезов;
- анализ корреляционных связей с другими свойствами пород, изучаемыми при геофизических исследованиях скважин;
- выделение свойств пород, наиболее тесно коррелирующих с тепловыми свойствами, установление соответствующих уравнений регрессии, анализ вариаций уравнений регрессии при исследованиях разных месторождений;
- анализ степени тепловой анизотропии пород и вариаций коэффициента тепловой анизотропии вдоль скважин;
- анализ вариаций степени тепловой неоднородности образцов пород вдоль скважин и изучение взаимосвязи степени тепловой неоднородности с текстурными особенностями пород;
- сочетание метода непрерывного теплофизического профилирования керна с дополнительными исследованиями тепловых свойств на стандартных цилиндрических образцах пород и на фрагментах дробленого керна с целью анализа вариаций тепловых свойств при насыщении пород разными флюидами, установления тепловых свойств минеральной матрицы пород, корректировки теоретических моделей теплопроводности;
- получение представительной информации о тепловых свойствах пород баженовской свиты и доманиковой формации с оценкой анизотропии и разномасштабной неоднородности пород;

- расширение круга задач нефтегазовой науки и индустрии, при решении которых важным являются исследования резервуаров углеводородов методами тепловой петрофизики.

## **ВЫВОДЫ**

1. Повышение эффективности бассейнового моделирования, проектирования и оптимизации тепловых методов добычи тяжелых нефтей, исследований месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов требует увеличения объема и повышения качества измерений комплекса тепловых свойств пород с учетом их анизотропии и разномасштабной неоднородности, что делает необходимым развитие экспериментальной базы тепловой петрофизики и повышение эффективности теплофизических исследований пород.
2. Совершенствование метода оптического сканирования является актуальным направлением работ для выполнения современных требований к развитию экспериментальной базы тепловой петрофизики и должно включать в себя оптимизацию параметров режима измерений и подготовки образцов пород к измерениям, разработку новых приборов оптического сканирования для расширения спектра задач, решаемых в рамках тепловой петрофизики путем высокоточных массовых измерений на полноразмерном керне, его малогабаритных дубликатах, стандартных образцах пород и мелких фрагментах дробленого керна с учетом высокой неоднородности и анизотропии пород месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов.
3. Необходимо создание метода экспрессного непрерывного теплофизического профилирования полноразмерного керна, обеспечивающего высокое пространственное разрешение при регистрации распределения тепловых свойств вдоль скважин, который мог бы быть комплексирован в рамках поточного профилирования свойств пород со скретч-тестированием керна и гамма-спектрометрическим каротажем на керне, данные которого можно было бы интегрировать с результатами геофизических исследований скважин.
4. Совершенствование экспериментальной базы тепловой петрофизики должно сопровождаться созданием новых методических разработок, обеспечивающих регистрацию распределения общего содержания органического вещества пород баженовской свиты и доманиковой формации вдоль скважин с высокой пространственной разрешающей способностью по результатам профилирования теплопроводности, определение вариаций теплопроводности минеральной матрицы вдоль скважин для традиционных коллекторов, анализ ориентации неизометричного

пустотного пространства пород и осуществление систематического контроля изменений свойств образцов в процессе лабораторных петрофизических исследований.

5. По мере развития экспериментальной базы тепловой петрофизики необходимо немедленное внедрение созданных разработок для повышения объема и качества информации о тепловых свойствах месторождений высоковязкой нефти, получения представительной информации о тепловых свойствах пород баженовской свиты и доманиковой формации, комплексирования результатов высокоразрешающего теплофизического профилирования керна с данными ГИС для повышения эффективности решения актуальных задач нефтегазовой науки и техники.

## **ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ТЕПЛОВОЙ ПЕТРОФИЗИКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ**

Как показано в главе 1, значительный ресурс развития экспериментальной базы тепловой петрофизики заключается в усовершенствовании метода оптического сканирования, что должно включать в себя совершенствование теоретических и экспериментальных основ метода, чему посвящена настоящая глава 2. Важному этапу развития экспериментальной базы - разработке новых приборов оптического сканирования, реализующих усовершенствованные теоретические и экспериментальные основы метода, основанных на новой элементной базе и предназначенных для решения новых задач тепловой петрофизики - посвящена глава 3.

Усовершенствованная аппаратурно-методическая база оптического сканирования должна обеспечить адаптацию метода и аппаратуры оптического сканирования к требованиям, сформулированным в разделе 1.4.3. Эти требования включают в себя, в частности, обеспечение одновременных измерений теплопроводности и температуропроводности/объемной теплоемкости с повышенным пространственным разрешением при регистрации неоднородности образцов пород, возможность измерений комплекса тепловых свойств как на полноразмерном керне, так и на стандартных образцах пород (цилиндры диаметром и высотой 30 мм) и небольших кусках дробленого керна (с характерным размером от 10 мм). Необходимо обеспечение параметров режима нагрева образцов пород и режима измерений, которые обеспечат снижение термического воздействия на образцы пород коллекторов с нетрадиционными запасами углеводородов (нефтяных сланцев) и флюидонасыщенные образцы, повышение скорости измерений, обеспечение целесообразной глубины теплофизического зондирования. Важно усовершенствовать подготовку образцов пород к измерениям так, чтобы устранить оказывавшиеся ранее на них нежелательные воздействия при выравнивании оптических характеристик поверхности образцов путем покраски эмалью и при последующем удалении эмали.

В рамках данного направления необходим также поиск технических решений, направленных на определение параметров режима измерений, обеспечивающих пространственное разрешение профилирования теплопроводности до 0,2 мм с сохранением возможности измерений полного комплекса тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости) при достижении необходимого уровня метрологических характеристик измерений.

## 2.1. Методика измерений тепловых свойств без применения покрытий для выравнивания оптических характеристик образцов керна и стандартных образцов пород

При измерениях тепловых свойств методом оптического сканирования с использованием формул (1.2) и (1.3) учитывается, что оптико-электронная база приборов оптического сканирования обеспечивает условия, при которых все приводимые в этих формулах разности электрических сигналов  $\Delta U$  в одинаковой степени пропорциональны разностям температур  $\Delta T$ , т.е. для всех разностей сигналов и температур достаточно строго выполняется соотношение

$$\Delta U = \chi \cdot \Delta T, \quad (2.1)$$

где  $\chi$  – коэффициент пропорциональности.

В рамках существовавшей до последнего времени практики, чтобы обеспечить одинаковую полезную мощность в пятне нагрева для всех образцов и одинаковую зависимость электрических сигналов инфракрасных датчиков температуры от коэффициента излучения поверхностей всех исследуемых и эталонных образцов, перед измерениями рабочие поверхности всех образцов пород и эталонных образцов обрабатывали так, чтобы обеспечить одинаковые коэффициенты поглощения и одинаковые коэффициенты излучения нагреваемых поверхностей образца породы и эталонных образцов. Для этого нагреваемые поверхности образца и эталонных образцов покрывали слоем эмали [76]. Для осадочных пород это является недостатком данного метода измерений, так как может к проникновению эмали в поры и трещины высокопористых и трещиноватых образцов, что, возможно, приведет к изменению свойств образцов. Кроме того, нанесение эмали, выдержка образцов для ее высыхания, удаление слоя эмали после завершения измерений приводит к потерям рабочего времени. Удаление эмали механическим путем не допускается собственниками керна во избежание практически необратимых изменений образцов пород.

При нагреве образца подвижным пятном нагрева и регистрации избыточной температуры нагрева подвижными датчиками температуры (рисунок 1.7) избыточная температура нагрева  $\Delta T_1$  образца твердого тела в области регистрации ее датчиком температуры 4 определяется соотношением [67]

$$\Delta T_1 = \frac{q}{2\pi\lambda x_1}, \quad (2.2)$$

где  $q$  – мощность локального источника тепла в пятне нагрева, а избыточная температура нагрева  $\Delta T_2$  образца твердого тела в области регистрации ее датчиком температуры теоретически определяется соотношением [67]

$$\Delta T_2 = \frac{q}{2\pi\lambda L} \cdot \exp\left(\frac{v(x_1 - R)}{2a}\right), \quad (2.3)$$

где  $R = ((x_1)^2 + (y_0)^2)^{1/2}$  (рисунок 1.7),  $v$  – скорость движения пятна нагрева и участка регистрации температуры датчиком 5 температуры относительно нагреваемого образца породы.

При нагреве поверхности образца породы оптическим источником, когда от источника на поверхность образца попадает излучение мощностью  $q$ , эффективная, т.е. поглощаемая образцом породы, мощность нагрева составляет  $\rho q$ , где  $\rho$  – коэффициент поглощения излучения поверхностью образца породы. Поэтому реальная избыточная температура нагрева поверхности образца породы  $(\Delta T_1)_p$  на участке ее регистрации датчиком 4 температуры составит [64]

$$(\Delta T_1)_p = \frac{\rho q}{2\pi\lambda x_1}, \quad (2.4)$$

а реальная избыточная температура нагрева поверхности образца породы  $(\Delta T_2)_p$  на участке ее регистрации датчиком 5 температуры составит [64]

$$(\Delta T_2)_p = \frac{\rho q}{2\pi\lambda L} \cdot \exp\left(\frac{v(x_1 - L)}{2a}\right) \quad (2.5)$$

В общем случае разность  $\Delta'U$  между электрическим сигналом  $U_6$  инфракрасного радиометра 6 для не нагретой поверхности образцов с температурой  $T_0$  и электрическим сигналом  $U_4$  инфракрасного радиометра 4 или электрическим сигналом  $U_6$  инфракрасного радиометра для нагретой поверхности образцов с температурой  $T$  (где  $T$  равно  $T_1$  для радиометра 4 и  $T_2$  для радиометра 5) можно представить как [64]

$$\Delta'U \cong \mu r - \mu r_0 = \mu(r - r_0) = \Delta r, \quad (2.6)$$

где  $\mu$  – коэффициент преобразования инфракрасного радиометра, который должен быть одинаковым для всех используемых радиометров, для чего необходимо использовать однотипные инфракрасные радиометры 4, 5 и 6,  $r$  – энергетическая светимость нагретой поверхности образца породы или эталонного образца,  $r_0$  – энергетическая светимость ненагретой поверхности образца породы или эталонного образца,  $\Delta r = r - r_0$ .

Согласно закону Стефана-Больцмана, энергетическую светимость можно выразить через температуру поверхности исследуемого образца породы или эталонного образца как

$$r = \varepsilon\sigma T^4, \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент излучения нагреваемой поверхности образца,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – абсолютная температура поверхности образца породы или эталонного образца.

Согласно (2.6) и (2.7), разность электрических сигналов  $\Delta'U$  можно представить следующим образом [64]:

$$\Delta'U \cong \mu(r - r_0) = \mu\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4). \quad (2.8)$$

Известно, что для любой функции  $F=F(z)$  ее приращение  $\Delta F$  при малых изменениях аргумента  $\Delta z$  можно выразить как

$$\Delta F = \frac{dF}{dz} \cdot \Delta z, \quad (2.9)$$

где  $\frac{dF}{dz}$  - первая производная функции  $F$  по  $z$ .

Уровни избыточных температур  $\Delta T_i$  являются существенно меньшими, чем абсолютная температура  $T$  поверхностей образцов, которую, согласно методике измерений, обеспечивают близкой для всех нагреваемых образцов, не отличающейся более чем на 3 К, т.е. на 1% от уровня  $T$ , даже при массовых измерениях в условиях кернохранилищ. Любую разность сигналов  $\Delta U$ , т.е. разности электрических сигналов  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_{1R1}$  и  $\Delta U_{1R2}$  инфракрасных датчиков температуры 4 и 6, соответствующие избыточной температуре  $(\Delta T_1)_p$  нагреваемого образца и избыточным температурам  $(\Delta T_{1R1})_p$  и  $(\Delta T_{1R2})_p$  эталонных образцов, а также разности электрических сигналов  $\Delta U_2$ ,  $\Delta U_{2R1}$  и  $\Delta U_{2R2}$  инфракрасных датчиков температуры 5 и 6, соответствующие избыточной температуре  $(\Delta T_2)_p$  нагреваемого образца и избыточным температурам  $(\Delta T_{2R1})_p$  и  $(\Delta T_{2R2})_p$  эталонных образцов, исходя из закона Стефана-Больцмана можно представить в виде [64]

$$\Delta'U \cong \mu \cdot \Delta r \cong \mu \cdot 4\varepsilon\sigma T^3 (\Delta T)_p \cong 4\mu\varepsilon\rho\sigma T^3 \Delta T, \quad (2.10)$$

где  $\mu$  - коэффициент преобразования инфракрасного радиометра,  $r$  – энергетическая светимость поверхности образца,  $\Delta r$  – повышение энергетической светимости образца породы после его нагрева,  $\rho$  – коэффициент поглощения нагреваемой поверхности образца,  $\varepsilon$  - коэффициент излучения нагреваемой поверхности образца,  $T$  – абсолютная температура

нагреваемой поверхности образца,  $\Delta T$  – реальная избыточная температура  $\Delta T_1$  или  $\Delta T_2$  нагреваемой поверхности образца.

При использовании одностипных инфракрасных радиометров 4, 5 и 6, имеющих практически равные коэффициенты преобразования регистрируемой энергетической светимости в электрический сигнал, формулу (2.10) можно записать в виде [64]

$$\Delta'U = K\varepsilon\rho\Delta T, \quad (2.11)$$

$$\text{где } K = 4\mu\sigma T^3.$$

Таким образом, при отсутствии специального одинакового покрытия поверхностей исследуемых образцов пород и эталонных образцов в исходных для расчетов тепловых свойств формулах (1.2) и (1.3) вместо разницы сигналов  $\Delta U$ , строго пропорциональной разности температур согласно (2.1), будет входить реальная разность сигналов  $\Delta'U$ . Эта реальная разность сигналов  $\Delta'U$ , согласно (2.1) и (2.11), связана с  $\Delta U$  соотношением [64]

$$\Delta U = \frac{K\varepsilon\rho}{\chi} \Delta'U \quad (2.12)$$

и, согласно (2.11), зависит не только от разности температур  $\Delta T$ , но и от параметра  $\varepsilon\rho$ , т.е. от оптических характеристик поверхности. В таком случае формальная подстановка  $\Delta'U$  в уравнения (1.2) и (1.3) вместо  $\Delta U$  может приводить к серьезным погрешностям измерений теплопроводности и температуропроводности, что требует анализа такого влияния на качество измерений и методических мер по устранению этого влияния.

При отсутствии специального покрытия, нанесенного перед началом измерений на образцы пород и эталонные образцы с известными теплопроводностью и температуропроводностью, теплопроводность каждого  $j$ -го образца породы из  $N_0$  образцов исследуемых пород, изучаемых при одном процессе сканирования ( $1 \leq j \leq N_0$ ), можно определить из формулы, следующей из формул (1.2) и (2.11) [64]:

$$\lambda_j = \frac{\lambda_{R1} \cdot \Delta U_{1R1} \cdot \frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_{R1} \rho_{R1}} + \lambda_{R2} \cdot \Delta U_{1R2} \cdot \frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_{R2} \rho_{R2}}}{2\Delta U_{1j}}, \quad (2.13)$$

где  $\Delta U_{1j}$  – разность электрических сигналов датчиков 4 и 6 для  $j$ -го исследуемого образца, а температуропроводность каждого  $j$ -го образца породы из  $N_0$  исследуемых образцов можно определить из формулы, следующей из формул (1.3) и (2.11) [64]:

$$a_j = \frac{a_{R1} \cdot \ln \left( \frac{\lambda_{R1} \cdot \Delta'U_{2R1} \cdot \varepsilon_{R2} \rho_{R2}}{\lambda_{R2} \cdot \Delta'U_{2R2} \cdot \varepsilon_{R1} \rho_{R1}} \right)}{\ln \left( \frac{\lambda_{R1} \cdot \Delta'U_{2R1} \cdot \varepsilon_{R2} \rho_{R2}}{\lambda_{R2} \cdot \Delta'U_{2R2} \cdot \varepsilon_{R1} \rho_{R1}} \right) + \frac{a_{R2} - a_{R1}}{a_{R2}} \cdot \ln \left( \frac{(\lambda_{R1} \cdot \Delta'U_{1R1} + \lambda_{R2} \cdot \Delta'U_{1R2}) \cdot \Delta'U_{2j}}{\lambda_{R1} \cdot \Delta'U_{1j} \cdot \Delta'U_{2R1} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_{R1} \rho_{R1}}{\varepsilon_{R2} \rho_{R2}}\right)} \right)}, \quad (2.14)$$

где  $\Delta'U_{2j}$  – разность электрических сигналов датчиков 5 и 6 для  $j$ -го исследуемого образца, индекс “ $j$ ” при коэффициентах поглощения и излучения соответствует характеристикам образцов пород, а индексы  $R_1$  и  $R_2$  при коэффициентах поглощения и излучения соответствуют эталонным образцам 7 и 8.

При использовании  $N$  эталонных образцов ( $N \geq 2$ ), размещаемых последовательно с исследуемыми образцами пород, формула (2.7) приобретает вид [64]

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \lambda_{Ri} \cdot \Delta'U_{1Ri} \cdot \frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_{Ri} \rho_{Ri}}}{N \cdot \Delta'U_{1j}}, \quad (2.15)$$

а формула (2.14) приобретает вид [64]

$$a_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{\substack{m,k=N(m \neq k) \\ m,k=1(m \neq k)}} a_{Rm} \cdot \ln \left( \frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{2Rm} \cdot \varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta'U_{2Rk} \cdot \varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}} \right) \frac{1}{\ln \left( \frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{2Rm} \cdot \varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta'U_{2Rk} \cdot \varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}} \right) + \frac{a_{Rk} - a_{Rm}}{a_{Rk}} \cdot \ln \left( \frac{(\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{1Rm} + \lambda_{Rk} \cdot \Delta'U_{1Rk}) \cdot \Delta'U_{2j}}{\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{1j} \cdot \Delta'U_{2Rm} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_{Rm} \rho_{Rm}}{\varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}}\right)} \right)}, \quad (2.16)$$

где  $i, m$  и  $k$  – переменные суммирования ( $1 \leq m, k \leq N$  при  $m \neq k$ ),  $n$  - количество размещений из  $N$  по 2.

Непосредственное определение отношения  $(\varepsilon_{Rk} \rho_{Rk}) / (\varepsilon_{Rm} \rho_{Rm})$ , входящего в формулу (2.16) и необходимого для определения температуропроводности образцов пород, предлагается осуществлять путем нагрева эталонных образцов и регистрации при помощи датчиков 4 и 6 электрических сигналов  $\Delta'U_{1Rk}$  и  $\Delta'U_{1Rm}$  [57]. Из формул (2.2) и (2.11) следует, что [64]

$$\frac{\Delta'U_{1R1}}{\Delta'U_{1R2}} = \frac{(\varepsilon_{R1} \rho_{R1}) \cdot \lambda_{R2}}{(\varepsilon_{R2} \rho_{R2}) \cdot \lambda_{R1}}, \quad (2.17)$$

откуда получаем соотношение для оценки отношения  $(\varepsilon_{Rk}\rho_{Rk})/(\varepsilon_{Rm}\rho_{Rm})$  путем определения электрических сигналов  $\Delta'U_{1Rk}$  и  $\Delta'U_{1Rm}$  и по известным значениям теплопроводности  $\lambda_{Rk}$  и  $\lambda_{Rm}$  эталонных образцов [64]:

$$\frac{\varepsilon_{Rk}\rho_{Rk}}{\varepsilon_{Rm}\rho_{Rm}} = \frac{\Delta'U_{1Rk} \cdot \lambda_{Rk}}{\Delta'U_{1Rm} \cdot \lambda_{Rm}} . \quad (2.18)$$

Технически несложно предварительно обработать поверхности каждого  $i$ -го эталонного образца из  $N$  эталонных образцов так, чтобы обеспечить одинаковое произведение для всех эталонных образцов, т.е. обеспечить равенство

$$\varepsilon_{Ri}\rho_{Ri} = \varepsilon_R\rho_R , \quad (2.19)$$

Выполнение условия  $\varepsilon_{Ri}\rho_{Ri} = \varepsilon_R\rho_R$  для поверхностей эталонных образцов осуществляют, нанося на них тонкий слой непрозрачного однородного вещества (краска, тонкая клейкая лента), что допустимо для эталонных образцов и приводит к равенству их коэффициентов поглощения и излучения. В таком случае теплопроводность каждого  $j$ -го исследуемого образца после завершения нагрева исследуемых образцов и эталонных образцов можно определять согласно соотношению, следующему из соотношения (2.15) при выполнении условия (2.19) [64]:

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_{Ri} \cdot \Delta'U_{1Ri}}{N \cdot \Delta'U_{1j}} \cdot \frac{\varepsilon_j\rho_j}{\varepsilon_R\rho_R} , \quad (2.20)$$

а температуропроводность каждого  $j$ -го исследуемого образца породы можно определять из соотношения, следующего из соотношения (2.16) при выполнении условия (2.19) [64]:

$$a_j = \frac{1}{n} \frac{\sum_{m,k=1(m \neq k)}^{m,k=N(m \neq k)} a_{Rm} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{2Rm}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta'U_{2Rk}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{2Rm}}{\lambda_{Rk} \cdot \Delta'U_{2Rk}}\right) + \frac{a_{Rk} - a_{Rm}}{a_{Rk}} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_j \cdot \Delta'U_{2j}}{\lambda_{Rm} \cdot \Delta'U_{2Rk}}\right)} . \quad (2.21)$$

Из уравнения (2.21) следует важный вывод о том, что отсутствие специального выравнивающего покрытия на образцах пород (непрозрачных для излучения источника тепла) не вносит дополнительной систематической погрешности в измерения температуропроводности, т.е. не влияет на качество измерений этой характеристики [57].

В то же время, согласно соотношению (2.20), отсутствие покрытия вносит систематическую (неконтролируемую) погрешность в измерения теплопроводности, причем, как это следует из (2.20), на практике эта погрешность может достигать десятков процентов при значительных различиях в  $\varepsilon_j\rho_j$  и  $\varepsilon_R\rho_R$ . Так, например, при  $\varepsilon_j\rho_j=0,8$  и при  $\varepsilon_R\rho_R=0,95$ , т.е. даже при не столь значительном различии оптических характеристик эталонных образцов и исследуемого образца, согласно (2.20) погрешность составит 41%, что на практике является

недопустимым. Чтобы избежать систематических погрешностей при измерениях теплопроводности в случае отсутствия покрытия на образцах пород, следует предварительно разделять исследуемые образцы на группы, каждая из которых включает в себя исследуемые образцы с одинаковыми (близкими) коэффициентами поглощения и одинаковыми (близкими) коэффициентами излучения, что обеспечивает стабильность произведения  $\varepsilon_j \rho_j$  для образцов каждой группы. Далее, из каждой группы отбирают по одному образцу породы и для каждого отобранного образца осуществляют измерение теплопроводности методом оптического сканирования с использованием формулы (2.15). Измеренное таким образом значение теплопроводности будет искаженным и составит отличное от действительного значение  $\lambda_{ошиб}$  из-за неопределенности коэффициентов поглощения и излучения отобранных образцов пород без покрытия. При использовании  $N$  эталонных образцов и использовании каждого из них для определения теплопроводности отобранного исследуемого образца породы значение  $\lambda_{ошиб}$  согласно формуле (2.15) определяется как [64]

$$\lambda_{ошиб} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_{Ri} \cdot \Delta' U_{1Ri}}{N \cdot \Delta' U_1} \quad (2.22)$$

Ошибка в измерении теплопроводности для отобранного образца без покрытия обусловлена тем, что формулы (2.15) и (2.22) справедливы лишь при условии  $\varepsilon_j \rho_j = \varepsilon_R \rho_R$ , т.е. когда поверхности исследуемых образцов пород имеют такое же произведение коэффициентов поглощения и излучения, что и эталонные образцы. В данном же случае отношение  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$  является неизвестным, что и приводит к ошибке измерений. С действительным значением теплопроводности  $\lambda$  отобранного образца измеренное значение  $\lambda_{ошиб}$  связано соотношением, следующим из соотношений (2.15) и (2.22) [64]:

$$\lambda = \lambda_{ошиб} \cdot \frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R} \quad (2.23)$$

После измерений  $\lambda_{ошиб}$  предлагается обработать поверхность каждого отобранного исследуемого образца или ее часть этой поверхности вдоль линии нагрева так, чтобы обеспечить одинаковое произведение коэффициента поглощения и коэффициента излучения обработанных поверхностей отобранных исследуемых образцов и эталонных образцов. Это можно сделать, например, покрыв поверхность каждого отобранного образца или часть этой поверхности вдоль линии нагрева слоем той же краски или той же клейкой ленты, которые использовались для покрытия поверхности эталонных образцов. После этого вновь при помощи формулы (2.22), теперь уже корректной для данного случая, поскольку обеспечено соблюдение условия  $\varepsilon_j \rho_j =$

$\varepsilon_R \rho_R$ , определяют теплопроводность путем нагрева обработанных участков поверхностей отобранных исследуемых образцов пород и регистрации на них избыточных температур нагрева. Далее по результатам двух измерений теплопроводности отобранных исследуемых образцов – сначала на необработанных, а потом на обработанных участках поверхности – из соотношения (2.23) определяют для каждого отобранного исследуемого образца отношение  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$ , т.е. отношение произведения коэффициента поглощения и коэффициента излучения каждого отобранного исследуемого образца к произведению коэффициента поглощения и коэффициента излучения эталонных образцов [64]:

$$\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{ошиб}}} \quad (2.24)$$

Далее при помощи метода оптического сканирования проводят измерения теплопроводности и температуропроводности остальных образцов из той серии, к которой относился отобранный образец, при этом на поверхность каждого образца из данной серии не наносят никакое покрытие. Поскольку соотношение (2.24) является общим для всех образцов данной серии и, следовательно, отношение  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$  является известным для всех образцов данной серии, определение теплопроводности каждого исследуемого образца из данной серии осуществляют при помощи формулы (2.22), а определение температуропроводности каждого исследуемого образца из данной серии осуществляют при помощи формулы (2.21). Точно так же при помощи известного способа проводят измерения теплопроводности и температуропроводности всех образцов из других серий, используя для образцов каждой серии значения отношения  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$ , установленные предварительно для отобранных образцов из каждой серии так, как это рекомендуется выше.

Для повышения точности определения отношения  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$  для каждого отобранного образца из каждой серии поверхность каждого отобранного образца можно разделить на две части вдоль линии нагрева. Первую часть поверхности после первых измерений на ней теплопроводности ( $\lambda_{\text{ошиб}1}$ ) покрывают перед вторым измерением теплопроводности слоем той же краски или той же клейкой ленты, которые использовались для покрытия поверхности эталонных образцов с известными теплопроводностью и температуропроводностью, для обеспечения условия  $\varepsilon_j \rho_j = \varepsilon_R \rho_R$ . Вторую часть поверхности после первых измерений на ней теплопроводности ( $\lambda_{\text{ошиб}2}$ ) оставляют без какой-либо обработки поверхности. После нанесения покрытия на первую часть поверхности каждого отобранного образца вдоль линии нагрева

определяют действительную теплопроводность  $\lambda$  на первой части отобранного образца и дополнительно вновь определяют теплопроводность  $(\lambda_{\text{ошиб-2}})_2$  на необработанных участках поверхностей для каждого отобранного исследуемого образца. После этого для каждого отобранного образца определяют отношение  $(\lambda_{\text{ошиб-1}})_2/(\lambda_{\text{ошиб-2}})_2$  значений теплопроводности  $(\lambda_{\text{ошиб-1}})_2$  и  $(\lambda_{\text{ошиб-2}})_2$ , полученных для второй части отобранного образца при измерениях до и после обработки поверхности первой части поверхности. Согласно формуле (2.15), разности выходных сигналов  $\Delta'U_1$  датчиков 4 и 6 температуры, регистрирующих температуру на необработанных участках каждого отобранного исследуемого образца, определяют измеряемое значение теплопроводности исследуемого образца. В случае, если мощность источника  $q$  стабильна и одинакова при нагреве как исследуемых образцов пород, так и эталонных образцов, величина мощности источника нагрева, согласно формулам (2.2), (2.3), (2.11), (2.15) и (2.16), не влияет на точность измерений теплопроводности и температуропроводности. Если же происходит случайное изменение мощности между первым измерением теплопроводности на отобранном образце без покрытия и вторым измерением теплопроводности на отобранном образце с покрытием второй части, а для эталонных образцов мощность источника нагрева при обоих измерениях теплопроводности на отобранном образце остается постоянной, то, согласно формулам (2.2), (2.11) и (2.22), это приводит к погрешности измерений теплопроводности  $\lambda$  и следовательно, как это следует из формулы (2.24), к погрешности определения необходимого отношения  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$ . Согласно соотношению (2.15), эта погрешность определения отношения  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$  внесет погрешность в результаты измерений теплопроводности на всех остальных образцах данной серии. Для исключения погрешности в определении отношения  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$  можно осуществлять выявление и исключение таких изменений мощности источника нагрева. С этой целью необходимо сравнение избыточного сигнала  $(\Delta'U_1)_1$  при первом измерении теплопроводности  $(\lambda_{\text{ошиб-2}})_1$  на той второй части поверхности отобранного образца, которая не будет подвергаться обработке перед вторым измерением после покрытия второй части поверхности отобранного образца, с избыточным сигналом  $(\Delta'U_1)_2$  при втором измерении теплопроводности на этой же второй части поверхности отобранного образца, при котором результат измерений составит  $(\lambda_{\text{ошиб-2}})_2$ . Согласно формулам (2.2), (2.11) и (2.15), относительное изменение избыточного сигнала  $\frac{(\Delta'U_1)_1}{(\Delta'U_1)_2}$  определяется соотношением [57, 64]

$$\frac{(\Delta'U_1)_1}{(\Delta'U_1)_2} = \frac{(\lambda_{\text{ошиб-2}})_1}{(\lambda_{\text{ошиб-2}})_2}. \quad (2.25)$$

Соотношение (2.25) позволяет определить соответствующую относительную погрешность измерений теплопроводности  $\lambda$  на первой части поверхности отобранного образца и, следовательно, согласно формуле (2.15), обеспечивает определение и учет погрешности отношения  $\frac{\varepsilon_j \rho_j}{\varepsilon_R \rho_R}$ . В свою очередь, это позволяет исключить обусловленную этим относительную погрешность измерений теплопроводности всех образцов данной серии [64].

Согласно метрологическим исследованиям, проведенным на одних и тех же образцах пород при нанесении на их поверхность специального покрытия и без него, описанный способ измерений тепловых свойств образцов горных пород без их покрытия вносит дополнительную погрешность при измерениях теплопроводности не более 3%, что, например, вполне допустимо при массовых измерениях на полноразмерном керне с целью регистрации вариаций тепловых свойств вдоль скважины. Результаты этих исследований показали, что качество измерений температуропроводности на полноразмерном керне (в случае непрозрачности пород в диапазоне излучения оптического источника и инфракрасных радиометров) без покрытия поверхности керна практически не изменяется [64].

Описанный в данном разделе способ измерений тепловых свойств без специального покрытия образцов пород был применен автором на практике для измерений более 1100 образцов пород баженовской свиты (глава 5).

## **2.2. Методика измерений тепловых свойств с выравниванием оптических характеристик поверхности образцов при помощи пленочного покрытия**

Для измерений тепловых свойств образцов керна, каждый или многие из которых характеризуются изменчивостью оптических характеристик (коэффициент поглощения и излучательная способность) и/или обладают значимым для метода измерений пропусканием инфракрасного излучения в спектральном диапазоне применяемого оптического источника тепла, автором предложено нанесение на поверхность образцов специально подобранной самоклеящейся пленки.

Пленка должна обладать следующими характеристиками:

- толщина пленки и ее тепловые свойства не должны приводить к дополнительным погрешностям измерений, ухудшающим метрологические характеристики метода;
- после нанесения пленки на поверхность образцов керна, стандартных и эталонных образцов должно обеспечиваться плотное ее прилегание к поверхностям образцов без воздушных или иных прослоек, способных повлиять на метрологические характеристики измерений тепловых свойств образцов пород;

- степень пропускания пленки для излучения источника тепла должна быть достаточно низкой, чтобы доля суммарного излучения, проходящего через пленку от источника к образцу и отраженного от поверхности образца и вновь проходящего через пленку в окружающее пространство, была столь низкой, чтобы сделать влияние вариаций оптических характеристик образцов пород, стандартных и эталонных образцов на качество измерений пренебрежимо малым;
- должна обеспечиваться возможность быстрого нанесения пленки на поверхность образцов керна перед измерениями, не снижающая существенно производительность процесса непрерывного профилирования тепловых свойств пород на керне;
- должна обеспечиваться возможность быстрого удаления пленки с поверхности образцов керна после завершения измерений;
- на поверхности образцов керна и стандартных образцов после удаления пленки не должны оставаться следы пленки, изменяющие свойства образцов и способные повлиять на процесс или результаты иных исследований свойств образцов;
- пленка должна быть достаточно доступной для регулярного ее применения при регулярных измерениях тепловых свойств пород методом оптического сканирования на многих тысячах образцов керна.

В результате экспериментальных метрологических исследований, проведенных автором для различных типов синтетических самоклеящихся пленок, было установлено, что в достаточной мере перечисленным требованиям удовлетворяет промышленно производящая термолента AVIORA (артикул - 302-049, производитель – торгово-производственная компания ASD, Россия), которая представляет собой поливинилхлоридную пленку, изготовленную на основе ПВХ-композиции, с нанесенным на одну сторону клеевым слоем. Толщина ленты составляет менее 110 мкм. Лента, благодаря высокой эластичности, плотно прилегает к поверхности образцов пород. Максимальная рабочая температура составляет до +125 °С, что хорошо подходит для применения при измерениях тепловых свойств пород методом оптического сканирования, где нагрев при измерениях не превышает температуру 60-70 °С. При более высоких температурах пленка не воспламеняется.

Исследования выбранной термоленты включали в себя:

- оценку коэффициента пропускания пленкой оптического излучения источника тепла,
- анализ изменений оптических характеристик поверхности образцов керна и стандартных образцов после нанесения и устранения пленки,
- сравнение результатов измерений теплопроводности и температуропроводности методом оптического сканирования стандартных образцов и образцов горных пород

при нанесении выбранной пленки и при использовании широко протестированного ранее нанесения покрытия нитроэмали.

Для быстрого и плотного нанесения пленки на поверхность образцов керна, не наносящего ущерба образцам, было предложено использовать подогрев пленки тепловым феном в процессе ее нанесения и одновременное накатывание ее на поверхность образцов резиновым валиком.

Установлено, что при использовании термоленты AVIORA для выравнивания оптических характеристик образцов керна и стандартных образцов основная погрешность сохраняется на уровне  $\pm 3$  для теплопроводности (при уровне случайной погрешности не более  $\pm 1,5\%$ ),  $\pm 4\%$  для температуропроводности и  $\pm 5\%$  для объемной теплоемкости (при доверительной вероятности 0,95).

### **2.3. Повышение эффективности метода оптического сканирования путем модификации параметров режима измерений для создания метода непрерывного теплофизического профилирования керна скважин**

Чрезмерно высокая температура поверхности образцов керна в пятне нагрева может приводить к фазовым изменениям поровых флюидов, возможности активной тепловой конвекции поровых флюидов в области высоких температурных градиентов, разрушению термоленты, предложенной для покрытия рабочей поверхности керна (раздел 2.2), изменениям органического вещества пород баженовской свиты и доманиковой формации. Для снижения максимальной температуры изучаемых образцов пород без снижения качества измерений тепловых свойств автором предложен специальное диафрагмирование излучения электроламп со встроенным отражателем для придания пятну нагрева эллиптической формы с длинной осью эллипса, направленной вдоль направления сканирования.

Еще одно предложенное изменение режима измерений, существенно повышающее эффективность метода оптического сканирования как в отношении повышения производительности измерений, так и в понижении температуры нагрева образцов пород, заключается в повышении скорости сканирования при выполнении условий, при которых такое изменение режима измерений не повлечет ухудшения качества измерений тепловых свойств.

Обоснованию предложенных изменений режима измерений и оптимизации его параметров применительно к созданию технологии высокопроизводительного непрерывного теплофизического профилирования полноразмерного керна посвящен данный раздел.

### 2.3.1. Анализ температурного поля образцов пород при вариациях геометрических параметров источника тепла

Возможности усовершенствования теоретической модели метода оптического сканирования путем изменений геометрических параметров пятна нагрева исследовались по результатам численного моделирования процесса теплопереноса при действии подвижных распределенных источников тепла на поверхности твердого тела в широком спектре тепловых свойств, соответствующих осадочным породам. Целью моделирования являлся анализ качества измерений тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости) в зависимости от различных параметров режима измерений, изучение возможности снижения теплового воздействия на изучаемые образцы пород и оптимизация метода измерений применительно к различным его модификациям.

Основной задачей анализа являлся поиск оптимальных значений основных параметров режима измерений (эффективная мощность источника тепла и геометрические параметры пятна нагрева, скорость сканирования, рабочая база, смещение поля зрения датчика температуры, обеспечивающего измерений температуропроводности и объемной теплоемкости (датчик 5 на рисунке 1.7)) для одновременного решения комплекса следующих задач:

- обеспечение режима нагрева сканируемого образца, позволяющего избежать перегрева образцов пород во избежание недопустимых изменений органического вещества, фазовых переходов и активных конвективных процессов в флюидонасыщенных образцах;
- обеспечение необходимых метрологических характеристик при измерениях тепловых свойств;
- обеспечение необходимой пространственной разрешающей способности при анализе степени неоднородности.

Математическая постановка задачи выглядит следующим образом. Эллиптический тепловой источник с нормальным распределением плотности теплового потока по каждой из осей эллипса движется с постоянной скоростью  $v$  по плоской поверхности образца с известными тепловыми свойствами и заданной начальной температурой  $T_0$ . Требуется определить избыточную температуру  $T - T_0$  при сканировании в точках образца, соответствующих регистрации температуры датчиками 4 и 5 на рисунке 1.7, обеспечивающими измерения теплопроводности и температуропроводности. Потерями энергии на излучение и конвекцию воздуха с поверхности образца пренебрегаем согласно данным работы, что практически не влияет на качество измерений благодаря тому, что данные факторы одинаково проявляются на изучаемых образцах пород и стандартных эталонных образцах тепловых свойств (образцовых мерах тепловых свойств) [67].

В таком случае распределение температуры в нагреваемом твердом теле описывается уравнением теплопроводности

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_i \nabla T); \quad T = T(x, y, z, t); \quad t \geq 0 \quad (2.26)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $T$  – температура,  $t$  – время,  $x, y, z$  – координаты.

Граничное условие на нагреваемой поверхности твердого тела (поверхности сканирования) зависит от задаваемой формы пятна нагрева. Для нормально-распределенного кругового источника тепла распределение плотности теплового потока  $q_0$  описывается уравнением [86]

$$q_0(X, Y, 0) = \frac{qk}{\pi} e^{-k((X-vt)^2 + Y^2)}, \quad (2.27)$$

где  $q$  – мощность источника тепла,  $k$  – коэффициент сосредоточенности источника тепла,  $X$  – координата по оси, направленной в направлении сканирования,  $Y$  – координата по оси, направленной перпендикулярно к направлению сканирования,  $v$  – скорость сканирования (рисунок 1.7).

Для эллиптического источника с нормальным распределением плотности теплового потока по обеим осям эллипса плотность теплового потока можно описать уравнением

$$q_0(x, y, 0) = \frac{q}{\pi ab} e^{-\left(\frac{(x-vt)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)}. \quad (2.28)$$

где  $a$  и  $b$  – длина осей эллипса соответственно вдоль и поперек направления сканирования.

Параметры распределения плотности теплового потока в пятне нагрева ( $k, a, b$ ) предварительно рассчитываются из условия воспроизведения пятна нагрева нужного размера и формы. Согласно [86], условным радиусом пятна нагрева при нормальном распределении удельного потока энергии считается расстояние, на котором удельный тепловой поток составляет 0,05 от его максимальной величины в центре пятна. На всех остальных границах твердого тела задаем условия адиабатичности, т.е. принимаем условие тепловой изолированности, т.е.  $dT/dn=0$  ( $\vec{n}$  – нормаль к поверхности тела), так как, как показано в [86], при сканировании образца с установившейся температурой теплообмен образца с окружающей средой столь незначителен, что поверхности, ограничивающие образец, можно считать адиабатическими.

Моделирование процесса сканирования выполнено с помощью программного обеспечения пакета COMSOL Multiphysics® с использованием модуля «Теплопередача» (Heat Transfer Module). С целью минимизации вычислительных затрат использовалась неравномерная сетка (см. пример на рисунке 2.1) с максимальной плотностью вдоль линии сканирования.

Проверка на сеточную сходимость была успешно осуществлена для случая с наименьшим пятном нагрева (расчет для большего пятна нагрева на той же сетке будет тем более сходиться, т.к. градиенты температуры будут меньше).

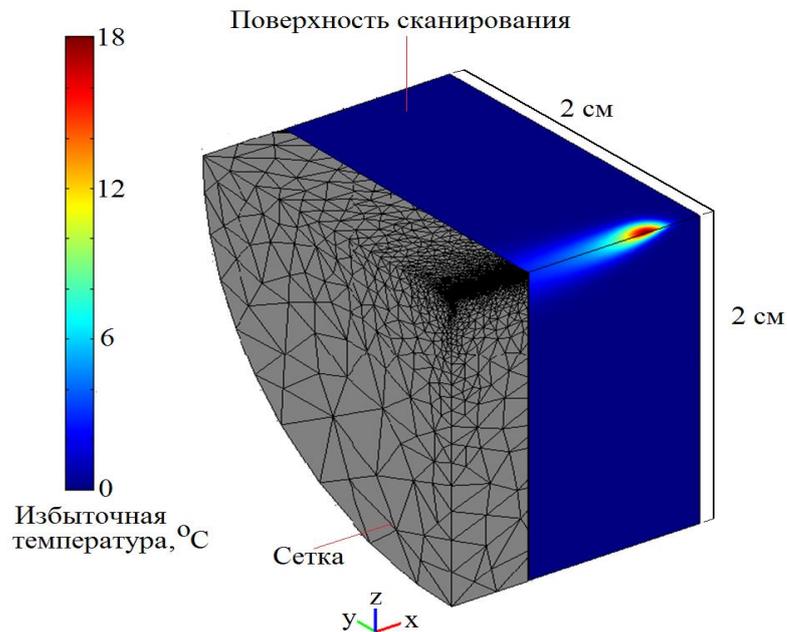


Рисунок 2.1. – Пример расчетной сетки с наложенным результатом расчета распределения температуры (уровень температуры показан цветом) по образцу керна. Для наглядности показана половина образца (распределение температуры симметрично:  $T(x,y,t) = T(x,-y,t)$ ).

Анализ показал, что полученное решение с удовлетворительной для предназначенного использования точностью совпадает с аналитическим решением [86] в случае нагрева однородного образца как подвижным точечным, так и подвижным нормально-распределенным круговым источником. Так, расхождение в избыточной температуре, полученной численно и аналитически, не превышает 0,1% вдоль линии сканирования образца. Для исследования влияния вариаций параметров режима измерений тепловых свойств при помощи технологии оптического сканирования, необходимых для усовершенствования технологии применительно к созданию метода прерывного теплофизического профилирования керна скважин, использовалась теоретическая модель метода оптического сканирования, созданная на основе программного пакета COMSOL.

При помощи описанной численной модели проведены расчеты характеристик температурного поля образцов пород и применяемых стандартных образцов тепловых свойств для комбинаций их тепловых свойств и параметров режима измерений, указанных в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Варианты расчетов параметров температурного поля изучаемых образцов пород (ось эллиптического пятна нагрева в направлении поперек линии сканирования принята 5 мм во всех случаях).

Номер	Тепловые свойства образцов			Форма источника				Скорость, мм/с					Смещение Y, мм					
	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a$ , мм <sup>2</sup> /с	$C$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1	1,5	2	3	2	4,5	7	10	20	0	2	4	6	8	10
1	0,36	0,40	0,90	+	+	+	+		+				+			+		
2	0,50	0,50	1,00	+	+	+	+		+				+			+		
3	1,20	0,60	2,00	+					+				+			+		
4	1,35	0,83	1,63	+	+	+	+		+				+	+	+	+	+	+
5	1,50	1,00	1,50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	2,00	1,11	1,80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	2,00	1,00	2,00	+					+				+			+		
8	3,00	1,30	2,30	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	3,00	1,50	2,00	+	+	+	+		+				+			+		
10	3,15	1,41	2,23	+	+	+	+		+				+	+	+	+	+	+
11	4,00	1,43	2,80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12	4,00	2,00	2,00	+					+				+			+		
13	4,60	1,92	2,40	+	+	+	+		+				+			+		
14	5,72	2,29	2,50	+	+	+	+		+				+			+		
15	7,20	2,77	2,60	+	+	+	+		+				+			+		

Комбинации тепловых свойств пород для расчетов (таблица 2.1) соответствуют результатам измерений тепловых свойств пород на многочисленных представительных коллекциях керна для более чем 20 месторождений в баженовской свите и доманиковой формации, 5 месторождений тяжелой нефти и более чем 10 месторождений с традиционными коллекторами. На рисунке 2.2 приведено поле корреляции между задаваемыми значениями теплопроводности и объемной теплоемкости, отражающее данные, приведенные в таблице 2.1. На этом же рисунке для сравнения приведены расчетные данные для комбинаций этих же тепловых свойств, характерных для пород баженовской свиты и доманиковой формации, а также кварцевых песчаников, представляющих коллектора Ярегского месторождения тяжелой нефти [82]. Как видно из рисунка 2.2, кривая регрессии для исходных данных, представленных в таблице 2.1, и расчетные зависимости достаточно близки. Кварцевые песчаники, относящиеся к числу наиболее теплопроводных типов осадочных пород, были выбраны для того, чтобы результаты расчетов соответствовали возможно большему диапазону тепловых свойств осадочных пород. Оценка эффективной теплопроводности  $\lambda_{эфф}$  двухфазной среды осуществлялась на основе теоретической модели Лихтенеккера-Асаада [112, 135]

$$\lambda_{эфф} = \lambda_{флюида}^{f\Phi} \cdot \lambda_{матр}^{1-f\Phi}, \quad (2.29)$$

где  $\lambda_{\text{флюида}}$  – теплопроводность порового флюида для традиционных коллекторов, включая коллектора с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов, или теплопроводность керогена (или совокупности разных видов органического вещества) для коллекторов с нетрадиционными запасами углеводородов,  $\lambda_{\text{матр}}$  – теплопроводность минеральной матрицы пород,  $\Phi$  – пористость для традиционных коллекторов или объемная доля керогена (или совокупности разных видов органического вещества),  $f$  - коэффициент Асаада.

Для оценки объемной теплоемкости  $C_{\text{эфф}}$  двухфазной среды использовали соотношение

$$C'_{\text{эфф}} = C_{\text{флюида}} \Phi + C_{\text{матр}} (1 - \Phi), \quad (2.30)$$

где  $C_{\text{флюида}}$  – объемная теплоемкость порового флюида для традиционных коллекторов, включая коллектора с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов, или объемная теплоемкость керогена (или совокупности разных видов органического вещества) для коллекторов с нетрадиционными запасами углеводородов,  $C_{\text{матр}}$  – объемная теплоемкость минеральной матрицы пород.

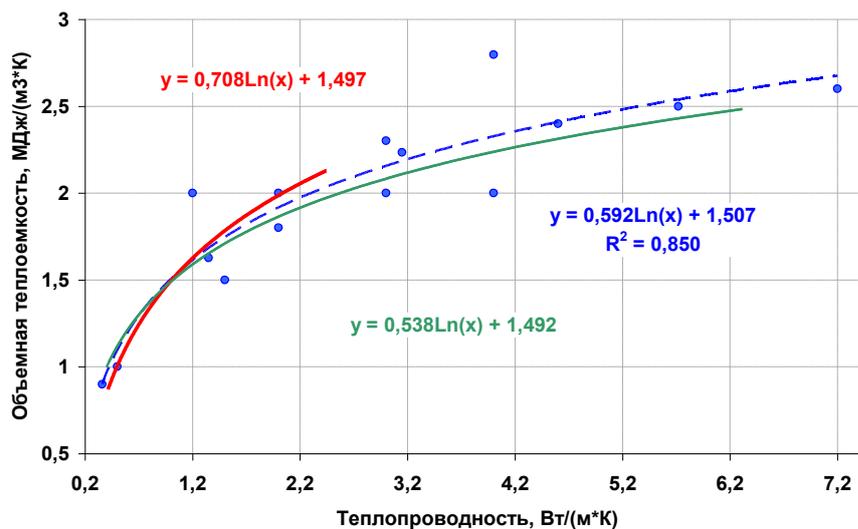


Рисунок 2.2. – Взаимосвязи теплопроводности и объемной теплоемкости, характеризующие исходные данные, использовавшиеся при численных расчетах (синие точки – данные из таблицы 2.1, синяя пунктирная кривая - кривая регрессии для тепловых свойств, представленных синими точками) и установленные согласно уравнениям 2.29 и 2.30 для пород баженовской свиты и доманиковой формации (красная кривая) и кварцевых песчаников (зеленая кривая).

В таблице 2.2 представлены исходные данные, использовавшиеся при оценке тепловых свойств пород по вышеприведенным соотношениям 2.29 и 2.30. Выбранные значения коэффициента Асаада соответствуют результатам тестирования теоретической модели Лихтенеккера-Асаада для кварцевых песчаников [42] и пород баженовской свиты [59]. Тепловые свойства минеральной матрицы и органического вещества принимались по результатам экспериментальных исследований тепловых свойств пород на представительных коллекциях для

коллекторов различных месторождений, включая породы баженовской свиты и доманиковой формации.

Таблица 2.2. Параметры, использовавшиеся для анализа связи между теплопроводностью и объемной теплоемкостью пород.

Тип коллектора	$\lambda_{\text{флюида}}$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{матр}}$ , Вт/(м·К)	$f$	$C_{\text{флюида}}$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)	$C_{\text{матр}}$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)
Традиционный	0,14	6,5	0,75	0,95	2,5
Нетрадиционный	0,1	2,7	0,6	0,80	2,2

### 2.3.2. Адаптация режима нагрева образцов пород к особенностям непрерывного профилирования тепловых свойств на керне коллекторов с нетрадиционными ресурсами углеводородов

Как указывалось в (1.3), актуальным является создание технологии непрерывного профилирования тепловых свойств на всем керне изучаемых скважин. Такое профилирование в общем случае должно осуществляться в условиях кернохранилищ. Реализацию подобных измерений наиболее целесообразно попытаться осуществить путем соответствующей адаптации так называемого полевого варианта прибора оптического сканирования, основанного на использовании специальных электрических ламп с фокусирующим отражателем в качестве источников тепла. Такой подход обусловлен более простым формированием пятна нагрева образцов пород с необходимыми геометрическими и энергетическими характеристиками, а также быстрой и недорогостоящей заменой источника тепла и блока его питания при выходе их из строя при работе в удаленных районах, отсутствием опасности запыления торцов световодов в прежних моделях полупроводниковых лазеров, приводившей к нарушению прозрачности торцов и их разрушению.

Адаптация параметров источника тепла и режима нагрева образцов пород к задаче непрерывного профилирования тепловых свойств на керне коллекторов с нетрадиционными ресурсами углеводородов должна основываться на одновременном выполнении следующих требований:

- обеспечение нагрева образцов пород с возможно меньшими значениями максимальных температур в пятне нагрева, с исключением уровня максимальной избыточной температуры выше 25°C (что соответствует максимальной температуре поверхности образцов 45-50°C) даже в течение времени около одной - двух секунд для образцов с органическим веществом во избежание необратимых изменений органического вещества;

- возможно наибольшее понижение максимальной температуры нагрева образцов пород в области пятна нагрева во избежание интенсивного испарения насыщающего флюида (воды) и понижение градиента температуры в этой области для исключения активной конвекции

насыщающего флюида, поскольку оба этих фактора могут привести к существенной неадекватности теоретических моделей метода оптического сканирования условиям экспериментальной его реализации, что повлияет на качество измерений тепловых свойств пород;

- обеспечение достаточной глубины зоны теплового зондирования образцов (5 мм и более), чтобы минимизировать влияние нарушенности приповерхностного слоя пород и соответствующее изменение его свойств, что связано с механическим воздействием на породы как при выбуривании керна, так и при распиливании его в условиях кернохранилищ для изготовления малогабаритных дубликатов керна, так называемых «горбушек»;

- обеспечение отношения сигнал/шум не менее 100:1 в поле зрения инфракрасного радиометра 4 (рисунок 1.7), обеспечивающего измерения теплопроводности, и не менее 50:1 в поле зрения радиометра 5 (рисунок 1.7), обеспечивающего измерения температуропроводности (раздел 1.4.1), что должно обеспечить случайные погрешности измерений данных теплопроводности и температуропроводности не более соответственно 1% и 2%. При разрешении по температуре в  $0,01^{\circ}\text{C}$ , достигаемом в настоящее время для инфракрасных радиометров, специально адаптированных для метода оптического сканирования в отношении размеров поля зрения, постоянной времени, формы и геометрических параметров, это означает, что избыточная температура в полях зрения радиометров должна быть не ниже  $1^{\circ}\text{C}$  для радиометра 4 (рисунок 1.7), предназначенного для измерений теплопроводности, и не ниже  $0,5^{\circ}\text{C}$  для радиометра 5 (рисунок 1.7), предназначенного для измерений температуропроводности.

Для обеспечения соотношения сигнал/шум не менее, чем 100:1 (соответствующего случайной погрешности не хуже 1%) для полевой установки оптического сканирования избыточная температура в поле зрения датчика температуры при рабочей базе 45 мм, используемой в применяемом варианте аппаратуры, должна составлять не менее  $1^{\circ}\text{C}$ . Как следует из соотношений (1.2), (2.2) и (2.3), избыточная температура в любой точке поверхности нагреваемого образца и в любой точке по его объему прямо пропорциональна мощности источника нагрева. Отсюда следует, что изменение мощности источника тепла от  $q_1$  до  $q_2$  в одинаковой степени изменяет как максимальную избыточную температуру  $\Delta_{\text{макс}}T$  поверхности в пятне нагрева, так и температуру  $\Delta_1T$  на линии движения центра пятна нагрева на расстоянии рабочей базы  $x_0$  от центра пятна нагрева (т.е. при  $x=-x_0$  и  $y=y_0$  на рисунке 1.7), т.е. выполняется соотношение

$$\frac{(\Delta_1T)_1}{(\Delta_1T)_2} = \frac{(\Delta_{\text{макс}}T)_1}{(\Delta_{\text{макс}}T)_2} = \frac{q_1}{q_2}, \quad (2.31)$$

где  $(\Delta_1 T)_1$  и  $(\Delta_1 T)_2$  – избыточные температуры в точке поверхности на  $x_0$  позади центра источника тепла и при  $y=0$  (рисунок 1.7) при мощности источника соответственно  $q_1$  и  $q_2$ ,  $(\Delta_{\max} T)_1$  и  $(\Delta_{\max} T)_2$  – максимальные избыточные температуры в пятне нагрева при мощности источника соответственно  $q_1$  и  $q_2$ .

Учитывая соотношение (2.31), необходимость выполнения требований  $\Delta_1 T \geq 1^\circ\text{C}$  и  $\Delta_{\max} T \leq 25^\circ\text{C}$ , за энергетический критерий приемлемости параметров режима измерений (мощности источника и скорости сканирования) можно принять отношение  $\frac{\Delta_{\max} T}{\Delta_1 T}$ , которое должно оставаться в пределах задаваемого диапазона и при заданных выше требованиях к параметрам  $\Delta_1 T$  и  $\Delta_{\max} T$  должно удовлетворять условию

$$\frac{\Delta_{\max} T}{\Delta_1 T} \leq 25. \quad (2.32)$$

Поскольку каждый из параметров  $\Delta_1 T$  и  $\Delta_{\max} T$  прямо пропорционален мощности источника, их отношение не зависит от мощности источника и является безразмерным критерием, характеризующим степень перегретости образца в области пятна нагрева при стандартном, требуемом уровне температуры в поле зрения инфракрасного датчика температуры 4 (рисунок 1.7), обеспечивающего измерение теплопроводности (т.е. в области на  $x_0$  позади центра пятна нагрева при  $y=0$ ). Подобный критерий можно ввести и для участка поверхности в поле зрения инфракрасного датчика температуры 5 (рисунок 1.7), обеспечивающего измерение температуропроводности (в области на  $x_0$  позади центра пятна нагрева при  $y=y_0$ ).

На рисунке 2.3а для образцов пород с различной теплопроводностью и объемной теплоемкостью (таблица 2.1) приведены расчетные профили избыточной температуры нагреваемой поверхности образцов вдоль линии движения центра источника тепла для случая нагрева реальным круговым нормально-распределенным источником тепла, которым может служить, например, специальная электролампа или лазерный источник тепла. Возможно более высокая концентрация энергии в пятне нагрева на поверхности изучаемого образца породы приводит к более высокой адекватности реального источника тепла его теоретической модели, использованной при выводе соотношения (1.3) и теоретических моделей (1.5) - (1.7) метода оптического сканирования. Вместе с тем, при таких же температурах в зоне их регистрации датчиками температуры 4 и 5 (рисунок 1.7) позади пятна нагрева повышение концентрации энергии в пятне нагрева приводит к более высоким максимальным температурам в пятне нагрева, что может привести к недопустимому перегреву органического вещества, а также вызвать опасность фазовых переходов и локальной конвекции воды в области пятна нагрева в связи с высокими градиентами температуры.

Для варианта установки оптического сканирования, предназначенного для измерений на полноразмерном керне [67], приемлемым является использование в качестве источника тепла специальной электролампы со встроенным отражателем. Это обеспечивает нагрев образцов пород с нормально-круговым распределением плотности теплового потока и при диаметре пятна нагрева 5 мм (по уровню 0,05 максимума плотности теплового потока [86]) создает условия для одновременных измерений теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости [76]. При расчетах избыточной температуры на поверхности образцов пород задавали избыточную температуру на линии движения центра источника тепла на расстоянии 45 мм от центра источника нагрева в  $1^{\circ}\text{C}$  для обеспечения соотношения сигнал/шум 100:1.

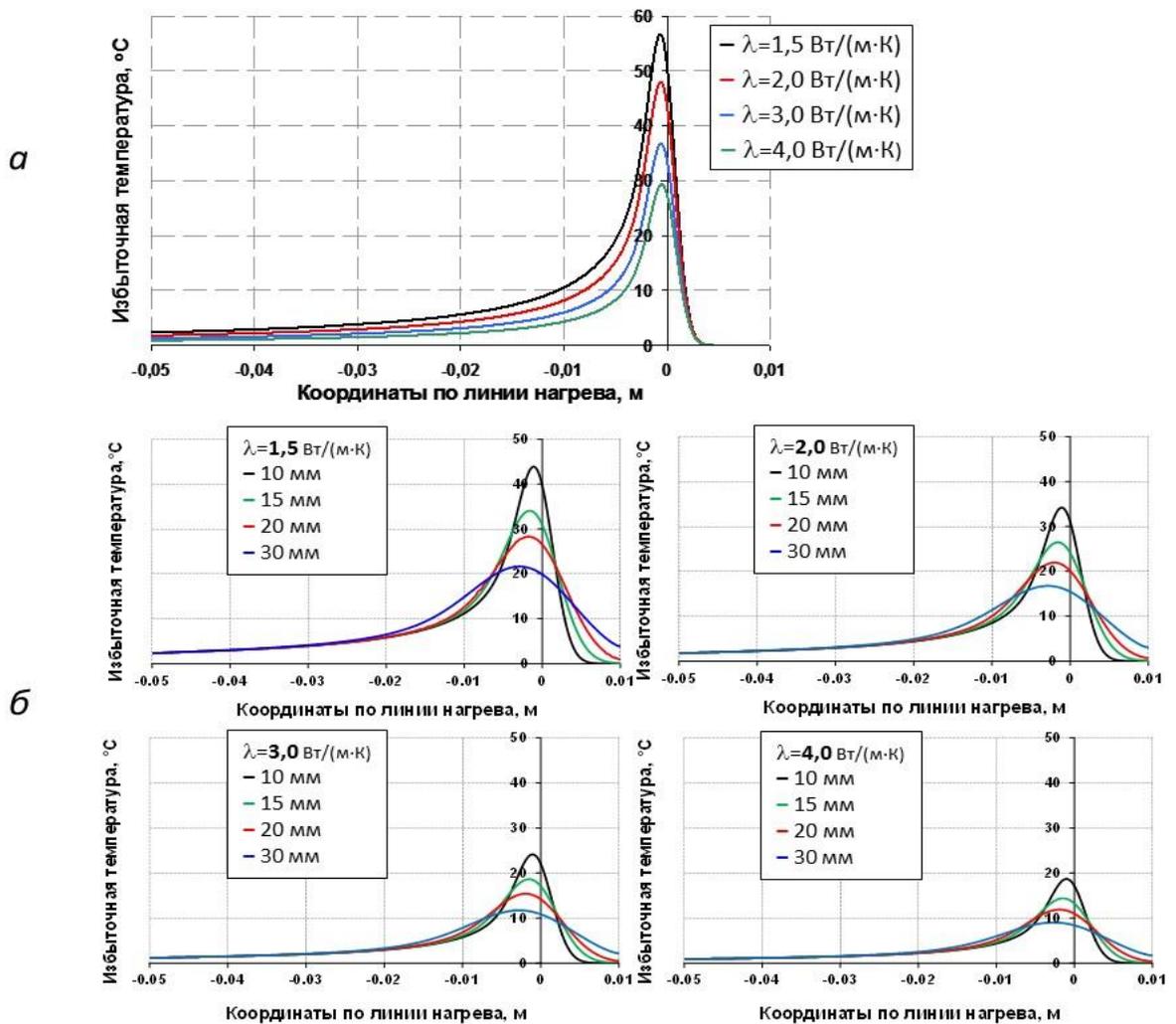


Рисунок 2.3. – Расчетные профили избыточной температуры нагреваемой поверхности образцов вдоль линии движения центра источника тепла в подвижной системе координат (скорость сканирования 4,5 мм/с, что соответствует созданной конструкции полевой установки оптического сканирования). *а*) Случай нагрева реальным круговым нормально-распределенным источником тепла с диаметром пятна нагрева 5 мм (по уровню 0,05 максимума плотности теплового потока). *б*) Случаи нагрева эллиптическим источником тепла с различными главными осями эллипса вдоль линии сканирования ( $a=10, 15, 20, 30$  мм) и главной осью 5 мм поперек линии сканирования. Скорость сканирования 4,5 мм/с. Соответствующие значения объемной теплоемкости приведены в таблице 2.1.

Из данных, приведенных на рисунке 2.3а, видно, что при температуре окружающей среды 20-25°C даже при наибольшем рассматриваемом значении теплопроводности пород 4 Вт/(м·К) максимальная температура нагрева образцов в круговом пятне нагрева может достигать 50-55°C (чему на рисунке 2.3а соответствует избыточная температура нагрева около 30 °С). При более низких значениях теплопроводности пород (согласно нашим измерениям, теплопроводность пород баженовской свиты и доманиковой формации варьирует в диапазоне 0,9 – 3 Вт/(м·К) в зависимости в основном от содержания органического вещества (глава 5)) или при высокой пористости (для традиционных коллекторов) максимальная температура может достигать еще больших значений (75-80 °С при теплопроводности 1,5 Вт/(м·К) и еще выше при меньших значениях теплопроводности), что недопустимо. Увеличение диаметра кругового пятна нагрева (например, до 10 мм) привело бы к понижению максимальной температуры в пятне нагрева, но вместе с тем вызвало бы значительное снижение качества измерений теплопроводности и объемной теплоемкости пород из-за возрастания неконтролируемых систематических погрешностей для определения этих тепловых свойств до значений более 10% в связи с возрастанием неадекватности теоретической и экспериментальной моделей теплопроводности (отличие реального распределенного пятна нагрева от идеализированного точечного, положенного в основу вывода соотношений (1.3) – (1.7)), что является неприемлемым. Уменьшение эффективной мощности в круговом пятне нагрева образцов при диаметре 5 мм с целью снижения максимальных температур в пятне нагрева приведет также к увеличению погрешности измерений каждого из изучаемых тепловых свойств (теплопроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости), так как вызовет снижение избыточной температуры в областях измерений теплопроводности (эта температура не должна составлять существенно менее 1°C) и теплопроводности и недопустимо ухудшит отношение сигнал/шум инфракрасных датчиков температуры 4 и 5 (рисунок 1.7).

Для решения проблемы предложены два взаимно дополняющих способа:

- способ 1 – диафрагмирование излучения лампового источника тепла таким образом, чтобы устранить области пятна нагрева, существенно удаленные от линии движения центра пятна нагрева, при этом диафрагмирование излучения лампового источника должно осуществляться таким образом, чтобы пятно нагрева приобрело форму эллипса, большая ось которого ориентирована вдоль линии сканирования, а малая ось направлена перпендикулярно к линии сканирования (результаты расчетов избыточных температур приведены на рисунке 2.3б);
- способ 2 - повышение скорости сканирования, что одновременно со снижением максимальной температуры нагрева образцов (как показано в разделе (2.3.3) позволяет существенно повысить производительность работ при непрерывном теплофизическом профилировании на керне скважин.

На рисунке 2.3б приведены результаты расчетов избыточных температур вдоль линии движения центра пятна нагрева для эллиптических пятен нагрева с малой осью эллипса 5 мм и большой осью эллипса, изменяющейся в диапазоне 10-30 мм (10, 15, 20 и 30 мм). Теплопроводность образцов принимали равной 1,5, 2, 3 и 4 Вт/(м·К) при объемной теплоемкости соответственно 1,5, 1,8, 2,3 и 2,8 МДж/(м<sup>3</sup>·К) (таблица 2.1), что соответствует уменьшению содержания менее теплопроводного и менее теплоемкого органического вещества. Как и для кругового нормально-распределенного источника тепла, расчеты проводились таким образом, что в поле зрения инфракрасного датчика температуры (координаты  $x=-0,045$  м и  $y=0$ ) для наиболее теплопроводного образца ( $\lambda=4$  Вт/(м·К)) избыточная температура составляет 1°C, что обеспечивает для этого образца и всех остальных, менее теплопроводных, образцов выполнение соотношения сигнал/шум на уровне не ниже 100:1. При расчетах учитывалось, что избыточная температура в любой точке нагреваемого твердого тела прямо пропорциональна эффективной мощности источника тепла согласно соотношению согласно соотношению (1.2).

На рисунках 2.4 и 2.5 приведены зависимости максимальной температуры нагрева образцов пород от теплопроводности образцов пород при разной длине оси эллипса, ориентированной вдоль линии сканирования (рисунок 2.4), и зависимости максимальной температуры нагрева от длины данной оси эллипса (рисунок 2.5). Данные на обоих рисунках получены для скорости сканирования 4,5 мм/с. При расчетах дополнительно рассматривались случаи измерений для образцов с теплопроводностью 0,36 и 0,50 Вт/(м·К) и объемной теплоемкостью соответственно 0,9 и 1,0 МДж/(м<sup>3</sup>·К). Это позволило более надежно установить уравнения регрессии, описывающие зависимости максимальной температуры от теплопроводности образцов пород и длины оси эллипса, приведенные на рисунках 2.4 и 2.5.

Из рисунка 2.4 следует, что максимальная избыточная температура нагрева поверхности образца пород баженовской свиты и доманиковой формации даже при наименьшей теплопроводности, соответствующей наибольшему общему содержанию органического вещества, зарегистрированному в наших экспериментах (главы 3-5), не превышает 27°C при большей оси эллиптического источника тепла 30 мм и не превышает 31°C при длине оси эллипса 20 мм, что является вполне допустимым при исследованиях данных пород. Установленные уравнения регрессии позволяют прогнозировать максимальную температуру нагрева при увеличении длины оси эллипса вдоль линии сканирования за границы изучавшегося диапазона ее значений.

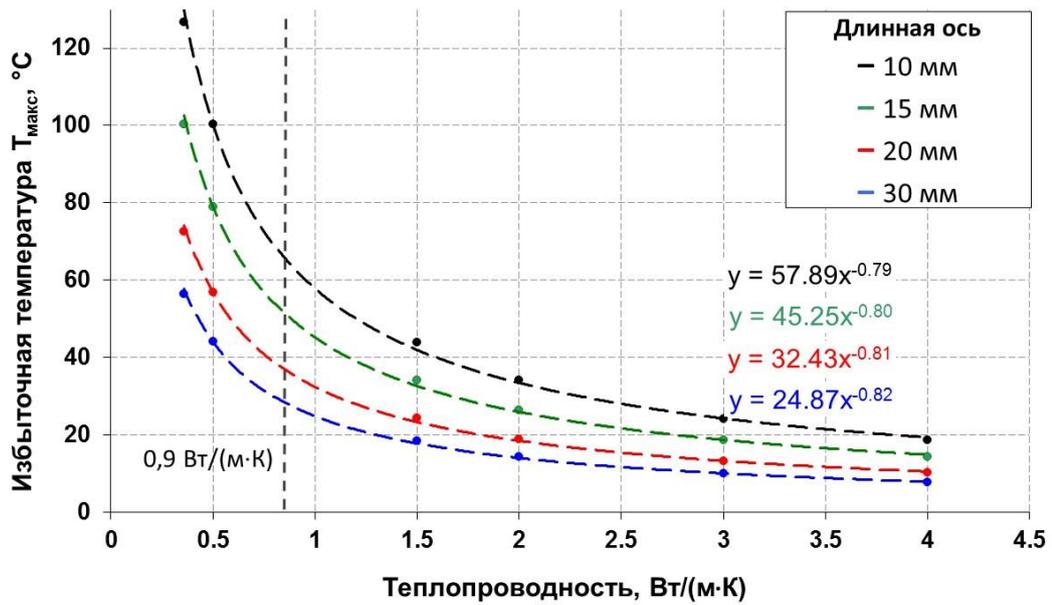


Рисунок 2.4. – Зависимости максимальной избыточной температуры нагрева образцов пород от длины оси эллипса, ориентированной вдоль линии сканирования, и теплопроводности образцов пород (скорость сканирования 4,5 мм/с). Уровень теплопроводности 0,9 Вт/(м·К) соответствует нижнему порогу теплопроводности пород баженовской свиты и доманиковой формации, зарегистрированному при экспериментальных теплофизических исследованиях месторождений [61, 65, 71], и соответствует наибольшим значениям общего содержания органического вещества, зарегистрированным для пород данных месторождений.

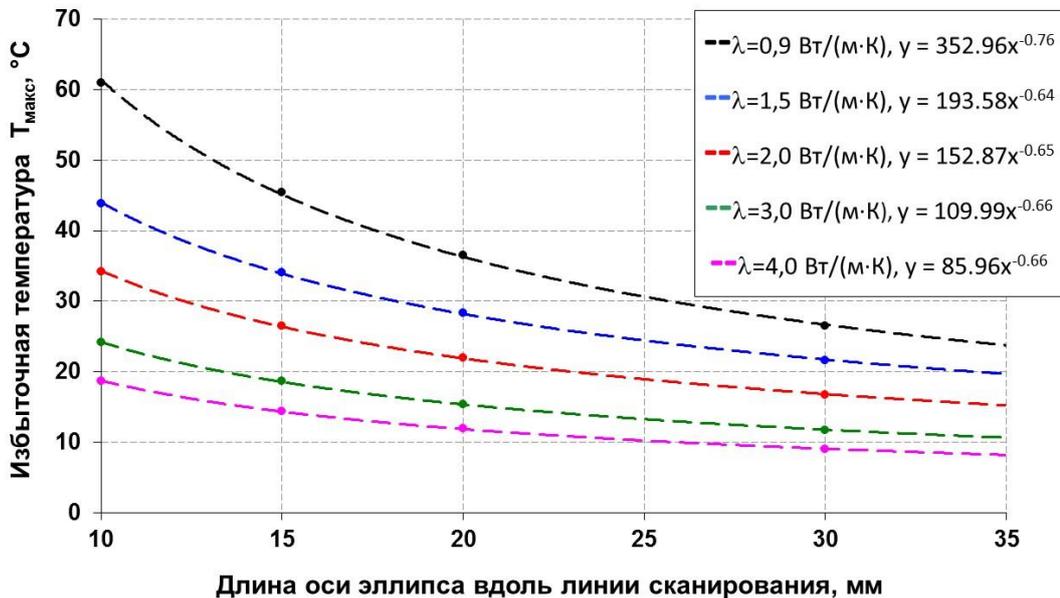


Рисунок 2.5. – Зависимость максимальной избыточной температуры нагрева образцов пород от длины оси эллиптического пятна нагрева вдоль направления сканирования.

Обеспечение необходимой эллиптичности пятна нагрева в полевых установках оптического сканирования осуществлено нами при помощи специального диафрагмирования пятна нагрева. Для новых разработанных лазерных установок оптического сканирования (глава 3) также осуществляется эллиптическое диафрагмирование в совокупности с выбором

соответствующего диаметра выходных элементов световодов (градианов) для полупроводникового лазера.

Еще более перспективным для будущих разработок является создание источников тепла с существенно более значительными длинными осями эллипса пятна нагрева или узким прямоугольным пятном нагрева, вытянутым вдоль направления сканирования. Наиболее эффективным для улучшения режима измерений должен быть переход к линейным источникам нагрева, совпадающим по направлению со скоростью сканирования. Однако это потребует, по всей видимости, применения существенно более сложных оптических устройств, возможно – с оптической разверткой лазерного луча. Как выше показано, преимущества применения таких источников, как и увеличение скорости сканирования (параграф 2.3.3) заключается в существенном снижении отношения максимальной избыточной температуры нагрева к избыточной температуре в областях ее регистрации для измерений теплопроводности и температуропроводности (соответственно области  $T_1$  и  $T_2$  на рисунке 1.7). Существенное снижение данного отношения создает возможности для повышения эффективности технологии оптического сканирования при решении важных задач, о чем говорится в конце параграфа 2.3.4.2.

### **2.3.3. Увеличение скорости сканирования как путь к повышению эффективности метода непрерывного теплофизического профилирования керна**

Созданные и применявшиеся ранее установки оптического сканирования осуществляли измерения при скорости сканирования 2-4,5 мм/с. Создание и внедрение метода непрерывного теплофизического сканирования керна для исследований пород баженовской свиты и доманиковой формации и месторождений высоковязких нефтей требует не только снижения максимальной избыточной температуры образцов пород, но и существенного повышения скорости проведения измерений. Возможность решения данной задачи изучалась в данной работе.

Расчеты параметров температурного поля изучаемых образцов пород при разных скоростях сканирования осуществлялись для диапазона теплопроводности пород 1,2 – 4 Вт/(м·К), характерного для пород баженовской свиты и доманиковой формации. Как и для случаев, описанных в предыдущем разделе, расчеты осуществлялись таким образом, чтобы наименьшая избыточная температура в поле зрения инфракрасного радиометра 4 (рисунок 1.7), обеспечивающего измерения теплопроводности, соответствующая наиболее теплопроводному из рассматриваемых образцов пород в указанном диапазоне, составляла 1°C, что соответствует требуемому отношению сигнал/шум 100:1. Согласно соотношениям (2.1) – (2.3), такой подход обеспечивает еще лучшее отношение сигнал/шум для всех образцов с меньшей теплопроводностью.

На рисунке 2.6 приведены установленные зависимости максимальной избыточной температуры нагрева образца от скорости сканирования при длинной оси эллиптического пятна нагрева 10 мм для диапазона скорости 2 – 20 мм/с при теплопроводности образцов пород в диапазоне 1,2 - 4 Вт/(м·К). Из рисунка 2.6. следует, что повышение скорости может обеспечить существенное понижение максимальной избыточной температуры. Так, переход от сканирования со скоростью 4,5 мм/с к сканированию со скоростью 10 мм/с снижает максимальную избыточную температуру на 35 и 43 % для образцов с теплопроводностью соответственно 1,2 и 4 Вт/(м·К). Это, в совокупности с предложенной эллиптической формой пятна нагрева (раздел 2.3.2), позволяет решить задачу снижения максимальных избыточных температур нагрева образцов пород баженовской и доманиковой свит до допустимых значений (25-30°C).

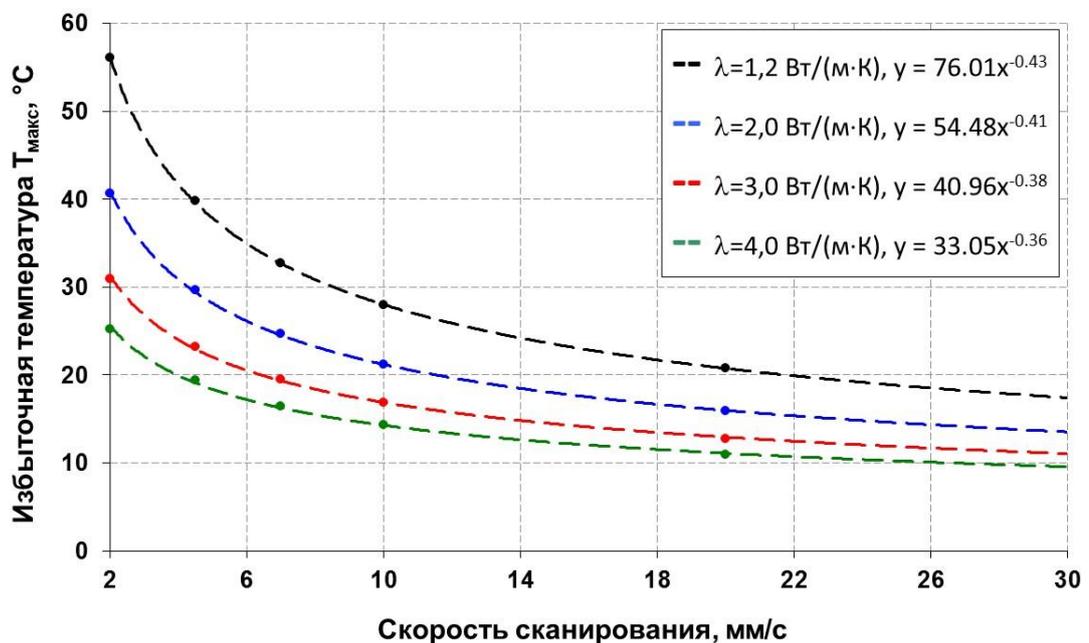


Рисунок 2.6. – Зависимость максимальной избыточной температуры нагрева образца от скорости сканирования.

На рисунке 2.7 приведены установленные зависимости максимальной избыточной температуры нагрева образца от теплопроводности пород при разных скоростях сканирования. Из рисунка 2.7 следует, что степень понижения максимальной избыточной температуры при повышении теплопроводности образцов приблизительно одинакова для различных скоростей сканирования в диапазоне скоростей 2-20 мм/с.

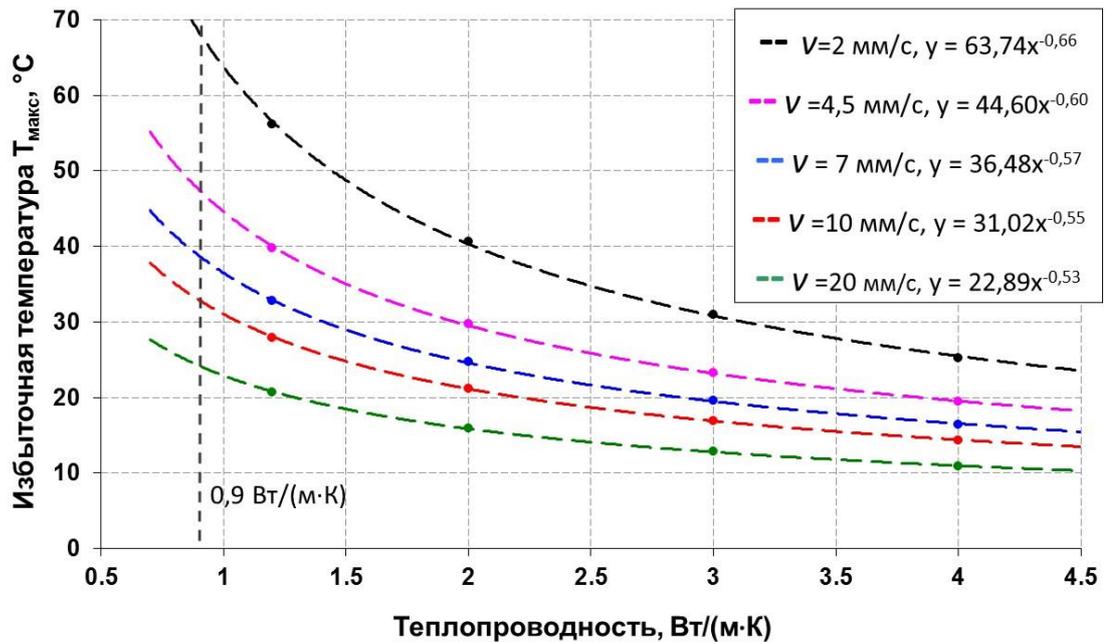


Рисунок 2.7. – Зависимость максимальной избыточной температуры нагрева от теплопроводности образцов (длинная ось эллиптического пятна нагрева – 10 мм). Уровень теплопроводности 0,9 Вт/(м·К) соответствует нижнему порогу теплопроводности пород баженовской и доманиковой формаций, зарегистрированному при экспериментальных теплофизических исследованиях месторождений [61, 65, 71], и соответствует наибольшим значениям общего содержания органического вещества, зарегистрированным для пород данных месторождений.

Установленные уравнения регрессии, описывающие взаимосвязь максимальных избыточных температур нагрева со скоростью сканирования и теплопроводностью образцов и показанные на рисунках 2.6 и 2.7, позволяют осуществлять корректный выбор параметров измерений при осуществлении измерений, модификации и проектировании систем оптического сканирования применительно к конкретным петрофизическим задачам.

#### 2.3.4. Влияние перехода к эллиптической форме области нагрева и повышения скорости сканирования на метрологические характеристики измерений тепловых свойств пород

Для оценки влияния предложенных новых конфигураций пятна нагрева и повышенной скорости сканирования на качество измерений тепловых свойств необходима оценка влияния вариаций формы и размеров пятна нагрева и скорости сканирования на случайную и систематическую погрешности измерений тепловых свойств для диапазонов 1...6,5 Вт/(м·К) для теплопроводности, 1,5...2,6 МДж/(м<sup>3</sup>·К) для объемной теплоемкости и 0,5...2,5 мм<sup>2</sup>/с для температуропроводности, характерных для пород баженовской свиты, доманиковой формации и других осадочных отложений.

### 2.3.4.1. Анализ зависимости случайных погрешностей измерений тепловых свойств от формы области нагрева и скорости сканирования

При отсутствии обоснованного алгоритма выбора взаимного расположения полей зрения датчиков температуры 4 и 5 и пятна нагрева (рисунок 1.7) качество измерений температуропроводности может достаточно серьезно уступать качеству измерений теплопроводности как в отношении систематической погрешности, так и в отношении случайной погрешности измерений. Повышенная, по сравнению с теплопроводностью, случайная погрешность измерений температуропроводности связана, в основном, с тем, что поле зрения инфракрасного датчика температуры 5 (рисунок 1.7) смещено относительно линии движения центра пятна нагрева, т.е. имеет место условие  $y_0 \neq 0$ . В связи с этим избыточная температура в поле зрения датчика 2 существенно меньше, чем температура в поле зрения датчика температуры 4 (рисунок 1.7), расположенного на линии движения центра пятна нагрева, т.е. при  $y_0 = 0$ , так как в основе применяемой теоретической модели метода лежит условие, что значение абсциссы  $x$  должно быть одинаковым для обоих датчиков температуры (рисунок 1.7).

В связи с этой проблемой важно оценить, как изменяются возможности регистрации избыточной температуры в поле зрения датчика 5 для измерений температуропроводности при предлагаемых переходах к эллиптическому пятну нагрева и повышенной скорости сканирования.

На рисунке 2.8 приведены значения избыточной температуры для постоянной рабочей базы  $x = -45$  мм, характерной для полевой версии прибора оптического сканирования, при значениях  $y_0 = 6$  мм и  $y_0 = 4$  мм и различных длинах оси эллипса пятна нагрева вдоль направления сканирования. Данные на рисунке показывают, что вариации оси эллиптического пятна нагрева крайне мало влияют на анализируемую избыточную температуру, в то время как данная температура существенно зависит от теплопроводности пород и величины смещения  $y_0$ .

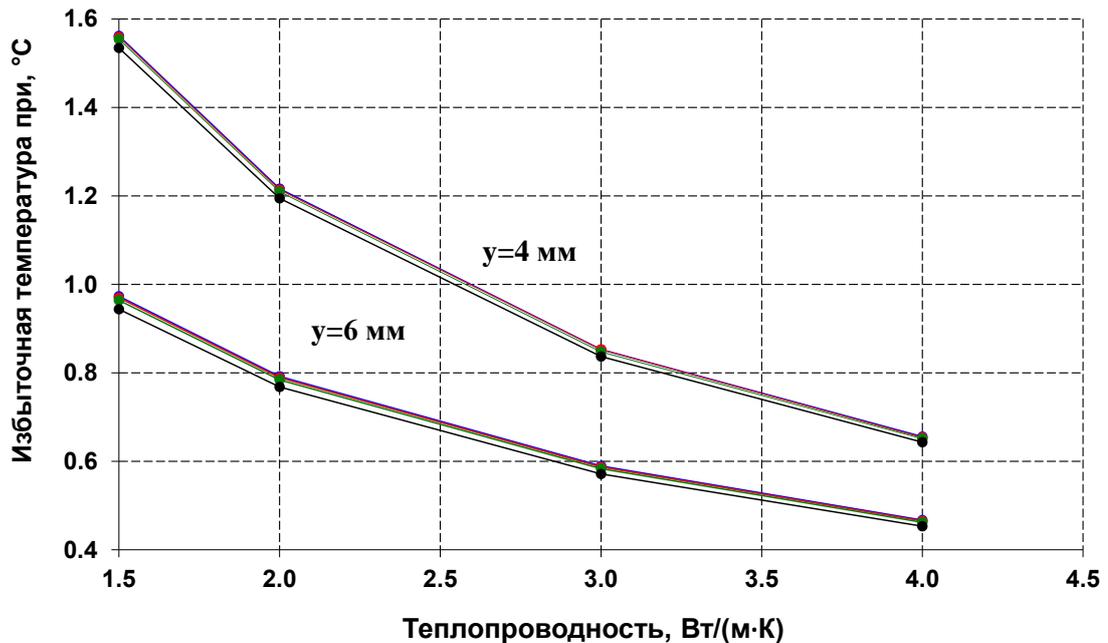


Рисунок 2.8. – Вариации избыточной температуры в поле зрения датчика температуры 5 (рисунок 1.7), предназначенного для измерений теплопроводности, в зависимости от теплопроводности образцов пород (1,2, 2, 3 и 4 Вт/(м·К)) при скорости сканирования 4,5 мм/с, значениях  $y_0=6$  мм и  $y_0=4$  мм и постоянной рабочей базе  $x_l = -45$  мм (рисунок 1.7), характерной для полевой версии прибора оптического сканирования, и различных длинах оси эллипса пятна нагрева вдоль направления сканирования. Верхняя группа данных соответствует смещению  $y_0=4$  мм, нижняя группа данных соответствует  $y_0=6$  мм.

На рисунке 2.9 показаны зависимости избыточной температуры при разных значениях  $y_0$  от 0 до 10 мм, трех значениях скорости сканирования (2, 4,5 и 10 мм/с) и двух значениях теплопроводности (1,2 и 3 Вт/(м·К)), близких к границам диапазона теплопроводности пород баженовской и доманиковой свит (главы 3, 5). Из рисунка 2.9 видно, что несмотря на должное отсутствие зависимости избыточной температуры от скорости сканирования согласно формуле (2.2), не учитывающей отличие реального пятна нагрева от идеализированного точечного пятна, в области с  $x=-45$  мм и  $y_0=0$  для образца с теплопроводностью 1,2 Вт/(м·К) такая зависимость проявляется, в то время как для образца с теплопроводностью 3 Вт/(м·К) она практически отсутствует. Это соответствует ранее установленной особенности метода оптического сканирования, согласно которой при современной экспериментальной реализации метода имеет место быстрое нарастание систематической погрешности измерений теплопроводности в области ее пониженных значений [67, 161]. Эта проблема решается нами путем использования двух стандартных образцов тепловых свойств в серии сканируемых образцов и введением соответствующих заранее установленных корректировок в программное обеспечение приборов оптического сканирования, которые автоматически учитываются непосредственно в процессе измерений.

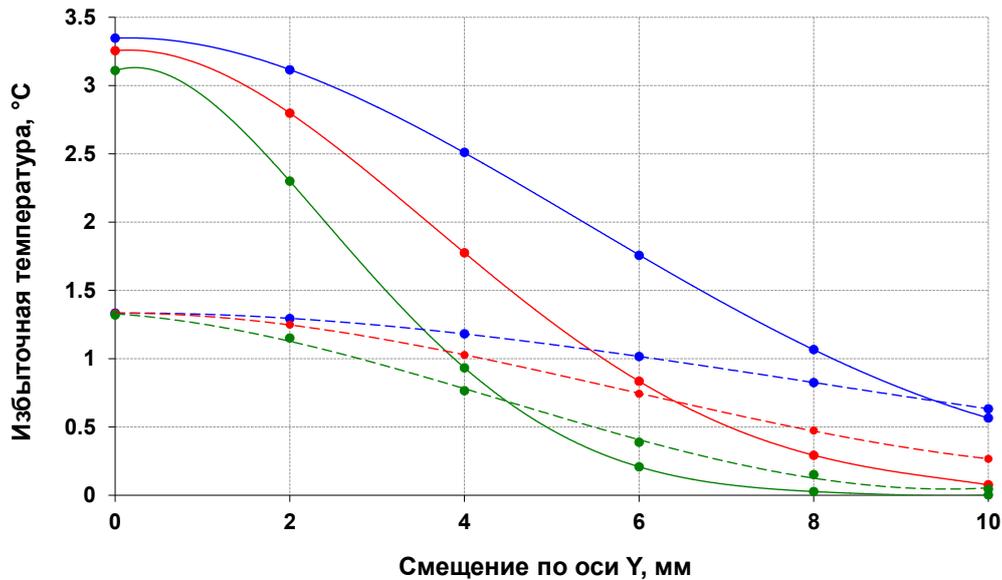


Рисунок 2.9. – Зависимость избыточной температуры в поле зрения инфракрасного датчика температуры 5 (рисунок 1.7), регистрирующего сигнал для измерений теплопроводности ( $x=-45$  мм,  $y_0 \neq 0$ ), от смещения поля зрения датчика по оси  $y$ . Сплошные линии – теплопроводность 1,2 Вт/(м·К), пунктирные линии - теплопроводность 3 Вт/(м·К); синий цвет – скорость сканирования 2 мм/с, красный цвет – 4,5 мм/с, зеленый цвет – 10 мм/с.

Согласно данным на рисунках 2.8-2.9, можно сделать следующие важные выводы в отношении измерений теплопроводности пород при повышении скорости сканирования.

1. При любой теплопроводности пород в рассмотренном диапазоне 1,2-3 Вт/(м·К) с повышением скорости сканирования наблюдается понижение избыточной температуры в областях нагреваемой поверхности с  $x=-45$  мм,  $y_0=4$  мм и  $y_0=6$  мм.

2. Степень уменьшения избыточной температуры с увеличением скорости сканирования возрастает с увеличением смещения  $y_0$ .

3. Для теплопроводности 3 Вт/(м·К), соответствующей верхней границе диапазона теплопроводности пород баженской свиты и доманиковой формации (главы 3 и 5), при скорости сканирования 10 мм/с уровень избыточной температуры в области с  $y_0=6$  мм/с ( $0,21^\circ\text{C}$  для теплопроводности 1,2 Вт/(м·К) и  $0,39^\circ\text{C}$  для теплопроводности 3 Вт/(м·К)) существенно ниже уровня, необходимого для измерений теплопроводности при стандартных измерениях ( $0,5^\circ\text{C}$  для обеспечения отношения сигнал/шум 50:1, что достигается с существенным запасом, согласно рисунку 2.9 при стандартной скорости 4,5 мм/с и  $y_0=6$  мм).

4. Обеспечить необходимый уровень избыточных температур и, соответственно, отношение сигнал/шум не хуже, чем 50:1, для участков с  $x=-45$  мм и  $y_0 \neq 0$  во всем рассматриваемом диапазоне теплопроводности можно, изменив смещение с  $y_0=6$  мм до  $y_0=4$  мм или  $y_0=5$  мм. Такая возможность регулировки величины смещения  $y_0$ , как и возможность

вариаций других параметров режима измерений, реализована в новом портативном лазерном приборе оптического сканирования, разработанном при участии автора (глава 3).

5. С повышением скорости сканирования до 10 мм/с при  $y_0=4$  мм и  $y_0=6$  мм нарушается закономерность, наблюдаемая на рисунке 2.9 для скорости 4,5 мм/с, при которой возрастание теплопроводности обязательно приводит к уменьшению избыточной температуры в областях с  $x=-45$  мм и  $y_0=4$  мм и  $y_0=6$  мм. Согласно данным на рисунке 2.9, для участка поля зрения датчика температуры 5 (рисунок 1.7) с  $x=-45$  мм,  $y_0=6$  мм значительное (около 50%) понижение избыточной температуры с повышением теплопроводности имеет место лишь для участков с  $y_0=2$  мм. Для  $y_0=4$  мм при скорости 10 мм/с избыточная температура при уменьшении теплопроводности от 3 до 1,2 Вт/(м·К) понижается всего на ~16 %. Для  $y_0=6$  мм и скорости 4,5 мм понижение теплопроводности от 3 до 1,2 Вт/(м·К) приводит к уменьшению избыточной температуры всего на ~6,5 %, а при скорости 10 мм/с уже, напротив, наблюдается увеличение избыточной температуры от 0,21 до 0,39°C, т. е. на ~86 %.

Таким образом, переход к нагреву образцов пород эллиптическими источниками тепла с отношением осей эллипса до 6:1 при большей оси эллипса, ориентированной вдоль направления сканирования, не ухудшает отношения сигнал/шум, а следовательно не ухудшает и случайной погрешности при измерениях теплопроводности. Повышение скорости сканирования от 4,5 до 10 мм/с (т.е. больше чем вдвое по сравнению с применявшейся ранее в полевой установке оптического сканирования) также позволяет сохранить требуемое отношение сигнал/шум (не хуже, чем 50:1), но требует размещения поля зрения инфракрасного радиометра на расстоянии не более чем 5 мм от линии движения центра пятна нагрева, т.е. требует выполнения условия  $y_0 \leq 5$  мм. Регистрация избыточной температуры при  $y_0=6$  мм и скорости 10 мм/с в диапазоне теплопроводности 1,2 – 3 Вт/(м·К) снижает отношение сигнал шум до 20:1. Это, однако, вполне допустимо в настоящее время при внедрении непрерывного теплофизического профилирования керна. Хотя такое снижение отношения сигнал/шум и ухудшает более чем вдвое случайную погрешность  $\delta\alpha$  измерений теплопроводности (или случайную погрешность измерений объемной теплоемкости  $\delta(c\rho)$ ) для отдельного образца, но это практически не снижает возможностей метода оптического сканирования для выделения теплофизической зональности разрезов скважин и оценки теплопроводности и объемной теплоемкости в отдельных интервалах глубин вдоль скважины при измерениях на многочисленных образцах керна в интервале. Причина этого заключается в том, что случайная погрешность оценки среднего значения теплопроводности и объемной теплоемкости в интервале будет приблизительно в  $\sqrt{n}$  меньше, чем случайные погрешности измерений для отдельного образца, что вполне допустимо на современном этапе развития тепловой петрофизики.

### 2.3.4.2. Анализ зависимости систематических погрешностей измерений тепловых свойств от формы пятна нагрева и скорости сканирования

Анализ зависимостей систематических погрешностей измерений тепловых свойств от параметров режимов измерений осуществлялся путем расчета избыточных температур для образцов пород с теплопроводностью  $\lambda_0$  и температуропроводностью  $a_0$ , значения которых приведены в таблице 2.1, и стандартных эталонных образцов теплопроводности и температуропроводности. Далее по данным об избыточных температурах и теплопроводности и температуропроводности стандартных эталонных образцов тепловых свойств (соответственно  $\lambda_{ст}$  и  $a_{ст}$ ) рассчитывали теплопроводность при помощи соотношения (1.5) и температуропроводность при помощи соотношения (1.7). Результаты определений теплопроводности и температуропроводности по рассчитанным избыточным температурам, отражающие реальные результаты измерений - соответственно  $\lambda_{измер}$  и  $a_{измер}$ , сравнивали с теплопроводностью  $\lambda_0$  и температуропроводностью  $a_0$  образцов пород, принимавшимися как исходные данные при расчетах. Систематические погрешности  $\delta\lambda$  для теплопроводности и  $\delta a$  для температуропроводности определяли соответственно как

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{измер} - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (2.33)$$

и

$$\delta a = \frac{a_{измер} - a_0}{a_0}. \quad (2.34)$$

В качестве стандартных эталонных образцов тепловых свойств принимали реально систематически применяемые нами техническое стекло марки КВ (плавленый кварц) с теплопроводностью 1,35 Вт/(м·К), температуропроводностью 0,83 мм<sup>2</sup>/с и объемной теплоемкостью 1,63 МДж/(м<sup>3</sup>·К) и белый мрамор с теплопроводностью 3,15 Вт/(м·К), температуропроводностью 1,41 мм<sup>2</sup>/с и объемной теплоемкостью 2,23 МДж/(м<sup>3</sup>·К). Данные образцы применяются нами в качестве стандартных образцов тепловых свойств на протяжении долгого времени (с 1996 г.) и прошли многократную проверку при тестовых измерениях методом оптического сканирования на сертифицированных образцах тепловых свойств в нашей стране и за рубежом в 1996-2017 гг. Среди других достаточно многочисленных стандартных образцов тепловых свойств, используемых при измерениях тепловых свойств различных пород, эти два стандартных образца по соотношению своих тепловых свойств хорошо подходят для исследований тепловых свойств осадочных пород в широком диапазоне их значений.

На рисунке 2.10 приведены результаты оценки систематических погрешностей измерений теплопроводности при различных параметрах эллиптического пятна нагрева. Из рисунка следует, что при теплопроводности в диапазоне 1,35...5,72 Вт/(м·К) и температуропроводности в диапазоне 0,83-2,29 мм<sup>2</sup>/с при длине оси эллиптического пятна нагрева не более 25 мм погрешность измерений теплопроводности не выходит за пределы диапазона -0,9...+2,1 %. Лишь при малых значениях теплопроводности – от 1,35 до 0,50 Вт/(м·К) и температуропроводности – от 0,50 до 0,83 мм<sup>2</sup>/с систематическая погрешность повышается до 4,1 % и при необходимости может быть учтена и исключена при обработке данных.

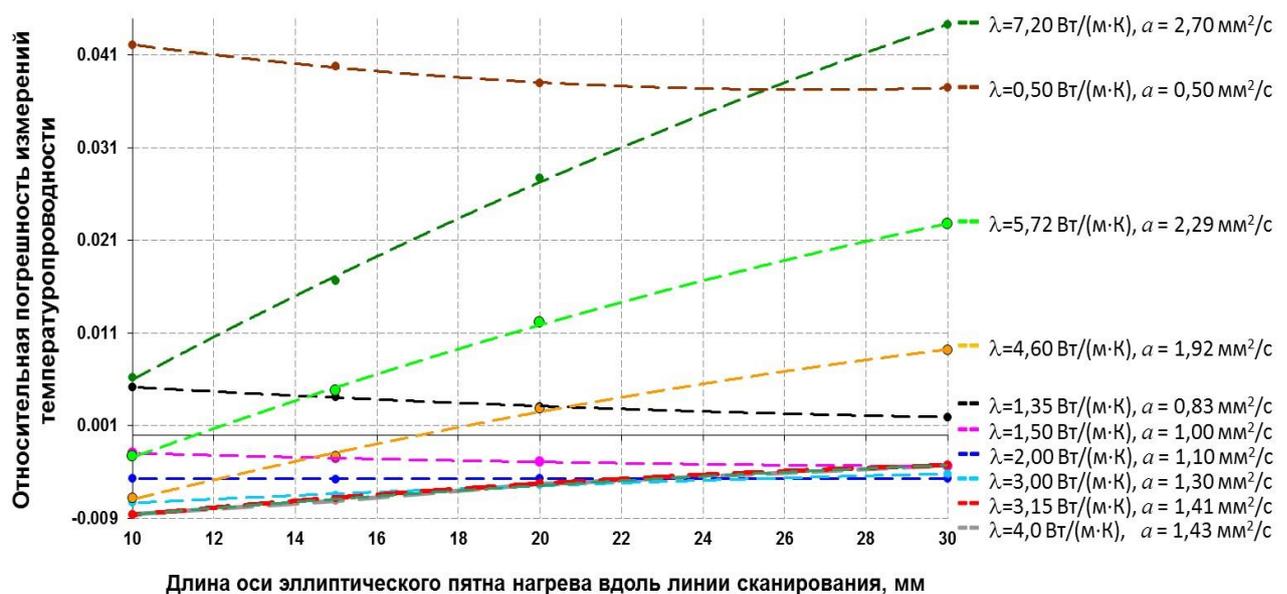


Рисунок 2.10. – Результаты оценки систематических погрешностей теплопроводности пород при различной длине оси эллиптического пятна нагрева, направленной вдоль линии сканирования.

На рисунке 2.11 приведены зависимости относительной систематической погрешности измерений теплопроводности пород  $\delta a$  от результатов определения теплопроводности различных образцов, фактически получаемых при реальных измерениях по соотношению (1.7), при использовании стандартных эталонных образцов с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К) и температуропроводностью соответственно 0,83 и 1,41 мм<sup>2</sup>/с, рабочей базе 45 мм, скорости сканирования 4,5 мм и различных значениях длины длинной оси эллиптического пятна нагрева в диапазоне 10-30 мм. Данные на рисунке 2.11 показывают, что переход к эллиптическому пятну нагрева с длинной осью 30 мм существенно повышает погрешность измерений теплопроводности лишь в области значений теплопроводности образцов пород от ~2,3 мм<sup>2</sup>/с и более, т.е. при значениях, которые далеко выходят за верхнюю границу теплопроводности пород баженовской свиты и доманиковой формации и большинства других типов осадочных пород. Пятно нагрева с

эллиптической осью 20 мм приводит к столь значительным погрешностям лишь при еще больших значениях теплопроводности –  $\sim 2,7 \text{ мм}^2/\text{с}$  и более. Как следует из рисунка 2.11, при понижении теплопроводности до  $0,40 \text{ мм}^2/\text{с}$  (теплопроводность  $0,36 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , что практически выходит за реально изучаемые диапазоны тепловых свойств осадочных пород) систематическая погрешность повышается до 6,8%. Существенно, что в диапазоне теплопроводности от  $2 \text{ мм}^2/\text{с}$  и менее, рабочем для пород баженовской свиты и доманиковой формации и других месторождений углеводородов, погрешность измерений теплопроводности слабо зависит от вариаций длинной оси пятна нагрева, поэтому переход к длине оси эллипса 20 и 30 мм не сказывается существенно на качестве измерений теплопроводности.

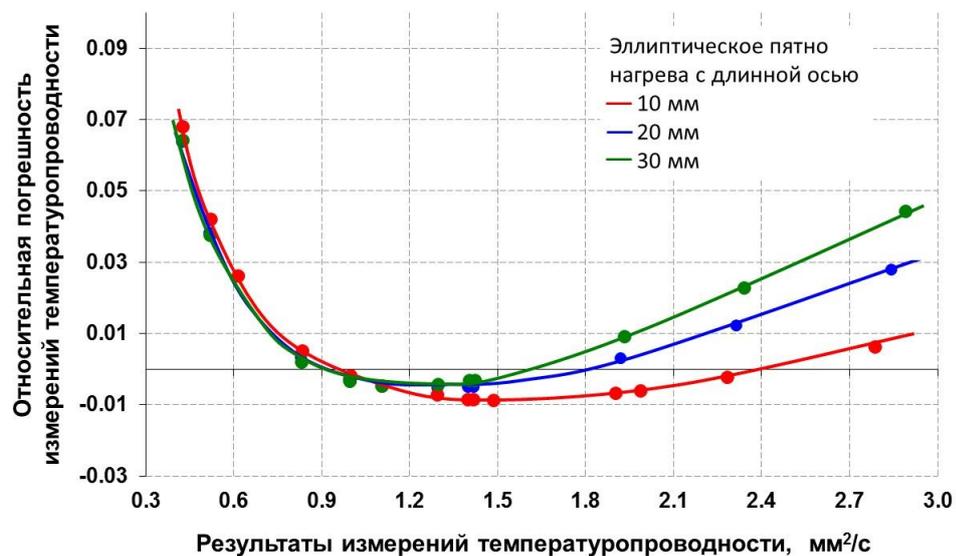


Рисунок 2.11. – Зависимость систематической погрешности измерений теплопроводности от фактически получаемых результатов измерений теплопроводности образцов пород при различных параметрах эллиптического пятна нагрева (стандартные эталонные образцы тепловых свойств с теплопроводностью 1,35 и 3,15  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , скорость сканирования 4,5 мм, рабочая база 45 мм).

Важно, что результаты расчетов относительной погрешности  $\delta a$ , приведенные на рисунке 2.11 в виде уравнений зависимости погрешности от результата измерений, позволяют оценить данную погрешность при измерениях теплопроводности и скорректировать результат измерений  $a_{\text{измер}}$  для определения уточненного значения теплопроводности  $a_0$  по соотношению, следующему из соотношения (2.34):

$$a_0 = \frac{a_{\text{измер}}}{1 + \delta a}. \quad (2.35)$$

На рисунке 2.12 приведена зависимость относительной систематической погрешности измерений теплопроводности пород  $\delta \lambda$  от результатов измерений теплопроводности различных образцов, фактически получаемых при реальных измерениях методом оптического

сканирования, при использовании стандартных эталонных образцов с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К) и температуропроводностью соответственно 0,83 и 1,41 мм<sup>2</sup>/с, рабочей базе 45 мм, скорости сканирования 4,5 мм и различной длиной оси эллиптического пятна нагрева в диапазоне 10-30 мм. Данные на рисунке 2.12 показывают, что переход к эллиптическому пятну нагрева с длиной осью 30 мм не приводит к повышению систематической погрешности измерений теплопроводности за пределы диапазона  $\pm 1\%$  в широком диапазоне теплопроводности – от 1,2 до 7 Вт/(м·К), что практически соответствует пределам необходимого диапазона для исследований пород баженовской свиты и доманиковой формации и других месторождений углеводородов. Пятно нагрева с эллиптической осью 20 мм приводит к такому же повышению погрешности при еще больших значениях температуропроводности – 2,7 мм<sup>2</sup>/с и более. Как следует из рисунка 2.12, при понижении температуропроводности до 0,40 мм<sup>2</sup>/с (теплопроводность 0,36 Вт/(м·К)) систематическая погрешность повышается до 6,8%, однако эти значения тепловых свойств практически далеко выходят за реально изучаемые диапазоны тепловых свойств осадочных пород. Таким образом, переход к использованию эллиптического пятна нагрева с длиной длинной оси до 30 мм не приводит к недопустимому снижению качества измерений теплопроводности, как и температуропроводности.

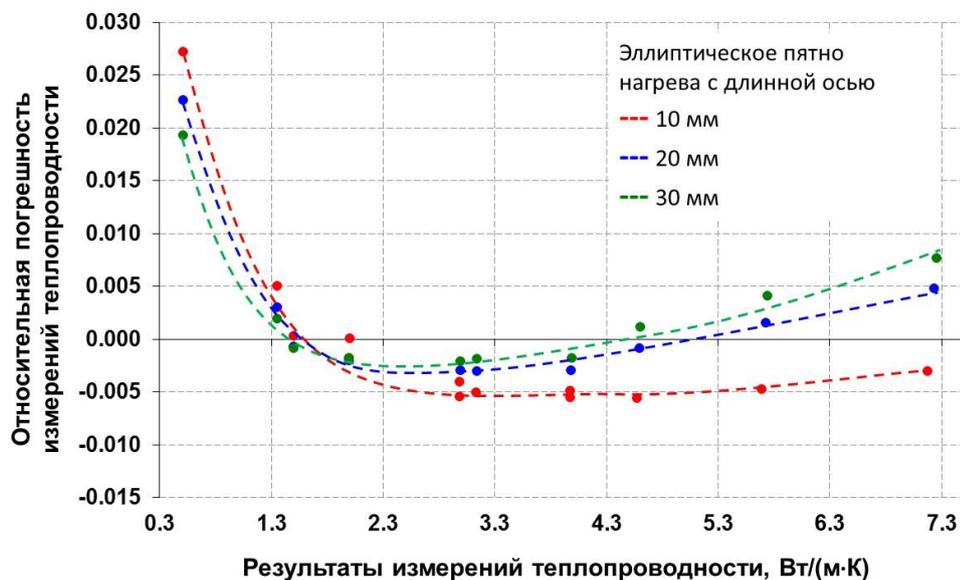


Рисунок 2.12. – Зависимость относительной систематической погрешности измерений теплопроводности от фактически получаемых результатов измерений теплопроводности образцов пород при различных параметрах эллиптического пятна нагрева (стандартные образцы тепловых свойств с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К), скорость сканирования 4,5 мм/с, рабочая база 45 мм).

Отметим, что, как и в рассмотренном выше случае с измерениями температуропроводности, результаты расчетов относительной погрешности  $\delta\lambda$  позволяют при необходимости оценить и исключить ее при реальных измерениях, т.е. позволяют скорректировать результат измерений

для определения уточненного значения теплопроводности  $\lambda_0$  по соотношению, следующему из соотношения (2.33):

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_{измер}}{1 + \delta\lambda}. \quad (2.36)$$

На рисунках 2.13 и 2.14 приведены расчетные зависимости относительной систематической погрешности измерений соответственно теплопроводности и температуропроводности от фактических результатов измерений теплопроводности и температуропроводности образцов пород методом оптического сканирования при различных значениях скорости сканирования. Приводимые зависимости соответствуют параметрам режима измерений, реализованными как в установке оптического сканирования, на основе которой создана и внедрена технология непрерывного теплофизического профилирования керна скважин (глава 4), так и в новых лазерных установках оптического сканирования (глава 3). Данные на рисунках 2.13 и 2.14 показывают, что увеличение скорости сканирования приводит к возрастанию систематических погрешностей измерений теплопроводности (рисунок 2.13) и температуропроводности (рисунок 2.14). В связи с этим приведенные на рисунках 2.13 и 2.14 данные имеют важное практическое значение, так как для созданной портативной лазерной установки оптического сканирования допускаются измерения с различной скоростью сканирования в диапазоне 0,5...10 мм/с. Следовательно, при измерениях с повышенной скоростью сканирования систематические погрешности измерений теплопроводности и температуропроводности могут быть оценены и исключены из результатов измерений при помощи зависимостей, приведенных на рисунках 2.13 и 2.14.

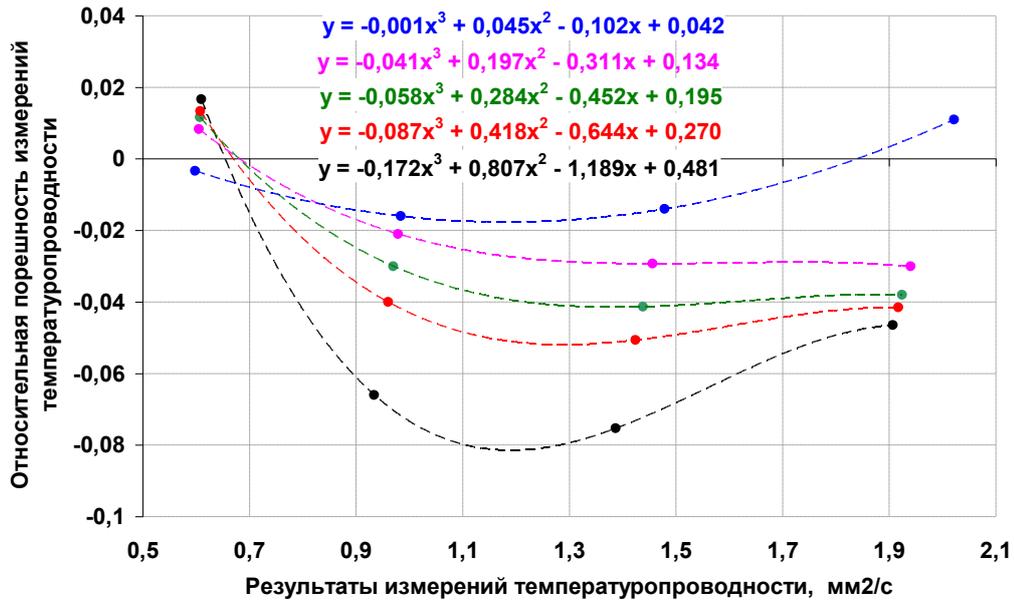


Рисунок 2.13. – Зависимость систематической погрешности измерений теплопроводности от фактически получаемых результатов измерений теплопроводности образцов пород при разных скоростях сканирования (стандартные образцы тепловых свойств с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К), рабочая база 45 мм, длинная ось эллиптического пятна нагрева 10 мм). Синий цвет – скорость сканирования 2 мм/с, розовый цвет – скорость сканирования 4,5 мм/с, зеленый цвет – скорость сканирования 7 мм/с, красный цвет – скорость сканирования 10 мм/с, черный цвет – скорость сканирования 20 мм/с.

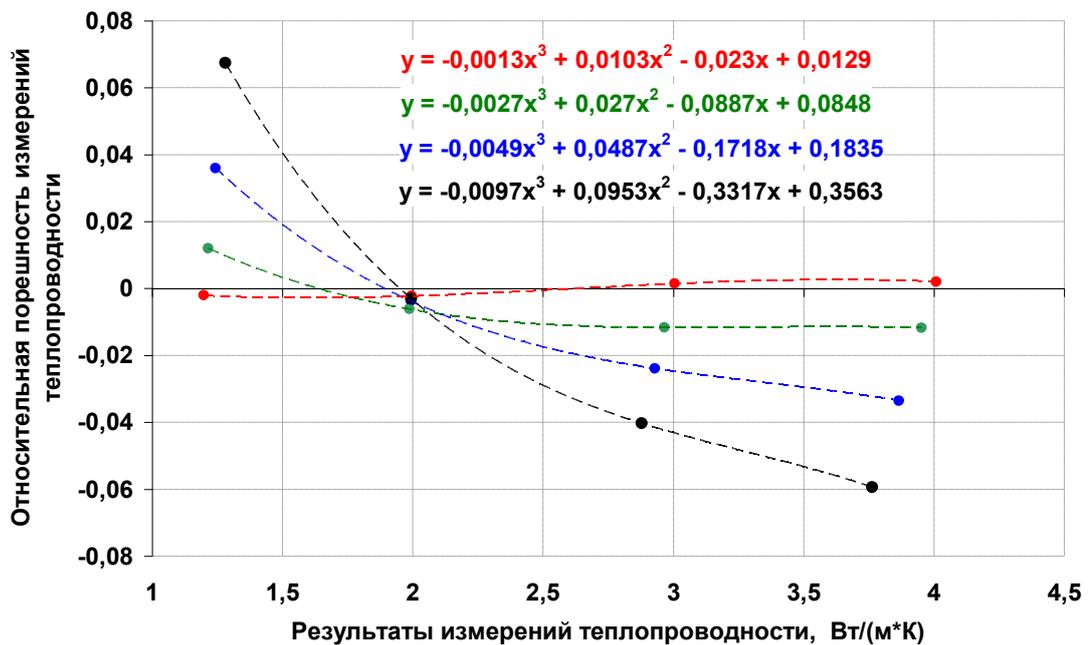


Рисунок 2.14. – Зависимость относительной систематической погрешности измерений теплопроводности от фактических результатов измерений теплопроводности образцов пород при разных скоростях сканирования (стандартные образца тепловых свойств с теплопроводностью 1,35 и 3,15 Вт/(м·К), рабочая база 45 мм, длинная ось эллиптического пятна нагрева 10 мм). Красный цвет – скорость сканирования 2 мм/с, зеленый цвет – скорость сканирования 4,5 мм/с, синий цвет – скорость сканирования 10 мм/с, черный цвет – скорость сканирования 20 мм/с.

Таким образом, установленные зависимости, приведенные на рисунках 2.11-2.14, обеспечивают корректный гибкий выбор параметров режима и требуемое качество измерений

тепловых свойств методом оптического сканирования как при реализации метода непрерывного профилирования керна скважин (глава 4), так и при исследованиях тепловых свойствах на стандартных образцах пород (цилиндры диаметром и высотой 30 мм) при помощи разработанных новых лазерных установок оптического сканирования (глава 3).

Результаты исследований, приведенные в разделе 2.3, показывают следующее:

- переход от нормально-распределенного источника к эллиптическим или иным источникам, существенно вытянутым в направлении линии сканирования, и повышение скорости сканирования обеспечивают значительное снижение отношения максимальной избыточной температуры нагрева к избыточной температуре в областях ее регистрации для измерений теплопроводности и температуропроводности (соответственно области  $T_1$  и  $T_2$  на рисунке 1.7);
- существенное снижение отношения максимальной избыточной температуры нагрева к избыточной температуре в областях ее регистрации для измерений теплопроводности и температуропроводности позволяет уменьшить тепловое воздействие на изучаемые образцы пород, что важно при теплофизических исследованиях пород баженовской свиты и доманиковой формации;
- снижение теплового воздействия на водонасыщенные и нефтенасыщенные породы уменьшает степень испарения и конвекции флюида в зоне нагрева, активное проявление которых может вносить дополнительную систематическую погрешность в результаты измерений и изменять свойства изучаемых образцов пород;
- снижение отношения максимальной избыточной температуры нагрева к избыточной температуре в областях ее регистрации для измерений теплопроводности и температуропроводности создает возможности для повышения отношения сигнал/шум при регистрации избыточных температур, что обеспечивает уменьшение случайной погрешности измерений; последний фактор особенно важен для измерений температуропроводности в связи с невысоким уровнем избыточной температуры в области  $T_2$  (рисунок 1.7), связанной с измерением температуропроводности;
- установленные закономерности следует учитывать при последующих разработках информационно-измерительных систем оптического сканирования следующих поколений.

#### **2.4. Оценка глубины зоны зондирования при теплофизическом профилировании керна методом оптического сканирования**

При измерениях теплопроводности образца, толщина которого не позволяет рассматривать образец как полубесконечное тело, соответствующее соотношениям (1.5) и (1.7), положенным в

основу теоретических моделей метода оптического сканирования, возникают систематические погрешности тепловых свойств образцов пород. Согласно [73], систематическая погрешность результата измерений теплопроводности  $\delta\lambda$  описывается в таком случае формулой

$$\delta\lambda = \frac{-2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{1+(2 \cdot n \cdot P_z)^2}} \exp\left[\left(-1 + \sqrt{1+(2 \cdot n \cdot P_z)^2}\right) \cdot \frac{-P_x}{2}\right]}{1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{1+(2 \cdot n \cdot P_z)^2}} \exp\left[\left(-1 + \sqrt{1+(2 \cdot n \cdot P_z)^2}\right) \cdot \frac{-P_x}{2}\right]}, \quad (2.37)$$

где  $P_x = v \cdot \frac{|x|}{a}$ ,  $P_z = \frac{d}{|x|}$ ,  $|x|$  — база измерений,  $a$  — температуропроводность породы,  $d$  —

толщина образца породы, при которой возникает систематическая погрешность  $\delta\lambda$ .

В дальнейшем параметр  $d$  будем называть глубиной зоны теплового зондирования изучаемых образцов пород.

Неадекватность реального образца полубесконечному твердому телу, рассматривавшемуся при разработке теоретических моделей метода оптического сканирования [67], проявляется в виде систематического отклонения избыточной температуры нагрева образца, если данное систематическое отклонение составляет не менее случайной погрешности измерений. Как показано в данной главе, определенные выше параметры режима измерений для изучения пород баженовской и доманиковой свит и месторождений высоковязких нефтей и характеристики применяемых инфракрасных датчиков температуры обеспечивают для регистрации избыточной температуры по линии движения центра пятна нагрева соотношение сигнал/шум не хуже, чем 100:1 (при доверительной вероятности 0,95), что соответствует случайной погрешности измерений теплопроводности  $\pm 1\%$  (при доверительной вероятности 0,95).

Расчеты, проведенные при помощи соотношения (2.37), позволили определить значения толщины образцов пород, приводящих к систематической погрешности измерений теплопроводности в 1% и более. Расчеты проводились для диапазона тепловых свойств пород, охватывающего как диапазон пород баженовской и доманиковой свит (1...3,5 Вт/(м·К)), так и породы традиционных коллекторов, когда, например, для кварцевых песчаников теплопроводность матрицы может достигать 6,5-7 Вт/(м·К) [82].

На рисунке 2.15 приведены результаты анализа зависимости глубины зоны теплового зондирования образцов пород от рабочей базы при разных тепловых свойствах пород и скорости сканирования 4,5 мм/с. Результаты расчетов показывают, что при скорости сканирования 4,5 мм/с и рабочей базе 45 мм глубина теплового зондирования находится в диапазоне 5...12 мм и может быть увеличена до 8...18 мм путем увеличения рабочей базы (расстояние  $x_l$  на рисунке 1.7) до 100 мм или уменьшения скорости сканирования до 2 мм/с. Для новых лазерных приборов

оптического сканирования (раздел 3.1), предназначенных для измерений на образцах малых размеров (стандартные образцы пород и образцы расколотого керна), а также для измерений с высокой пространственной разрешающей способностью  $\sim 0,2$  мм (раздел (2.4) [154], при малых рабочих базах и повышенной скорости сканирования глубина зоны теплового зондирования может быть уменьшена до 2,5 ...6 мм. Последнее важно для измерений теплопроводности и температуропроводности частиц шлама или неконсолидированных пород, когда из частиц шлама или неконсолидированных пород и материала-заполнителя (специальный воск, вода) под давлением приготавливаются синтетические образцы малой толщины (5-6 мм) для возможно более плотного их прессования [146].

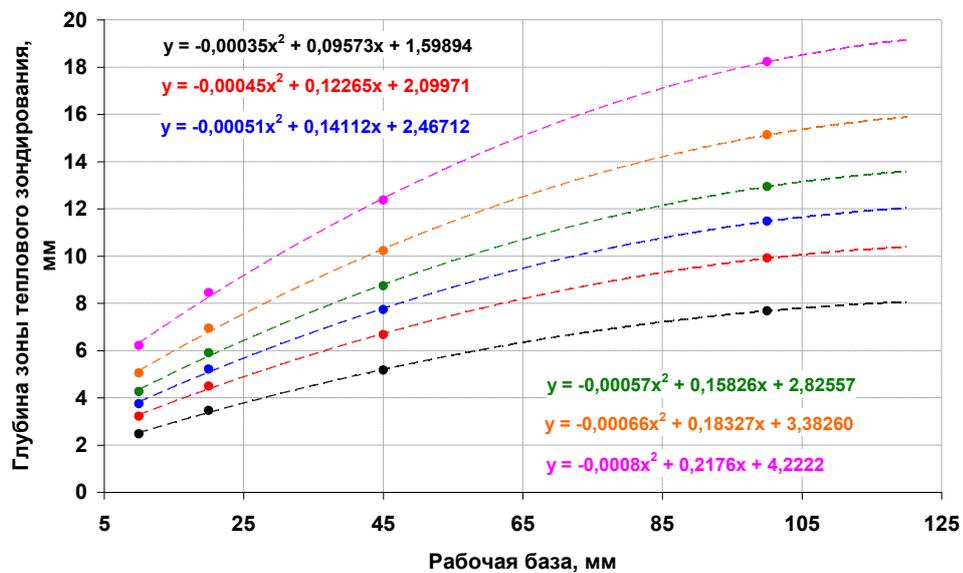


Рисунок 2.15. – Зависимости глубины теплового зондирования образцов пород от рабочей базы при разных тепловых свойствах пород (скорость сканирования 4,5 мм/с). Черный цвет – теплопроводность породы 0,5 Вт/(м·К), красный цвет – 1,35 Вт/(м·К), синий цвет - 2,0 Вт/(м·К), зеленый цвет - 3,15 Вт/(м·К), оранжевый цвет – 4,6 Вт/(м·К), розовый цвет – 7,2 Вт/(м·К).

На рисунке 2.16 приведены данные расчетов, характеризующие зависимость глубины зоны теплового зондирования от скорости сканирования при различных тепловых свойствах пород для рабочей базы измерений, применяемой на полевой установке оптического сканирования. Результаты показывают существенную зависимость глубины теплового зондирования от скорости, что создает предпосылки для изучения вариаций тепловых свойств с глубиной в образце путем нескольких сканирований с различными скоростями сканирования.

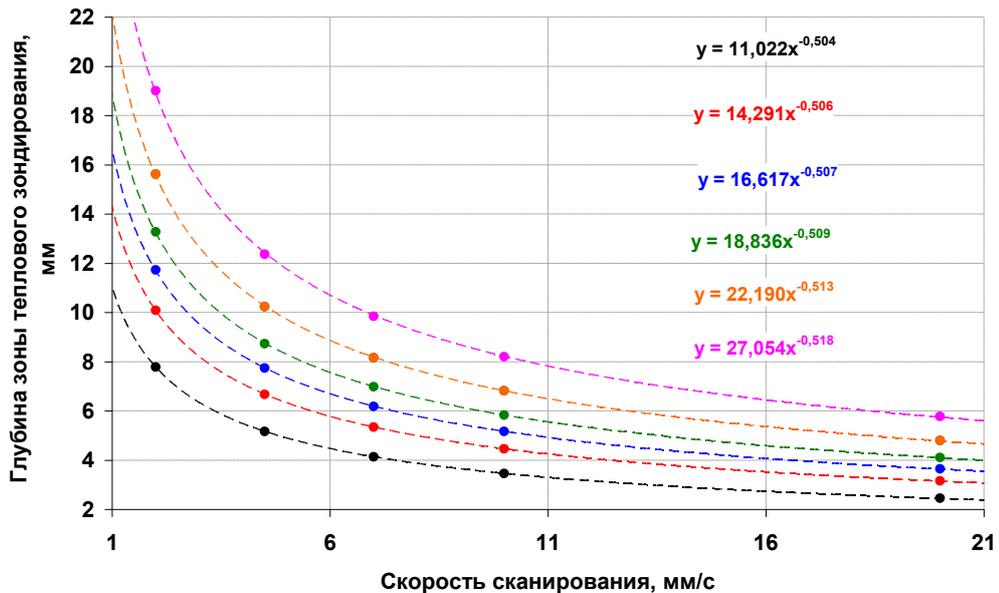


Рисунок 2.16. – Зависимости глубины теплового зондирования образцов пород от скорости сканирования при разных тепловых свойствах пород (рабочая база 45 мм). Черный цвет – теплопроводность породы 0,5 Вт/(м·К), красный цвет – 1,35 Вт/(м·К), синий цвет - 2,0 Вт/(м·К), зеленый цвет - 3,15 Вт/(м·К), оранжевый цвет – 4,6 Вт/(м·К), розовый цвет – 7,2 Вт/(м·К).

Зависимость глубины теплового зондирования от теплопроводности по результатам расчетов приведена на рисунке 2.17. Отклонения результатов расчетов от строгой связи между глубиной теплового зондирования и теплопроводностью связаны с тем, что вариации выбиравшихся значений температуропроводности и объемной теплоемкости для всей анализировавшейся коллекции образцов не были связаны с вариациями теплопроводности однозначной зависимостью, что отвечает реальным условиям для горных пород.

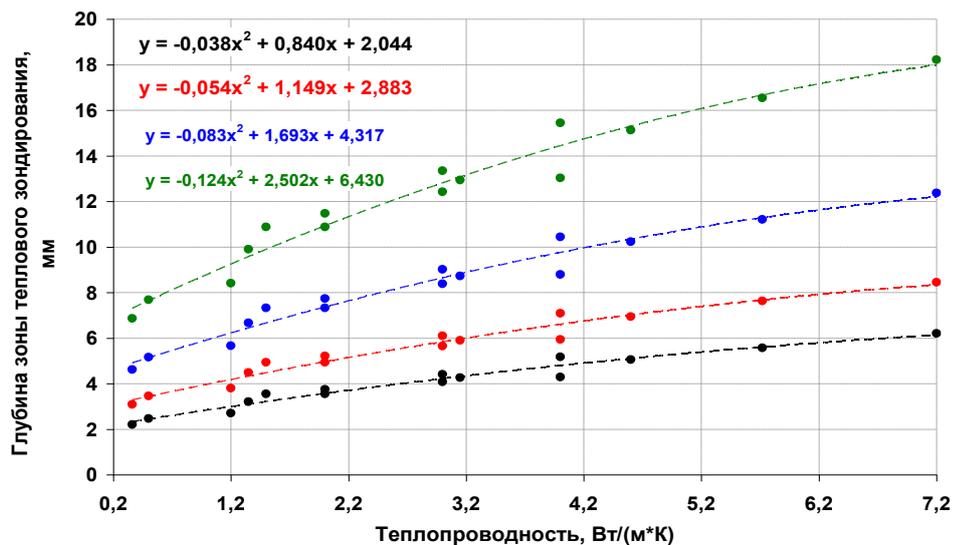


Рисунок 2.17. – Зависимость глубины теплового зондирования образцов пород от теплопроводности образцов пород (данные о температуропроводности и объемной теплоемкости рассматривавшихся образцов приведены в таблице 2.1) (скорость сканирования 4,5 мм/с). Черный цвет – рабочая база 10 мм, красный цвет – 20 мм, синий цвет – 45 мм, зеленый цвет – 100 мм.

Приводимые на рисунках 2.15-2.17 уравнения регрессии позволяют проводить оценки глубины теплового зондирования в широком диапазоне свойств пород и корректно выбирать необходимые параметры режима измерений.

## 2.5. Анализ пространственной разрешающей способности при профилировании тепловых свойств пород

Экспериментальный анализ пространственной разрешающей способности при профилировании теплопроводности неоднородных твердых тел методом оптического сканирования проводился при помощи физической модели слоистой среды (рисунок 2.18). Модель включала чередующиеся слои материалов с разной теплопроводностью: технического стекла марки КВ с теплопроводностью  $1,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и мрамора с теплопроводностью  $3,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Сочетание теплопроводности слоев хорошо соответствует диапазону вариаций теплопроводности пород баженовской свиты и доманиковой формации. Модель состояла из двух половин: правая половина на рисунке 2.18 представляла собой тонкие слои стекла КВ (от 0,5 до 4 мм) с более толстыми слоями мрамора (8-15 мм); левая половина, напротив, представляла собой чередование тонких слоев мрамора (от 0,5 до 4 мм) с более толстыми слоями стекла (8-15 мм).

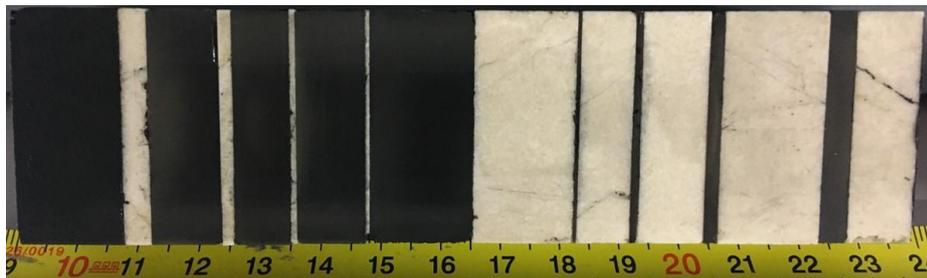


Рисунок 2.18. – Физическая модель слоистой среды для анализа пространственной разрешающей способности при теплофизическом профилировании керна. Темные слои модели - стекло марки КВ, светлые слои – белый мрамор.

На рисунке 2.19 приведены результаты оптического сканирования слоистой модели. Измерения на полевой установке осуществлялись при различных скоростях сканирования при нагреве поверхности модели с эллиптическим пятном нагрева при длинной оси 10 мм вдоль направления сканирования и короткой оси 5 мм поперек направления сканирования. При сканировании на разработанной мобильной лазерной установке (глава 3) нагрев осуществлялся круговым нормально-распределенным источником тепла с диаметром 2,5 мм при рабочей базе 10 мм и скорости сканирования 3 мм/с. Наличие краевого эффекта в области расположения самого тонкого слоя стекла КВ (крайний левый слой на рисунке 2.19 и справа на профилях на рисунке 2.19) не позволяет выделить этот тонкий слой на панелях *a*, *b* и *в* рисунка 2.19, но на панели *г* рисунка 2.19 этот слой отчетливо выделяется.

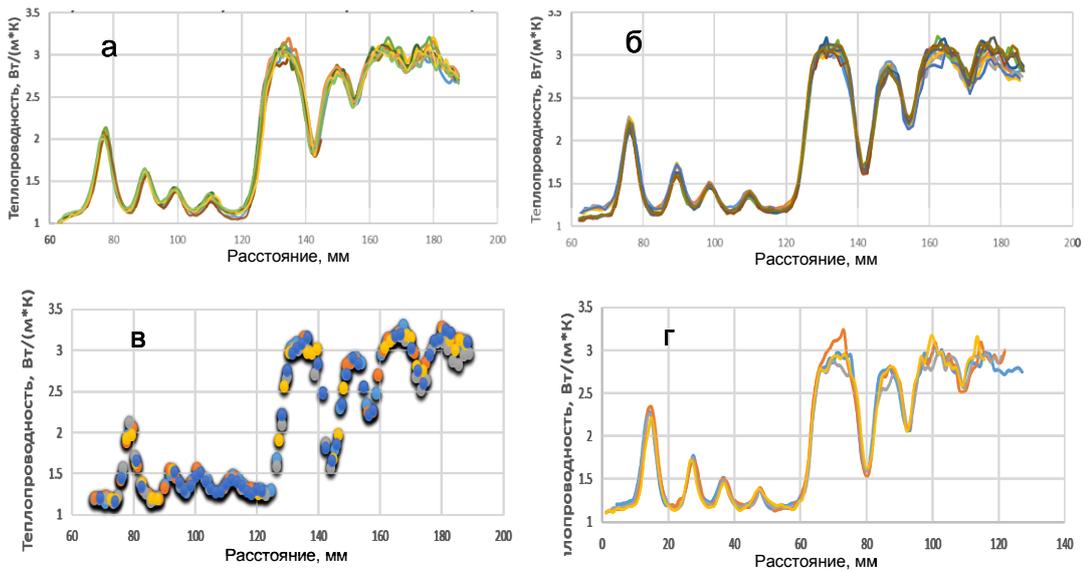


Рисунок 2.19. – Результаты профилирования теплопроводности при оптическом сканировании слоистой модели. а – полевая установка, скорость сканирования 4,5 мм/с, б – полевая установка, скорость сканирования 10 мм/с, в - полевая установка, скорость сканирования 20 мм/с, г – лазерная установка, рабочая база 10 мм, скорость сканирования 3 мм/с. Сканирование физической модели, показанной на рисунке 2.18, осуществлялось в направлении справа - налево, т.е. половины модели расположены в обратном порядке.

Приведенные на рисунке 2.19 результаты показывают, что пространственная разрешающая способность теплофизического профилирования значительно выше при выделении участков с пониженной теплопроводностью (правые части профилей). Это создает особенно благоприятные условия для выделения тонких слоев низкотеплопроводного органического вещества в породах с более высокой теплопроводностью матрицы, что соответствует породам баженовской свиты и доманиковой формации.

Хотя выделение тонкого слоя стекла толщиной 0,5 мм в окружающем мраморе на панелях а, б и в рисунка 2.19 затруднено из-за краевого эффекта, его выявляемость не вызывает сомнения, так как пространственная разрешающая способность при выделении менее теплопроводных участков выше, чем при выделении более теплопроводных зон, а слой более теплопроводного мрамора толщиной 0,5 мм в окружающем стекле уверенно выделяется во всех случаях сканирования. Во всех случаях, охарактеризованных на рисунке 2.19, пространственная разрешающая способность при характеристике неоднородности среды составила не менее 0,5 мм.

Из данных на рисунке 2.19 а, б, в следует, что пространственная разрешающая способность для полевой установки оптического сканирования, на базе которой создана технология непрерывного теплофизического профилирования керна скважин, при анализе неоднородности пород применительно к нетрадиционным коллекторам составляет не менее 1 мм. Повышение скорости сканирования при измерениях на полевой установке приводит к

повышению пространственной разрешающей способности теплофизического профилирования, что особенно проявляется при выделении зон с пониженной теплопроводностью, соответствующих участкам органического вещества. Таким образом, предложенное выше (раздел 2.3.3) повышение скорости сканирования обеспечивает не только снижение максимальных температур нагрева образцов пород, но и позволяет добиться повышенной пространственной разрешающей способности теплофизического профилирования, сравнимого с разрешающей способностью, обеспечиваемой автономным модулем оптического сканирования с повышенной разрешающей способностью, разработанным с участием автора (раздел 3.2) [57, 154].

Наиболее высокое пространственное разрешение при анализе неоднородности пород, достигаемое за счет достижения минимальной рабочей базы, обеспечивает разработанный автономный модуль оптического сканирования с теплофизическим профилированием образцов пород в двух противоположных направлениях [57, 154]. При выборе минимально возможной рабочей базы, определяемой в основном условием исключения попадания отраженного излучения оптического источника в объектив инфракрасного радиометра, для данной лазерной установки пространственная разрешающая способность составляет 0,2 мм [154].

## **ВЫВОДЫ**

1. Предложенные решения по исключению влияния вариаций оптических характеристик образцов пород и стандартных образцов тепловых свойств на результаты измерений тепловых свойств позволяют избежать вносимых ранее изменений свойств образцов пористых и трещиноватых пород при необходимой ранее их покраске в ходе подготовки к измерениям и создают условия для разработки метода непрерывного профилирования тепловых свойств пород на керне скважин при теплофизических исследованиях месторождений углеводородов.
2. Измерения теплопроводности горных пород методом оптического сканирования не требуют выравнивания оптических характеристик поверхности образцов пород и стандартных образцов тепловых свойств.
3. Переход к источникам тепла с пятном нагрева, вытянутым в направлении сканирования, обеспечивает существенное снижение максимальной температуры нагрева образцов, что важно при исследованиях пород баженовской свиты и доманиковой формации, флюидонасыщенных пород и создает дополнительные возможности для повышения качества измерений теплопроводности и теплопроводности пород.
4. Повышение скорости сканирования обеспечивает снижение максимальной температуры нагрева образцов, что важно при исследованиях пород баженовской свиты и

доманиковой формации, и позволяет существенно снизить время проведения измерений тепловых свойств при применении метода непрерывного профилирования тепловых свойств на керне скважин в условиях кернохранилищ.

5. Предложенные параметры режима измерений методом оптического сканирования обеспечивают необходимый метрологический уровень измерений тепловых свойств и пространственную разрешающую способность 0,2-1 мм при регистрации неоднородности пород.
6. Комплекс решений, описанных в главе 2, создает условия для разработки технологии непрерывного теплофизического профилирования керна скважин и широкого внедрения данной технологии в практику исследований коллекторов углеводородов.

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ**

Основная часть экспериментальных исследований тепловых свойств пород месторождений углеводородов включают в себя измерения на полноразмерном керне или его малогабаритных дубликатах («горбушках»). Вместе с тем, важную роль играют исследования свойств пород на стандартных цилиндрических образцах (30x30 мм), других видах специально подготавливаемых образцов пород, мелких фрагментах дробленого керна. Для проведения высококачественных массовых экспрессных измерений тепловых свойств на таких образцах полевая установка оптического сканирования практически неприменима, что потребовало расширения спектра приборов оптического сканирования. В настоящей главе описываются новые лазерные приборы оптического сканирования, разработанные с участием автора.

Исследования тепловых свойств пород на стандартном керне обладают существенными особенностями. Разработанные методики проведения таких исследований, основанные на применении лазерных приборов оптического сканирования, и результаты применения этих методик на коллекциях стандартных образцов для различных месторождений углеводородов также описываются в данной главе.

#### **3.1. Необходимость разработки новых лазерных приборов оптического сканирования**

В то время как полевые установки оптического сканирования совершенствовались путем разработки нового программного обеспечения, замены на более совершенные ламповые источники нагрева, применения шаговых двигателей перемещения оптической системы, лазерная версия прибора оптического сканирования практически не изменялась за последние 30 лет. В качестве источника нагрева в предыдущих вариантах лазерного прибора применялись громоздкие углекислотные лазеры  $\text{CO}_2$  непрерывного действия. В процессе работы такие лазеры требуют непрерывного охлаждения проточной водой, что приводит к подключению либо магистрального водопровода, либо внешнего стационарного термостата. Для выхода на стабильный режим мощности лазеру  $\text{CO}_2$  требуется около 1 часа для прогрева прибора, при этом нестабильность расхода циркулирующей воды в системе охлаждения приводит к существенной нестабильности мощности лазера. Характерной проблемой таких лазеров являлась нестабильность фокусировки луча, приводящая к существенному, плохо контролируемому снижению качества измерений тепловых свойств образцов пород методом оптического сканирования. Транспортировка такой системы оптического сканирования была связана с серьезными трудностями и риском выхода лазера из строя.

Вместе с тем, применение лазерной версии установки оптического сканирования необходимо, так как она позволяет проводить измерения на образцах горных пород, имеющих небольшие размеры - 20-30 мм, за счет небольшого пятна нагрева (2-4 мм). Это обеспечивает исследования тепловых свойств пород на стандартных цилиндрических образцах (чаще всего диаметром 30 мм и высотой 30 мм), которые выбуриваются из полноразмерного керна скважин для лабораторных петрофизических исследований. Исследования на стандартных образцах важны, так как на этих образцах в рамках нефтяной петрофизики проводится также и основная часть нестандартных петрофизических исследований (при помощи ядерно-магнитного резонанса, геомеханические и др.). Теплофизические исследования стандартных образцов пород, как и другие виды работ, проводятся при различных состояниях данных образцов: в неэкстрагированном виде, с донасыщением неэкстрагированных образцов керосином (теплофизическая модель нефти), после экстракции и высушивания, после насыщения водой с последующим высушиванием, после насыщения керосином, для некоторых физических свойств являющего моделью нефти из-за близости этих свойств для керосина и нефти. Исследования тепловых свойств на стандартных образцах необходимы для следующих целей [59]:

- получение данных о комплексе тепловых свойств при различных видах поровых флюидов;
- получение наиболее надежных данных о корреляционных связях между тепловыми и другими свойствами пород, так как измерения всех этих свойств могут проводиться на одних и тех же образцах, что резко снижает влияние неоднородности пород на надежность результатов анализа взаимосвязей свойств;
- определение теплопроводности и объемной теплоемкости минеральной матрицы пород на коллекциях образцов, отобранных с достаточно широким диапазоном их пористости, что необходимо для бассейнового и гидродинамического моделирования;
- получение экспериментальных данных для проверки корректности теоретических моделей теплопроводности неоднородных анизотропных сред и адаптации моделей к решению геолого-геофизических задач.

Разработка метода измерений тепловых свойств пород на шламе или неконсолидированных породах, открывающего возможность массовых оперативных теплофизических измерений в местах бурения скважин в рамках геолого-технологических исследований, требует измерений эффективных теплопроводности и температуропроводности/объемной теплоемкости на синтетических образцах в виде тонких дисков (5-6 мм) [146], что не может быть выполнено с требуемым качеством на полевой установке. Кроме того, принципы, заложенные в построение полевой установки оптического сканирования, не могут обеспечить ставшее остроактуальным комплексирование

теплофизического профилирования со скретч-тестированием и спектральным гамма-каротажом керна, что требует создания соответствующих лазерных приборов.

Целесообразность разработки современного лазерного прибора оптического сканирования связана также с необходимостью развития подхода, в рамках которого осуществляют построение пространственного 2D распределения тепловых свойств по поверхности образцов пород путем многократного оптического сканирования образцов [60]. Построение 2D распределений тепловых свойств, позволяющих прогнозировать 2D распределение других свойств пород, коррелируемых с тепловыми свойствами, представляет интерес для исследований не только полноразмерного керна, но и иных, возможно меньших по размеру образцов пород, в частности стандартных образцов пород. Такие специальные исследования выполняются с целью 1) прогноза 2D вариаций других свойств пород, для которых установлены тесные корреляции с тепловыми свойствами, и/или 2) детального анализа неоднородности и структурно-текстурных особенностей литотипов пород. В данной главе описывается применение методики регистрации 2D детального распределения тепловых свойств, основанной на применении метода оптического сканирования, для прогноза 2D вариаций пористости, коэффициента тепловой анизотропии и получения данных о связи теплопроводности с общим содержанием органического вещества. Обеспечение высокой пространственной разрешающей способности при построении 2D распределений и возможности проводить подобные исследования на возможно меньших по размеру образцах также требует применения лазерного прибора оптического сканирования.

Таким образом, на современном этапе развития тепловой петрофизики необходимой стала разработка новых лазерных приборов, отвечающих комплексу современных требований. Новые лазерные приборы должны стать неотъемлемой частью теплофизических исследований керна в лабораториях и кернохранилищах.

### **3.2. Разработка лазерных установок оптического сканирования для профилирования тепловых свойств**

На рисунке 3.1. показаны две разработанные установки оптического сканирования, в которых в качестве источника тепла 3 (рисунок 1.7) [57] использовался полупроводниковый лазер непрерывного действия РУМА-970-10 с длиной волны 0,97 мкм. Предложенный лазерный источник обладает следующими преимуществами перед ранее использовавшимся углекислотным лазером CO<sub>2</sub>:

- высокая стабильность выходной мощности излучения,
- компактные размеры,
- воздушное охлаждение,

- малое время прогрева,
- вывод сигнала через опто-волоконную линию (световод),
- применение широкого ряда заменяемых фокусирующих систем на основе оптического разъема FC/PC.

Применение такого лазерного источника тепла дало возможность существенно уменьшить размеры пятна нагрева (до диаметра 1,5-2,2 мм). Это позволило получить важные дополнительные возможности для (1) повышения пространственной способности теплофизического профилирования и (2) изучения образцов малых размеров, т.е. стандартных образцов пород и мелких фрагментов керна, по отношению к полевой установке оптического сканирования, предназначенной для поточных измерений на полноразмерном керна и его малогабаритных дубликатах («горбушках»), получаемых при срезе части образца полноразмерного керна вдоль его оси.

Разработанный комплект лазерных установок включают в себя:

- автономный модуль оптического сканирования для теплофизического профилирования комплекса тепловых свойств с высоким пространственным разрешением (до 0,2 мм) (оптический узел установки показан на рисунке 3.1а), который предназначен для комплексирования теплофизического профилирования керна с механическим скретч-тестированием [174] и поточным гамма-спектроскопическим профилированием керна;

- мобильную установку для массовых измерений тепловых свойств на стандартных образцах керна и мелких фрагментах с широким диапазоном вариаций параметров режима измерений, которая может легко транспортироваться в любой пункт назначения для проведения массовых экспрессных измерений в кернаохранилищах или в местах бурения скважин (рисунок 3.1б).

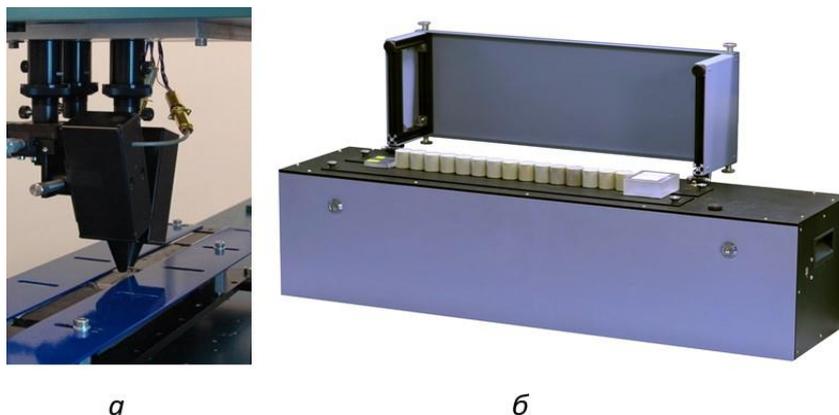


Рисунок 3.1. – Лазерные установки оптического сканирования. а – Автономный лазерный модуль оптического сканирования, обеспечивающий теплофизическое профилирование керна с повышенной пространственной разрешающей способностью [154]. б – Мобильная установка для измерений тепловых свойств на стандартных образцах горных пород и мелких фрагментах керна (с характерным замером  $\geq 10$  мм) с возможностью вариаций параметров режима измерений в широких диапазонах.

Разработка лазерных установок существенно расширила круг задач тепловой петрофизики, решаемых при помощи метода оптического сканирования.

Автономный модуль оптического сканирования (рисунок 3.1а) обеспечивает непрерывное сканирование образцов последовательно в двух противоположных направлениях на серии образцов керна протяженностью до 1 м с повышенной разрешающей способностью при профилировании теплопроводности (от 0,2 мм). При разработке модуля ставилась задача обеспечить комплексирование профилирования теплопроводности керна с высоким разрешением (0,2 мм) с детальным анализом неоднородности пород в комплексе с механическим скретч-тестированием керна [154]. Оптический узел автономного модуля адаптирован к методу и установкам скретч-тестирования и расположен, как и регистрирующий узел скретчера, над серией образцов керна, которые при подготовке их к измерениям прижимаются к монтажной платформе (синий цвет на рисунке 3.1а) снизу при помощи пневматического устройства [57, 83, 154]. При прямом ходе модуля оптического сканирования обеспечивается профилирование теплопроводности с пространственным разрешением 0,2 мм, что соответствует пространственному разрешению при регистрации неоднородности пород при помощи механического скретч-тестирования. При обратном ходе модуля оптического сканирования совместно регистрируются профили теплопроводности и температуропроводности с пространственным разрешением около 1 мм и большей глубиной теплофизического зондирования [57, 83, 154]. Основной особенностью прибора является то, что при первом сканировании со скоростью  $v_1$  (рисунок 1.7) осуществляют измерения теплопроводности и температуропроводности путем регистрации профилей температур  $T_1$  и  $T_2$  вдоль направления сканирования инфракрасными радиометрами 5 и 6 на двух участках поверхности: 1) при  $x_l=10$  мм и  $y_0=0$  и 2) при  $x_l=10$  мм и  $y_0=4$  мм (рисунок 1.7). Регистрация профиля начальной температуры  $T_0$  образца при первом сканировании осуществляется инфракрасным радиометром 6, который при обратном ходе используется уже для измерений теплопроводности с повышенной пространственной разрешающей способностью. Для обеспечения высокой пространственной разрешающей способности при профилировании теплопроводности поле зрения радиометра 6 расположено в области с  $y=0$  на возможно меньшем расстоянии  $x_2$  впереди пятна нагрева. Расстояние  $x_2$  выбрано равным 3 мм исходя из следующих одновременных требований: 1) должно обеспечиваться максимально возможное пространственное разрешение профилирования теплопроводности, 2) отраженное от образца излучение лазера не должно искажать результаты регистрации температуры нагрева в поле зрения радиометра 6, 3) основная погрешность измерений теплопроводности должна составлять не хуже  $\pm 4\%$  (при доверительной вероятности 0,95). В серии с исследуемыми образцами последовательно располагают стандартные образцы тепловых свойств 7 и 8. При обратном сканировании со скоростью  $v_2$  инфракрасный радиометр

6 регистрирует профиль температуры нагрева, а начальную температуру образцов регистрируют при помощи радиометра 4. Для данной установки разработан радиометр 6 с уменьшенными размерами поля зрения (1x1 мм) и специально заданными геометрическими параметрами. В стандартном режиме измерений скорость сканирования составляет 3 мм/с, хотя для отдельных измерений может выбираться в диапазоне от 2 до 5 мм/с для изменения глубины теплового зондирования [57, 83, 154].

Оптико-электронные компоненты установки смонтированы на платформе установки для скретч-тестирования производства компании Terra-Tek (рисунок 3.1а), благодаря чему теплофизические измерения могут осуществляться на блоках образцов керна, подготовленных к исследованию как до скретч-тестирования керна, так и после него. Основные характеристики автономного модуля оптического сканирования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Характеристики автономного модуля оптического сканирования для комплексных измерений тепловых свойств с высоким пространственным разрешением для профилирования теплопроводности [57, 83, 154].

Параметр	Величина
Диапазон измерений теплопроводности	0,2...6,0 Вт/(м·К)
Диапазон измерений температуропроводности	$(0.1...2.5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Основная погрешность измерений теплопроводности (д.в. 0,95)	$\pm 3\%$
Основная погрешность измерений температуропроводности (д.в. 0,95)	$\pm 4\%$
Пространственное разрешение при профилировании теплопроводности	$\geq 0,2 \text{ см}$
Параметр	Величина
Скорость сканирования	3...5 мм/с
Тип оптического источника тепла	Лазер, непрерывного действия, длина волны - 960 нм

Благодаря своим конструктивным особенностям, функциональным возможностям и техническим характеристикам разработанный автономный модуль оптического сканирования может быть интегрирован в один цикл поточного профилирования полноразмерного керна со стандартным гамма-спектрометром.

Высокая воспроизводимость результатов теплофизического профилирования и возможность детальной регистрации тепловой неоднородности образцов пород при помощи автономного модуля оптического сканирования иллюстрируются на рисунке 3.2 и

обеспечиваются благодаря малой случайной погрешности измерений ( $\leq 1,5\%$  при доверительной вероятности 0,95).

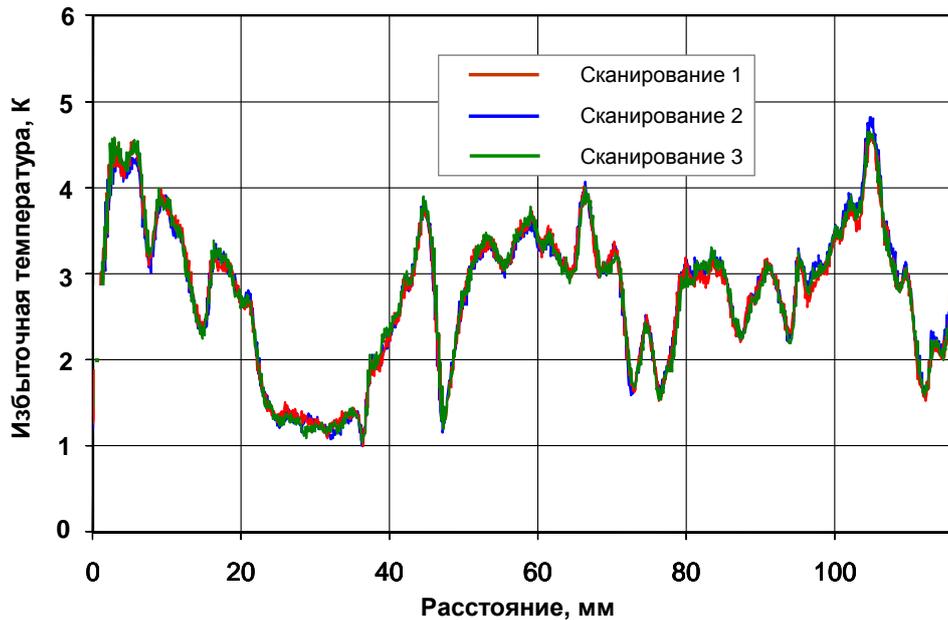


Рисунок 3.2 – Результаты трех последовательных сканирований образца породы при помощи автономного модуля оптического сканирования [154].

На рисунке 3.3 приведены результаты профилирования теплопроводности для серии образцов нефтяных сланцев общей протяженностью 930 мм, полученные при помощи автономного модуля оптического сканирования. Профили теплопроводности хорошо отражают разномасштабную неоднородность пород, отражающую особенности текстуры пород и вариации их минерального состава. Благодаря высокой пространственной разрешающей способности установки хорошо выделяется гнездо пирита и регистрируется теплопроводность в зоне его расположения.

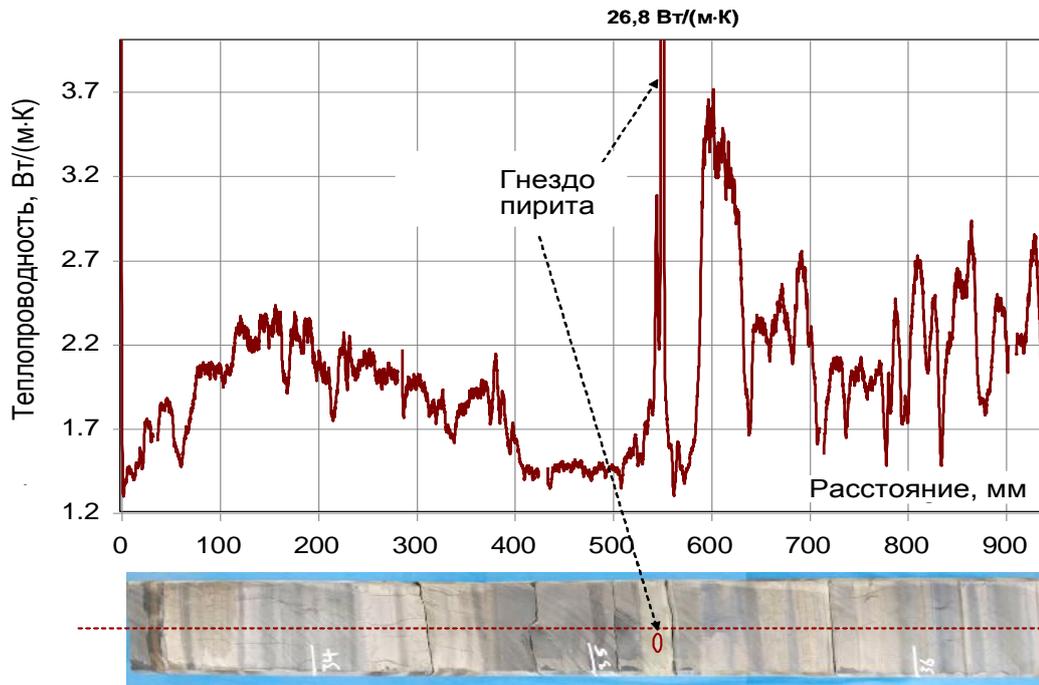


Рисунок 3.3 – Результат непрерывного высокоразрешающего профилирования теплопроводности серии образцов нефтяных сланцев [154].

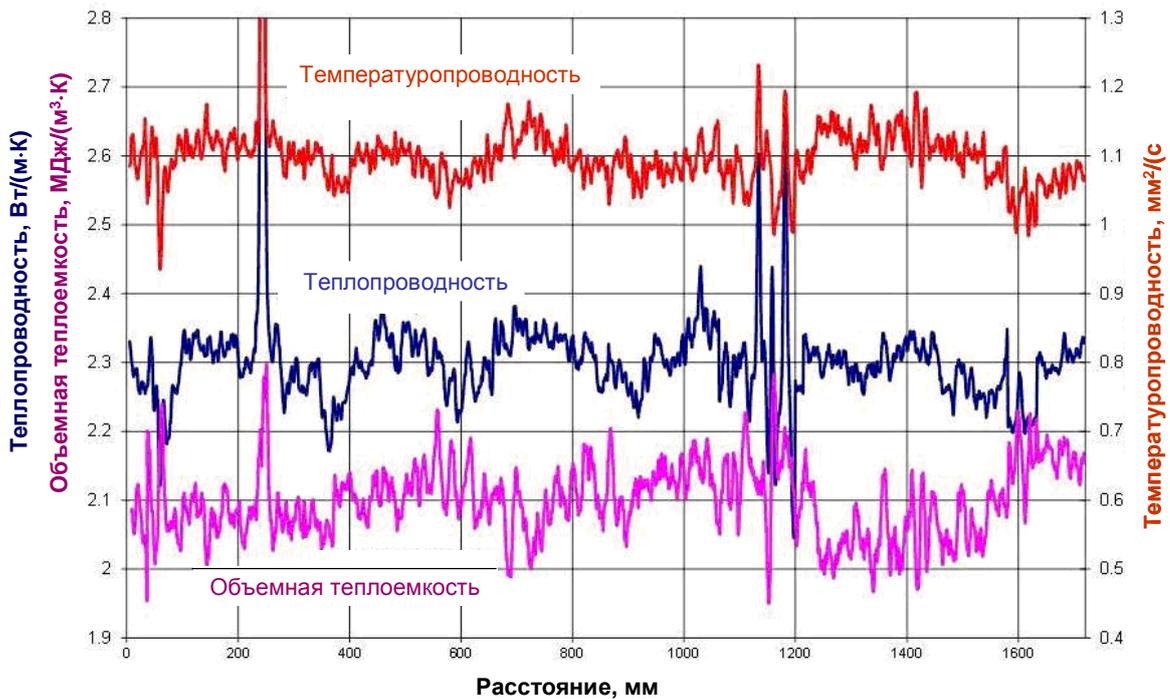


Рисунок 3.4 – Пример непрерывных детальных профилей комплекса тепловых свойств, зарегистрированных для двух серий образцов нефтяных сланцев общей длиной 1700 мм [145]

Пример непрерывных профилей полного комплекса тепловых свойств для двух серий образцов сланцев общей длиной 1700 мм приведен на рисунке 3.4. Как следует из рисунка, разработанная лазерная измерительная установка оптического сканирования позволяет регистрировать разномасштабные вариации свойств, значительно выходящие за пределы шумов измерительной системы, которые составляют (при оценке по двум среднеквадратичным отклонениям) 1% для теплопроводности, 2% для температуропроводности и 2,5% для объемной

теплоемкости. Высокочастотные вариации сигналов, отражаемые на профилях свойств на рисунке 3.4, значительно выходят за пределы шума и характеризуют высокочастотные вариации теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости, отражающие неоднородность образцов пород.

Для комплексных измерений тепловых свойств горных пород на стандартных образцах пород (цилиндры 30x30 мм) и мелких фрагментах керна в условиях кернохранилищ и для исследований тепловых свойств образцов пород с вариациями глубины теплофизического зондирования и пространственной разрешающей способности разработана мобильная установка оптического сканирования (рисунок 3.1б). Вариации глубины теплофизического зондирования и пространственной разрешающей способности при профилировании тепловых свойств, а также адаптация параметров режима к размерам изучаемых образцов обеспечиваются возможностью оперативно изменять в достаточно широких пределах параметры режима измерений – размеры и форму пятна нагрева, рабочую базу, скорость сканирования (таблица 3.2). Измерения тепловых свойств могут осуществляться при установке на рабочей платформе в одну серию для измерений при одном сканировании до 15 стандартных образцов пород. Благодаря возможности изменять параметры режима измерений в широких пределах, прибор обеспечивает также измерения эффективных тепловых свойств на тонких синтетических образцах (5-6 мм), специально приготавливаемых при измерениях тепловых свойств на шламе и неконсолидированных породах [146], благодаря легко регулируемой глубине теплофизического зондирования.

Сканирование образцов с повышенным пространственным разрешением на серии образцов керна общей протяженностью до 0,5 м (рисунок 3.1б) обеспечивает:

- широкий диапазон минимальной длины и ширины изучаемых образцов пород (соответственно от 10 мм до 500 мм по длине);
- широкий диапазон минимальной толщины изучаемых образцов пород (от 5 мм в диапазоне тепловых свойств пород);
- широкий диапазон управляемых вариаций глубины теплового зондирования образцов (от 5 до 30 мм в диапазоне тепловых свойств осадочных пород);
- высокую производительность измерений и простоту установки изучаемых образцов на рабочей платформе;
- поточный характер измерений (с числом изучаемых образцов до 50 в час);
- вариации пространственного разрешения при изучении вариаций тепловых свойств образцов (от 0,2 до 10 мм).

Таблица 3.2. Характеристики мобильной лазерной установки оптического сканирования для комплексных измерений тепловых свойств на стандартных образцах пород и мелких фрагментах керна с широким диапазоном вариаций параметров режима измерений.

Параметр	Величина
Масса, габариты	20 кг, 25x25x90 см
Диапазон измерений теплопроводности	0,2...40 Вт/(м·К)
Диапазон измерений температуропроводности	$(0,1...5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Основная погрешность измерений теплопроводности (д.в. 0,95)	$\pm 3\%$
Основная погрешность измерений температуропроводности (д.в. 0,95)	$\pm 4\%$
Пространственное разрешение при профилировании теплопроводности	Регулируемое, $\geq 0,2 \text{ мм}$
Скорость сканирования	0,5-20 мм/с
Расстояние от пятна нагрева до поля зрения радиометра вдоль линии нагрева	5 – 100 мм
Расстояние между полями зрения радиометров в направлении, перпендикулярном линии нагрева	3 – 10 мм
Тип оптического источника тепла	Лазер непрерывного действия, длина волны - 970 нм

Для настройки всех вариантов созданных приборов оптического сканирования, для их рабочей метрологической поверки и текущего метрологического контроля в процессе измерений применяются стандартные образцы тепловых свойств твердых тел, охарактеризованные в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Комплект стандартных образцов тепловых свойств твердых тел, используемых для настройки созданных лазерных приборов оптического сканирования, их рабочей метрологической поверки и текущего метрологического контроля в процессе измерений [30, 161].

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температуропроводность, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Оргстекло бесцветное бытовое поделочное [84]	0,194 ( $\pm 0,5\%$ )	–
Техническое стекло «ТФ-1» [84]	0,701 ( $\pm 0,3\%$ )	0,556 ( $\pm 0,5\%$ )
Техническое стекло К-8 [84]	1,094 ( $\pm 0,3\%$ )	0,789 ( $\pm 0,7\%$ )
Техническое стекло «ЛК-5» [84]	1,185 ( $\pm 0,3\%$ )	0,779 ( $\pm 0,7\%$ )
Техническое стекло марки КВ (плавленый кварц) [84]	1,35 ( $\pm 1\%$ )	0,827 ( $\pm 1\%$ )
Диабаз	2,30	1,06
Белый мрамор	2,75	1,25
Белый мрамор	3,15	1,41
Материал BCR724 (Pyroceram)	3,75	1,80
Филлит	4,85	2,36

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температуропроводность, $10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с
Сплав титана ВТ-6	6,52	2,74
Монокристаллы кварца	6,05 ( $\pm 0,8\%$ ) вдоль оси С 10,7 ( $\pm 1\%$ ) вдоль осей А и В	3,06 ( $\pm 1\%$ ) вдоль С 5,42 ( $\pm 1,5\%$ ) вдоль осей А и В
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	13,7	3,65

### 3.3. Теплофизические исследования стандартных образцов пород

В тепловой петрофизике долгое время отсутствовали методы и средства теплофизических измерений, которые могли обеспечить неразрушающие измерения главных значений тензора теплопроводности, коэффициента тепловой анизотропии, объемной теплоемкости пород на стандартных образцах пород. Развитие технологии оптического сканирования впервые обеспечило возможность комплексных теплофизических измерений на таких образцах.

Массовые, и в то же время прецизионные неразрушающие измерения главных значений тензора теплопроводности, объемной теплоемкости, коэффициента тепловой анизотропии и коэффициента тепловой неоднородности на образцах стандартного керна при различных видах поровых флюидов в условиях кернохранилищ могут быть осуществлены лишь при помощи разработанного мобильного лазерного прибора оптического сканирования (раздел 3.2). Только за последние годы при помощи метода и аппаратуры оптического сканирования нами изучено более 400 образцов стандартного керна для 5 скважин трех месторождений углеводородов. В процессе таких измерений вдоль выбранных линий оптического сканирования на поверхностях стандартных образцов регистрируются непрерывные профили каждого из тепловых свойств, что позволяет учесть неоднородность образца. На рисунке 3.5 приведены случаи оптимального сочетания линий сканирования, которое следует выбирать при теплофизических исследованиях стандартных образцов [59]. В случаях выбора 2D модели анизотропии породы (при равенстве главных значений теплопроводности вдоль напластования ( $\lambda_{//}$  на рисунке 3.5a) и их отличии от главного значения теплопроводности поперек напластования ( $\lambda_{\perp}$  на рисунке 3.5a), что достаточно корректно в подавляющем большинстве случаев [6, 24]) осуществляют следующие сканирования: вдоль плоскости напластования (направления 2 и 4 на рисунке 3.5a) и перпендикулярно ей (направления 1 и 3 на рисунке 3.5a). Результаты такого сканирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяют определить главные значения тензора теплопроводности  $\lambda_{//}$  и  $\lambda_{\perp}$  соответственно вдоль и поперек напластования [161]. Главное значение тензора теплопроводности  $\lambda_{//}$  вдоль напластования определяется сразу при сканировании перпендикулярно плоскости напластования (в направлении 1 на рисунке 3.5a). Главное значение тензора теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  поперек напластования определяется расчетным путем по

результатам сканирования вдоль плоскости напластования (направление 2 на рисунке 3.5а) с учетом результата определения параметра  $\lambda_{\parallel}$ . Основная погрешность измерений составляет не более  $\pm 3\%$  (при доверительной вероятности 0,95 и при равном вкладе случайной и систематической составляющих погрешности) для теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  вдоль напластования, не более  $\pm 4\%$  для теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  поперек напластования, не более  $\pm 5\%$  для объемной теплоемкости  $C$  и не более  $\pm 5\%$  для коэффициента тепловой анизотропии  $K$  (определяемого как  $K = \lambda_{\parallel} / \lambda_{\perp}$ ). Степень неоднородности каждого образца характеризуют по результатам профилирования теплопроводности, определяя коэффициент тепловой неоднородности  $\beta$ , который рассчитывается при помощи соотношения  $\beta = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / \lambda_{\text{сред}}$ , где  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  – соответственно минимальная и максимальная в пределах образца теплопроводность,  $\lambda_{\text{сред}}$  – средняя теплопроводность образца [83]. Так как измерения методом оптического сканирования являются достаточно быстрыми (процесс подготовки образца занимает 1-2 минуты, а процесс оптического сканирования требует 20-30 секунд), для дополнительного снижения случайной погрешности в необходимых случаях для каждого направления проводят не одно, а два сканирования, что позволяет снизить случайную погрешность измерений.

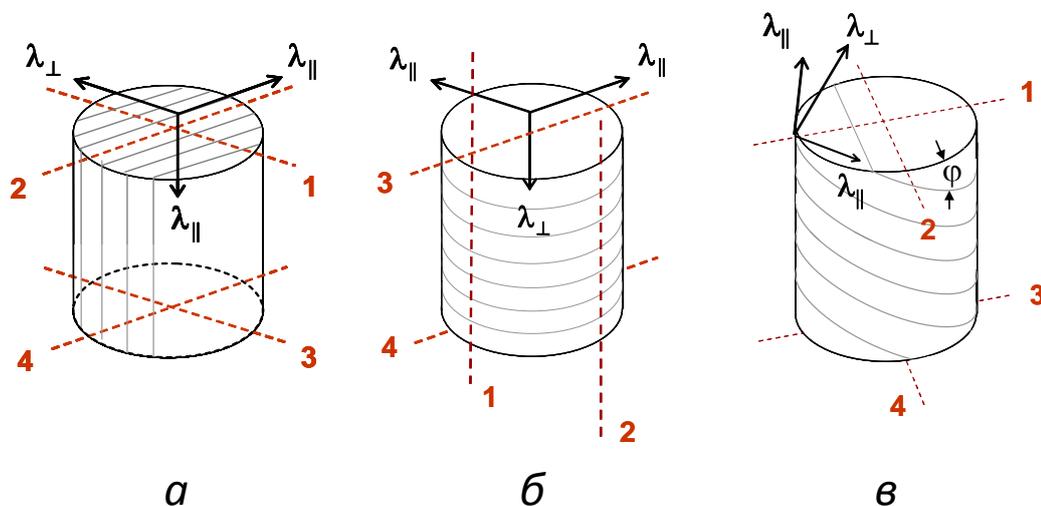


Рисунок 3.5. – К рекомендуемому выбору направлений сканирования на поверхностях образцов при теплофизических исследованиях стандартных образцов [59]. Красные линии 1 - 4 – направления сканирования поверхностях образца стандартного керна, тонкие серые линии – обозначение плоскости напластования.

В наиболее распространенных случаях, когда плоскость напластования перпендикулярна плоским поверхностям образца стандартного керна, теплофизические измерения проводят, сочетая сканирование вдоль двух взаимно перпендикулярных линий 1 и 2 на плоской поверхности образца, как это показано на рисунке 3.5а.

Для снижения влияния неоднородности образцов на результаты определения  $\lambda_{\parallel}$  и  $\lambda_{\perp}$  в случаях, приведенных на рисунках 3.5а, б и в, для каждого направления сканирования выбирают

две параллельные линии на противоположных частях поверхности образца (соответственно линии 1 и 3 для одного направления сканирования и линии 2 и 4 для перпендикулярного направления сканирования). В таком случае измерениями охватывается значительная часть объема стандартного образца породы, так как глубина теплофизического зондирования составляет 8-12 мм (раздел 2.4). В таком случае главные значения тензора теплопроводности породы, согласно соотношениям (1.2) и (1.3), определяют при помощи соотношений:

$$\lambda_{\parallel} = (\lambda_{\text{каж}1} + \lambda_{\text{каж}3})/2, \quad (3.1)$$

где  $\lambda_{\text{каж}1}$  и  $\lambda_{\text{каж}3}$  – результаты измерений теплопроводности при сканировании вдоль линий соответственно 1 и 3,

и 
$$\lambda_{\perp} = [(\lambda_{\text{каж}2} + \lambda_{\text{каж}4})/2]^2 / [(\lambda_{\text{каж}1} + \lambda_{\text{каж}3})/2], \quad (3.2)$$

где  $\lambda_{\text{каж}2}$  и  $\lambda_{\text{каж}4}$  – результаты измерений «кажущейся» теплопроводности [59] при сканировании вдоль линий соответственно 2 и 4.

Если плоскость напластования параллельна плоским поверхностям стандартного образца, необходимым, дополнительно к сканированию по торцу образца, является сканирование на цилиндрической поверхности образца (рисунок 3.5б). В таких случаях для определения главных значений тензора теплопроводности по результатам сканирований вдоль направлений 1 - 4 также используют соотношения (3.1) и (3.2). Вследствие неадекватности условий такого эксперимента теоретической модели метода оптического сканирования, предусматривающей сканирование на плоской поверхности образцов пород, необходима оценка систематической погрешности измерений, допускаемой при сканировании по цилиндрической поверхности. Оценку такой погрешности проводят путем сравнения результатов измерений тепловых свойств на плоской и цилиндрической поверхностях предварительно отобранного изотропного образца с близкими тепловыми свойствами (возможен выбор промышленного материала) [59].

Известно, что в общем случае (т.е. при 3D анизотропии твердого тела) при произвольном направлении линии сканирования относительно главных осей теплопроводности А, В и С образца породы результат измерений теплопроводности не отражает отдельно взятые главные компоненты тензора теплопроводности  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$  или  $\lambda_C$  для указанных главных осей теплопроводности, а представляет собой функцию данных главных компонент теплопроводности (так называемую «кажущуюся» теплопроводность), которая определяется соотношением [161]

$$\lambda_{\text{каж}} = \sqrt{\lambda_A \lambda_B \cos^2 \gamma + \lambda_A \lambda_C \cos^2 \beta + \lambda_B \lambda_C \cos^2 \alpha}, \quad (3.3)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  - углы между линией сканирования и соответственно главными осями теплопроводности А, В и С.

Из соотношений (3.1) и (3.3) следуют соотношения (3.4) и (3.5), позволяющие определять главные значения тензора теплопроводности  $\lambda_{//}$  и  $\lambda_{\perp}$  для образцов с 2D анизотропией в ситуациях, когда плоскость напластования наклонена к плоской поверхности образца под углом  $\varphi$  (рисунок 3.1в), по результатам сканирования по направлениям 1 - 4, показанным на рисунке 3.5в [59]:

$$\lambda_{//} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\lambda_{ка.ж1} + \lambda_{ка.ж3}}{2}\right)^2 - \left(\frac{\lambda_{ка.ж2} + \lambda_{ка.ж4}}{2}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi}}{\sin \varphi} \quad (3.4)$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{\left(\frac{\lambda_{ка.ж2} + \lambda_{ка.ж4}}{2}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{\lambda_{ка.ж1} + \lambda_{ка.ж3}}{2}\right)^2 - \left(\frac{\lambda_{ка.ж2} + \lambda_{ка.ж4}}{2}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi}} \quad (3.5)$$

В случаях, когда определение направления главных осей теплопроводности перед измерениями теплопроводности является затруднительным, предварительно находят направление этих осей. Для этого осуществляют сканирование на плоской поверхности образца, пересекающей плоскость напластования (рисунок 3.5а), последовательно вдоль нескольких линий с изменением их положения, которое проводят путем их сдвига каждый раз на 15-30° вокруг оси стандартного образца, как это показано на рисунке 3.6.

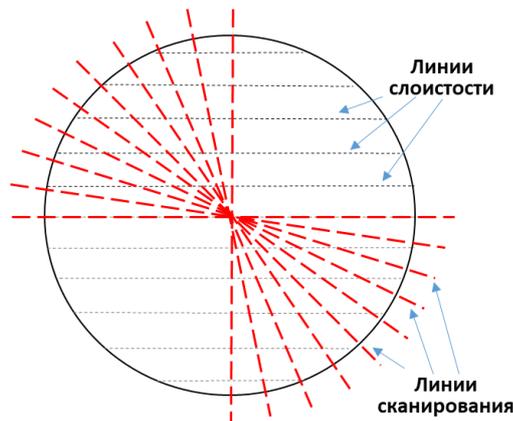


Рисунок 3.6. – К определению направления главных осей теплопроводности путем сканирования образца в различных направлениях с обработкой результатов измерений теплопроводности при помощи соотношения (3.3).

Учет анизотропии и измерения главных значений теплопроводности при исследованиях стандартных образцов пород являются обязательными, так как это существенно влияет на

результаты петрофизических исследований как при подготовке баз исходных данных по свойствам пород, так и при анализе корреляционных связей [59, 74, 152].

Так как традиционные технологии измерений тепловых свойств не обеспечивали ранее измерения на стандартных образцах пород, внедрение технологии оптического сканирования в практику лабораторных петрофизических исследований впервые предоставило возможность изучения корреляционных связей между тепловыми и другими свойствами осадочных пород на максимально высоком для современных условий уровне надежности.

### 3.4. Определение тепловых свойств минеральной матрицы карбонатных пород

На рисунке 3.7 приведены поля корреляции между теплопроводностью и пористостью (здесь и далее при описании результатов лабораторных петрофизических исследований под пористостью будем понимать коэффициент открытой пористости), построенные по результатам исследований коллекции из 73 стандартных образцов карбонатных пород одного из месторождений высоковязкой нефти. Теплофизические исследования проводились в том порядке, который описан в разделе 3.3. Измерения тепловых свойств для данной коллекции проводились последовательно (1) после высушивания образцов (в специальной печи согласно рекомендациям по высушиванию образцов осадочных пород), (2) после насыщения образцов моделью пластовой воды и (3) после насыщения образцов керосином, который при таких исследованиях может рассматриваться как модель нефти в связи с близостью тепловых свойств нефти и керосина. Насыщение образцов флюидами проводилось при вакуумировании образцов согласно соответствующим методическим рекомендациям. Пористость каждого образца измеряли гидростатическим методом [15, 59].

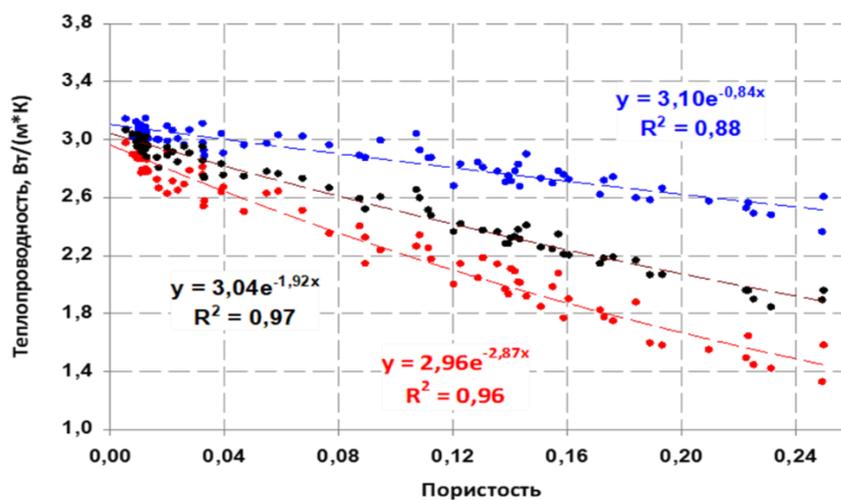


Рисунок 3.7. – Зависимости между теплопроводностью и коэффициентом открытой пористости  $K_p$  для коллекции карбонатных пород. Красный цвет – высушенные образцы, черный цвет – насыщение моделью нефти (керосин), синий цвет – насыщение моделью пластовой воды. В приведенных на рисунке уравнениях регрессии параметр «у» соответствует теплопроводности вдоль напластования, параметр «х» соответствует пористости пород [59].

Высокие, статистически значимые для всех состояний образцов коэффициенты детерминации (0,88 - 0,97, рисунок 3.7) и достаточно широкий диапазон пористости образцов позволили с высокой степенью надежности по уравнениям регрессии установить, что теплопроводность минеральной матрицы, соответствующая пористости равной нулю, находится в диапазоне 2,96 - 3,10 Вт/(м·к) (рисунок 3.7) при среднем значении 3,03 Вт/(м·к) [59].

Тесная связь теплопроводности и пористости обуславливает совпадение зональности этих двух параметров вдоль скважины, установленное по результатам данных измерений (рисунок 3.8). Это обосновывает хорошие перспективы применения предложенного нами метода непрерывного бесконтактного неразрушающего профилирования комплекса тепловых свойств на всем полноразмерном керне скважины с пространственной разрешающей способностью ~1 мм (главы 4 и 5). Непрерывное поточное теплофизическое профилирование керна, впервые открывающее возможность активного включения таких базовых физических свойств пород, как теплопроводность, температуропроводность и объемная теплоемкость в работы по разведке месторождений углеводородов, может существенно дополнить стандартные виды каротажа в скважинах, так как его пространственная разрешающая способность существенно выше возможностей других видов каротажа, при этом важно, что вариации ряда других физических свойств, например, скоростей упругих волн, также во многом определяются вариациями пористости пород [59].

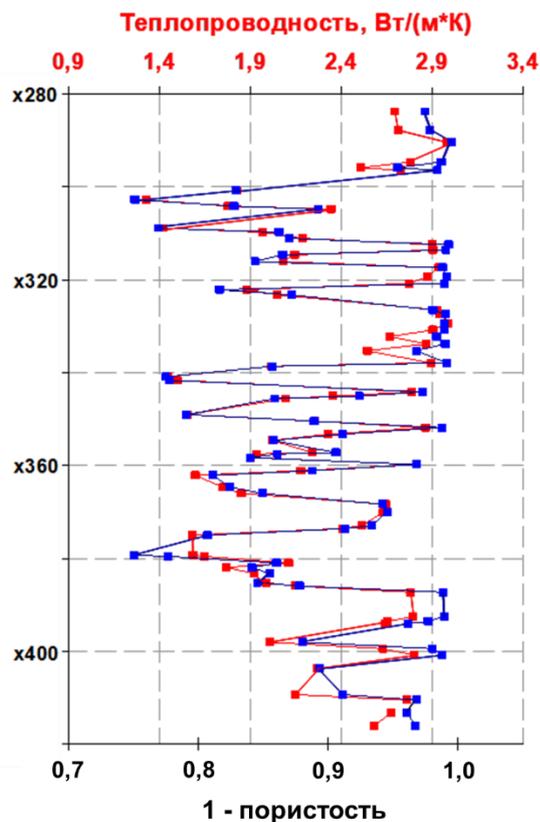


Рисунок 3.8. – Вариации теплопроводности и параметра (1 – пористость) вдоль скважины, вскрывшей карбонатные породы-коллектора резервуара углеводородов [59].

Тесные корреляционные связи между объемной теплоемкостью и пористостью, установленные по результатам измерений на стандартных образцах этой же коллекции карбонатных пород (рисунок 3.9), позволили из найденных уравнений регрессии (рисунок 3.9) установить, что объемная теплоемкость минеральной матрицы изучавшихся пород (соответствующая пористости, равной нулю) находится в диапазоне 2,22 – 2,24 МДж/(м<sup>3</sup>·К) при среднем значении 2,23 МДж/(м<sup>3</sup>·К). Данные об объемной теплоемкости необходимы для бассейнового и гидродинамического моделирования, как и теплопроводность минеральной матрицы пород [11, 129].

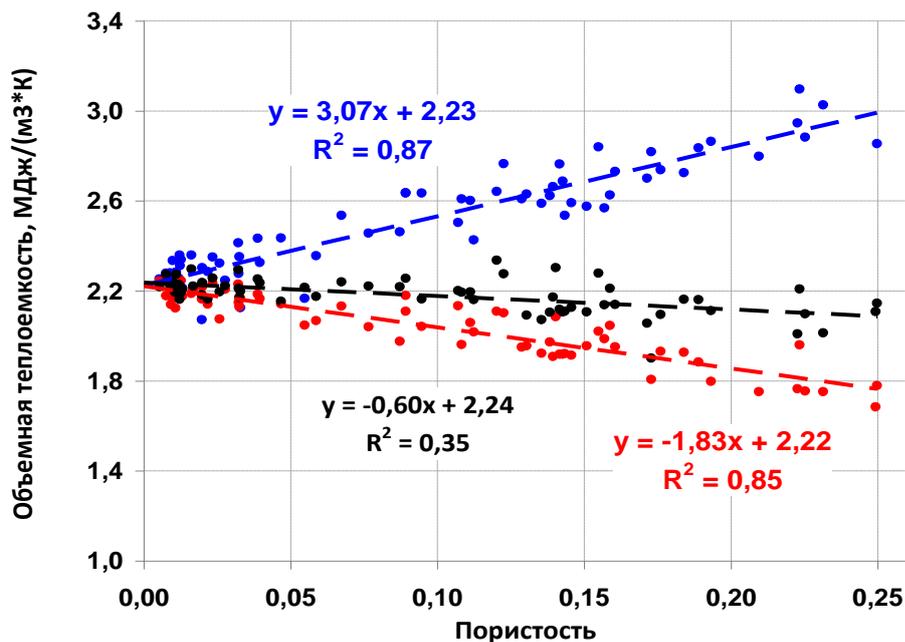


Рисунок 3.9. – Зависимости между объемной теплоемкостью и пористостью для коллекции карбонатных пород. Красный цвет – высушенные образцы, черный цвет – насыщение моделью нефти (керосин), синий цвет – насыщение моделью пластовой воды. В приведенных на рисунке уравнениях регрессии параметр «y» соответствует объемной теплоемкости, параметр «x» соответствует пористости пород [59].

### 3.5. Анализ взаимосвязи теплопроводности и общего содержания органического вещества для пород баженовской свиты

Для разработки метода, обеспечивающего применение результатов непрерывного теплофизического профилирования на керне для определения общего содержания органического вещества в породах нетрадиционных резервуаров баженовской свиты и доманиковой формации (глава 5), важное значение имеет анализ связи теплопроводности с общим содержанием органического вещества  $C_{орг}$ . К наиболее надежным методам определения  $C_{орг}$  относятся измерения с применением пиролиза [28, 36]. Анализ результатов измерений теплопроводности на стандартных образцах и данных пиролиза необходим для установления корреляционной связи между теплопроводностью и  $C_{орг}$ , а также для разработки методики определения  $C_{орг}$  по данным о теплопроводности пород при помощи аналитических моделей (глава 5). Вместе с тем при

подобном анализе следует иметь в виду, что результаты измерений теплопроводности на стандартных образцах пород характеризуют значительно больший (не менее, чем в 10 раз, см. ниже) объем породы, чем результаты пиролиза, проводящегося на образцах пород объемом около 0,2-0,3 см<sup>3</sup> [28, 36].

Методом оптического сканирования проведены измерения тепловых свойств на коллекции из 126 стандартных образцов-цилиндров, представляющих низкопроницаемые породы из отложений баженовской свиты. Измерения последовательно проводились при четырех состояниях всех образцов: 1) до их экстрагирования, 2) после донасыщения керосином (имеющим, как указывалось выше, тепловые свойства, близкие к свойствам нефти и другим видам углеводородов), 3) после экстрагирования с последующим высушиванием, 4) после водонасыщения под вакуумом. При каждом состоянии образцов измеряли главные значения теплопроводности  $\lambda_{//}$  и  $\lambda_{\perp}$  соответственно вдоль и поперек напластования, объемную теплоемкость  $C$ , коэффициент тепловой анизотропии  $K$ , коэффициенты тепловой неоднородности  $\beta_{//}$  и  $\beta_{\perp}$  для линий сканирования соответственно вдоль и поперек напластования. Общее число измерений составило более 1400, общее число сканирований – около 3000 [65].

На рисунке 3.10 приведен геолого-геофизический планшет изучавшейся скважины. В первых трех полях приведены данные комплекса геофизических исследований скважин (ГИС). В третьем поле на гамма-каротаж (ГК) наложены данные профильных замеров, позволившие согласовать глубины отбора керна с глубинами ГИС. В четвертом поле дан минеральный состав пород. Анализ этого состава показал, что породы представлены в основном кремнеземом, и только в верхней части присутствует значимое количество карбонатных минералов. Пористость, представленная в панели 5, измерена по керосину до экстракции образцов. Анализ пористости и продуктивного индекса (PI, представлен в панели 9) показывает, что все литофизические типы обладают емкостью, заполненной в скважине углеводородными флюидами, но ни один из интервалов не будет отдавать нефть без специального воздействия на пласт. Параметр ТОС, представленный в панели 6, - это массовая концентрация органического вещества (ОВ). На панелях 7 и 8 даны пиролитические характеристики S1 и S2 изучаемых пород. Данные на панелях 6-8 получены методом Rock-Eval Е.В. Козловой и сотрудниками МГУ им. М.В.Ломоносова Г.А. Калмыковым и А.Г.Калмыковым [65].

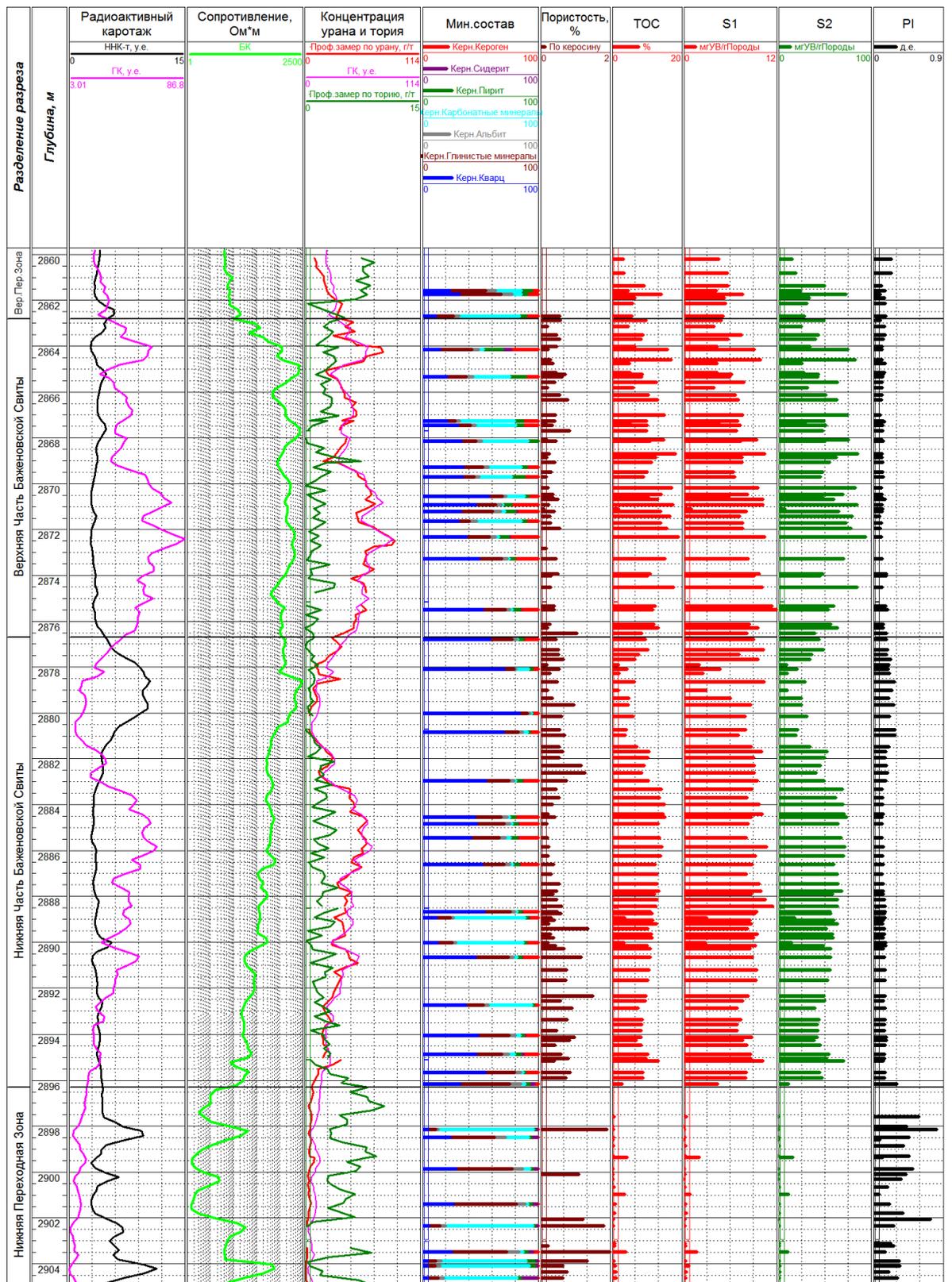


Рисунок 3.10. – Геолого-геофизический планшет по скважине, вскрывшей БС. ТОС – массовое содержание органического углерода, S1, S2 [мгУВ/г породы] – пиролизические параметры, PI – индекс продуктивности [65].

В таблице 3.4 приведены результаты статистической обработки результатов измерений тепловых свойств коллекции образцов пород баженовской свиты. Отраженные в таблице 3.4

вариации тепловых свойств при изменении состояния образцов обусловлены, главным образом, изменениями свойств флюида в порово-трещинном пустотном пространстве пород при экстрагировании, высушивании, насыщении моделью нефти или пластовой воды. Замена состава флюида в поровом пространстве отражается на тепловых свойствах пород даже при невысокой пористости, поскольку при атмосферных условиях теплопроводность воды (0,59 - 0,61 Вт/(м·К)), воздуха и пара (0,022 - 0,026 Вт/(м·К) [9]) и нефти 0,10 - 0,17 Вт/(м·К) существенно отличаются между собой и являются значительно меньшими теплопроводности матрицы (для большинства осадочных пород 1,5 – 6,5 Вт/(м·К)) [65].

Таблица 3.4. Тепловые свойства образцов изучавшейся коллекции образцов пород бажендовской свиты [65].

Свойство	Неэкстрагированный керн	Насыщение - модель нефти (керосин)	Насыщение - воздух	Насыщение - модель пластовой воды
$\lambda_{\parallel}$ Вт/(м·К)	$\frac{1,28 - 3,14}{1,89 (0,38)}$ *	$\frac{1,23 - 3,52}{1,97 (0,48)}$	$\frac{0,82 - 3,21}{1,76 (0,62)}$	$\frac{1,24 - 3,92}{1,88 (0,61)}$
$\lambda_{\perp}$ Вт/(м·К)	$\frac{0,67 - 3,16}{1,66 (0,47)}$	$\frac{0,59 - 3,31}{1,58 (0,58)}$	$\frac{0,21 - 3,09}{1,37 (0,68)}$	$\frac{0,55 - 3,71}{1,56 (0,72)}$
Коэффициент анизотропии	$\frac{1,00 - 2,10}{1,19 (0,18)}$	$\frac{1,00 - 2,37}{1,31 (0,31)}$	$\frac{1,00 - 3,91}{1,44 (0,39)}$	$\frac{1,00 - 2,21}{1,38 (0,32)}$
$C^{**}$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)	$\frac{1,61 - 2,52}{1,93 (0,22)}$	$\frac{1,58 - 2,47}{2,06 (0,24)}$	$\frac{1,21 - 2,32}{1,84 (0,29)}$	$\frac{1,82 - 2,49}{2,16 (0,21)}$
$\beta_{\parallel}$	$\frac{0,01 - 0,21}{0,05 (0,04)}$	$\frac{0,01 - 0,19}{0,07 (0,03)}$	$\frac{0,01 - 0,16}{0,06 (0,07)}$	$\frac{0,01 - 0,17}{0,07 (0,03)}$
$\beta_{\perp}$	$\frac{0,01 - 0,52}{0,10 (0,08)}$	$\frac{0,01 - 0,51}{0,13 (0,07)}$	$\frac{0,01 - 0,41}{0,11 (0,11)}$	$\frac{0,01 - 0,38}{0,12 (0,09)}$

\* В числителе – диапазон измеренных значений, в знаменателе – среднее значение, в скобках - среднеквадратичное отклонение.

\*\*  $C$  - объемная теплоемкость.

Из данных таблицы 3.4 можно сделать следующие выводы [65].

1. Все тепловые свойства изучавшихся пород бажендовской свиты изменяются в широких диапазонах. Так, для неэкстрагированного керна теплопроводность  $\lambda_{\perp}$  изменяется почти в пять раз, коэффициент тепловой анизотропии – более чем вдвое, объемная теплоемкость – более чем в 1,5 раза.

2. Теплопроводность изучавшихся пород в ряду осадочных пород характеризуется пониженными значениями (средние значения  $\lambda_{\parallel}$  и  $\lambda_{\perp}$  составили соответственно 1,89 и 1,66 Вт/(м·К)), что следует объяснить в основном присутствием в породах низкотеплопроводного

органического вещества. Установленные значения объемной теплоемкости баженовской свиты лежат в области средних значений осадочных пород.

3. При любом состоянии керна (неэкстрагированный, сухой, нефте- и водонасыщенный) породы обладают высоким коэффициентом тепловой анизотропии. В условиях значительного контраста теплопроводности минеральной матрицы и органического вещества (15–30), это может свидетельствовать о слоистом переслаивании органического вещества с веществом минеральной матрицы, ориентированном расположении глинистых минералов и ориентированной микротрещиноватости пород.

4. Согласно данным о коэффициенте тепловой неоднородности, степень неоднородности пород в пределах образцов стандартного керна достаточно высока, при этом при всех состояниях керна наблюдается соотношение  $\beta_{\parallel} < \beta_{\perp}$ , что свидетельствует о более высокой неоднородности образцов в направлении поперек напластованию. Для неэкстрагированного керна как средние, так и максимальные значения коэффициента тепловой неоднородности  $\beta_{\perp}$  вдвое превышают значения  $\beta_{\parallel}$ , что однозначно свидетельствует о слоистой текстуре образцов и, вместе с высокими значениями коэффициента анизотропии, говорит о слоистости слаботеплопроводного органического вещества в высокотеплопроводной матрице.

Для 114 образцов коллекции методом пиролиза было определено общее содержание органического вещества (данные Е.В.Козловой, Г.А. Калмыкова, А.Г. Калмыкова). То обстоятельство, что определения  $C_{org}$  методом пиролиза проводились на фрагментах полноразмерного керна, отбирившихся в областях керна, непосредственно прилегающих к плоским поверхностям цилиндрических стандартных образцов, максимально снижало влияние неоднородности пород (весьма существенной согласно материалам главы 5) и обеспечило возможность достаточно надежного установления взаимосвязи теплопроводности и  $C_{org}$ .

Известно, что для теплопроводности терригенных и карбонатных коллекторов определяющим, вместе с минеральным составом, является влияние пористости [19, 109, 171]. Как показал проведенный анализ связи тепловых свойств образцов пород баженовской свиты с пористостью, в условиях невысокой пористости неэкстрагированных образцов (средняя пористость 0,80 % при стандартном отклонении 1,24 %) влияние пористости для изучавшейся коллекции пород является незначительным (для сухих образцов) или практически совсем не проявляется. Охарактеризованные в таблице 3.4 вариации тепловых свойств для коллекции образцов обусловлены совокупностью таких факторов, как вариации содержания в породах кремнистых и карбонатных минералов, глинистого и органического вещества, изменения трещиноватости и микротрещиноватости пород [65].

Поскольку для всех образцов изучавшейся коллекции пород была установлена существенная тепловая анизотропия (при коэффициенте анизотропии до 2,05 при среднем

значении 1,21), для анализа взаимосвязи теплопроводности и  $C_{орг}$  использовали значения компоненты теплопроводности  $\lambda_{//}$ , которая, как показали данные исследования, значительно более тесно связано с  $C_{орг}$ , чем значение теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  (рисунки 3.11 и 3.8). Поле корреляции между теплопроводностью  $\lambda_{//}$  и  $C_{орг}$  представлено на рисунке 3.11. На представленных на рисунке 3.11 данных из общей анализировавшейся коллекции достаточно четко выделяются 13 образцов, принадлежащих одному интервалу глубин залегания и представляющих группу радиоляритов [3]. Анализ корреляционных связей теплопроводности и  $C_{орг}$  для обеих групп пород позволяет сделать следующие важные выводы: (1) теплопроводность матрицы, в которую не входит органическое вещество, и которая необходима для определения  $C_{орг}$  по результатам непрерывного теплофизического профилирования на керне с использованием аналитической модели связи теплопроводности, для основной группы низкопроницаемых пород составляет 2,36 Вт/(м·К), что получено при подстановке  $C_{орг}=0$  в уравнение регрессии, приведенное на рисунке 3.11 и соответствующее основной группе низкопроницаемых пород, (2) теплопроводность матрицы для радиоляритов, которая также необходима для непрерывного профилирования  $C_{орг}$  по данным теплофизического профилирования полноразмерного керна, составляет 3,19 Вт/(м·К) (установлено по уравнению регрессии для радиоляритов, рисунок 3.11), что существенно выше, чем для остальных образцов пород коллекции. Уравнения регрессии, характеризующие связь теплопроводности с  $C_{орг}$  и установленные при максимально возможном в настоящее время соответствии коллекций образцов, для которых проводились измерения теплопроводности и  $C_{орг}$ , имеют важное значение, так как они позволяют преобразовывать результаты непрерывного профилирования теплопроводности, получаемые при теплофизическом каротаже на керне, в непрерывные профили вдоль скважины параметра  $C_{орг}$ . Важно, что профили параметра  $C_{орг}$  регистрируются в результате с таким же высоким пространственным разрешением (~1 мм), как и профили теплопроводности, получаемые при непрерывном профилировании керна (глава 5) [65].

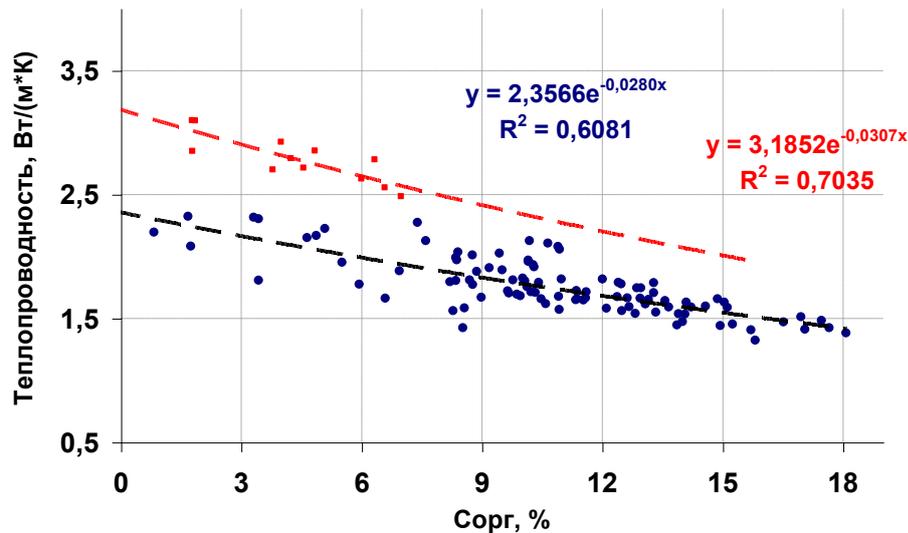


Рисунок 3.11. – Поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности  $\lambda_{//}$ , параллельной напластованию, и общим содержанием органического вещества  $C_{орг}$  для основной группы низкопроницаемых пород-коллекторов (темно-синий цвет) и радиоларитов (красный цвет). В приведенных на рисунке уравнениях регрессии параметр «у» соответствует теплопроводности, параметр «х» соответствует общему содержанию органического вещества  $C_{орг}$  пород [59].

Приведенные на рисунке 3.12 поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности  $\lambda_{\perp}$ , перпендикулярной напластованию, и общим содержанием органического вещества  $C_{орг}$  для основной группы низкопроницаемых пород-коллекторов и радиоларитов, показывают, что данная связь является существенно более слабой, чем в случае с теплопроводностью  $\lambda_{//}$ , параллельной напластованию (рисунок 3.11). Это вновь показывает существенную роль анизотропии и обязательный ее учет при петрофизических исследованиях стандартных образцов, как это ранее отмечалось в работе [59].

Результаты данных исследований показывают тесную связь между теплопроводностью и общим содержанием органического вещества, что открывает возможность прогноза детальных вариаций  $C_{орг}$  вдоль скважин по результатам высокоразрешающего профилирования теплопроводности. Вместе с тем, показано, что в таких случаях необходимо учитывать анизотропию пород и для определения  $C_{орг}$  использовать данные о главном значении тензора теплопроводности вдоль напластования [59, 65].

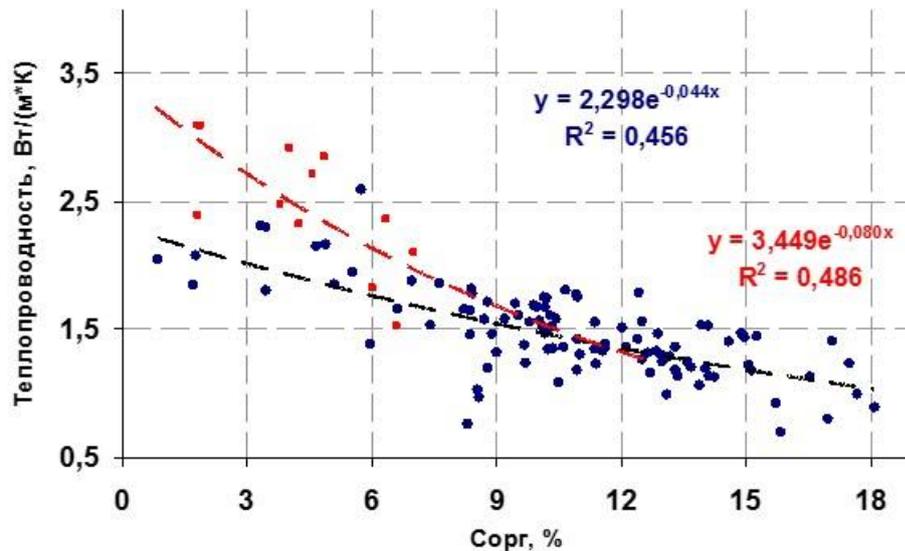


Рисунок 3.12. – Поля корреляции и уравнения регрессии, характеризующие связь между компонентой теплопроводности  $\lambda_{\perp}$ , перпендикулярной напластованию, и общим содержанием органического вещества  $C_{org}$  для основной группы низкопроницаемых пород-коллекторов (темно-синий цвет) и радиоларитов (красный цвет). В уравнениях регрессии параметр «y» соответствует теплопроводности, параметр «x» соответствует общему содержанию органического вещества  $C_{org}$  пород [59].

В условиях установленной существенной неоднородности образцов баженовской свиты существенным для оценок значимости корреляционных связей между содержанием органического вещества и тепловыми свойствами пород является то, что оценка содержания органического вещества проводилась методом пиролиза на отобранных из образцов стандартного керна пробах, объем которых не превышал  $0,3 \text{ см}^3$ . При теплофизическом сканировании стандартного керна ширина охватываемого измерениями слоя составляла около 2 см, глубина – около 1 см. Результаты двукратного независимого профилирования теплопроводности вдоль одной и той же линии сканирования и вдоль параллельных линий на противоположных поверхностях (раздел 3.3, рисунок 3.5) усреднялись. Таким образом, при теплофизических измерениях на обеих плоских поверхностях стандартного керна при сканировании в двух взаимно-перпендикулярных направлениях в оценку тепловых свойств вовлекалось около 70% объема каждого образца. Как видно из рисунка 3.9, на котором представлены результаты аналогичных исследований образца пород доманиковой формации и который приведен для наглядности, профили теплопроводности при двух независимых сканированиях образца вдоль одной линии сканирования практически совпадают, что подтверждает низкую общую случайную погрешность измерений (не более 1% при доверительной вероятности 0,95). Из данных на рисунке 3.13 следует, что в той области, откуда отбиралась проба для оценки общего содержания органического вещества, вариации теплопроводности составили более 30% от её среднего для этой области значения. Протяжённость образца в этой области в направлении сканирования составляла около 15 мм.

Отношение объёмов вещества, изучаемых теплофизическим методом оптического сканирования и методом пиролиза, для каждого стандартного образца составляет, как показано выше, не менее, чем 10:1, в пользу теплофизического метода исследований пород. Это говорит о том, что при проводившихся исследованиях измеряемые на стандартном образце тепловые свойства характеризовали большую часть объема неоднородного образца, в то время как данные об общем содержании органического вещества соответствуют незначительной части объема стандартного образца, что свидетельствует о существенно более высокой представительности результатов теплофизических измерений. Такое существенное расхождение исследуемых объемов в условиях установленной значительной неоднородности образцов снижает тесноту корреляции между теплопроводностью и содержанием органического вещества. Установлено, что при понижении содержания органического вещества повышается коэффициент тепловой неоднородности, причем наиболее существенно при сканировании поперек напластования. Это говорит о том, что распределение органического вещества с понижением его содержания становится в пределах каждого образца менее равномерным, чем при более высоких его значениях, что и должно было сказаться на тесноте изучаемой связи при уменьшении содержания органического вещества [59, 65].

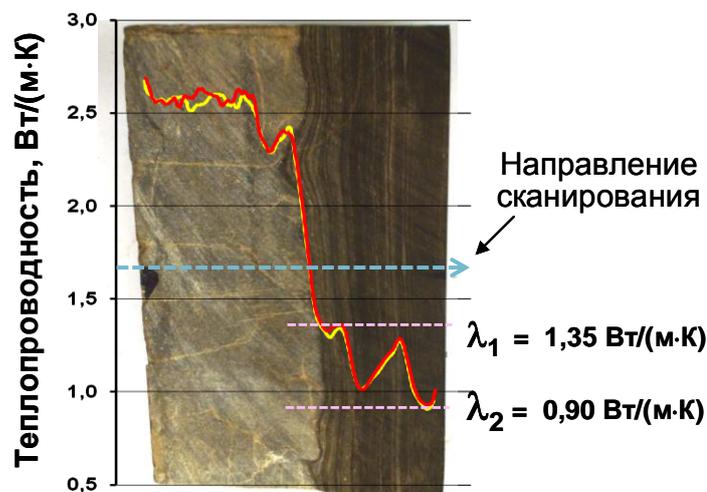


Рисунок 3.13. – Результаты профилирования теплопроводности образца породы доманиковой формации. Голубая пунктирная линия - линия оптического сканирования при измерениях тепловых свойств. Красная и жёлтая линии - профили теплопроводности, зарегистрированные при двух независимых сканированиях образца вдоль одной и той же линии.  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — соответственно максимальное и минимальное значения теплопроводности вдоль напластования в области повышенного содержания органического вещества [59, 65].

Уравнения регрессии, характеризующие связь теплопроводности с  $C_{org}$  и установленные при максимально возможном в настоящее время соответствии коллекций образцов, для которых проводились измерения теплопроводности и  $C_{org}$ , имеют важное значение, так как они позволяют преобразовывать результаты непрерывного профилирования теплопроводности на керне в непрерывные профили вдоль скважины параметра  $C_{org}$  (раздел 4.7). Важным достоинством

такого метода регистрации вариаций параметра  $C_{орг}$  является то, что профили параметра  $C_{орг}$  регистрируются в результате при этом также с высоким пространственным разрешением, близком к разрешению для профилей теплопроводности, получаемых при непрерывном теплофизическом профилировании на керне (раздел 4.7).

### 3.6. Оценка степени тепловой анизотропии пород, обусловленной контрастом теплопроводности органического вещества и минеральной матрицы пород

Сканирования теплопроводности на описанных выше многочисленных коллекциях керна пород баженовской и доманиковой формаций показали, что коэффициент тепловой неоднородности при профилировании теплопроводности образцов керна поперек плоскости напластования (т.е. при сканировании вдоль оси керна), как правило, имеет существенно более высокие значения, чем при профилировании теплопроводности вдоль плоскости напластования (т.е. при сканировании поперек оси керна). Поскольку для пород баженовской свиты и доманиковой формаций коэффициент тепловой неоднородности определяется в основном локальными проявлениями органического вещества, теплопроводность которого в 5-20 раз ниже теплопроводности матрицы пород, это свидетельствует о присутствии слоистой текстуры и тенденции к слоистому залеганию органического вещества.

В условиях упорядоченной неоднородности среды с существенным контрастом теплопроводности компонент это приводит к тепловой анизотропии среды. Для оценки возможных значений коэффициента тепловой анизотропии, обусловленной данной причиной, рассмотрим слоистый образец, в котором параллельные слои органического вещества чередуются со слоями матрицы породы (рисунок 3.14). Такой пример позволит сделать оценку сверху степени тепловой анизотропии для подобной модели слоисто-неоднородной среды.

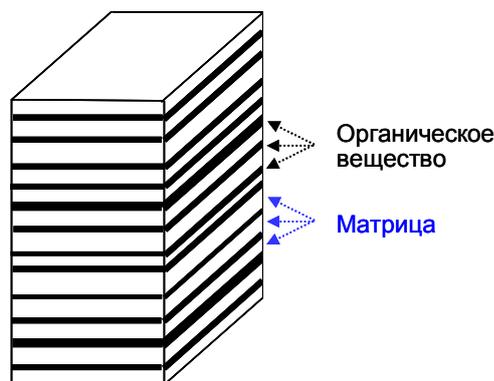


Рисунок 3.14. – Модель слоисто-неоднородного образца с чередованием слоев органического вещества и матрицы.

Нетрудно показать, что для модели среды на рисунке 3.14 эффективная теплопроводность  $\lambda_{эфф//}$  в направлении, параллельном ориентации слоев, определяется соотношением

$$\lambda_{эффII} = \lambda_{орг} \Phi_{орг} + \lambda_{матр} (1 - \Phi_{орг}) \quad , \quad (3.6)$$

а эффективная теплопроводность  $\lambda_{эфф\perp}$  в направлении, перпендикулярном ориентации слоев, определяется соотношением

$$\lambda_{эфф\perp} = \frac{1}{\frac{\Phi_{орг}}{\lambda_{орг}} + \frac{1 - \Phi_{орг}}{\lambda_{матр}}} \quad (3.7)$$

В таком случае коэффициент тепловой анизотропии  $K$  слоисто-неоднородной среды составляет

$$K = \frac{\lambda_{эффII}}{\lambda_{эфф\perp}} = [\lambda_{орг} \Phi_{орг} + \lambda_{матр} (1 - \Phi_{орг})] \cdot \left( \frac{\Phi_{орг}}{\lambda_{орг}} + \frac{1 - \Phi_{орг}}{\lambda_{матр}} \right) \quad (3.8)$$

На рисунке 3.15 приведены результаты расчета коэффициента тепловой анизотропии согласно формуле (3.8). Значения теплопроводности органического вещества выбирались в диапазоне 0,15-0,5 Вт/(м·К) согласно результатам оценок  $\lambda_{орг}$ , приведенным в таблице 5.7. Плотность матрицы выбрана равной 2,5 г/см<sup>3</sup>, а плотность органического вещества (керогена) - 1,14 г/см<sup>3</sup> (согласно оценкам Г.А. Калмыкова и А.Г.Калмыкова). Теплопроводность матрицы принимали равной 2,5 и 3 Вт/(м·К) согласно результатам теплофизического профилирования керн. Приведенные по оси абсцисс значения  $C_{орг}$  связаны со значениями  $\Phi_{орг}$ , входящими в формулы 3.6-3.8, соотношением (5.6), выведенным автором и приведенным ниже в главе 5.

Приведенные на рисунке 3.15 данные о возможных значениях коэффициента тепловой анизотропии, обусловленной слоистой текстурой пород, содержащих твердое органическое вещество - кероген, хотя и являются оценками сверху, но тем не менее показывают значительную роль ориентированного залегания слоев керогена в выявленной высокой анизотропии пород баженовской и доманиковой формаций (разделы 5.1-5.4). Так, даже при наименьшем контрасте теплопроводности матрицы и органического вещества из рассмотренных нами (соответственно 2,5 и 0,5 Вт/(м·К)) при значениях  $C_{орг}$  в диапазоне 0,1 - 0,3 коэффициент тепловой анизотропии достаточно значителен и составляет 1,5-1,8.

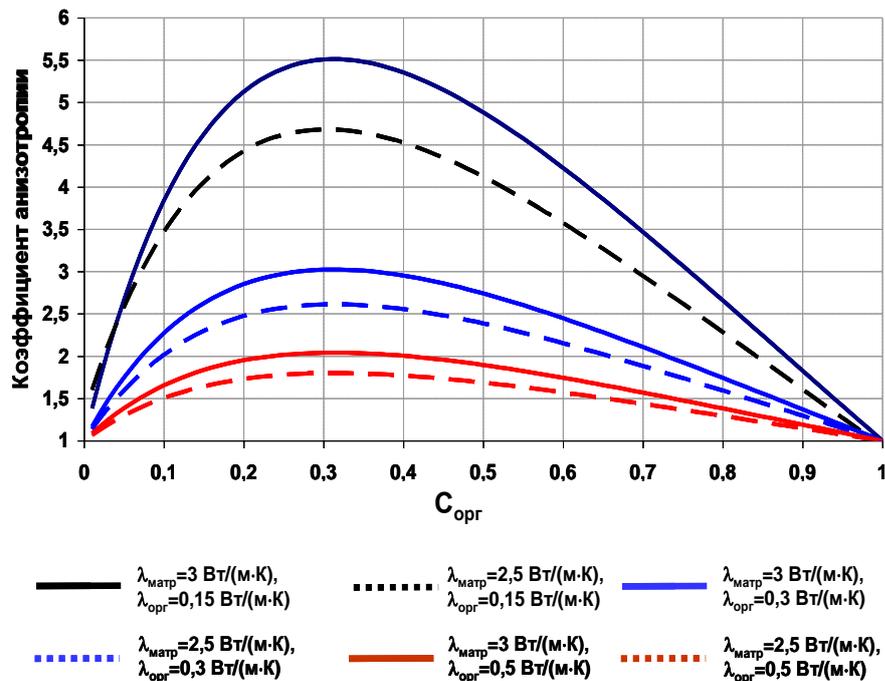


Рисунок 3.15. – Результаты расчета коэффициента тепловой анизотропии согласно формуле (5.13). На рисунке указаны принимавшиеся при расчетах значения теплопроводности матрицы и органического вещества.

Вместе с тем, при анализе причин экспериментально установленной значительной тепловой анизотропии для пород баженовской и доманиковой формаций (разделы 3.5, 5.2-5.4, таблицы 5.1-5.5) следует учитывать и возможный существенный вклад наложенной анизотропии, которая возникает при развитии ориентированной трещиноватости в данных породах при техногенных воздействиях на них при подъеме керна, экстрагировании, высушивании, водонасыщении образцов пород при лабораторных петрофизических исследованиях, как это показано в разделе 3.10 и таблице 3.7 [59]. Определить основную причину тепловой анизотропии помогает разработанная нами методика анализа неизометричного пустотного пространства пород, основанная на измерениях главных компонент теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии при различных свойствах порового вещества с дополнительным водонасыщением образцов, описанная в разделе 3.8.

### 3.7. Результаты исследований вариаций свойств пород в пределах образца на основе регистрации 2D распределения теплопроводности

Исследования неоднородности и анизотропии пород месторождений углеводородов занимают важное место в геологоразведочных работах. Неоднородность пород изучается в различном ее масштабе: в достаточно крупном масштабе (от десятков сантиметров и более) при геофизических исследованиях скважин с применением разных видов каротажа, на уровне образцов полноразмерного керна и стандартных образцов пород в лабораторных условиях, в

масштабе первых микрон на малых пробах пород с применением рентгеновской томографии. Все большее место в таких исследованиях занимают методы, позволяющие обеспечить непрерывную регистрацию пространственных вариаций свойств пород. К таким методам можно отнести скретч-тестирование [174], гамма-спектрометрический метод исследований полноразмерного керна, непрерывное профилирование электрического сопротивления и упругих свойств и др. Изучение степени анизотропии пород и ее пространственных вариаций до настоящего времени не было обеспечено в необходимой мере аппаратурно-методической базой. Вместе с тем, предприняты первые попытки использовать возможности метода оптического сканирования для регистрации 2D вариаций пористости [13] и степени тепловой анизотропии пород [166].

Перейти к регистрации 2D распределений тепловых свойств, включая коэффициент тепловой анизотропии, позволяет достаточно высокое быстродействие метода оптического сканирования и его достаточно высокая пространственная разрешающая способность, которая для разработанных новых лазерных установок (раздел 3.2) может достигать 0,2 мм. При наличии установленных связей тепловых свойств с другими физическими свойствами (главы 4 и 5) такая регистрация пространственных распределений тепловых свойств в пределах образца может быть использована для прогноза 2D вариаций других физических свойств.

В связи с этим представляет интерес развитие и совершенствование методики комплексного анализа вариаций пористости и коэффициента тепловой анизотропии осадочных пород в пределах изучаемых образцов.

Для экспериментальных исследований пространственных вариаций теплопроводности с целью прогноза 2D вариаций пористости и коэффициента тепловой анизотропии были отобраны три полноразмерных образца керна после отделения от них малогабаритных дубликатов (так называемых «горбушек»). Ниже приводится описание изучавшихся образцов пород [60].

Образец 1 (фото на рисунке 3.16 *a*) представлял собой известняк органогенно-детритовый светло-серого цвета. Текстура образца - пятнистая, пористо-кавернозная, трещиноватая. Видимый органический детрит представлен обломками раковин (до 60 мм) и члениками криноидей (до 12 мм), редко обломками мшанок размером до 10 мм. Пористо-кавернозные участки немногочисленны, располагаются хаотично. Часть каверн залечена вторичным кальцитом [60].

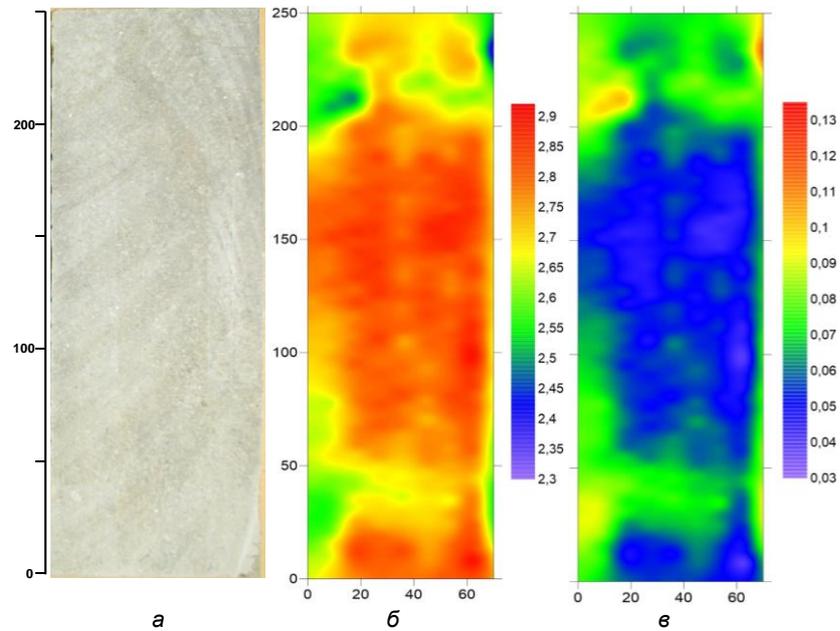


Рисунок 3.16. – Образец 1, известняк органогенно-детритовый. *а* – Фотография образца; *б* – распределение теплопроводности по образцу в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; *в* – распределение по образцу коэффициента пористости [60].

Образец 2 (фото на рисунке 3.17 *а*) представлял собой известняк органогенно-детритовый окремненный серо-коричневого цвета, трещиноватый, слабо кавернозно-пористый, слабо неравномерно нефтенасыщенный. Текстура образца - пятнистая, неясно слоистая, слабо пористая, трещиноватая. Видимый органический детрит представлен члениками криноидей диаметром до 11 мм, цепочками мшанок, раковинами брахиопод (до 0,35 мм), гастропод и фораминифер (локально), кораллами. Немногочисленные поры и каверны изометричной и удлиненной формы диаметром до 14 мм расположены неравномерно, развиваются вдоль трещин, а также связаны с органическим детритом. Часть пустот инкрустирована кристаллами кальцита. Нефтенасыщение слабое, неравномерное, по трещинам и порам [60].

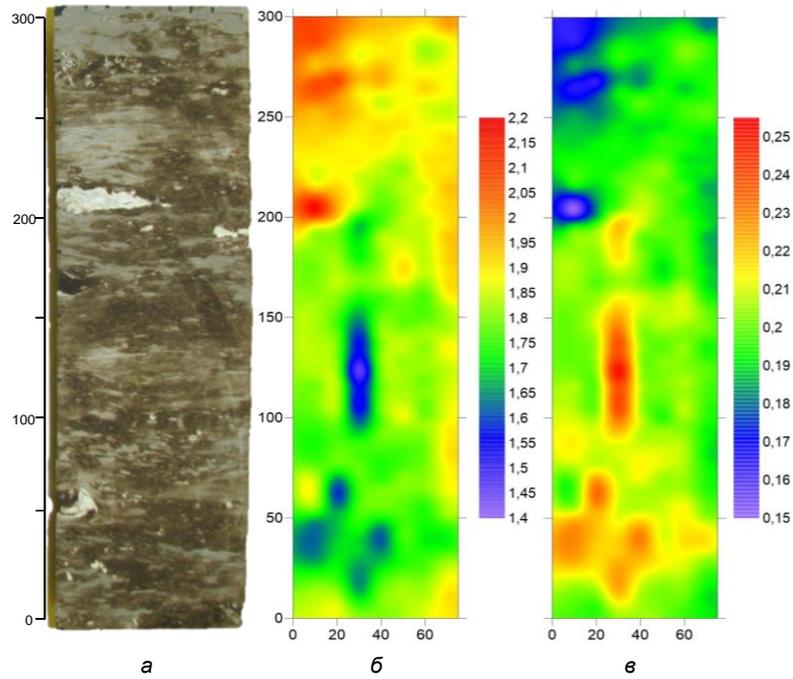


Рисунок 3.17. – Образец 2, известняк органогенно-детритовый окремненный серо-коричневого цвета. *a* – Фотография образца; *б* – распределение теплопроводности по образцу в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; *в* - распределение по образцу коэффициента пористости [60].

Образец 3 (фото на рисунке 3.18*a*) представлял собой песчаник тонкозернистый, слоистый. Слоистость обусловлена ориентированным расположением растительного детрита. Пористость по образцу распределена неравномерно. В наиболее пористых участках порода пропитана нефтью [60].

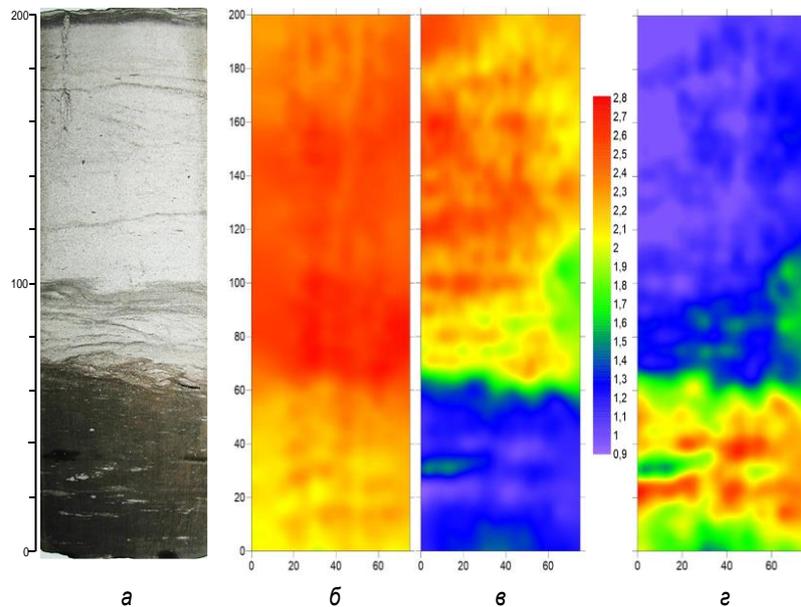


Рисунок 3.18. – Образец 3, песчаник тонкозернистый, слоистый. *a* – Фотография образца; *б* – распределение параллельной компоненты тензора теплопроводности по образцу в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; *в* - распределение перпендикулярной компоненты тензора теплопроводности по образцу в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; *г* -распределение по образцу коэффициента анизотропии [60].

Образцы керн 1 и 2 были отобраны из коллекции полноразмерного керн, полученного при бурении одной скважины. Образец 3 отобран из коллекции полноразмерного керн скважины, пробуренной на другой территории.

В процессе регистрации пространственных вариаций теплопроводности образцов 1-3 плоскую поверхность каждого из образцов сканировали вдоль параллельных линий, отстоящих одна от другой на расстояние 5 мм. После завершения сканирования в одном направлении повторяли сканирование той же плоской поверхности образца в перпендикулярном направлении вдоль линий, также отстоящих одна от другой на 5 мм. Каждое сканирование обеспечивало регистрацию профиля теплопроводности и температуропроводности. Между сканированиями выдерживали паузу для выравнивания температуры образца после предыдущего измерения. Глубина слоя, характеризующего результаты измерений теплопроводности, составляла около 12 мм [60].

Образцы керн 1 и 2 отбирались из коллекции полноразмерного керн скважины, на которой проводилось непрерывное профилирование теплопроводности вдоль скважины для всех образцов полноразмерного керн методом оптического сканирования (раздел 4.1). Для каждого образца керн по регистрируемому при оптическом сканировании профилю теплопроводности определяли среднюю теплопроводность. Для этой же скважины по результатам стандартного каротажа было получено распределение пористости вдоль скважины. Для каждой из двух групп пород, которые представлены образцами 1 и 2, проводили анализ корреляционной связи между теплопроводностью образцов, усредненной вдоль регистрировавшегося при тепловом каротаже профиля теплопроводности для каждого образца керн, и пористостью. Данные профилирования теплопроводности усредняли в окне, равном интервалу глубин, соответствующему разрешающей способности метода определения коэффициента пористости (0,5 м). Результаты анализа корреляционной связи между теплопроводностью и пористостью использовали для интерпретации результатов регистрации вариаций теплопроводности для образцов 1 и 2 [60].

На рисунке 3.16б приведены результаты регистрации распределения теплопроводности для образца 1. Хотя внешне образец представляется достаточно однородным (фото на рисунке 3.16 а), его теплопроводность варьирует в достаточно широком диапазоне – от 2,3 Вт/(м·К) до 2,9 Вт/(м·К) [60].

Измерения, проводившиеся при непрерывном теплофизическом профилировании керн данной скважины, показали, что образцы групп пород, представленных образцами 1 и 2, характеризуются отсутствием тепловой анизотропии.

На рисунке 3.19 приведено поле корреляции между теплопроводностью и пористостью  $K_p$  для совокупности образцов данного типа пород. Высокий для данного объема выборки коэффициент корреляции (0,83) свидетельствует, что вариации теплопроводности для данной

группы пород обусловлены, главным образом, изменениями пористости. Установленная тесная связь между теплопроводностью и пористостью характеризуется уравнением регрессии [60]

$$\lambda = -4,43K_n + 2,97 \text{ (Вт/(м·К))}, \quad (3.9)$$

где  $\lambda$  - теплопроводность, Вт/(м·К),  $K_n$  – пористость (коэффициент открытой пористости). Уравнение (3.9) использовали для преобразования результатов определения теплопроводности, представленных на рисунке 3.16 б, в данные о пористости образца (рисунок 3.16 в) [60]. Полученные в результате такого преобразования данные о пространственных вариациях пористости, приведенные на рисунке 3.16 в, показывают, что пористость в пределах внешне однородного образца 1 изменяется в пределах от 0,03 до 0,13 [60].

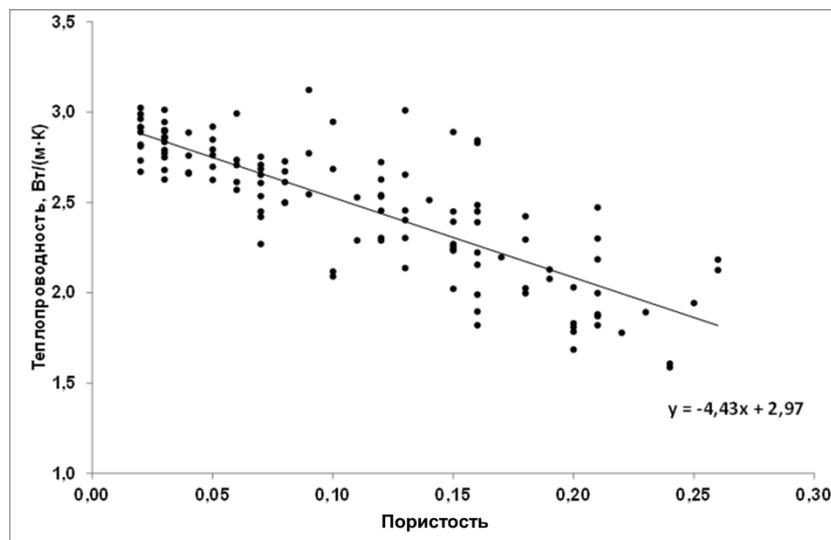


Рисунок 3.19. – Поле корреляции теплопроводности и пористости для органогенно-детритовых известняков, к которым принадлежит изучавшийся образец 1 [60].

На рисунке 3.17 б приведены результаты регистрации пространственных вариаций теплопроводности для образца 2. Как следует из рисунка 3.17 б, теплопроводность образца изменяется от 1,4 Вт/(м·К) до 2,2 Вт/(м·К). Результаты корреляционного анализа для пород, представленных образцом 2, показали (рисунок 3.20), что коэффициент корреляции между теплопроводностью и пористостью составил 0,81. Это свидетельствует о том, что и для этой группы пород вариации теплопроводности обусловлены, главным образом, вариациями пористости. С использованием уравнения регрессии [60]

$$\lambda = -5,35 K_n + 3,05 \text{ (Вт/(м·К))}, \quad (3.10)$$

связывающего изменения теплопроводности с пористостью для пород, представленных образцом 2, получены данные о пространственных вариациях пористости для образца 2 (рисунок 3.17 в). В результате установлено, что пористость изменяется в пределах образца от 0,15 до 0,25 [60].

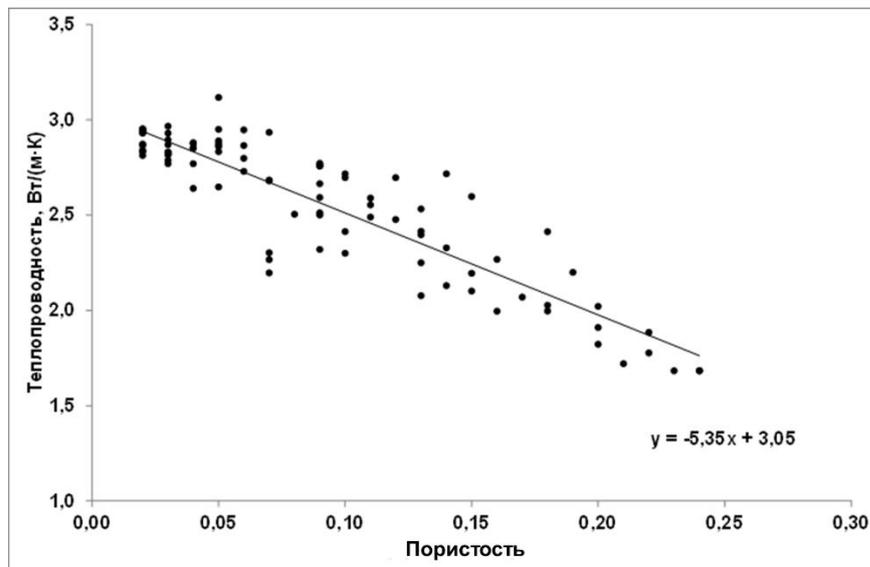


Рисунок 3.20. – Поле корреляции теплопроводности и пористости для органогенно-детритовых окремненных известняков, к которым принадлежит образец 2 [60].

Данные о неоднородности и распределении пористости в пределах образца полноразмерного керна могут представлять существенную значимость при выборе области образца полноразмерного керна для последующего изготовления малых образцов для специальных исследований (стандартные петрофизические исследования, томография, измерения при пластовых термобарических условиях, пиролиз и др.).

Результаты регистрации пространственных вариаций главных значений тензора теплопроводности вдоль и поперек напластования для образца 3, представленные на рисунке 3.18, позволили охарактеризовать пространственные 2D вариации коэффициента тепловой анизотропии. На рисунке 3.18б показаны данные, характеризующие теплопроводность вдоль напластования, которая варьирует от 2,0 Вт/(м·К) до 2,8 Вт/(м·К). Результаты регистрации теплопроводности в направлении поперек напластования, представленные на рисунке 3.16в, показывают, что для нижней части образца 3 отмечаются значения теплопроводности поперек напластования в диапазоне от 0,9 Вт/(м·К) до 1,9 Вт/(м·К), что значительно меньше теплопроводности вдоль напластования. На рисунке 3.18г показано пространственное распределение коэффициента тепловой анизотропии, определявшегося как отношение теплопроводности вдоль напластования к теплопроводности поперек напластования. Как следует из рисунка 3.18г, для нижней части образца 3 характерна высокая анизотропия с коэффициентом анизотропии от 1,5 до 2,3. Средняя часть образца характеризуется коэффициентом анизотропии в диапазоне 1,3-1,5. Верхняя часть образца является практически изотропной [60].

Проблема исследования анизотропии физических свойств пород остается актуальной в современной петрофизике. В практике петрофизических исследований обычно разделяют образцы пород на изотропные и анизотропные. Вместе с тем, полученные и приведенные на

рисунке 3.18г данные демонстрируют, что даже в масштабе нескольких сантиметров степень анизотропии может существенно изменяться.

Как и в случае с регистрацией распределения коэффициента пористости, информация о пространственных вариациях коэффициента анизотропии обеспечивает более обоснованный выбор области образцов полноразмерного керна для отбора малых образцов для последующих различных специальных петрофизических исследований.

Приведенные результаты показывают, что при наличии установленных связей между теплопроводностью и коэффициентом пористостью данные о пространственных 2D вариациях теплопроводности обеспечивают регистрацию 2D распределения пористости и степени тепловой анизотропии для изучаемых образцов. В разделе 5.4 показано, что данные о вариациях коэффициента тепловой анизотропии могут успешно использоваться для прогноза вариаций акустической анизотропии [80].

Как показали результаты наших исследований и практика работ, комплекс данных о вариациях степени неоднородности, коэффициента пористости и коэффициента анизотропии в пределах образца полноразмерного керна, получаемых в результате теплофизических исследований полноразмерного керна, может быть использован для обоснованного выбора областей образца полноразмерного керна для последующего изготовления малых образцов для специальных исследований (стандартные петрофизические исследования, томография, измерения при пластовых термобарических условиях, пиролиз и др.) [152].

### **3.8. Методика исследований ориентации неизометричного пустотного пространства пород на примере изучения керна Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6**

В основу теплофизических исследований пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины (СГ-6) нами были положены массовые измерения теплопроводности пород, вскрытых при бурении [78]. Измерения проведены на 1219 образцах керна при атмосферных условиях для интервала глубин 3698 - 7501 м по разрезу скважины и 24 образцах керна соседних скважин в интервале глубин 1650 - 3010 м. При массовых измерениях определяли главное значение тензора  $\lambda_{//}$  теплопроводности в направлении, перпендикулярном к оси керна, т.е. параллельно напластованию пород. Этот параметр связан, в основном, с минеральным составом, структурными особенностями, пористостью, субвертикальной и наклонной трещиноватостью пород. Помимо этого, для каждого образца определяли коэффициент тепловой неоднородности  $\beta$  (раздел 1.4), который рассчитывали как разность максимального и минимального значений теплопроводности в пределах образца, деленную на эквивалентную теплопроводность того же образца [74].

Изучение анизотропии и определение главных значений тензора теплопроводности пород  $\lambda_{//}$  и  $\lambda_{\perp}$  (соответственно в направлении параллельно и перпендикулярно плоскости напластования) для воздушно-сухого и водонасыщенного состояния образцов проводили на дополнительной коллекции из 171 образца керна. Таким образом, средний шаг измерений параметра  $\lambda_{//}$  по разрезу в интервале 3698—7051 м составил 2,7 м.

Согласно заключению А. Д. Дучкова и др. [20], до наших исследований керна скважины СГ-6 для пород Западно-Сибирской плиты в целом было выполнено не более 1000 измерений теплопроводности. Подавляющее большинство изучавшихся образцов керна было отобрано из интервалов глубин 0—100 и 1000—3000 м. Основная часть данных относится к южной части Западно-Сибирской плиты. Незначительный объем измерений (не более 300) выполнен для центральной и западной частей Западно-Сибирской плиты (Широтное Приобье, Среднее Приобье, зона Березовских дислокаций) [40]. Представительные данные о теплопроводности северной части плиты ранее отсутствовали, кроме того, имевшиеся данные были получены в основном на воздушно-сухих образцах, в результате чего теплопроводность могла быть существенно занижена [21]. Таким образом, объем измерений, выполненных нами по разрезу скважины СГ-6 в 1992-1993 гг., почти в 1,5 раза превышал объем измерений, проведенных по всей Западно-Сибирской плите за все предыдущие годы, при этом впервые были получены представительные данные об анизотропии и тепловой микро- и макронеоднородности пород различных литотипов [74].

Первичные результаты измерений  $\lambda_{//}$  для 1414 воздушно-сухих образцов керна, включая 171 образец, отобранный для специальных исследований, показали, что диапазон изменения теплопроводности  $\lambda_{//}$  по разрезу скважины СГ-6 довольно широк и составляет 0,90-4,5 Вт/(м. К). Обращает на себя внимание высокая изменчивость теплопроводности даже в малых интервалах глубин, что указывает на необходимость массовых измерений для получения надежных данных [74].

В таблице 3.5 приведены теплофизические характеристики различных типов пород. Диапазон средних значений  $\lambda_{//}$  для различных литотипов, вскрытых СГ-6, составляет 1,35-3,52 Вт/(м. К). Анализ данных таблицы 3.5 подтверждает ранее сделанные выводы о том, что битуминозность, углистость, повышенное содержание органического вещества и цеолитизация приводят к понижению  $\lambda_{//}$ , а карбонатизация, пиритизация и окварцевание повышают теплопроводность пород [79]. Следует отметить незначительную тепловую неоднородность пород на уровне образца ( $\beta=0,05—0,10$ ); исключение составляют породы с повышенным содержанием органического вещества, для которых  $\beta = 0,16—0,27$  [74].

Таблица 3.5. Теплопроводность пород разреза скважины СГ-6 [74].

№ п/п	Характеристика пород	$\lambda_{//\text{среднее}}$	$S_{\lambda//}$	$\beta_{\text{среднее}}$	$S_{\beta}$	$N$
		Вт/(м·К)				
1	Песчаники	2,77	0,47	0,06	0,03	289
2	Песчаники известковистые	2,88	0,36	0,07	0,04	70
3	Аргиллиты	2,52	0,28	0,06	0,03	192
4	Аргиллиты известковистые	2,70	0,34	0,08	0,05	20
5	Аргиллиты с органикой	2,35	0,30	0,27	0,09	29
6	Аргиллиты с органикой пиритизированные	2,56	0,73	0,09	0,03	26
7	Аргиллиты углистые	2,19	0,39	0,10	0,08	14
8	Тонкое переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов	2,61	0,33	0,08	0,05	130
9	То же (известковистые)	2,42	0,22	0,09	0,04	12
10	То же (с органикой)	2,30	0,20	0,19	0,05	10
11	Конгломераты	3,52	0,38	0,10	0,08	23
12	Конгломераты известковистые	3,44	-	0,21	-	5
13	Базальты	2,62	0,53	0,10	0,13	125
14	Базальты известковистые	2,74	0,40	0,06	0,04	46
15	Базальты окварцованные	3,28	0,63	0,06	0,05	11
16	Базальты цеолитизированные	1,35	-	0,07	0	5
17	Базальты миндалекаменные	2,42	0,34	0,07	0,06	104
18	Туфы базальтов	2,49	0,43	0,05	0,05	8

Примечание:  $\lambda_{//\text{среднее}}$  – среднее значение теплопроводности  $\lambda_{//}$ ;  $S_{\lambda//}$  – среднеквадратичное отклонение теплопроводности;  $\beta_{\text{среднее}}$  – среднее значение коэффициента тепловой неоднородности;  $S_{\beta}$  – среднеквадратичное отклонение коэффициента тепловой неоднородности;  $N$  – объем выборки.

В таблице 3.6 приведено сопоставление наших данных с результатами прежних измерений теплопроводности по южной части Западно-Сибирской плиты [20]. Можно отметить значительные среднеквадратичные значения  $S_{\lambda//}$  вариаций теплопроводности разреза СГ-6 по сравнению с южной частью Западно-Сибирской плиты (баженовская — тюменская свиты). По разрезу Тюменской скважины довольно высокие значения  $S_{\lambda//}$  (0,32—0,49 Вт/(м·К) отмечены у осадочно-вулканогенной толщи и у субконтинентальных терригенных отложений, что

свидетельствует о тепловой макронеоднородности в пределах толщ. Пониженные значения  $\lambda_{//}$  и невысокая тепловая макронеоднородность отмечаются у пород васюганской, георгиевской и баженовской свит, представленных морскими терригенными отложениями. Низкие значения  $\lambda_{//}$  баженовской свиты обусловлены высокой битуминозностью и повышенным содержанием органического вещества ( $C_{орг}$ ) в породах. Повышенные значения теплопроводности варенгаяхинской, витютинской и береговой свит связаны, очевидно, с увеличением зернистости пород (средне-крупнозернистые песчаники) и наличием прослоев конгломератов, характеризующихся довольно высокой теплопроводностью (таблица 3.5) [74].

Таблица 3.6. Сопоставление результатов измерений теплопроводности пород, вскрытых скважиной Тюменской сверхглубокой скважиной СГ-6, с результатами прежних измерений теплопроводности для южной части Западно-Сибирской плиты, описанных в работе [20] [74].

Разрез скважины		СГ-6					Юг Западно-Сибирской плиты			
№ п/п	Свита	Возраст	Глубина, м	$\lambda_{//}$	$S_{\lambda}$	N	Глубина, м	$\lambda_{//}$	$S_{\lambda}$	N
				Вт/(м·К)				Вт/(м·К)		
1	Мегионская	K <sub>1</sub>	3698-3783	2,19	0,18	103	-	-	0,05	-
2	Баженовская	I <sub>3</sub>	3783-3844	2,07	0,15	50	2100-2900	1,30	0,10	70
3	Георгиевская	I <sub>3</sub>	3844-3854	2,27	0,20	14	2300-2700	1,60	0,10	11
4	Васюганская	I <sub>3-2</sub>	3854-3981	2,38	0,37	100	2200-2800	1,80	0,10	26
5	Тюменская	I <sub>2</sub>	3981-4610	2,39	0,21	141	2400-3000	2,10	-	55
6	Котухтинская	I <sub>2-1</sub>	4610-5214	2,60	0,29	91	-	-	-	-
7	Ягельная	I <sub>1</sub>	5214-5364	2,87	0,33	10	-	-	-	-
8	Береговая	I <sub>1</sub>	5364-5588	2,97	0,42	41	-	-	-	-
9	Витютинская	T <sub>3</sub>	5588-5765	3,13	0,40	100	-	-	-	-
10	Варенгаяхинская	T <sub>3-2</sub>	5765-6011	3,02	0,26	26	-	-	-	-
11	Пурская	T <sub>2-1</sub>	6011-6424	2,87	0,32	149	-	-	-	-
12	Коротчаевская	T <sub>1</sub>	6424-7502	2,63	0,49	387	-	-	-	-

Распределение  $\lambda_{//}$  по разрезу скважины СГ-6, полученное при обработке данных при помощи треугольного нерекурсивного фильтра со скользящим окном в 101 элемент, характеризуется ее ростом с глубиной от 2,20 до 2,80 Вт/(м·К). На фоне общего повышения теплопроводности с глубиной по разрезу выделяются отрицательные (3760-3860 м, 6580-6800 м)

и положительные (5580-5800 м) аномалии. Отрицательные аномалии теплопроводности обусловлены разными факторами: в первом интервале понижение  $\lambda_{//}$  связано с высоким содержанием  $S_{орг}$  и битуминозностью пород баженовской свиты, во втором — с интенсивным разуплотнением пород. Повышенные значения  $\lambda_{//}$  в интервале 5580-5800 м можно объяснить структурными изменениями пород, наличием прослоев гравелитов и конгломератов и увеличением степени стадияльной преобразованности пород [74].

Особенность методики специальных исследований отдельной коллекции, включавшей 171 образец керна, отобранной по результатам массовых измерений теплопроводности по глубине скважины СГ-6, заключалась в том, что при исследованиях анизотропии для повышения качества измерений и снижения влияния неоднородности пород на оценку степени анизотропии для каждого воздушно-сухого образца из коллекции в 171 образец на плоской поверхности выполняли 6 измерений теплопроводности: 3 измерения со сканированием вдоль оси керна и 3 измерения при сканировании перпендикулярно оси керна, при этом для учета неоднородности образцов и неравномерно распределенной субгоризонтальной трещиноватости параллельные линии сканирования смещали одна от другой. Таким путем по результатам 6 сканирований для каждого воздушно-сухого образца керна, поднятого при бурении вертикальной (или субвертикальной) скважины, определяли компоненту теплопроводности вдоль оси скважины  $\lambda_{//c}$  и компоненту теплопроводности поперек оси скважины  $\lambda_{\perp c}$ , а также коэффициент анизотропии  $K_c$ . Таким же образом по результатам 6 сканирований для каждого образца после его водонасыщения определяли  $\lambda_{//s}$ ,  $\lambda_{\perp s}$ ,  $K_s$ . Коэффициент тепловой анизотропии  $K$  во всех случаях рассчитывали как  $K = \lambda_{//} / \lambda_{\perp}$ .

По этим данным для каждого образца рассчитывали относительные изменения этих параметров при переходе от воздушно-сухого состояния образцов к водонасыщенному [74]:

$$\delta\lambda_{//} = \frac{\lambda_{//s} - \lambda_{//c}}{\lambda_{//c}}; \quad \delta\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_{\perp s} - \lambda_{\perp c}}{\lambda_{\perp c}}; \quad \delta K = \frac{K_s - K_c}{K_c}. \quad (3.11)$$

Коэффициенты анизотропии  $K_c$  и  $K_s$  и параметр  $\delta K$  характеризуют, в основном, степень и соотношение субгоризонтальной и субвертикальной трещиноватости, так как анизотропия в связи с текстурными и структурными особенностями пород, как установлено, для пород разреза СГ-6 невелика [74].

С учетом значительно более высокой теплопроводности воды по отношению к теплопроводности воздуха (соответственно 0,60 и 0,025 Вт/(м·К)) случаи с  $\delta\lambda_{//} > 0$  при малой открытой пористости образцов пород следует интерпретировать как возрастание  $\lambda_{//}$  в связи с заполнением субвертикальных трещин водой, при этом компонента теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  изменяется незначительно, что соответствует соотношению  $\delta K < 0$  (рисунок 3.21, случай 3).

Случай с  $\delta\lambda_{\perp} > 0$  при малой открытой пористости образцов пород соответствует заполнению водой открытых пор и субгоризонтальных трещин, при этом мало изменяется компонента  $\lambda_{\parallel}$ , что дополнительно приводит к регистрации соотношения  $\delta K < 0$  (рисунок 3.21, случай 1). Одновременное выполнение соотношений  $\delta\lambda_{\parallel} < 0$  и  $\delta\lambda_{\perp} < 0$  с незначительными изменениями коэффициента анизотропии должно соответствовать присутствию соответственно субвертикальной и субгоризонтальной трещиноватости (рисунок 3.21, случай 2).

В случаях существенной пористости образцов пород для всех рассмотренных случаев ориентации неизометричного пустотного пространства имеет место более значительное возрастание обеих компонент теплопроводности, но соответствие степеней их увеличения  $\delta\lambda_{\parallel}$  и  $\delta\lambda_{\perp}$  при водонасыщении образцов для рассмотренных разных случаев ориентации неизометричного пустотного пространства остается прежним.

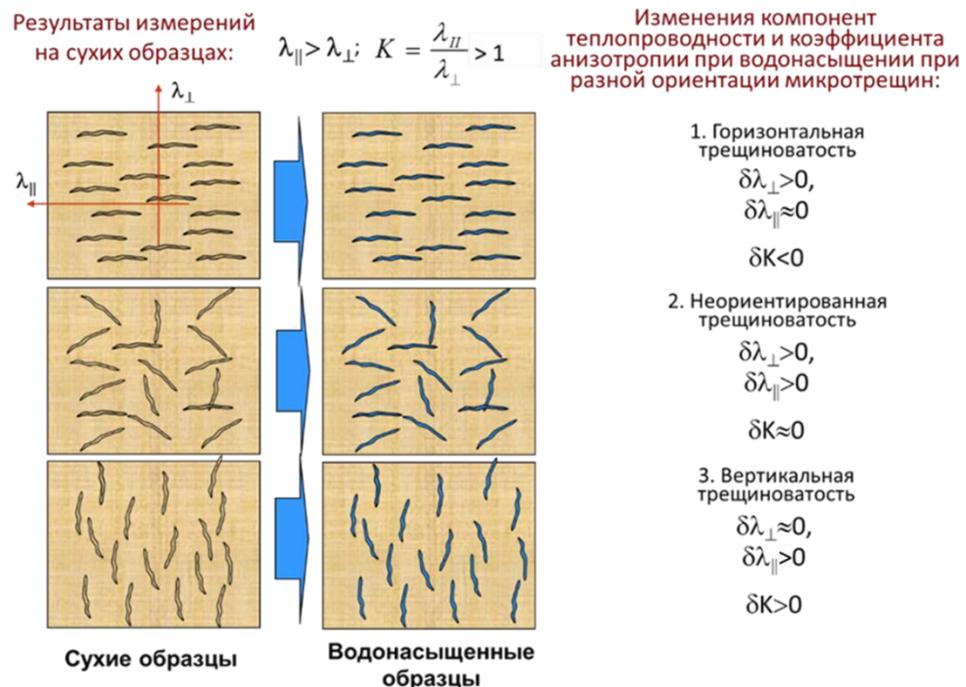


Рисунок 3.21. – Закономерности изменения компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования и коэффициента тепловой анизотропии при переходе образцов пород от сухого состояния к водонасыщенному в разных случаях ориентации неизометричного пустотного пространства.

В случаях наклонной ориентации неизометричного пустотного пространства по отношению к оси керна предварительно проводят определение направлений главных осей теплопроводности так, как это описано в разделе 3.3 (рисунок 3.6).

Статистическую обработку данных по разрезу осуществляли путем перехода от неравномерного шага данных к равномерному, используя треугольный фильтр в окне 100 м с шагом скольжения 50 м с последующей обработкой этих данных треугольным нерекурсивным фильтром с пятью элементами в скользящем окне. На рисунке 3.22 представлены результаты

подобной статистической обработки по разрезу параметров  $\delta\lambda_{//}$ ,  $\delta\lambda_{\perp}$ ,  $K_c$ ,  $K_e$ ,  $\delta K$ , а также данные КамНИИКИГС и Экспедиции СГБ о пористости пород. При обработке результатов измерений пористости использовали среднее арифметическое значение открытой пористости, определенных в КамНИИКИГС при насыщении образцов водой и керосином, и значения общей пористости, определенного в Экспедиции СГБ В.Е. Фонькиным по корреляционной связи пористости с магнитной восприимчивостью [74].

По данным на рисунке 3.22 в целом наблюдается соответствие между вариациями пористости и параметра  $\delta\lambda_{//}$ . Лишь в интервале 3950-4100 м и в какой-то степени в интервале 6870-6950 м изменение пористости не соответствует изменению параметра  $\delta\lambda_{//}$ . В интервалах 4450-4700, 5500-6500 и 6800-7250 м к степени и характеру изменений пористости ближе изменения параметра  $\delta\lambda_{\perp}$  [74].

При интерпретации комплекса данных, приведенных на рисунке 3.22, необходимо учитывать, что, например, случай с  $\delta\lambda_{\perp} > 0$  и  $\delta K < 0$  должен соответствовать наличию субгоризонтальной трещиноватости пород, так как в этом случае возрастание  $\lambda_{\perp}$  при водонасыщении объясняется не только объемной пористостью, но и наличием субгоризонтальной трещиноватости (термин «объемная пористость» заимствован у М. П. Воларовича [10], который при этом подразумевал поры с близкими размерами в трех взаимно перпендикулярных направлениях). Однако соотношение  $\delta\lambda_{\perp} > 0$  может соответствовать и развитию субвертикальных трещин при водонасыщении керна, но в этом случае должны наблюдаться отрицательные или близкие к нулю значения  $\delta K$ . Напротив, случаи с  $\delta\lambda_{\perp} < 0$  и  $\delta K > 0$  должны соответствовать преобладанию субвертикальной трещиноватости или развитию субгоризонтальных трещин при водонасыщении; в последнем случае должны наблюдаться крайне малые или отрицательные значения  $\delta\lambda_{\perp}$ . Расшифровке и интерпретации данных помогает анализ коэффициентов анизотропии  $K_c$  и  $K_e$  для воздушно - сухого и водонасыщенного состояний образцов [74].

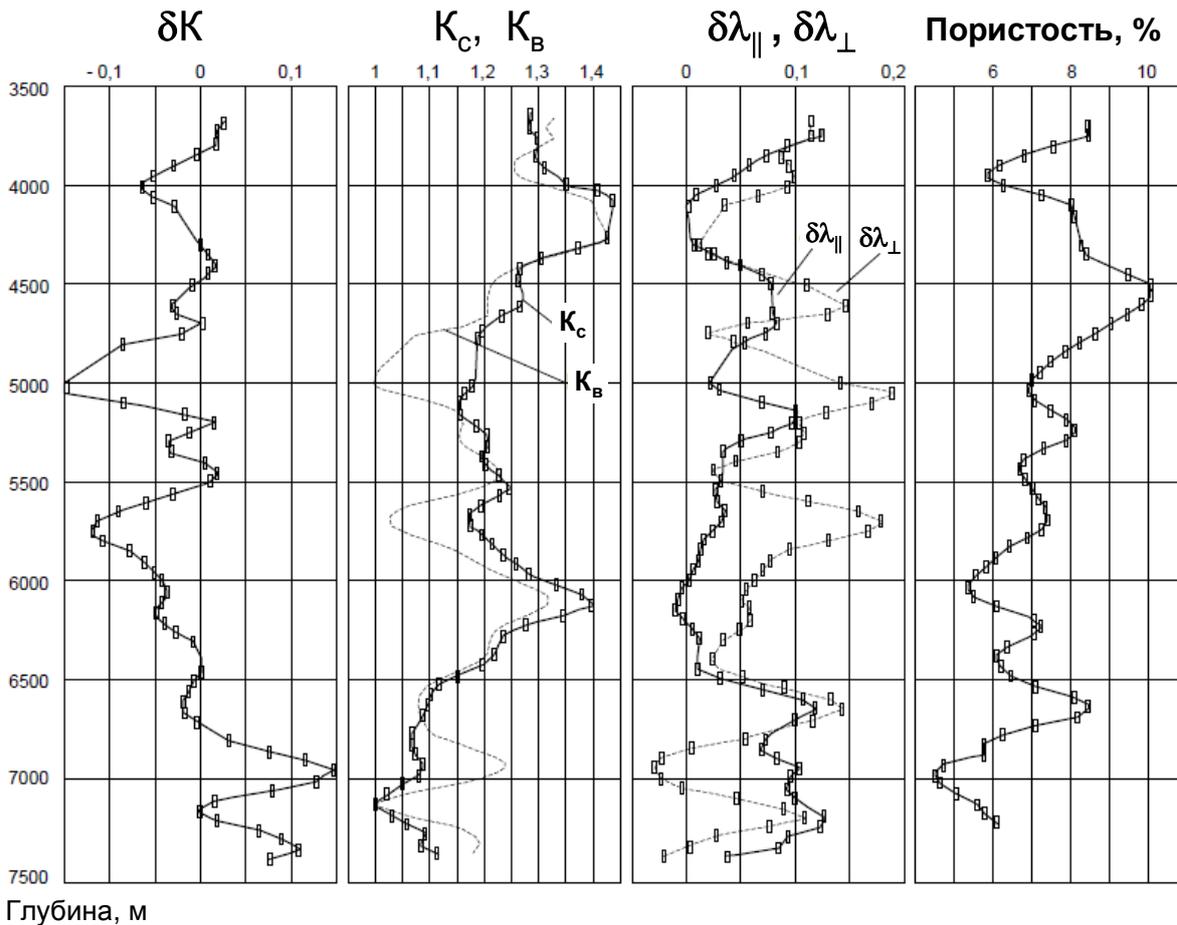


Рисунок 3.22. - Вертикальные вариации вдоль скважины коэффициента тепловой анизотропии для воздушно-сухих ( $K_c$ ) и водонасыщенных образцов пород ( $K_b$ ), относительного изменения  $\Delta K$  коэффициента тепловой анизотропии  $K$ , относительного изменения  $\Delta\lambda_{\parallel}$  теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$ , относительного изменения  $\Delta\lambda_{\perp}$  теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  при водонасыщении образцов и пористости образцов пород [74].

По совместному анализу вариаций параметров  $\Delta\lambda_{\parallel}$ ,  $\Delta\lambda_{\perp}$ ,  $K_c$ ,  $K_b$ ,  $\Delta K$  по разрезу, отраженных на рисунке 3.22, можно охарактеризовать отдельные интервалы глубин следующим образом.

1. В интервалах 3680-3800, 4300-4500, 4700-4800, 5150-5500, 6500-6700, 7100-7200 м можно предположить отсутствие трещиноватости или наличие хаотической трещиноватости, так как  $\Delta\lambda_{\parallel}$  и  $\Delta\lambda_{\perp}$  близки между собой, их изменение достаточно хорошо соответствует изменению пористости и  $\Delta K$  близко к нулю.

2. В интервалах 3800-4070, 4500-4650, 5200-5350 м должна присутствовать некоторая субгоризонтальная трещиноватость согласно зарегистрированным соотношениям  $\Delta\lambda_{\perp} > 0$  и  $\Delta K > 0$ .

3. В интервалах 4750-5150, 5550-5950 м следует предположить наличие существенной субгоризонтальной трещиноватости, так как в этих интервалах  $\Delta\lambda_{\perp}$  значительно выше, чем  $\Delta\lambda_{\parallel}$ , и при этом наблюдаются значительные по абсолютной величине отрицательные значения  $\Delta K$ .

4. В интервалах 6700-7100, 7200-7450 м можно предположить наличие существенной субвертикальной трещиноватости пород согласно соотношениям  $\delta\lambda_{\perp} < \delta\lambda_{\parallel}$  и  $\delta K > 0$ , отмеченным для этих интервалов.

5. Интервал 6550-7450 м резко отличается от всех остальных участков разреза по следующей совокупности соотношений для  $\delta\lambda_{\parallel}, \delta\lambda_{\perp}, K_c, \delta K$ : устойчиво высокие значения  $\delta\lambda_{\parallel}$ , крайне малые  $K_c$ , наличие отрицательных  $\delta\lambda_{\perp}$ , значительные положительные  $\delta K$ ; это должно свидетельствовать о значительном отличии пород в этой части разреза по совокупности их фильтрационных характеристик [74].

Подчеркнем, что общий характер изменений  $\delta\lambda$  и (особенно параметра  $\delta\lambda_{\parallel}$ ) по разрезу достаточно хорошо соответствует в целом изменениям пористости, однако очевидно, что небольшое для столь протяженного интервала глубин количество исследованных образцов (171 образец), малое число сканирований в направлении оси керна и незначительное расстояние между этими линиями сканирования ограничили возможность получения более детальной и достоверной информации о связи параметров  $\delta\lambda_{\parallel}, \delta\lambda_{\perp}, K_c, K_v, \delta K$  с пористостью и трещиноватостью пород. В то же время результаты применения предложенного подхода для экспрессного анализа фильтрационных характеристик пород с использованием весьма ограниченного объема измерений показала, что при массовых измерениях главных составляющих тензора теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  и  $\lambda_{\perp}$  для воздушно-сухих и водонасыщенных образцов можно получать информацию, полезную для экспрессной оценки открытой пористости, оценки вклада как объемной, так и трещиноватой пористости в общую величину открытой пористости пород, и для оценки степени трещиноватости с определением направления преобладающей ее ориентации. Данная методика экспрессных теплофизических исследований заслуживает дальнейшего развития также ввиду того, что она не требует долгого водонасыщения образцов по всему их объему (тем более под вакуумом), существенно искажающего, как известно, физические свойства керна, поднятого с больших глубин: при измерениях теплопроводности достаточно простого водонасыщения в течение не более 1-1,5 часов, чтобы практически полностью насытить верхний слой толщиной 1-1,5 см, в котором протекают процессы теплопереноса при теплофизических измерениях методом оптического сканирования с использованием специально подобранных параметров режима измерений (скорости сканирования, рабочей базы измерений, характеристик источника тепла и датчика температуры) [74].

Важно, что данные исследования проводились на образцах полноразмерного керна со спиленным малогабаритным дубликатом («горбушкой») без специального высушивания образцов керна в печах и без вакуумирования образцов при водонасыщении, что позволило

оценить возможности применения предлагаемой методики в экспрессном, т.е. наименее трудоемком варианте.

Приведенные результаты экспериментальных исследований на представительных коллекциях образцов пород, вскрытых Тюменской сверхглубокой скважиной СГ-6, представили также основу для оценки плотности кондуктивного теплового потока и его вертикальных вариаций в районе бурения скважины.

Таким образом, специальные исследования компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования и коэффициента тепловой анизотропии и их изменений при переходе от воздушно-сухого состояния к водонасыщенному состоянию образцов керна позволили осуществить оценку степени и ориентации трещиноватости пород разреза.

### **3.9. Корректировка теоретической модели Лихтенеккера по результатам исследований стандартных образцов пород на примере карбонатных пород**

Получение экспериментальных данных о теплопроводности и пористости для одних и тех же стандартных образцов из коллекций осадочных пород, однородных в литологическом отношении, представляет практически единственную реальную возможность проверки адекватности той или иной теоретической модели эффективной теплопроводности неоднородных сред реальным свойствам пород. Это связано с тем, что именно на стандартных образцах могут быть получены представительные данные для пористости и именно на тех же образцах могут быть выполнены высокоточные измерения теплопроводности с использованием прибора оптического сканирования, что минимизирует влияние тепловой неоднородности на результаты проверки адекватности теоретических моделей теплопроводности. Как показано в [148], при анализе связи теплопроводности и пористости необходимо использовать главное значение теплопроводности для направления вдоль плоскости напластования, что делает обязательным учет анизотропии и измерения обеих компонент теплопроводности -  $\lambda_{//}$  и  $\lambda_{\perp}$  - при петрофизических исследованиях на стандартных образцах для выявления наличия тепловой анизотропии, определения направления главных осей теплопроводности и оценки степени анизотропии (раздел 3.3).

В рамках описываемой работы на вышеописанной коллекции карбонатных пород были проведены исследования применимости одной из теоретических моделей теплопроводности – модели средневзвешенного геометрического среднего, называемой также моделью Лихтенеккера по имени предложившего ее автора [135]:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_{флюида}^{Кп} \cdot \lambda_{матрицы}^{1-Кп}, \quad (3.12)$$

где  $\lambda_{эфф}$  – эффективная теплопроводность породы,  $\lambda_{флюида}$  – теплопроводность порового флюида,  $\lambda_{матрицы}$  – теплопроводность минеральной матрицы породы,  $K_p$  - пористость пород.

Модель Лихтенеккера наиболее часто применяется в геофизике для теоретической оценки эффективной теплопроводности пористых твердых тел, представляемых как двухфазная среда «однородная минеральная матрица – поровый флюид» [122, 127, 129, 164, 171, 172, 179, 183]. Вместе с тем очевидно, что данная модель не может исчерпывающе корректно оценивать теплопроводность горных пород, так как теплопроводность минеральной матрицы зависит не только от ее минерального состава, но и от формы минеральных зерен, межзернового контактного теплового сопротивления, степени тепловой анизотропии пород. Последующим развитием данной модели явилась более совершенная теоретическая модель двухфазной среды – модель Лихтенеккера-Асаада [112], в которой предложено дополнительные факторы, влияющие на теплопроводность двухфазной среды (такие как влияние формы минеральных зерен, межзернового контактного теплового сопротивления) учитывать при помощи дополнительного корректировочного коэффициента:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_{флюида}^{f \cdot K_p} \cdot \lambda_{матрицы}^{1-f \cdot K_p}, \quad (3.13)$$

где  $f$  – корректировочный коэффициент, учитывающий влияние вышеуказанных факторов и позволяющий приблизить расчетное значение теплопроводности к реальной эффективной теплопроводности двухфазной среды [59].

Для охарактеризованной выше коллекции образцов карбонатных пород (раздел 3.3), изучавшейся в отношении тепловых свойств и пористости, на рисунке 3.23 приведены относительные погрешности теоретических оценок теплопроводности образцов коллекции при помощи модели Лихтенеккера (3.12) по отношению к полученным экспериментальным данным. Рассмотрение проводилось для разных состояний образцов – сухих, насыщенных керосином (тепловая модель нефти из-за близости их тепловых свойств) и водой при насыщении под вакуумом. Как и в работе [148], результаты теоретического моделирования теплопроводности сопоставлялись с результатами измерений компоненты теплопроводности  $\lambda_{//}$  вдоль напластования. Теоретические оценки теплопроводности для разных состояний образцов пород (сухие, насыщенные керосином и водонасыщенные) проводились по формуле (3.12) с использованием оценок теплопроводности минеральной матрицы пород, сделанных при помощи уравнений регрессии, приведенных на рисунке 3.7 для пористости  $K_p=0$ : 2,96 Вт/(м·К), 3,04 Вт/(м·К) и 3,10 Вт/(м·К) соответственно для сухих, насыщенных керосином и водонасыщенных пород. Относительные погрешности определялись по соотношению

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{\text{модел}} - \lambda_{\text{экспер}}}{\lambda_{\text{экспер}}} \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

где  $\delta\lambda$  - относительная погрешность теоретического моделирования теплопроводности при заданных пористости  $\Phi$  и теплопроводности минеральной матрицы породы  $\lambda_{\text{матрицы}}$ ,  $\lambda_{\text{модел}}$  - теоретическая оценка теплопроводности при помощи модели Лихтенеккера (3.12) при заданных пористости  $\Phi$  и теплопроводности минеральной матрицы породы  $\lambda_{\text{матрицы}}$ ,  $\lambda_{\text{экспер}}$  - результат измерений теплопроводности образца. Пористость каждого образца задавали по результатам ее измерений гидростатическим методом [59].

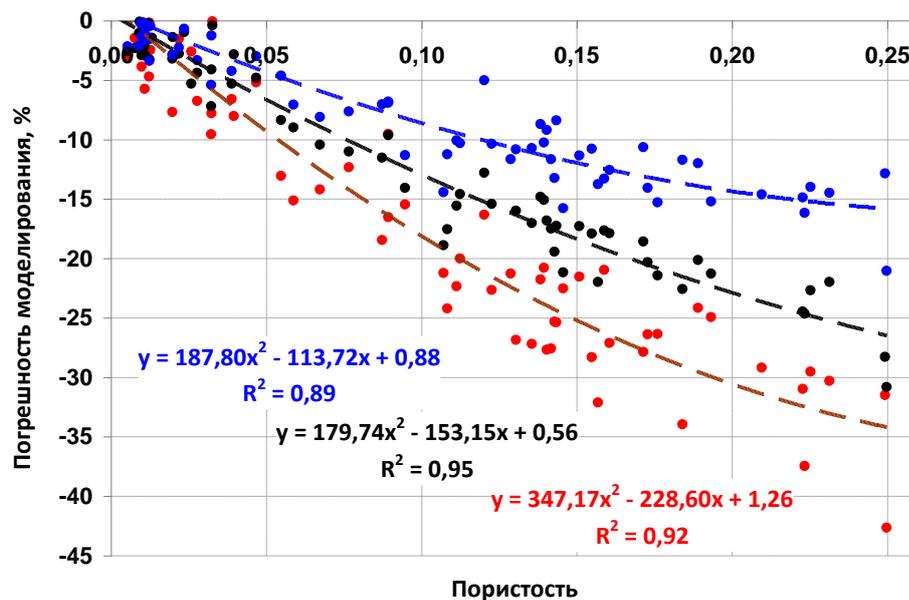


Рисунок 3.23. – Зависимость погрешности определения теплопроводности при помощи теоретической модели Лихтенеккера от пористости пород. Красный цвет – сухие образцы пород, черный цвет – насыщение образцов керосином (тепловая модель нефти), синий цвет – водонасыщенные образцы. В приведенных на рисунке уравнениях регрессии параметр «у» соответствует погрешности моделирования теплопроводности, параметр «х» соответствует пористости пород [59].

Из рисунка 3.23 видно, что погрешность теоретических оценок теплопроводности при помощи модели Лихтенеккера увеличивается с ростом пористости пород и закономерно уменьшается при переходе от сухих образцов к образцам, насыщенным керосином, и далее к образцам, насыщенным водой, что соответствует уменьшению контраста между теплопроводностью минеральной матрицы и теплопроводностью порового флюида в ряду воздух – нефть – вода [59].

Применение модели Лихтенеккера-Асаада (формула (3.13)) с подобранными нами корректировочными коэффициентами  $f=0,61$  для сухих пород,  $f=0,59$  для пород, насыщенных керосином, и  $f=0,51$  для водонасыщенных пород существенно повысило качество теоретических оценок теплопроводности. Установлено последовательное уменьшение корректировочного

коэффициента  $f$  с увеличением теплопроводности флюида (0,024-0,026 Вт/(м·К) для воздуха, 0,13-0,18 Вт/(м·К) для керосина и 0,58-0,60 Вт/(м·К) для воды) и, соответственно, с уменьшением контраста теплопроводности минеральной матрицы пород и теплопроводности порового флюида, что согласуется с выводами работы [183] об увеличении погрешности применения модели Лихтенеккера с увеличением контраста в теплопроводности минеральной матрицы и порового флюида [59].

На рисунке 3.24 приведены поля корреляции между теоретическими оценками теплопроводности по модели Лихтенеккера-Асаада и результатами измерений теплопроводности. Данные на рисунке 3.24 показывают, что модель Лихтенеккера-Асаада при известных корректирующих коэффициентах  $f$  дает существенно более точные оценки по сравнению с моделью Лихтенеккера. Так, среднеквадратическое расхождение между теоретическими оценками по модели Лихтенеккера-Асаада и результатами измерений теплопроводности составило  $\pm 4,4\%$  для сухих,  $\pm 2,3\%$  для нефтенасыщенных и  $\pm 2,3\%$  для водонасыщенных образцов пород изучавшейся коллекции при средних отклонениях соответственно 0,1%, 0,03% и 0,03%, что при современном уровне определения теплопроводности пород является свидетельством высокого качества оценок теплопроводности при помощи модели Лихтенеккера-Асаада при любом поровом флюиде [59].

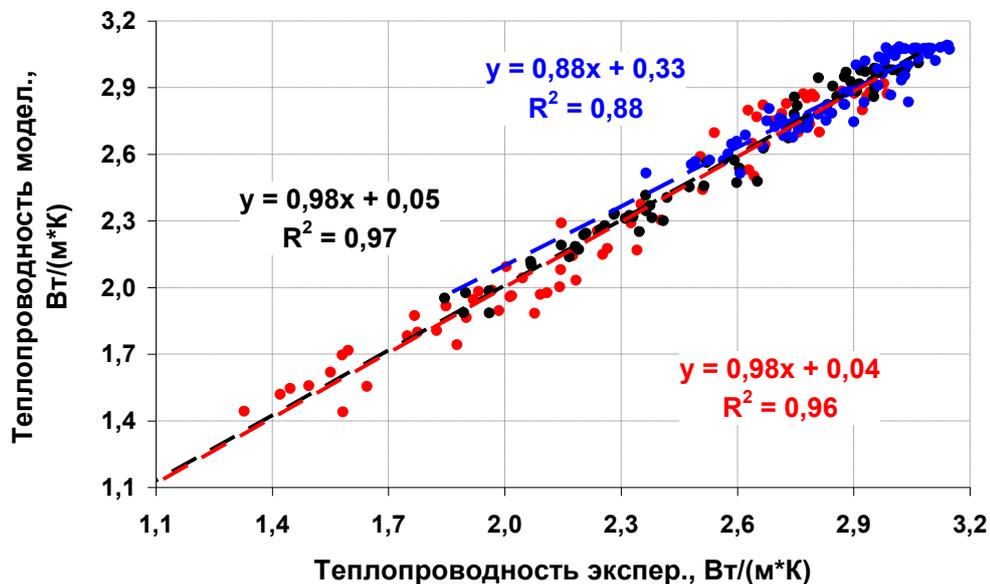


Рисунок 3.24. – Поле корреляции между экспериментальными данными о теплопроводности образцов пород (обозначение на рисунке «Теплопроводность экспер.») и результатами оценки теплопроводности при помощи теоретической модели Лихтенеккера-Асаада (обозначение на рисунке «Теплопроводность модел.»). Красный цвет – сухие образцы пород,  $f = 0,61$ , черный цвет – насыщенные образцы моделью нефти (керосин),  $f = 0,59$ , синий цвет – водонасыщенные образцы,  $f = 0,51$ . В приведенных на рисунке уравнениях регрессии параметр « $y$ » соответствует результатам теоретического моделирования теплопроводности, параметр « $x$ » соответствует результатам измерений теплопроводности [59].

Приведенные результаты показывают следующее [59]:

1) формальное применение модели Лихтенеккера для высокопористых карбонатных пород может приводить к весьма значительным погрешностям – до 13-21% для водонасыщенных, 28-31% для нефтенасыщенных и 32-43% для сухих пород;

2) при известных для выбранной разновидности пород значениях корректирующего коэффициента  $f$  модель Лихтенеккера-Асаада может обеспечивать достаточно высокое качество оценок теплопроводности, сопоставимое с лучшими современными средствами измерений теплопроводности;

3) с учетом того, что значения корректирующего коэффициента  $f$  могут находиться в широком диапазоне [148] и могут быть определены только путем сопоставления результатов теоретического моделирования теплопроводности с результатами ее измерений, для успешного применения теоретической модели Лихтенеккера-Асаада необходимы предварительные экспериментальные исследования теплопроводности на представительной выборке образцов изучаемого типа пород с применением прецизионного измерительного оборудования для определения корректирующего коэффициента  $f$ , соответствующего данному типу пород и конкретному поровому флюиду [59].

Результаты исследований показывают, что измерения на стандартных образцах пород позволяют оценивать адекватность теоретических моделей теплопроводности реальным свойствам пород и при необходимости дают возможность определять корректирующие поправки и вносить их в современные теоретические модели теплопроводности.

### **3.10. Контроль свойств образцов пород в процессе лабораторных петрофизических исследований**

В процессе петрофизических исследований систематическое изучение полного комплекса тепловых свойств при помощи разработанных лазерных приборов оптического сканирования (раздел 3.2) на различных стадиях цикла петрофизических работ (механическая обработка, экстрагирование, высушивание, флюидонасыщение, нагрев, давление и др.) помогает контролировать состояние образцов и возможные вариации их свойств, обусловленные воздействиями на образцы [9, 59, 65, 74, 152].

Так, при исследованиях коллекции образцов пород баженовской свиты, описанных в разделе 3.5, установлены закономерности в вариациях тепловых свойств при изменении состояний образцов, не отмечавшиеся ранее при исследованиях терригенных и карбонатных пород. Как указывалось в разделе 3.5, измерения тепловых свойств для образцов данной коллекции последовательно проводились при каждом из четырех состояний образцов: 1) до их экстрагирования, 2) после донасыщения керосином (имеющим, как указывалось выше, тепловые

свойства, близкие к свойствам нефти и другим видам углеводородов), 3) после экстрагирования с последующим высушиванием, 4) после водонасыщения под вакуумом. Известно, что воздух, органическое вещество (нефть (керосин), кероген) и вода имеют существенно различные значения теплопроводности, которые составляют соответственно 0,024-0,026 Вт/(м·К), 0,11-0,50 Вт/(м·К), 0,58-0,60 Вт/(м·К), что намного меньше теплопроводности минеральной матрицы пород (1,5-7,6 Вт/(м·К)) [9]. В связи с этим теплопроводность пористых и трещиноватых пород должна последовательно увеличиваться при изменениях порового флюида в ряду «воздух (газ) – нефть (керосин) – вода». Известно также, что в случаях, когда тепловая анизотропия пород обусловлена ориентированной трещиноватостью, коэффициент тепловой анизотропии при замене порового флюида в той же последовательности должен уменьшаться, что надежно регистрируется при экспериментальных исследованиях тепловых свойств трещиноватых пород [74, 148]. Все эти закономерности наблюдались нами, в частности, при вышеописанных исследованиях карбонатных пород с существенной пористостью (раздел 3.3, рисунки 3.7 и 3.9) и при изучении трещиноватых пород, вскрытых Тюменской сверхглубокой скважиной СГ-6 (раздел 3.8 [74]) [59].

Малые случайные погрешности метода оптического сканирования при измерениях теплопроводности (не более  $\pm 1,5\%$  для однократного измерения при доверительной вероятности 0,95) и объемной теплоемкости (не более  $\pm 3\%$ ) позволяют уверенно регистрировать изменения тепловых свойств образцов пород при изменениях поровых флюидов в ряду газ – нефть (модель нефти) - вода даже при невысокой пористости (от 0,5%) образцов. Вместе с тем, практически на всех стадиях настоящих исследований для большинства образцов пород баженовской свиты из коллекции, описанной в разделе 3.5, были зарегистрированы изменения их тепловых свойств, которые не адекватны прогнозным изменениям этих свойств только за счет изменения свойств флюидов в пустотном пространстве данных пород. Особенно существенными являются такие неадекватные изменения для коэффициента анизотропии и теплопроводности  $\lambda_{\perp}$ . Степень и характер выявленных неадекватностей обладает отчетливой зональностью вдоль скважины [59].

Неадекватные вариации тепловых свойств при изменениях состояний образцов пород рассмотрим подробно на примере группы из 24 образцов данной коллекции, отобранных из одного интервала глубин протяженностью 12 м. В таблице 3.7 для данных образцов приведены средние результаты измерений главных значений тензора теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  и  $\lambda_{\perp}$  соответственно вдоль и поперек напластования пород, коэффициента тепловой анизотропии  $K$  при каждом из состояний образцов и среднеквадратичные отклонения для результатов измерений рассматриваемых свойств. Для анализа значимости изменений в измерявшихся свойствах пород использовали метод сравнения средних с использованием критерия Стьюдента (таблица 3.8). Для этого были проведены расчеты параметра  $t$  по формуле [94]

$$t = \frac{\langle x_1 \rangle - \langle x_2 \rangle}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (3.12)$$

где  $\langle x_1 \rangle$  и  $\langle x_2 \rangle$  - средние значения измерявшихся величин,  $n_1$  и  $n_2$  – объемы выборок,  $S_1$  и  $S_2$  – среднеквадратичные отклонения измерявшихся величин в выборках [59].

Таблица 3.7. Тепловые свойства 24 стандартных образцов пород баженовской свиты, заполняющих интервал глубин протяженностью 12 м, при изменении их состояния по циклу «экстрагирование - керосинонасыщение - высушивание - водонасыщение» (насыщение флюидами осуществлялось при вакуумировании) [59].

Параметры		Образцы с природным насыщением	Неэкстрагированные образцы с природным насыщением, донасыщенные керосином	Сухие образцы	Водонасыщенные образцы
$\lambda_{//}$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{// \text{ среднее}}^*$	1,79	1,83	1,71	1,78
	$CKO (\lambda_{//})^{**}$	0,21	0,28	0,29	0,26
$\lambda_{\perp}$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{\perp \text{ среднее}}$	1,56	1,47	1,16	1,26
	$CKO (\lambda_{\perp})$	0,28	0,36	0,40	0,35
$K = \frac{\lambda_{II}}{\lambda_{\perp}}$	$K \text{ среднее}$	1,17	1,27	1,57	1,45
	$CKO (K)$	0,11	0,15	0,22	0,18

Примечания:

\* Среднее значение результатов измерений параметра для всей изучавшейся выборки из 24 стандартных образцов низкопроницаемых пород-коллекторов;

\*\*  $CKO$  - среднеквадратическое значение результатов измерений параметра для изучавшейся выборки из 24 стандартных образцов.

Результаты расчетов параметра  $t$  приведены в таблице 3.8. В тех случаях, когда значение коэффициента Стьюдента  $t$  превышало 2,06, изменение свойств следовало признать значимым [94].

Таблица 3.8. Значения коэффициента Стьюдента для оценки значимости изменений тепловых свойств стандартных образцов пород, приведенных в таблице 1, при изменении состояния образцов [59].

Параметр	Сравнение для состояний «природное насыщение» и «природное состояние с донасыщением керосином»	Сравнение для состояний «природное состояние с донасыщением керосином» и «сухие образцы»	Сравнение для состояний «водонасыщенные образцы» и «сухие образцы»	Сравнение для состояний «водонасыщенные образцы» и «природное состояние с донасыщением керосином»
$\lambda_{//}$	0,57	1,49	0,90	0,65
$\lambda_{\perp}$	0,99	2,88*	0,94	2,09**
$K = \frac{\lambda_{II}}{\lambda_{\perp}}$	2,69**	5,63*	2,11*	3,84**

Примечания:

\* Случаи значимых изменений, объясняемых заполнением пустотного пространства флюидом.

\*\* Случаи изменений свойств образцов пород, которые не могут быть объяснены заполнением пустотного пространства флюидом, а обусловлены изменением тепловых свойств минеральной матрицы, объема и формы элементов пустотного пространства.

Из приведенных в таблице 3.7 экспериментальных данных и приведенных в таблице 3.8 результатов оценки значимости изменений тепловых свойств образцов пород можно сделать вывод о том, что изучавшиеся образцы низкопроницаемых пород весьма чувствительны к разным видам воздействия на них – экстрагированию, высушиванию, водонасыщению – и претерпевают изменения тепловых свойств минеральной матрицы (очевидно - за счет разуплотнения матрицы, изменений межзерновых контактов и свойств глинистой составляющей пород) и пустотного пространства. В таблице 3.8 одной и двумя звездочками отмечены случаи, в которых изменения свойств пород при изменениях состава порового флюида являются статистически значимыми. Одной звездочкой отмечены случаи, когда изменения свойств образцов являются естественными, так как объясняются соответствующими изменениями теплопроводности флюида, заполняющего поровое/трещиноватое пространство. Двумя звездочками отмечены «аномальные» случаи, в которых изменения тепловых свойств образцов пород не могут быть объяснены изменениями теплопроводности флюидов в пустотном пространстве, а обусловлены изменениями тепловых свойств минеральной матрицы или/и объема и структуры пустотного пространства [59].

Согласно таблицам 3.7 и 3.8, к «аномальным» относятся следующие данные [59]:

(1) значимое понижение компоненты  $\lambda_{\perp}$  теплопроводности для водонасыщенных образцов по отношению к их естественному состоянию и состоянию с донасыщением керосином, что противоречит физически логичным ситуациям, когда заполнение ориентированных трещин более теплопроводной, чем воздух и нефть, водой должно повышать параметр  $\lambda_{\perp}$  (раздел 3.8) [74];

(2) значимые повышения коэффициента тепловой анизотропии при донасыщении неэкстрагированных образцов керосином, в то время как должно, напротив, наблюдаться понижение коэффициента анизотропии, так как более теплопроводный, чем вода или нефть, заполняет часть пустотного пространства, заполненного воздухом вместо ушедших нефти или воды в процессе достаточно долгого выдерживания образцов при атмосферных условиях;

(3) значимые «аномальные» повышения коэффициента тепловой анизотропии для водонасыщенных пород по сравнению с образцами с природным насыщением и по сравнению с неэкстрагированными образцами, донасыщенными керосином; замена пустотного пространства более теплопроводным флюидом при стабильных минеральной матрице и пустотном пространстве для пород с ориентированной трещиноватостью должна приводить к снижению коэффициента анизотропии для ряда состояний «естественно-насыщенные образцы – образцы с

донасыщением керосином - водонасыщенные образцы» (раздел 3.8) [59], в то время как результаты данных измерений показывают противоположную последовательность значений коэффициента тепловой анизотропии с его возрастанием вместо понижения: 1,17-1,27 -1,45. Подобный эффект можно объяснить также увеличением объемной доли ориентированных глинистых прослоек пород.

Отмеченные «аномальные» понижения компоненты теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  для водонасыщенных образцов по сравнению с естественно- и керосинонасыщенными образцами и повышение коэффициента тепловой анизотропии для водонасыщенных образцов по сравнению с естественно-насыщенными образцами и с образцами, донасыщенными керосином, однозначно свидетельствуют о серьезных изменениях в минеральной матрице и пустотном пространстве, произошедших при донасыщении керосином под вакуумом, экстрагировании, высушивании и водонасыщении образцов под вакуумом.

Средняя пористость рассматриваемых 24 образцов изменялась от 0,53% на первой стадии исследований до 2,73% на завершающей стадии (данные Г.А. Калмыкова), что подтверждает вывод о некотором возрастании объема порового пространства в процессе экстрагирования, высушивания и насыщения образцов керосином и водой (теплопроводность воздуха, керосина и воды составляет соответственно 0,024 - 0,026, 0,13 - 0,18, 0,59 - 0,61 Вт/(м·К) [122]. Вместе с тем, существенный рост коэффициента тепловой анизотропии и значительное уменьшение теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  указывают на значительное развитие ориентированной микротрещиноватости в процессе работы с образцами, которая значительно изменяет данные тепловые свойства пород, но может не влиять существенно на пористость [59].

Свидетельства подобных изменений отмечены и для ряда других образцов из данной коллекции низкопроницаемых пород-коллекторов.

Более высокая чувствительность компоненты  $\lambda_{\perp}$  к изменениям образцов пород по сравнению с компонентой  $\lambda_{\parallel}$  показывает, что основные изменения образцов пород при экстрагировании, высушивании и флюидонасыщении касаются направления, перпендикулярного плоскости напластования.

Приведенные результаты показывают, что систематический оперативный теплофизический анализ стандартных образцов в процессе стандартных петрофизических исследований помогает контролю состояния образцов в сложном петрофизическом цикле и позволяет избежать неверных результатов и выводов петрофизических измерений, так как изменения состояния образцов могут быть причиной существенных изменений других свойств образцов пород, обнаружение которых другими методами в большинстве случаев, особенно в отношении изменения анизотропии пород, весьма затруднительно [59].

Такие не характерные для подавляющего большинства осадочных горных пород изменения тепловых свойств позволили сделать вывод о том, что экстрагирование, флюидонасыщение и высушивание керн могут приводить к существенным изменениям тепловых свойств минеральной матрицы пород баженовской свиты в связи с изменениями межзерновых контактов и сплошности минеральной матрицы. Если на первых этапах исследований (экстрагирование, высушивание т.д.) такие изменения регистрировались, благодаря прецизионному уровню теплофизических измерений, по изменениям тепловых свойств, то на заключительной стадии исследований изменения для ряда образцов стали заметны даже при визуальном осмотре (появление хорошо видимых трещин). Важно, что такие процессы с изменениями тепловых свойств образцов должны приводить к соответствующим изменениям и других свойств пород, таких как механические, упругие, электрические и др., что необходимо учитывать в процессе петрофизических исследований в целях сохранения керн и получения достоверной информации об изменении свойств пород при изменениях состава порового флюида [59].

Таким образом, систематический оперативный теплофизический анализ стандартных образцов в процессе лабораторных петрофизических исследований помогает обеспечивать контроль изменений свойств минеральной матрицы, пустотного пространства и анизотропии образцов пород на всех этапах петрофизического цикла, что позволяет своевременно выявлять изменения комплекса свойств образцов и более корректно интерпретировать результаты экспериментальных петрофизических исследований при изучении других свойств [9]. Такой контроль свойств образцов пород помогает избежать неверных результатов и выводов при комплексных лабораторных петрофизических исследованиях [59]. Контроль свойств изучаемых стандартных образцов основан на последовательных измерениях и анализе вариаций компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования, объемной теплоемкости и коэффициентов тепловой анизотропии и неоднородности при помощи разработанной мобильной лазерной установки на всех этапах петрофизических исследований. Эффективность контроля обеспечивается неразрушающим, бесконтактным характером измерений, их высокой точностью (случайная погрешность измерений теплопроводности не превышает 1,5% при доверительной вероятности 0,95) и быстротой. Такой контроль позволяет своевременно выявлять и учитывать изменения не только тепловых, но и других, коррелируемых с тепловыми, свойств образцов.

Систематический оперативный контроль за изменениями свойств матрицы пород и пустотного пространства при воздействиях на изучаемые стандартные образцы при экстрагировании, высушивании, нагреве, флюидонасыщении, замораживании и др. внедрен в практику петрофизических работ Центра по добыче углеводородов Сколтеха.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный подход для профилирования тепловых свойств со сканированием образцов пород в двух противоположных направлениях с изменением расстояния между пятном нагрева и областью регистрации температуры нагрева поверхности позволил разработать автономный лазерный модуль оптического сканирования, который может комплексоваться с поточным скретч-тестированием керна при непрерывной регистрации неоднородности пород вдоль скважин. При одном направлении оптического сканирования обеспечивают максимальное пространственное разрешение 0,2 мм, что соответствует пространственному разрешению при скретч-тестировании, и комбинирование профиля теплопроводности с профилями, получаемыми при скретч-тестировании. При оптическом сканировании в противоположном направлении обеспечивается профилирование полного комплекса тепловых свойств – теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости.
2. Разработанный мобильный лазерный прибор обеспечивает массовые измерения комплекса тепловых свойств горных пород на стандартных образцах пород (цилиндры 30x30 мм), мелких фрагментах керна в условиях кернохранилищ, синтетических образцах, приготавливаемых при измерениях тепловых свойств на шламе и неконсолидированных породах. и позволяет исследовать тепловые свойства образцов пород с вариациями глубины теплофизического зондирования и пространственной разрешающей способности.
3. Разработанный автономный лазерный модуль оптического сканирования может быть применен для поточного высокоразрешающего теплофизического профилирования керна в комплексе с поточным гамма-спектрометрическим профилированием полноразмерного керна с монтажом модуля на гамма-спектрометре.
4. Мобильный лазерный прибор обеспечивает массовые экспрессные измерения комплекса тепловых свойств на стандартных образцах с учетом анизотропии и неоднородности пород на разных стадиях лабораторных исследований стандартных образцов.
5. Измерения тепловых свойств на стандартных образцах пород с широким диапазоном общего содержания органического вещества для пород нетрадиционных коллекторов или пористости для пород традиционных коллекторов с учетом анизотропии образцов позволяют определять теплопроводность и объемную теплоемкость минеральной матрицы пород, необходимые для бассейнового и гидродинамического моделирования.
6. Установленная тесная связь между теплопроводностью пород и общим содержанием органического вещества, впервые изучавшаяся на представительной коллекции образцов с учетом анизотропии, неоднородности и наиболее тесно проявляющаяся для компоненты

теплопроводности вдоль напластования пород, создает предпосылки для определения общего содержания органического вещества по результатам непрерывного профилирования тепловых свойств на керне.

7. Разработанные лазерные приборы оптического сканирования позволяют получать детальную информацию о 2D распределении пористости и коэффициента тепловой анизотропии пород коллекторов на образцах пород в широком диапазоне их размеров.
8. Измерения главных значений тензора теплопроводности для образцов с изменением состояния образцов от сухого до флюидонасыщенного и анализ вариаций относительных изменений коэффициента тепловой анизотропии и компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования при флюидонасыщении позволяют получать информацию о микротрещиноватости пород, ориентации микротрещин и вариации этих характеристик вдоль скважины.
9. Последовательные измерения стандартных образцов в процессе стандартных петрофизических исследований при изменении состояния образцов пород помогают осуществлять контроль изменений свойств минеральной матрицы, пустотного пространства и анизотропии образцов пород на всех этапах лабораторного петрофизического цикла, что позволяет своевременно выявлять изменения свойств образцов пород при технологических воздействиях на них в процессе лабораторных петрофизических исследований.

## **ГЛАВА 4. МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОРОД НА КЕРНЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ И НЕТРАДИЦИОННЫМИ ЗАПАСАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Несмотря на многие достоинства технологии оптического сканирования, на практике достаточно часто имели место случаи, когда применение технологии не допускалось при изучении высокопористых и трещиноватых осадочных пород. Это связано с тем, что краска, которой все годы применения метода оптического сканирования покрывали поверхность керна и стандартных образцов тепловых свойств для выравнивания оптических характеристик образцов пород и методика применения которой была тщательно отработана и протестирована [67, 76], в пористых и трещиноватых породах проникает в поры и трещины, что могло приводить к изменению свойств образцов пород и мешать проведению других исследований керна. Если для измерений на плотных образцах кристаллических пород и монокристаллах минералов это не имело значения [73, 161], то долгое время это обстоятельство сдерживало применение технологии для массовых измерений тепловых свойств для осадочных пород на кернах скважин, пробуренных в месторождениях углеводородов, так как нефтегазовые компании - владельцы керна не могли допустить изменений свойств керна и вынуждены были отказываться от применения метода оптического сканирования.

Другая, не решенная ранее проблема, была связана с тем, что при исследованиях пород баженовской свиты и доманиковой формации чрезмерный нагрев образцов пород мог привести к недопустимым необратимым изменениям органического вещества.

Еще один фактор, который исключал возможность непрерывного теплофизического профилирования всего керна скважин, был связан с невысокой скоростью оптического сканирования керна, что делало процесс теплофизического профилирования чрезмерно долгим.

В главе 2 описана осуществленная модификация технологии оптического сканирования, которая помогла в одних случаях полностью исключить необходимость применения выравнивающего оптического покрытия (раздел 2.1), в других случаях позволила вместо краски использовать специальную пластиковую пленку, быстро наносимую на поверхность керна, легко удаляемую после проведения теплофизических измерений и не изменяющую свойства керна (раздел 2.2). Были найдены параметры режима оптического сканирования, позволяющие значительно снизить температуру нагрева образцов пород до допустимых значений, повысить скорость теплофизического профилирования полноразмерного керна и добиться достаточно высокого пространственного разрешения при профилировании без ухудшения метрологических характеристик метода (раздел 2.3).

Найденные решения, описанные в главе 2, ликвидировали препятствие для широкого применения метода оптического сканирования в нефтяной геофизике и открыли возможности для создания нового метода теплофизических исследований месторождений – непрерывного бесконтактного неразрушающего теплофизического профилирования всего керна скважин с высоким пространственным разрешением. Этот новый метод, как показано в настоящей главе и главе 5, получил быстрое внедрение для исследований нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными ресурсами углеводородов.

#### **4.1. Метод непрерывного теплофизического профилирования керна**

При разработке метода непрерывного теплофизического профилирования керна использованы следующие уникальные возможности теплофизических исследований, обеспечиваемые технологией оптического сканирования:

- обеспечение массовых неразрушающих бесконтактных измерений полного комплекса тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости) пород при атмосферных условиях;
- прецизионный уровень измерений при полной погрешности не более  $\pm 3\%$  для теплопроводности,  $\pm 4\%$  для температуропроводности и  $\pm 5\%$  для объемной теплоемкости (при доверительной вероятности 0,95);
- измерения комплекса тепловых свойств без какой-либо механической обработки образцов керна с обеспечением полной сохранности керна;
- определение главных значений тензора теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии для каждого образца;
- непрерывное профилирование каждого из изучаемых тепловых свойств вдоль и поперек образца при каждом сканировании и регистрация степени тепловой неоднородности каждого изучаемого образца с пространственной разрешающей способностью не хуже 1 мм;
- измерения всех тепловых свойств на серии образцов полноразмерного с общей длиной установленных в одну серию образцов до 0,5 м;
- возможность измерений тепловых свойств на слабо-консолидированных образцах пород.

Для удобства изучения анизотропии и определения главных значений тензора теплопроводности пород в большинстве случаев непрерывное теплофизическое профилирование следует выполнять на малогабаритных дубликатах керна – так называемых «горбушках», отпиливаемых от полноразмерного керна после извлечения его из упаковочных контейнеров (рисунок 4.1 а). В случаях необходимости поточного теплофизического профилирования керна сразу после извлечения его из упаковочных контейнеров оптическое сканирование на

цилиндрических поверхностях керна должно при необходимости оценки коэффициента анизотропии сопровождаться дополнительным сканированием на плоских торцах керна (рисунок 4.1 б).

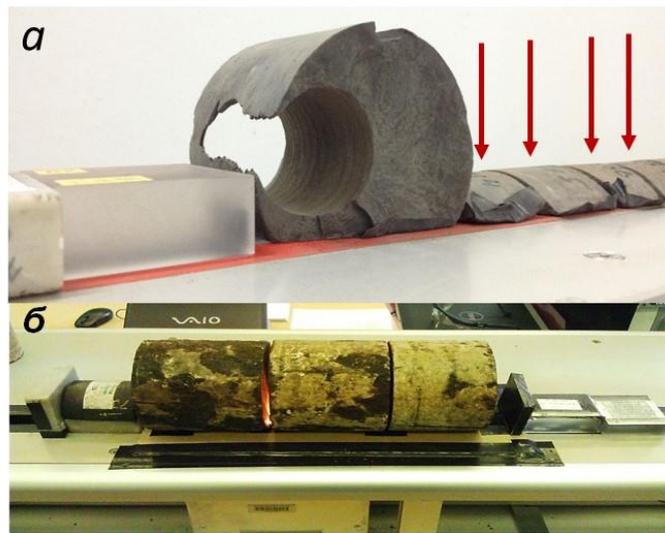


Рисунок 4.1. – Непрерывное профилирование тепловых свойств на керне. *а* – Измерения на плоской поверхности малогабаритных дубликатов (указаны стрелками), *б* – измерения на цилиндрической поверхности керна.

Впервые метод непрерывного теплофизического профилирования керна (далее НТП) был применен автором в 2014 г. для непрерывного профилирования около 3000 образцов полноразмерного керна двух скважин, пробуренных в пермо-карбонной залежи Усинского месторождения тяжелой нефти [62, 63, 143, 145, 155, 157, 158]. В 2015 г. данный метод был впервые применен автором для непрерывного бесконтактного неразрушающего теплофизического профилирования полноразмерного керна скважин, пробуренных на месторождениях Западной Сибири, расположенных на территории залегания баженовской свиты [55, 65, 80], после чего получил достаточно широкое внедрение при исследованиях баженовской свиты [54, 58, 61, 66, 68, 69, 70, 81, 104, 121, 141, 142, 144, 150, 168] (глава 5). С 2017 г. область применения метода охватывает уже и доманиковую формацию [58] (глава 5).

Разработанный метод исследований разрезов скважин заключается в непрерывном бесконтактном профилировании теплопроводности, температуропроводности (а следовательно – и объёмной теплоёмкости) всего полноразмерного керна, извлеченного при бурении. Для измерений используется полевой вариант прибора оптического сканирования (глава 1, раздел 1.3), в котором используется нагрев образцов предложенным нами эллиптическим пятном нагрева (глава 2, раздел 2.3.2) и сканирование с повышенной скоростью (глава 2, раздел 2.3.3). Для массовых измерений в местах хранения керна прибор транспортируется в пункт расположения кернохранилища. После установки в кернохранилище при помощи 6-8 стандартных образцов тепловых свойств (глава 2, таблица 2.4) проводятся метрологические испытания прибора и, при необходимости, его дополнительная настройка. Профилирование

проводится вдоль оси кернa по плоской поверхности малогабаритных дубликатов кернa («горбушек»), получаемых при распиливании кернa после извлечения его из упаковочных контейнеров, или на цилиндрической поверхности кернa как сразу после извлечения кернa из контейнеров, так и после некоторого времени хранения. При сканировании вдоль оси кернa регистрируются профили компоненты теплопроводности, перпендикулярной оси кернa, т.е. компоненты теплопроводности, параллельной плоскости напластования для вертикальных скважин (раздел 1.4.1). Для измерений компоненты теплопроводности, перпендикулярной плоскости напластования, при оптическом сканировании на распиленном керне после профилирования в направлении вдоль скважины для повторяют сканирование в поперечном направлении с интервалом 4-6 см вдоль кернa для учета неоднородности пород. На нераспиленных образцах кернa для измерений обеих компонент теплопроводности измерения проводят по образующей цилиндрической поверхности кернa и на торцах. Анализ азимутальной анизотропии проводят путем дополнительных измерений на плоских торцах кернa со сканированием в нескольких направлениях (рисунок 3.6) для определения направления главных осей теплопроводности и измерений главных компонент тензора теплопроводности. Пространственная разрешающая способность профилирования теплопроводности составляет не более 1 мм (глава 2, раздел 2.7). Перед измерениями не требуется какая-либо механическая обработка образцов кернa, т.е. обеспечивается их полная сохранность. В результате измерений определяются главные значения тензора теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  (вдоль напластования) и  $\lambda_{\perp}$  (поперек напластования), коэффициент тепловой анизотропии, оцениваемый для каждого образца по соотношению  $K = \lambda_{\parallel} / \lambda_{\perp}$ . и коэффициент тепловой неоднородности, определяемый по каждому профилю теплопроводности при помощи соотношения

$$\beta = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\text{сред}}}, \quad (4.1)$$

где  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  – соответственно минимальная и максимальная в пределах образца теплопроводность,  $\lambda_{\text{сред}}$  – средняя теплопроводность образца.

Профилирование осуществляется с размещением на платформе измерительного прибора либо образцов кернa сериями с общей длиной каждой серии до 0,5 м, либо всего столбика кернa, извлеченного из контейнера. Для образцов кернa длиной более 0,5 м профилирование проводят по частям образца, последовательно сдвигая его на платформе прибора вдоль направления сканирования. Измерения могут проводиться как на твердых, так и на слабokonсолидированных образцах пород.

Для исключения влияния вариаций оптических характеристик поверхности кернa на результаты измерений при методе НТП применяется один из двух предложенных ниже приемов:

- разбиение всего керна на группы с близкими коэффициентами поглощения и излучения, с оценкой совокупности этих коэффициентов при помощи специальных измерений и учетом результатов данных измерений при обработке данных, полученных при оптическом сканировании всего керна скважины (глава 2, раздел 2.1);
- нанесение на поверхность керна тонкой самоклеящейся ленты (глава 2, раздел 2.2) при помощи прижимного валика и теплового вентилятора, небольшой нагрев ленты которым обеспечивает необходимое плотное прилегание ленты к поверхности керна; сразу после измерений лента удаляется с керна и не оставляет на керне следов.

Возможность непрерывного поточного теплофизического профилирования керна обеспечивается тем, что за 1 час измерений непосредственно в местах хранения керна (кернохранилищах) обеспечивается профилирование 2,5 – 3 метров керна.

#### **4.2. Результаты непрерывного теплофизического профилирования керна оценочных скважин пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения**

Методом непрерывного теплофизического профилирования исследован керн двух оценочных скважин (*A* и *B*), пробуренных в пермокарбоновой залежи Усинского месторождения [16]. Профилирование проводилось по плоской поверхности малогабаритных дубликатов керна («горбушках»), полученных при распиливании керна после извлечения его из упаковочных контейнеров. Помимо непрерывного профилирования вдоль оси керна (вдоль скважины) проводили дополнительное профилирование каждого образца поперек его оси. На нераспиленных образцах измерения проводились по образующей цилиндрической поверхности керна и на торцах. Непрерывное теплофизическое профилирование всех 2995 образцов керна для скважин *A* и *B* было проведено непосредственно в кернохранилище компании в течение трёх недель. Общее число сканирований вдоль и поперек оси керна составило около 7500. Пространственная разрешающая способность профилирования теплопроводности составляла ~1 мм (глава 2, раздел 2.5) [62].

Для скважины *A* профилирование проведено на 1910 малогабаритных дубликатах керна («горбушках»), непрерывно отобранных в интервале глубин общей протяженностью 307 м. В зонах дробления пород дополнительно был отобран 31 мелкий образец дробленого керна, для которых тепловые свойства были определены на лазерной установке оптического сканирования. Таким образом, общее число образцов керна, изученных путём непрерывного профилирования по скважине *A*, составило 1941. Распределения теплопроводности вдоль напластования  $\lambda_{||}$ , объёмной теплоёмкости, коэффициента тепловой анизотропии и коэффициента тепловой неоднородности для скважины *A* приведены на рисунке 4.2. Приводимые теплофизические данные, обозначенные цветными точками на рисунке, соответствуют средним значениям

теплопроводности, объемной теплоемкости и коэффициента тепловой анизотропии, определявшимися для каждого образца керна по результатам профилирования. Данные о коэффициенте тепловой неоднородности для каждого образца соответствуют результатам сканирования вдоль оси керна [62].

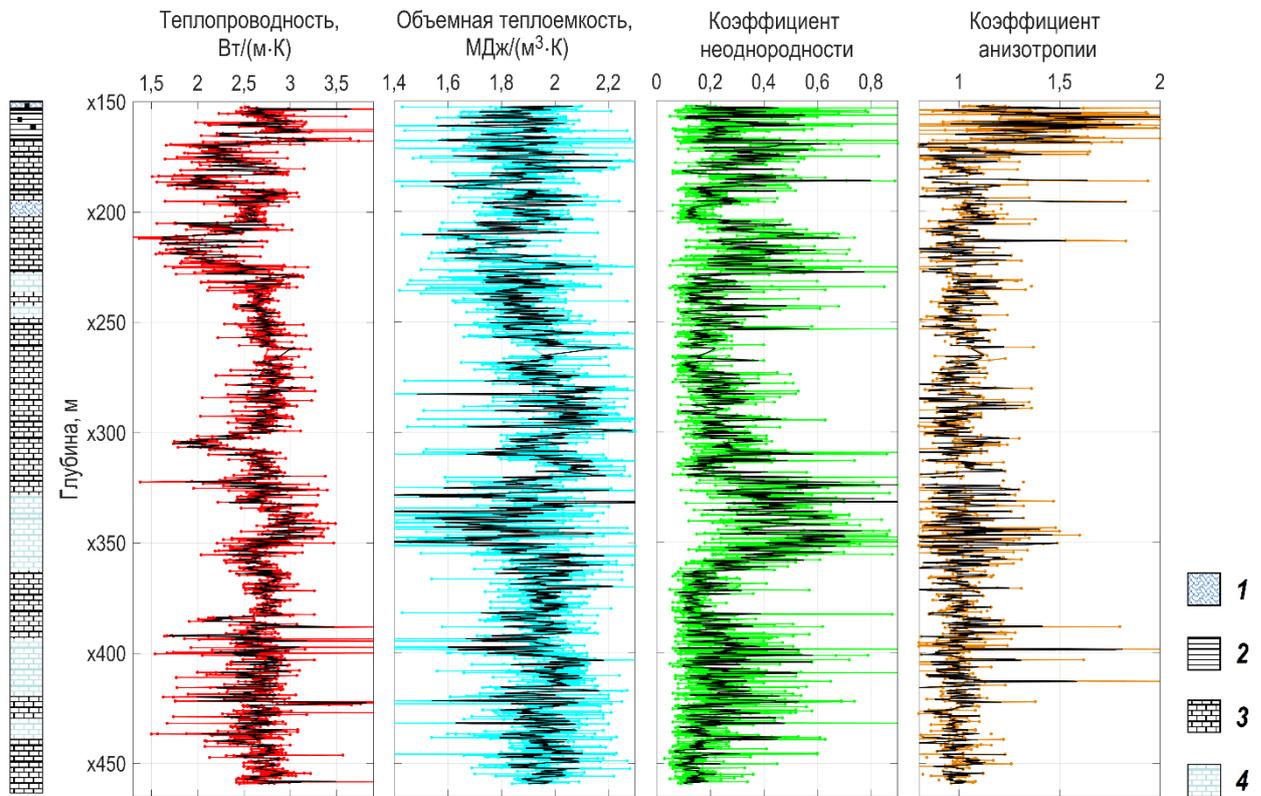


Рисунок 4.2. – Распределение регистрировавшихся тепловых свойств пород вдоль оценочной скважины А. 1 - Известняки пелитоморфные, неравномерно окремненные и пиритизированные, слабо глинистые, 2 - глинисто-терригенные породы, пиритизированные, трещиноватые, 3 - известняки органогено-детритовые, 4 - известняки органогенно-детритовые. Цветными точками, соединенными тонкими линиями того же цвета, обозначены результаты измерений для каждого образца керна; черными линиями обозначены результаты фильтрации с усреднением результатов измерений в скользящем прямоугольном окне с 5 элементами в окне (ширина окна ~0,5 м) [62].

Для скважины *Б* профилирование керна проведено на 940 образцах-«горбушках» в интервале глубин общей протяженностью 134 м. В отдельных местах, где «горбушки» отсутствовали, для измерений были отобраны 114 образцов ненарушенного полноразмерного керна диаметром 110 мм. Таким образом, общее число образцов керна, изученных путем непрерывного профилирования для скважины *Б*, 1054. Результаты профилирования приведены на рисунке 4.3 [62].

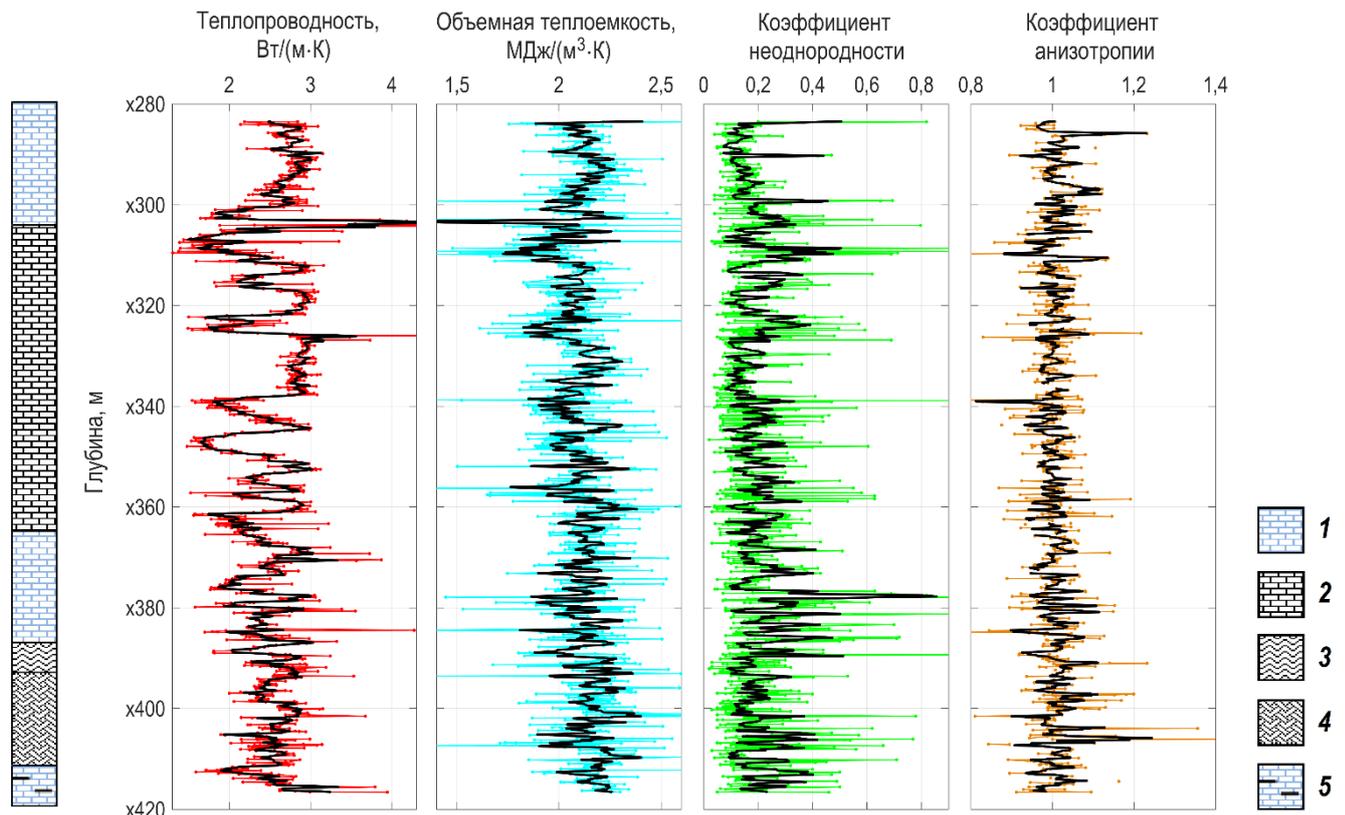


Рисунок 4.3. – Распределение тепловых свойств пород вдоль оценочной скважины Б. 1 - Известняки органогено-детритовые, кремнистые, слабоглинистые, 2 - известняки органогенно-детритовые, иногда комковато-детритовые, слабоглинистые, 3 - переслаивание известняка органогенно-детритового, кремнистого, глинистого и доломита сильноглинистого, 4 - известняки органогенно-детритовые неравномерно доломитизированные, сильно глинистые, 5 - известняки органогенно-детритовые, кремнистые, глинистые. Цветными точками, соединенными тонкими линиями того же цвета, обозначены результаты измерений для каждого образца керна; черными линиями обозначены результаты фильтрации с усреднением результатов измерений в скользящем прямоугольном окне с 5 элементами в окне (ширина окна ~0,5 м) [62].

На рисунках 4.2 и 4.3 для скважин А и Б показаны также литологические колонки разреза, построенные по макроскопическому описанию керна [62]. Практически для всей изученной коллекции керна плоскость слоистости была ориентирована перпендикулярно или субперпендикулярно к оси керна.

В основу интерпретации вертикальных вариаций тепловых свойств и различия их характера и степени для двух скважин была положена информация о возможных вариациях тепловых свойствах минеральной матрицы пород и порового флюида, приведенная в таблице 4.1, а также экспериментальные данные о теплопроводности породообразующих минералов [79]. Теплопроводность пород определяется, главным образом, их минеральным составом, пористостью, геометрическими параметрами порового/трещиноватого пространства, видом и свойствами порового флюида, степенью анизотропии, связанной со слоистостью пород, согласной ориентацией зерен и/или микротрещин, плотностью межзерновых контактов. Объемная теплоемкость пород зависит от минерального состава, пористости и вида порового флюида. Для традиционных коллекторов доминирующими факторами влияния на

тепловые свойства обычно являются влияние пористости и вариации состава порового флюида [108, 109, 117], что объясняется существенными различиями между тепловыми свойствами минеральной матрицы пород и поровых флюидов (таблица 4.1) [62].

Таблица 4.1. Тепловые свойства поровых пластовых флюидов и минеральной матрицы осадочных пород [62, 122].

Свойства Компонент	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Объемная теплоемкость, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)
Минеральная матрица	1,3...7,6	1,7...2,7
Пластовая вода	0,59-0,61	4,19
Органическое вещество (нефть, кероген)	0,10-0,18	1,45...1,65
Воздух, газ	0,024..0,026	0,00122...0,00126

Согласно результатам измерений для скважины А (рисунок 4.2), в интервале глубин х152,30 – х459,24 м исследованные образцы пород характеризуются широкими диапазонами теплопроводности (0,44 – 10,9 Вт/(м·К)), объемной теплоёмкости (0,80 – 2,28 МДж/(м<sup>3</sup>·К)), коэффициента анизотропии (1 – 2,6) и коэффициента тепловой неоднородности (0,05 – 1,52) [62].

Данные для скважины А, приведенные на рисунке 4.2, позволяют сделать следующие выводы [62, 122].

1. Все измеренные тепловые свойства характеризуются существенными разномасштабными вариациями вдоль скважины, что свидетельствует о необходимости массовых измерений как для точных оценок средних значений тепловых свойств в отдельных интервалах глубин, необходимых для гидродинамического моделирования тепловых методов добычи, так и для выделения теплофизической зональности пласта при изучении его неоднородности.

2. Для теплопроводности характерна зональность с локальными её вариациями от 0,44 до 10,9 Вт/(м·К) при среднем диапазоне значений 2,4 – 3,0 Вт/(м·К), в целом стабильном для изучаемого интервала глубин.

3. Для объемной теплоёмкости характерен устойчивый тренд с увеличением параметра с глубиной при его существенных локальных вариациях.

4. По всем тепловым свойствам для скважины А чётко выделяется глинисто-терригенная пачка в интервале глубин х152,3 – х169,2 м, где неравномерная пиритизация и окремнение пород проявляются высокими значениями теплопроводности (до 8,0 Вт/(м·К)) и коэффициента

тепловой неоднородности (до 1,6) (теплопроводность монокристалла пирита – 41,4 Вт/(м·К), кварца в его агрегатном состоянии – 7,6 Вт/(м·К) [83]).

Как следует из данных рисунка 4.3, породы, вскрытые скважиной Б, в интервале глубин х283,50 – х416,65 м характеризуются вариациями теплопроводности в диапазоне 1,31 – 5,43 Вт/(м·К), объёмной теплоёмкости в диапазоне 1,09 – 2,93 МДж/(м<sup>3</sup>·К) и коэффициента тепловой неоднородности в диапазоне 0,02 – 1,17.

Данные для скважины Б, приведенные на рисунке 4.3, показывают следующее [62]:

1. Тепловые свойства характеризуются существенными вариациями в данном интервале глубин.
2. Для теплопроводности характерна зональность с локальными вариациями параметра вне среднего диапазона 2,0 – 3,0 Вт/(м·К), в целом стабильного для изучаемого интервала глубин.
3. Протяженность выделяемых зон локальных вариаций теплопроводности и объёмной теплоёмкости не превышает 5 – 10 м.

Зарегистрированные существенные вариации теплопроводности и объёмной теплоёмкости пород вдоль скважин А и Б можно объяснить следующими факторами:

- 1) литологическими особенностями пород (пятнистым окремнением пород, наличием глинистых прослоев, доломитизацией);
- 2) вариациями нефтенасыщенности пород (интенсивное нефтенасыщение, неравномерное, пятнистое нефтенасыщение, нефтенасыщение по трещинам);
- 3) вариациями пористости, кавернозности и степени трещиноватости пород.

Перечисленные факторы существенно, хотя и в различной степени, влияют на тепловые свойства пород, что и обуславливает достаточно высокую теплофизическую дифференциацию разреза скважины.

Приведенные на рисунках 4.2 и 4.3 результаты измерений показывают, что существенной тепловой анизотропией (с коэффициентом анизотропии в диапазоне 1,2 – 2,6) характеризуются лишь породы верхнего интервала глубин х155 – х170 м скважины А. Высокая тепловая анизотропия здесь обусловлена, в основном, преобладающей субгоризонтальной трещиноватостью пород. Анализ тепловой анизотропии проводился на основе предположения об отсутствии значимой азимутальной анизотропии, т.е. отсутствии различий в значениях теплопроводности для разных направлений в плоскости напластования, что было подтверждено дополнительными исследованиями на нескольких характерных образцах керна из этого интервала глубин [62].

Согласно рисункам 4.2 и 4.3, средние для скважин А и Б значения теплопроводности имеют близкие значения, но характер и степень вариаций теплопроводности как в масштабе сантиметров, так и в масштабе метров и десятков метров существенно различны для скважин,

что свидетельствует о значительных отличиях в геологическом строении участков пласта, вскрытых скважинами *A* и *B*. Так, породы скважины *A* характеризуются более значительными вариациями теплопроводности в пределах каждого образца, о чем свидетельствуют более высокие значения коэффициента тепловой неоднородности для скважины *A* (рисунки 4.2 и 4.3). Для пород скважины *B* характерны существенно более высокие, чем для скважины *A*, вариации теплопроводности в масштабе 2 - 20 м, что можно объяснить изменениями типов пористости, минерального состава и состава порового флюида [62].

Новые возможности для анализа свойств и геологического строения резервуара представляет совместная интерпретация данных о теплопроводности и коэффициенте тепловой неоднородности. Коэффициент тепловой неоднородности образцов отражает структурно-текстурные особенности пород с характерным размером на уровне 0,5 – 2 см. Для обеих скважин коэффициент тепловой неоднородности варьирует в широком диапазоне (0,02 – 2,7) и характеризует как вертикальную зональность разреза, так и особенности двух разных блоков пласта, вскрытых скважинами *A* и *B*. Повышенные значения коэффициента тепловой неоднородности в пределах каждого образца следует связывать с локальными увеличениями трещиноватости, кавернозности, присутствием высокотеплопроводного пирита и пятнистым окремнением пород. Так, согласно рисунку 4.2, интервалы глубин х170 – 1178 м и х184 – 1189 м скважины *A* характеризуются одновременным понижением теплопроводности и объёмной теплоёмкости и повышением коэффициента тепловой неоднородности. Напротив, интервал глубин х178 – х184 м отличается одновременным повышением теплопроводности и объёмной теплоёмкости и понижением коэффициента тепловой неоднородности. Согласно данным таблицы 4.1, отмечаемое сочетание вариаций тепловых свойств в интервалах глубин х170 – х178 м и х184 – х189 м должно означать повышение пористости пород с заполнением порового пространства органическим веществом (нефтью), при этом повышенное значение коэффициента тепловой неоднородности в данных интервалах свидетельствует о том, что в пределах каждого образца пористость и содержание нефти распределяются не равномерно, а с локальными вариациями по образцу, т.е. имеет место очаговая пористость и неравномерное нефтенасыщение в пределах каждого образца. В то же время, на рисунке 4.2 выделяется интервал глубин х320 – х355 м с противоположными изменениями тепловых свойств, когда повышение теплопроводности сочетается с понижением объёмной теплоёмкости, при этом в данном интервале глубин существенно повышается коэффициент тепловой неоднородности. Подобное сочетание одновременных изменений тепловых свойств можно интерпретировать как признак повышенного содержания кварца в виде зёрен размером 0,5 – 2 см, так как теплопроводность кварца (7,60 Вт/(м·К) в агрегате [79]), значительно выше теплопроводности матрицы пород (2,9 – 3,3 Вт/(м·К) [62], см. разделы 3.3 и 4.5).

#### 4.3. Связь результатов теплофизического профилирования с пористостью по данным ГИС

Обобщенные для каждой скважины поля корреляции между теплопроводностью и пористостью, оценки коэффициента корреляции и уравнения регрессии по всем результатам измерений приведены на рисунке 4.4. В данном случае результаты измерений теплопроводности усредняли в интервалах глубин протяженностью 0,5 м для приведения в соответствие пространственных разрешающих способностей при определениях теплопроводности на керне и пористости по данным ГИС. Согласно оценке тесноты связи по критерию Стьюдента, для обеих скважин *A* и *B* коэффициенты корреляции между теплопроводностью и пористостью при столь значительных объёмах выборок являются значимыми. Для скважины *B* коэффициент корреляции (-0,88) существенно выше, чем для скважины *A* (-0,50). Это свидетельствует о том, что влияние минерального состава пород, типов пористости и состава порового флюида на теплопроводность пород, вскрытых скважиной *B*, является меньшим, чем влияние пористости, и говорит о незначительных вариациях этих факторов в целом в изучавшемся интервале глубин. Напротив, пониженное значение коэффициента корреляции для скважины *A* следует объяснить более частым присутствием в образцах пород скважины *A* зерен высокотеплопроводных пирита и кварца, что приводит к более существенным вариациям теплопроводности матрицы с глубиной для скважины *A*, о чём говорят повышенные локальные значения теплопроводности, регистрируемые по профилям теплопроводности для всех изучавшихся образцов скважины *A*. По найденным уравнениям регрессии, приведенным на рисунке 4.4, средние значения теплопроводности матрицы пород составляют 2,88 и 3,06 Вт/(м·К) соответственно для скважин *A* и *B* [62].

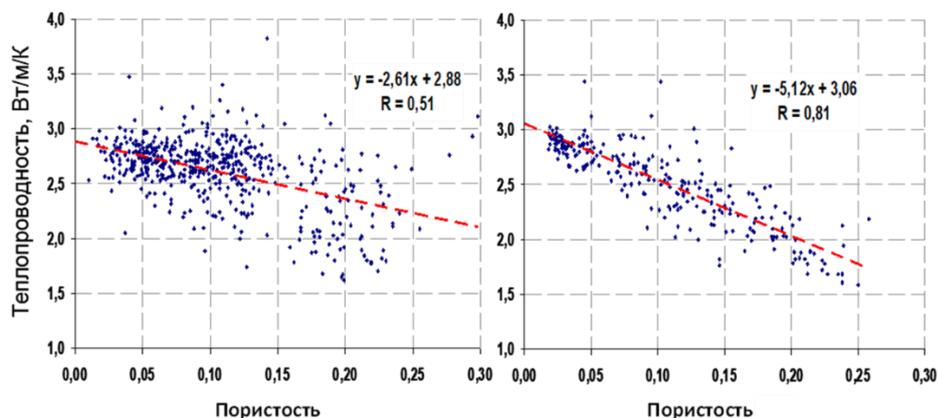


Рисунок 4.4. – Поля корреляции теплопроводности с пористостью (в данном случае общая пористость по данным ГИС) и соответствующие уравнения регрессии. Левая панель – данные для скважины *A*, правая панель – данные для скважины *B*. Данные о теплопроводности усреднены в интервале 0,5 м для приведения в соответствие с пространственной разрешающей способностью акустического каротажа [62].

По результатам теплофизического профилирования керна и определения пористости по данным ГИС установлена также значимая корреляция между объемной теплоемкостью пород и пористостью (рисунок 4.5), хотя теснота связи существенно уступает корреляции между теплопроводностью и пористостью. Коэффициенты корреляции между объемной теплоемкостью  $C$  и пористостью  $K_{п}$  составляют 0,29 для обеих скважин и являются значимыми при столь значительных объемах выборок. Уравнения регрессии имеют вид  $C=0,728 \cdot K_{п}+1,986$  МДж/(м<sup>3</sup>·К) для скважины *A* и  $C=0,491 \cdot K_{п}+2,157$  МДж/(м<sup>3</sup>·К) для скважины *B*. Согласно данным уравнениям регрессии, объемная теплоемкость минеральной матрицы пород скважины *A* и *B* составляет соответственно 1,99 и 2,16 МДж/(м<sup>3</sup>·К). Более высокая объемная теплоемкость пород скважины *B* может быть связана с повышенным окремнением пород скважины *A* и повышенной доломитизацией пород скважины *B* (с учетом того, что объемная теплоемкость кварца ниже, а доломита выше, чем для других основных породообразующих минералов изучавшихся пород). Полученные данные об объемной теплоемкости матрицы необходимы для гидродинамического моделирования процесса добычи тяжелой нефти при помощи тепловых методов. В среднем уровень объемной теплоемкости для пород скважины *A* составил на ~12% ниже, чем для скважины *B* [62].

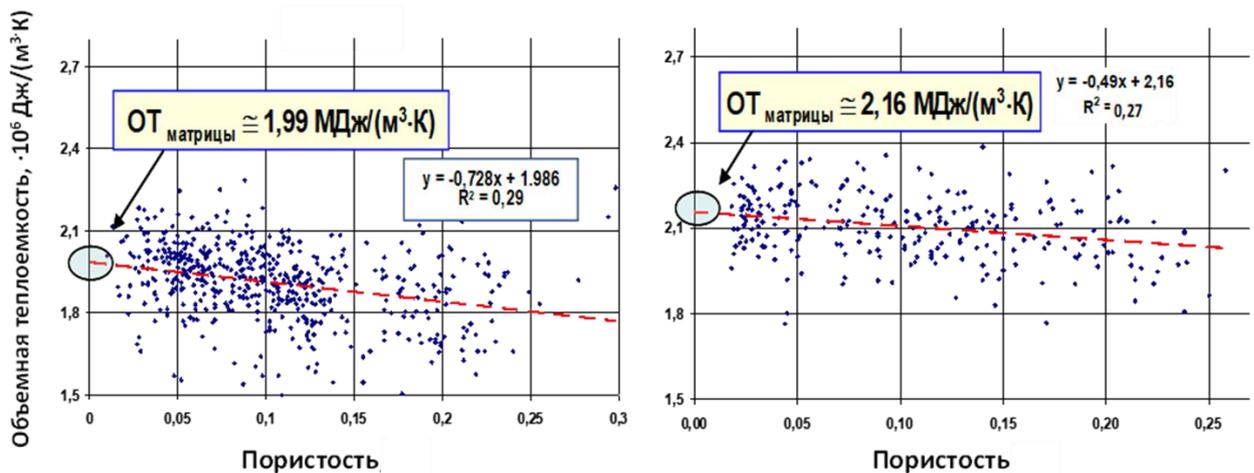


Рисунок 4.5. – Поля корреляции объемной теплоемкости с пористостью (здесь общая пористость по данным ГИС) и соответствующие уравнения регрессии. Левая панель – данные для скважины *A*, правая панель – данные для скважины *B*. Данные о теплопроводности усреднены в интервале 0,5 м для приведения в соответствие с пространственной разрешающей способностью каротажа пористости. На рисунке ОТ – объемная теплоемкость [62].

На рисунках 4.6 и 4.7 приведены распределения первичных результатов измерений средней теплопроводности для каждого образца керна и параметра (1-пористость) (здесь пористость – общая пористость пород, определявшаяся по данным плотностного каротажа) вдоль скважин *A* и *B*. На рисунках данные приведены как в общем виде для протяженных интервалов глубин (x150 – x450 м для скважины *A* на рисунке 4.6 *a* и x280 - x420 м для скважины *B* на рисунке 4.7), так и в более детальном виде: для скважины *A* для интервалов глубин x200 – x250 м (рисунок

4.6 б) и x300-x350 м (рисунок 4.6 в), для скважины Б для интервалов глубин x320 – x360 м (рисунок 4.7 б) и x360 - x400 м (рисунок 4.7 в). Параметр (1-пористость) использован здесь для облегчения визуального анализа совпадений вариаций теплопроводности и пористости вдоль каждой скважины. Из рисунка 4.6 а видно, что интервал глубин x150 – x170 м резко отличается от других интервалов характером связи теплопроводности и параметра (1-пористость), что объясняется тем, что изучавшиеся образцы керна не являются достаточно представительными по своей пористости для данного интервала глубин, характеризующегося в целом рыхлыми породами, которые не представлены керном. Для остальных участков интервала глубин x170 – x435 м в целом наблюдается совпадение зональности вертикальных вариаций теплопроводности и параметра (1-пористость), что соответствует результатам корреляционного анализа, описанным выше. Важно, что значительно более высокая пространственная разрешающая способность теплофизического профилирования (около 0,1 м для данных на рисунке 4.6, что соответствует осреднению теплопроводности в пределах каждого образца керна при средней длине образцов керна около 0,1 м) обеспечивает существенно более детальную информацию о структуре порового пространства пласта по сравнению с данными геофизических исследований скважины, пространственная разрешающая способность которых составляет около 0,5 м. Это, в частности, позволяет при помощи анализа вертикальных вариаций теплопроводности уточнить границы интервалов с изменениями пористости. Наблюдаемое в интервале x332 – x350 м расхождение в поведении теплопроводности и параметра (1-пористость) с повышенными значениями теплопроводности в диапазоне 2,8–3,3 Вт/(м·К) объясняется увеличением содержания в породах высокотеплопроводного кварца, что подтверждается и соответствующим понижением объёмной теплоёмкости (рисунок 4.2), характерным для кварца (для кварца  $C=1,89$  МДж/(м<sup>3</sup>·К) согласно [128] при  $C=2,2-2,5$  МДж/(м<sup>3</sup>·К), характерных для минеральной матрицы осадочных пород [59, 62]).

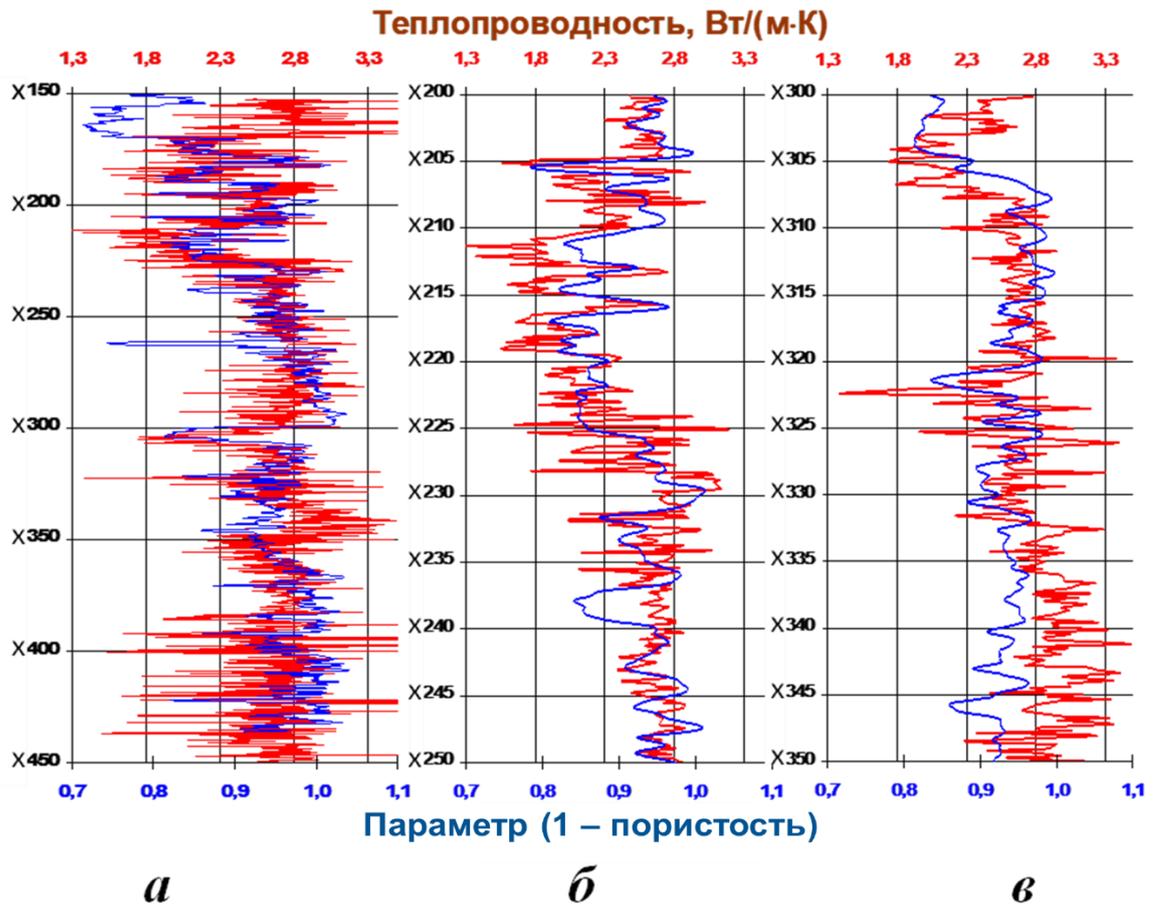


Рисунок 4.6. – Распределение теплопроводности и параметра (1-пористость) для скважины А в интервале глубин х150-х450 м (а) и в более детальном масштабе для интервалов глубин х200-х250 м (б) и х300-х350 м (в) [62].



что в данном интервале глубин преобладает межзерновой характер пористости, возможно сочетающийся с ее очаговым характером при размере очаговых участков менее длины образцов керн (в среднем  $\sim 0,1$  м) [62].

В интервале глубин  $x237 - x240$  м скважины *A* (рисунок 4.6 панель *б*, область, выделенная желтым эллипсом) наблюдается существенное нарушение соответствия вариаций теплопроводности и параметра (1-пористость), наблюдаемого в целом для остальных участков данного интервала. Поскольку в данном интервале глубин  $x237 - x240$  м наблюдается резкое понижение параметра (1-пористость), соответствующее повышению пористости, а теплопроводность остается стабильной, то такое сочетание вариаций теплопроводности и пористости позволяет сделать вывод о том, что в интервале глубин  $x237 - x240$  м преобладает каверновый тип пористости с наличием каверн, размеры которых превышают размеры образцов керн. Другими словами, в данном интервале керн не отражает в достаточной степени особенности пласта и свойства керн не соответствуют свойствам пласта, так как пористость, определяемая по керну, является существенно меньшей, чем средняя пористость пласта, определяемая, в основном, крупными кавернами [62].

Из сравнения данных на рисунках 4.6 *а* и 4.7 *а* следует, что связь теплопроводности и параметра (1-пористость) для скважины *B* гораздо стабильнее, чем для скважины *A*, что отмечалось и выше (рисунок 4.4). Нарушения этой связи для скважины *B* наблюдаются лишь в коротких интервалах глубин. Так, в интервалах глубин  $x325 - x326$  м (рисунок 4.6 *б*),  $x367 - x371$  м,  $x377 - x378$  м,  $x380 - x381$  м,  $x383 - x384$  м (рисунок 4.7 *в*) нарушение этой связи сопровождается повышениями теплопроводности, что, согласно анализу образцов керн, обусловлено с повышением в породах содержания высокотеплопроводных доломита (5,5–6,2 Вт/(м·К), [79]), кварца или пирита. Нарушение связи теплопроводности и пористости, сопровождающееся понижением теплопроводности, как, например, в интервалах глубин  $x357 - x358$  м скважины *B* (рисунок 4.6 *б*) и  $x208 - x213$  м скважины *A* (рисунок 4.6 *б*), может быть связано с вариациями состава порового флюида [62].

Тесная корреляционная связь теплопроводности и пористости – для скважины *B* практически вдоль всей скважины (рисунок 4.7), а для скважины *A* в большинстве интервалов глубин (рисунок 4.6) - позволяет в интервалах глубин с высокой степенью данной корреляции преобразовать профили теплопроводности, зарегистрированные для образцов керн, в профили пористости для этих образцов при помощи установленных уравнений регрессии, как это показано на рисунке 4.8. Такая, фактически экспрессная, детализация распределения пористости вдоль образцов пород практически недоступна для исследований подобного объёма коллекций керн другими методами [62].

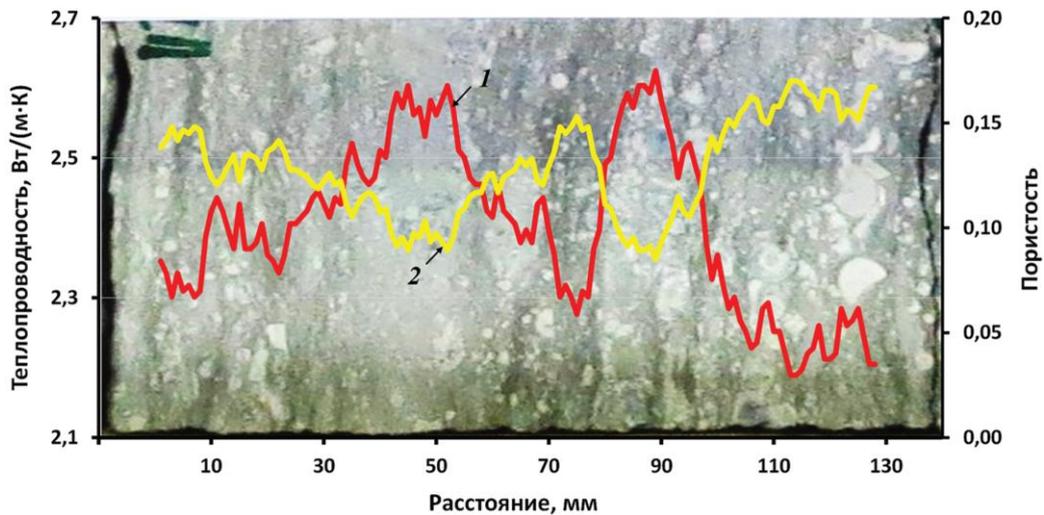


Рисунок 4.8. – Преобразование профилей теплопроводности (1) в профили пористости (2) образцов [62].

На рисунке 4.9 приведены распределения первичных результатов измерений теплопроводности (пространственная разрешающая способность  $\sim 10$  см, так как результаты профилирования усреднялись для каждого образца керна) и параметра (1-пористость) (для результатов ГИС пространственная разрешающая способность составляет около 50 см) для участка глубин  $x200$ - $x250$  м скважины А. Из данных на рисунке 4.9 можно сделать следующие выводы [62]:

- значительно более высокая пространственная разрешающая способность теплофизического профилирования ( $\sim 1$  мм для профиля теплопроводности по образцу и около 10 см для профиля теплопроводности вдоль скважины при усреднении теплопроводности для каждого образца керна) позволяет получить более детальную информацию о структуре порового пространства по сравнению с данными ГИС (пространственная разрешающая способность около 0,5 м) и уточнить границы интервалов изменений пористости;
- в интервалах глубин  $x200$ - $x232$  м, 240-250 м в целом наблюдается близкий характер вариаций теплопроводности и параметра (1-пористость), особенно в интервале глубин, выделенном на рисунке голубым эллипсом; близкий характер вариаций результатов теплофизического профилирования и данных ГИС о параметре (1-пористость), наблюдаемый несмотря на существенное различие в пространственной разрешающей способности двух методов измерений при известной тесной корреляции между теплопроводностью и пористостью при наличии межзерновой пористости, позволяет сделать заключение о том, что в данных интервалах глубин преобладать должна межзерновая пористость;
- совместный анализ вариаций теплопроводности и пористости позволяет сделать заключение о том, что в интервале глубин  $x236$  –  $x240$  м преобладает каверновый тип пористости; очевидно, что результаты ГИС при их разрешающей способности около 0,5 м способны зарегистрировать крупномасштабные пустоты (по своим размерам способные

выходить за размеры отдельных образцов керна), которые не могут быть адекватно отражены в результатах профилирования образцов керна [62].

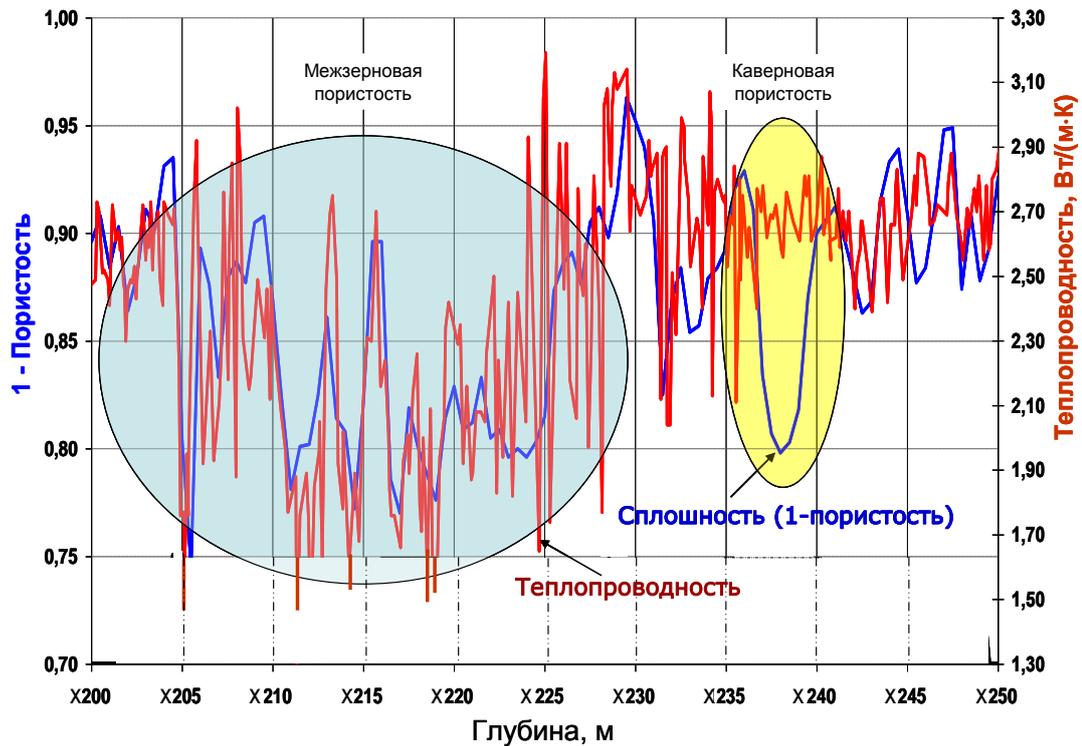


Рисунок 4.9. – Связь теплопроводности с данными ГИС по пористости и детализация структуры пористости пласта по результатам измерений теплопроводности для скважины А [62].

#### 4.4. Степень тепловой неоднородности образцов пород как информативный параметр при анализе неоднородности разреза скважин

Данные о распределении максимальных и минимальных значений теплопроводности в пределах каждого образца, полученные при непрерывном сканировании вдоль оси керна и приведенные на рисунке 4.10 для скважин А и В вместе с данными о соответствующем коэффициенте тепловой неоднородности (обозначен символом  $\beta$ ), позволяют для каждого образца керна охарактеризовать причину неоднородности образца. Повышение локальных значений теплопроводности в пределах образца может быть обусловлено локальными повышениями содержания кварца и пирита, понижениями пористости, трещиноватости и нефтенасыщенности образцов. Причинами локального понижения теплопроводности в отдельных зонах каждого образца керна могут являться локальные повышения пористости и трещиноватости, повышения нефтенасыщенности и содержания глинистых минералов. Данные на рисунке 4.10 о вариациях максимального и минимального значений теплопроводности с глубиной показывают существенное различие в причинах неоднородности пород, связанных как с проявлениями очаговой пористости, глинистости и трещиноватости (приводящим к

понижению минимальной теплопроводности), так и локальными пятнистыми окремнением или пиритизацией пород (приводящими к повышению максимальной теплопроводности) [62].

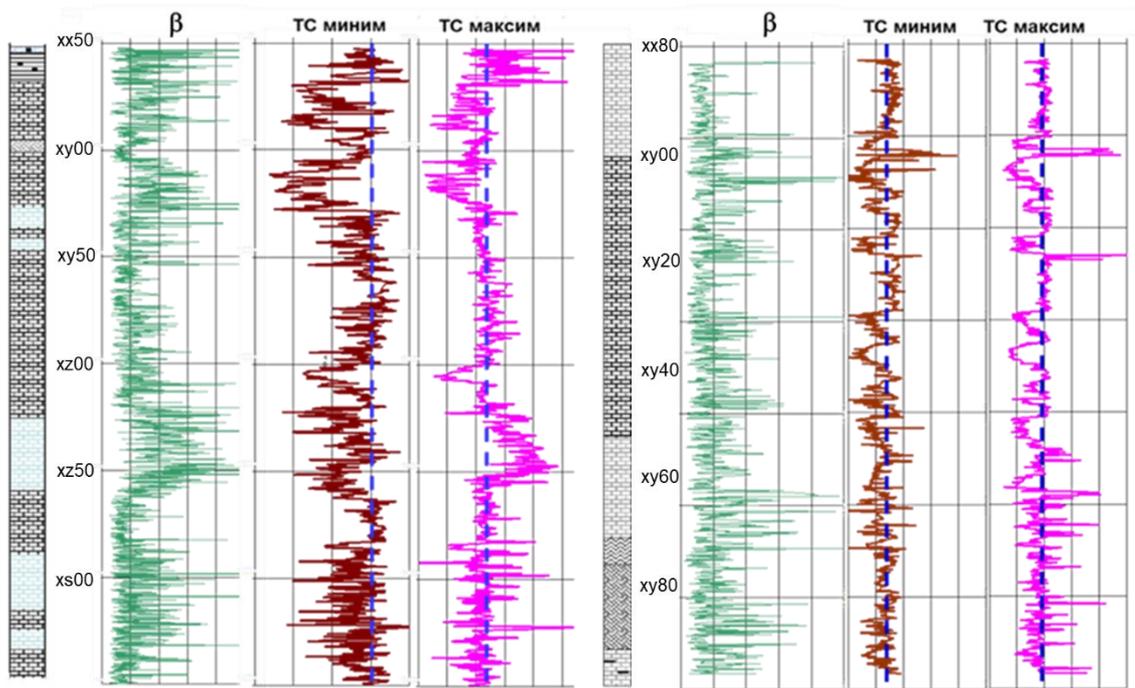


Рисунок 4.10. - Распределение коэффициента тепловой неоднородности и максимальных и минимальных значений теплопроводности, зарегистрированных в пределах каждого образца, вдоль скважин *A* (левая панель) и *B* (правая панель) [62].

Поскольку для скважины *B* установлена тесная связь между теплопроводностью и пористостью (рисунки 4.4 и 4.7), коэффициент тепловой неоднородности для участка бурения этой скважины отражает собой, по сути, коэффициент вариации пористости в масштабе от  $\sim 0,1$  м (средний размер образцов керна) и выше. Такой же смысл имеет коэффициент тепловой неоднородности для интервалов глубин скважины *A* с тесной корреляцией между теплопроводностью и пористостью (рисунок 4.5) [62].

Сравнение значений коэффициентов тепловой неоднородности для двух скважин на рисунке 4.10 показывает, что породы скважины *A* характеризуются более значительными вариациями теплопроводности в масштабе  $\sim 0,1$  м, что можно связать с их повышенной трещиноватостью, кавернозностью, повышенным влиянием локального окремнения и пиритизации. В то же время, из сравнения вертикальных вариаций средних для каждого образца керна значений теплопроводности для двух скважин (рисунки 4.2 и 4.3) можно сделать вывод, что для пород скважины *B* характерны гораздо более существенные вариации теплопроводности в масштабе 2-20 м, что можно связать с более крупномасштабными изменениями типов пористости, минерального состава и состава порового флюида по глубине скважин [62].

Данные на рисунке 4.11 отражают результаты определения коэффициента тепловой неоднородности пород  $\beta$  при профилировании каждого образца керна как вдоль его оси (индекс

«пар» на рисунке), так и поперек нее (индекс «перп»). Результаты характеризуют различие в степени неоднородности пород как в целом для скважин, так и для разных направлений сканирования. Из рисунка 4.11 следует, что породы, вскрытые скважиной *A*, существенно более неоднородны для обоих направлений сканирования, чем для скважины *B*. Средние значения  $\beta$  для скважины *A* для обоих направлений сканирования керна в 1,4 раза выше, чем для скважины *B* [62].

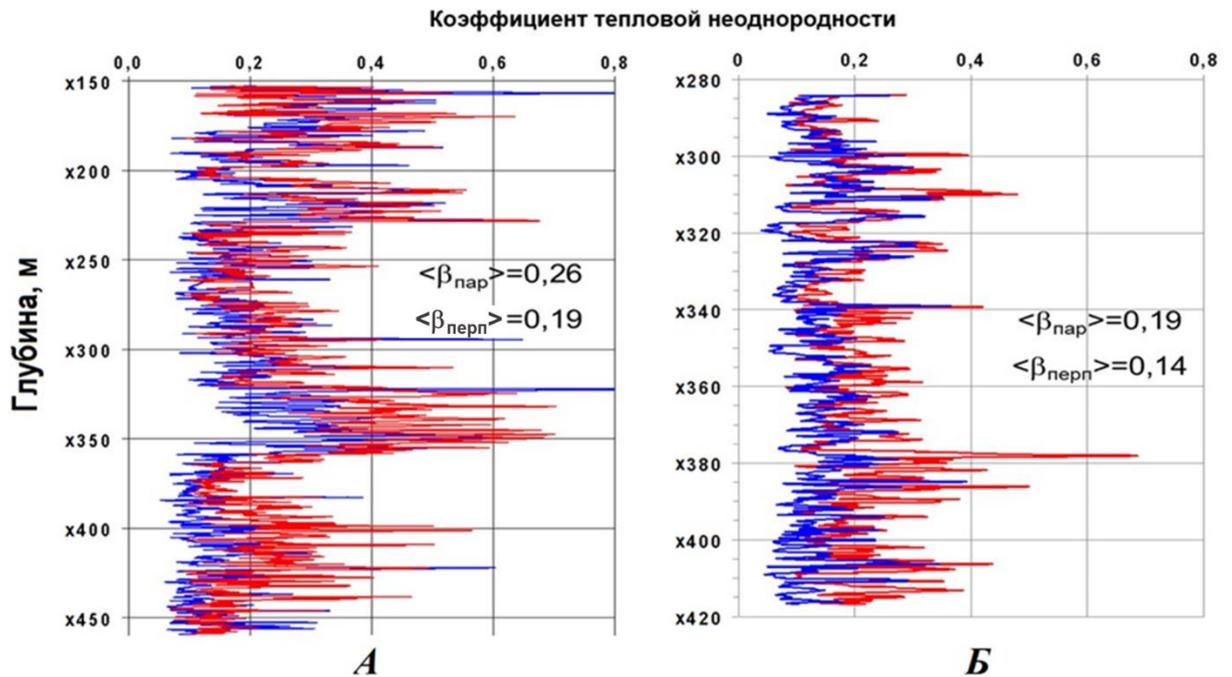


Рисунок 4.11. - Различия в коэффициентах тепловой неоднородности пород для скважин *A* (левая панель) и *B* (правая панель) при взаимно-перпендикулярных направлениях сканирования керна [62].  $\beta_{\text{пар}}$  – коэффициент тепловой неоднородности, регистрируемый при сканировании вдоль оси керна,  $\beta_{\text{перп}}$  – коэффициент тепловой неоднородности, регистрируемый при сканировании поперек оси керна.

Результаты измерений, приведенные на рисунке 4.11, показывают, что в интервалах глубин x275 – x453 м для скважины *A* и x318 – x418 для скважины *B* коэффициент тепловой неоднородности, регистрируемый при сканировании вдоль оси керна (поперек напластования), систематически и существенно выше, чем его значения при сканировании в поперечном направлении, что означает наличие в данных интервалах глубин упорядоченной (ориентированной) неоднородности пород, характеризующей макроанизотропию свойств пласта и обусловленной их преимущественной неоднородностью в направлении оси керна (причины - неяснослоистая, косослоистая текстуры, неравномерное, пятнисто-слоистое распределение пор). Из рисунка 4.12 также следует, что породы, вскрытые скважиной *A*, существенно более неоднородны для обоих направлений сканирования, чем породы, вскрытые скважиной *B*. Как выше указывалось, средние значения коэффициента тепловой неоднородности для скважины *A* для каждого направления сканирования керна существенно (приблизительно на 40%) выше, чем

для скважины *Б*. Согласно данному выше определению коэффициента тепловой неоднородности, повышение коэффициента тепловой неоднородности может быть обусловлено в основном следующими факторами: 1) увеличением максимального значения теплопроводности, что связано для данного пласта с пятнистым окварцеванием, доломитизацией или пиритизацией; 2) понижением минимального значения теплопроводности, что связано с проявлением очаговой пористости с заполнением пор нефтью, существенно менее теплопроводной, согласно таблице, чем пластовая вода; 3) сочетанием первого и второго факторов одновременно.

На рисунке 4.12 представлены фотографии образцов пород, подтверждающие слоистую текстуру изучавшихся пород [62].

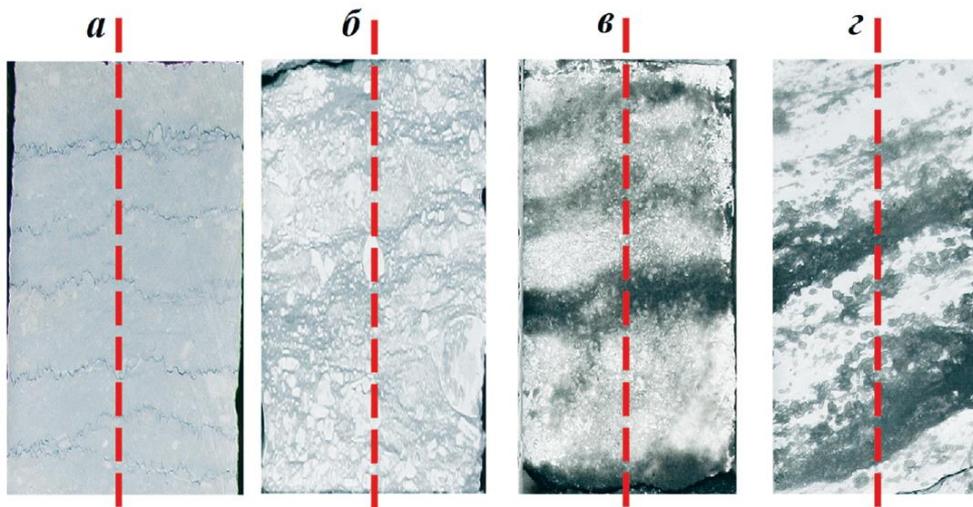


Рисунок 4.12. - Текстурные особенности, обуславливающие упорядоченную (ориентированную) неоднородность пород: *а* – стилолитовая, *б* – неяснокослоистая, *в* и *г* – неравномерное, пятнисто-слоистое распределение пор (по заключению Р.А. Ромушкевич). Красные пунктирные линии – линии оптического сканирования при теплофизическом профилировании вдоль оси зерна [62].

Систематическое отличие коэффициента тепловой неоднородности для направления сканирования вдоль оси зерна от его значения для направления в поперечном направлении, т.е. значимое различие в степени неоднородности пород для двух взаимно перпендикулярных направлений сканирования, означает наличие упорядоченной (ориентированной) неоднородности пород в масштабе образцов зерна с преимущественно горизонтальным (или субгоризонтальным) залеганием слоев, отличающихся по теплопроводности, что характеризует макроанизотропию свойств пласта на уровне образцов зерна. На рисунке 4.13 приведены распределения степени различия между коэффициентами тепловой неоднородности  $\beta$  для двух направлений сканирования, определявшейся по отношению  $\beta_{\text{нар}}/\beta_{\text{перп}}$ . Из рисунка 4.13 видно, что степень этого различия, т.е. степень тепловой макроанизотропии, монотонно увеличивается с глубиной, при этом как абсолютные значения отношения  $\beta_{\text{нар}}/\beta_{\text{перп}}$ , так и быстрота возрастания данного отношения с глубиной различаются для скважин *А* и *Б*. Данные на рисунке 4.14

показывают существенную дифференцированность и зональность разрезов обеих скважин по степени макроанизотропии. Выявленные закономерности требуют дополнительного анализа и могут предоставить важную информацию об особенностях пород пласта, вскрытых скважинами *A* и *B*.

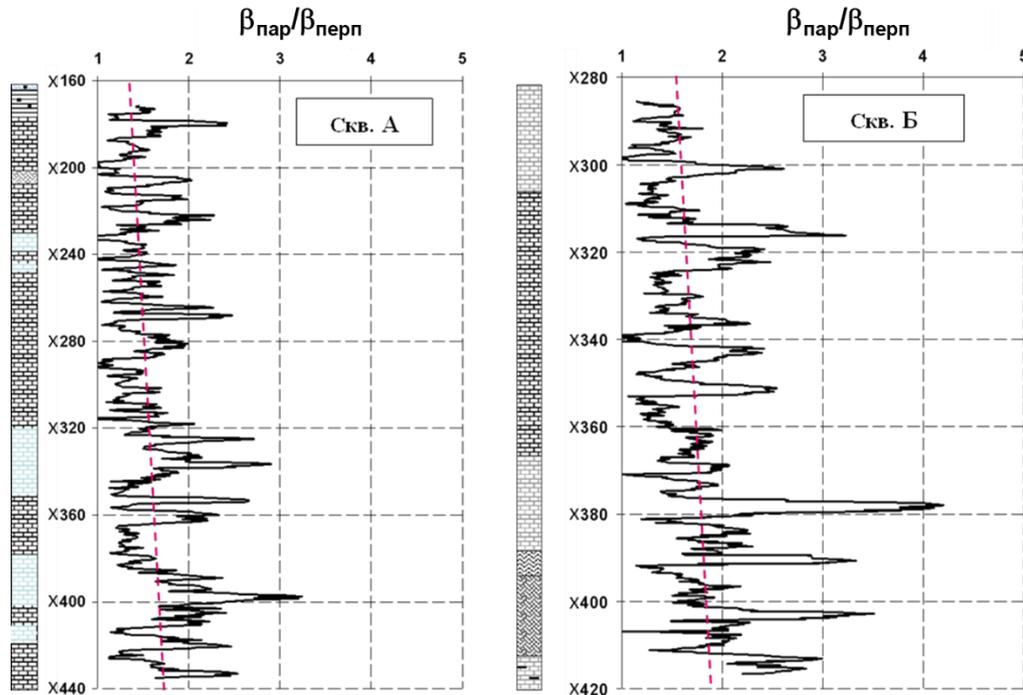


Рисунок 4.13. - Выделение зон ориентированной неоднородности (макроанизотропии) пород пласта по сравнению коэффициента тепловой неоднородности для разных направлений профилирования.

Дополнительные возможности для расчленения разреза представляет совместный анализ вертикальных вариаций коэффициента тепловой неоднородности и пористости. Первичные результаты измерений этих параметров вдоль всей скважины *A* представлены на рисунке 4.14. На рисунке 4.15 эти же данные представлены для двух более коротких интервалов в более удобном для детального анализа масштабе. Из данных на рисунках 4.14 и 4.15 следует, что в большинстве интервалов глубин наблюдается идентичность в зональности пористости и коэффициента тепловой неоднородности (см., например, данные для интервала глубин x350-x400 м на нижней панели рисунке 4.15). Поскольку пространственное разрешение при измерениях пористости составляет около 0,5 м, а при регистрации максимальных и минимальных в пределах образца значений теплопроводности, определяющих коэффициент тепловой неоднородности,  $\sim 0,005$  м по профилю каждого образца и  $\sim 0,1$  м для данных на рисунках 4.14 и 4.15. Это означает, что детальные данные о коэффициенте тепловой неоднородности дают возможность оценки структуры вариаций пористости также в масштабе от  $\sim 0,005$  м, что приблизительно в 100 раз лучше разрешающей способности при определениях пористости по данным ГИС. Наблюдаемые в некоторых узких интервалах глубин существенные локальные расхождения в вариациях

пористости и коэффициента тепловой неоднородности (интервалы x237...x239 м на верхней панели рисунка 4.16, а также x370...x371 м, x383...x386 м, x391,5...x392,5 м на нижней панели рисунке 4.16) должны свидетельствовать о каверновом характере пористости в этих интервалах, поскольку свойства образцов керна при крупномасштабной каверновой пористости не могут надежно охарактеризовать свойства всего пустотного пространства в этой части пласта.

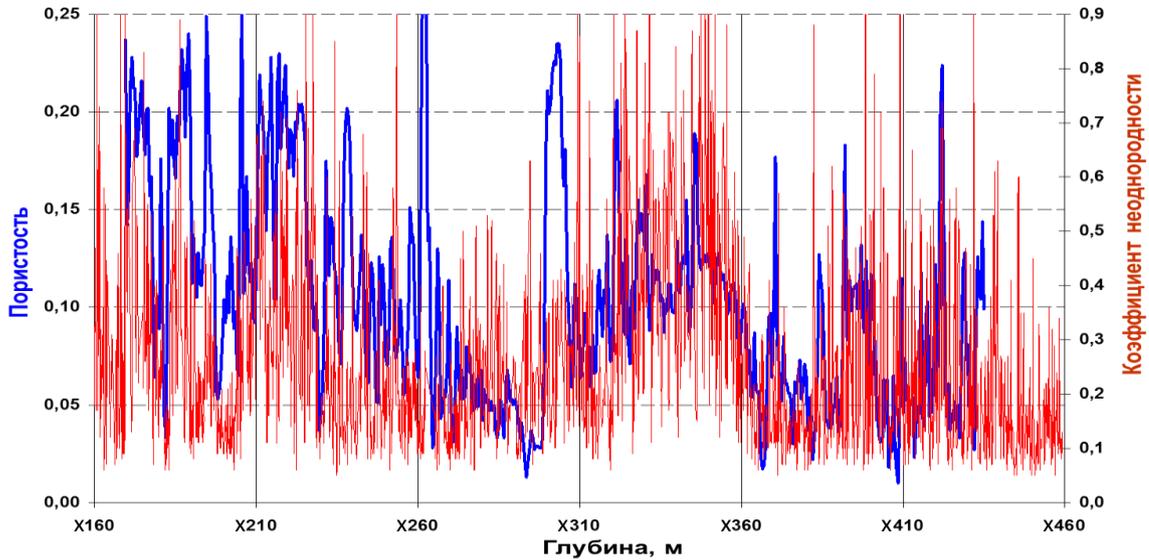


Рисунок 4.14. - Зональность распределений коэффициента тепловой неоднородности и пористости (первичные данные) для скважины А. Синяя линия – данные о пористости, красная линия – данные о коэффициенте тепловой неоднородности.

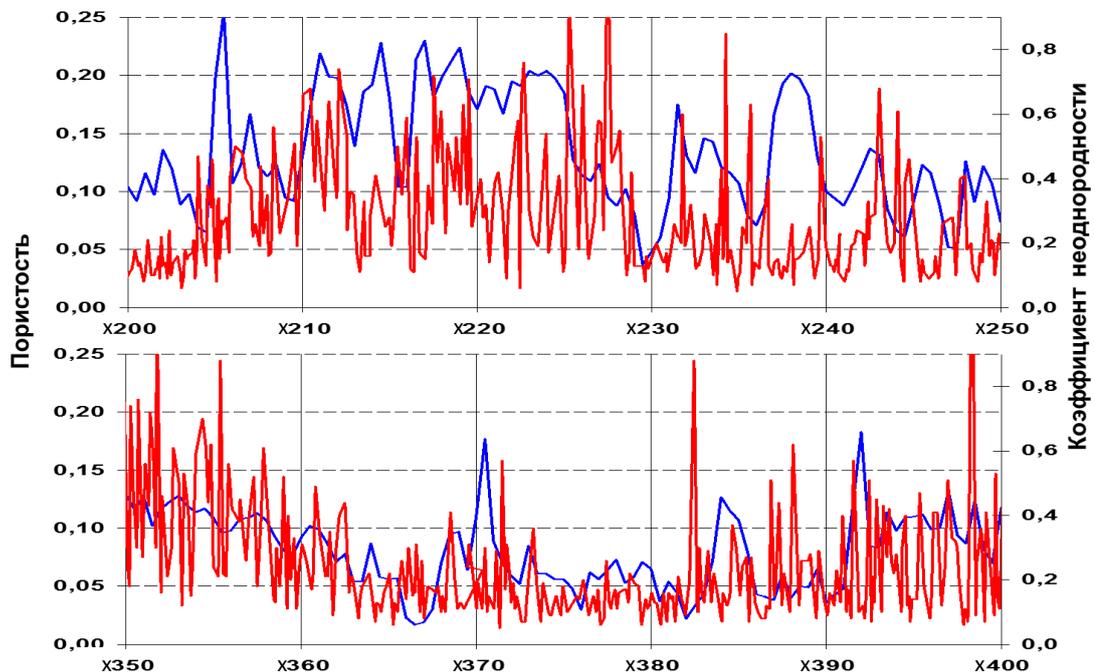


Рисунок 4.15. - Связь тепловой неоднородности пород, вскрытых скважиной А, с пористостью (данные ГИС) в разных интервалах глубин. Синяя линия – данные о пористости, красная линия – данные о коэффициенте тепловой неоднородности.

Поля корреляции между коэффициентом тепловой неоднородности и значениями  $\lambda_{мин}$  и  $\lambda_{макс}$  на рисунке 4.16 показывают, что для скважины Б коэффициент тепловой неоднородности

обусловлен, главным образом, значениями параметра  $\lambda_{\min}$ , т.е. наличием в образцах пород локальных областей с пониженной теплопроводностью (главным образом - очаговая пористость, а также повышенная глинистость и трещиноватость). Из рисунка 4.16 следует также, что для скважины *A* наряду с влиянием этих факторов проявляется и влияние параметра  $\lambda_{\max}$ , что свидетельствует о существенном влиянии участков образцов пород с повышенной теплопроводностью (пятна кварца, халцедона, повышенной пиритизации) на свойства пород.

Анализ влияния различных факторов на установленные разномасштабные вариации тепловых свойств пород показывает, что для пород скважины *B* эти вариации свидетельствуют, в основном, о пятнистом характере распределения участков повышенной пористости в пределах образца при относительно стабильном минеральном составе пород. Для скважины *A* тепловая неоднородность пород свидетельствует как о пятнистом характере распределения участков повышенной пористости, так и о вариациях минерального состава в пределах образца.

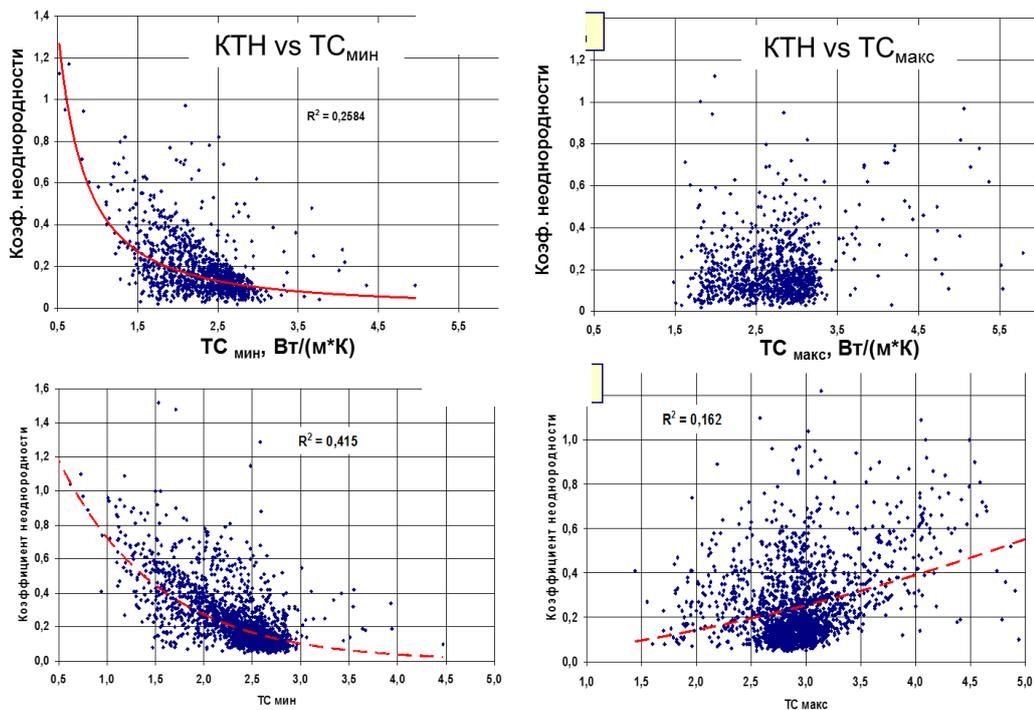


Рисунок 4.16. - Данные о степени влияния значений минимальной и максимальной теплопроводности пород, зарегистрированных в пределах каждого образца керна, на коэффициент тепловой неоднородности пород, вскрытых скважинами *A* (слева) и *B* (справа).

Таким образом, непрерывная регистрация вариаций комплекса тепловых свойств и коэффициента тепловой неоднородности пород вдоль скважины по керну и анализ этих данных как самостоятельно, так и в совокупности с данными ГИС, позволили осуществить анализ зональности свойств пласта, уточнить структуру пустотного пространства пород, предоставили информацию для уточнения границ зон нефтенасыщенности.

#### **4.5. Определение тепловых свойств минеральной матрицы по результатам теплофизического профилирования керн и каротажа пористости**

Как указывалось в главе 1, практически все современные бассейновые и термогидродинамические симуляторы предусматривают ввод исходных данных о тепловых свойствах пород пласта и вмещающих пород при помощи теоретических моделей, позволяющих определять эффективные тепловые свойства пород по информации о тепловых свойствах минеральной матрицы, пористости, составе порового флюида и тепловых свойствах отдельных компонент порового флюида (газ, нефть, вода). Данные о теплопроводности и объемной теплоемкости матрицы пород продуктивного пласта и вмещающих пород являются обязательной исходной информацией при термогидродинамическом моделировании процесса добычи тяжелой нефти при любых видах теплового воздействия на пласт.

В разделе 3.3 представлены результаты определения тепловых свойств минеральной матрицы пород путем измерений теплопроводности на коллекциях стандартных образцов пород при использовании данных о пористости, получаемых для этих образцов путем лабораторных измерений или по данным ГИС для соответствующих интервалов глубин. В разделе 4.3 показано, что среднюю по скважине теплопроводность минеральной матрицы можно определять по результатам анализа корреляции между данными профилирования теплопроводности и данными о пористости, получаемыми по результатам ГИС.

Автором предложен еще один подход к определению теплопроводности и объемной теплоемкости минеральной матрицы пород с регистрацией детальных вариаций этих свойств вдоль скважин. Этот подход основан на анализе корреляционной связи между теплопроводностью и пористостью в каждом коротком интервале глубин (в случае скважин *A* и *B* Усинского месторождения тяжелой нефти протяженность таких интервалов была выбрана в 8 м) с переходом к соседнему интервалу глубин со сдвигом на короткое расстояние (в нашем случае 2 м). Для анализа корреляции результаты профилирования теплопроводности и объемной теплоемкости усреднялись в интервалах глубин 0,5 м для приведения в соответствие представительности данных о пористости (пространственное разрешение каротажа, по данным которого определялась пористость, составляло 0,5 м) и тепловых свойствах. Интервал 8 м был выбран как близкий к оптимальному, поскольку в таком случае анализируемый объем выборки по теплопроводности и пористости составлял 17 элементов в каждом интервале глубин, что можно рассматривать как достаточно представительную выборку. Порог значимости коэффициента корреляции при доверительной вероятности 0,95 составляет в таком случае 0,482 [94]. При анализе полей корреляции в отдельных интервалах глубин в некоторых случаях при проверке при помощи критерия Пирсона [94] исключались аномальные значения теплопроводности, обусловленные случайными нехарактерными для массива включения

высокотеплопроводного пирита (теплопроводность пирита 41,4 Вт/(м·К) [79]). Всего было проанализирован 561 интервал глубин протяженностью 8 м каждый, при этом было всего выявлено и удалено 16 аномальных пар теплопроводности и коэффициента пористости для скважины *A* и 13 аномальных пар для скважины *B*.

На рисунках 4.17 и 4.18 приведены вертикальные вариации теплопроводности пород и коэффициентов корреляции между теплопроводностью и пористостью вдоль скважин *A* и *B*. Как следует из данных рисунков, скважины *A* и *B* существенно отличаются по вариациям коэффициентов корреляции вдоль скважин. Если для скважины *A* коэффициент корреляции является значимым для меньшей части глубины скважины, то для скважины *B* тесная связь между теплопроводностью и пористостью характерна практически вдоль всей скважины за исключением коротких интервалов глубин  $x380-x395$  м и  $x405-x415$  м. Для каждого интервала глубин протяженностью 8 м со значимой корреляцией по найденным уравнениям регрессии определены значения теплопроводности матрицы пород (рисунки 4.17 и 4.18), которая варьирует с глубиной в диапазоне 2,42-3,30 Вт/(м·К) вдоль скважины *A* и 2,78-3,36 Вт/(м·К) вдоль скважины *B* (соответственно рисунки 4.17 и 4.18). Сравнение этих данных о вариациях теплопроводности матрицы вдоль скважин с результатами оценки средней теплопроводности матрицы, сделанными в разделе 4.3 по данным, приведенным на рисунке 4.4 для скважины *B* (3,06 Вт/(м·К)), показывает, что установленная существенная зональность теплопроводности вдоль скважины должна учитываться при термогидродинамическом моделировании в свете установленной ранее высокой чувствительности результатов моделирования резервуаров тяжелой нефти при тепловых методах добычи к неопределенностям в данных о тепловых свойствах пород.

Снижение тесноты корреляционной связи теплопроводности и пористости или ее отсутствие, а также переход от отрицательной корреляции этих свойств к положительной, что характерно в значительной степени для большей части скважины *A*, свидетельствует о том, что влияние пористости пород затушевывается влиянием возрастающего присутствия высокотеплопроводных минералов (кварц, пирит), также резкими колебаниями нефтенасыщенности пород в интервалах высокой пористости.

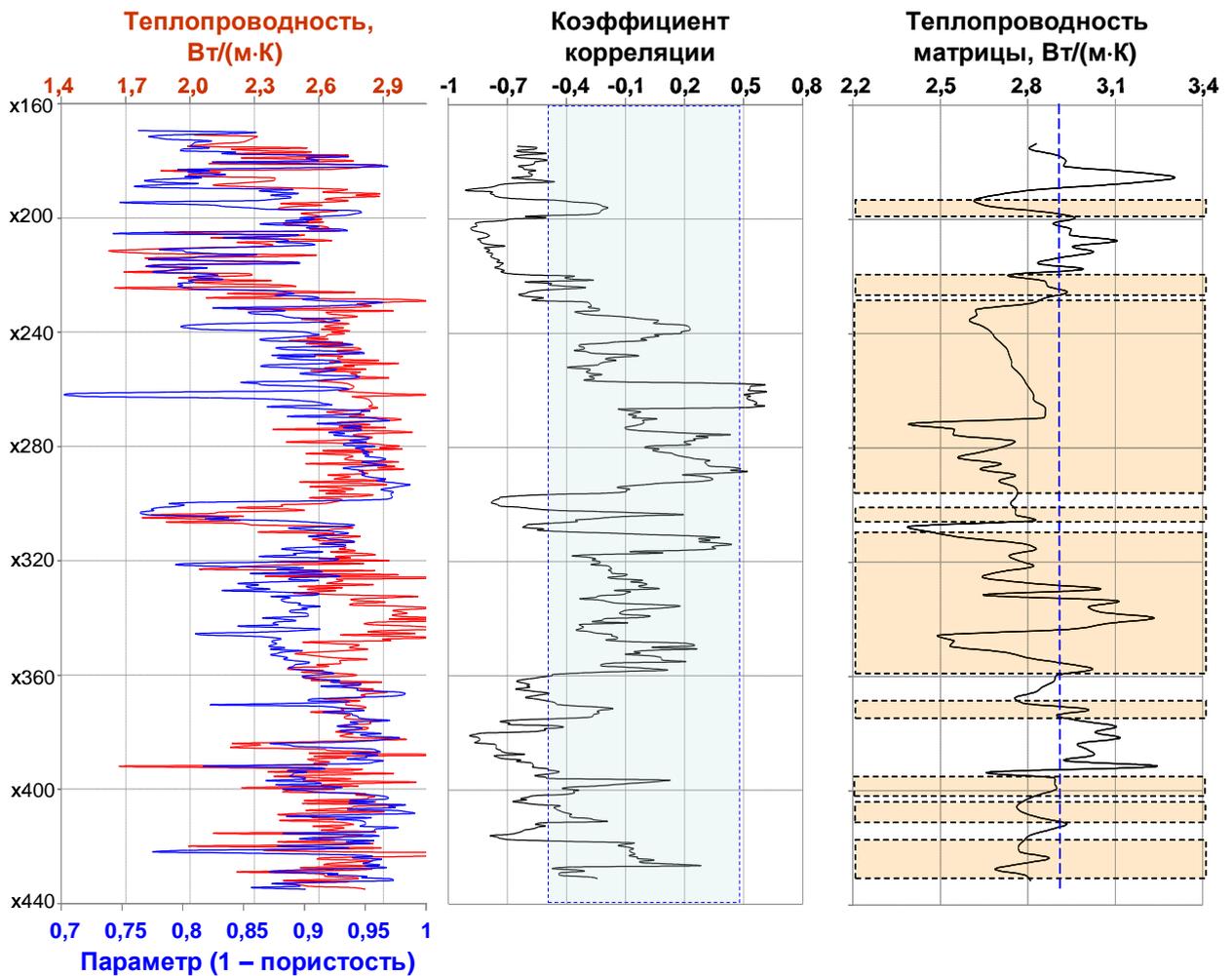


Рисунок 4.17. - Вертикальные вариации теплопроводности и пористости пород (общая пористость по данным ГИС), коэффициента корреляции между ними и теплопроводности минеральной матрицы пород, оцененной по уравнениям регрессии для корреляции между теплопроводностью и пористостью в коротких интервалах глубин, для скважины А. Голубым полем выделена область, в которой коэффициент корреляции имеет значение, меньше значимого уровня (0,482 при доверительной вероятности 0,95) для объема выборки 17 элементов. Голубая пунктирная линия на правой панели отмечает уровень средней теплопроводности матрицы 2,88 Вт/(м·К), соответствующий рисунку 4.4. Желтым полем выделены интервалы глубин, для которых коэффициент корреляции имеет значения меньше значимого уровня.

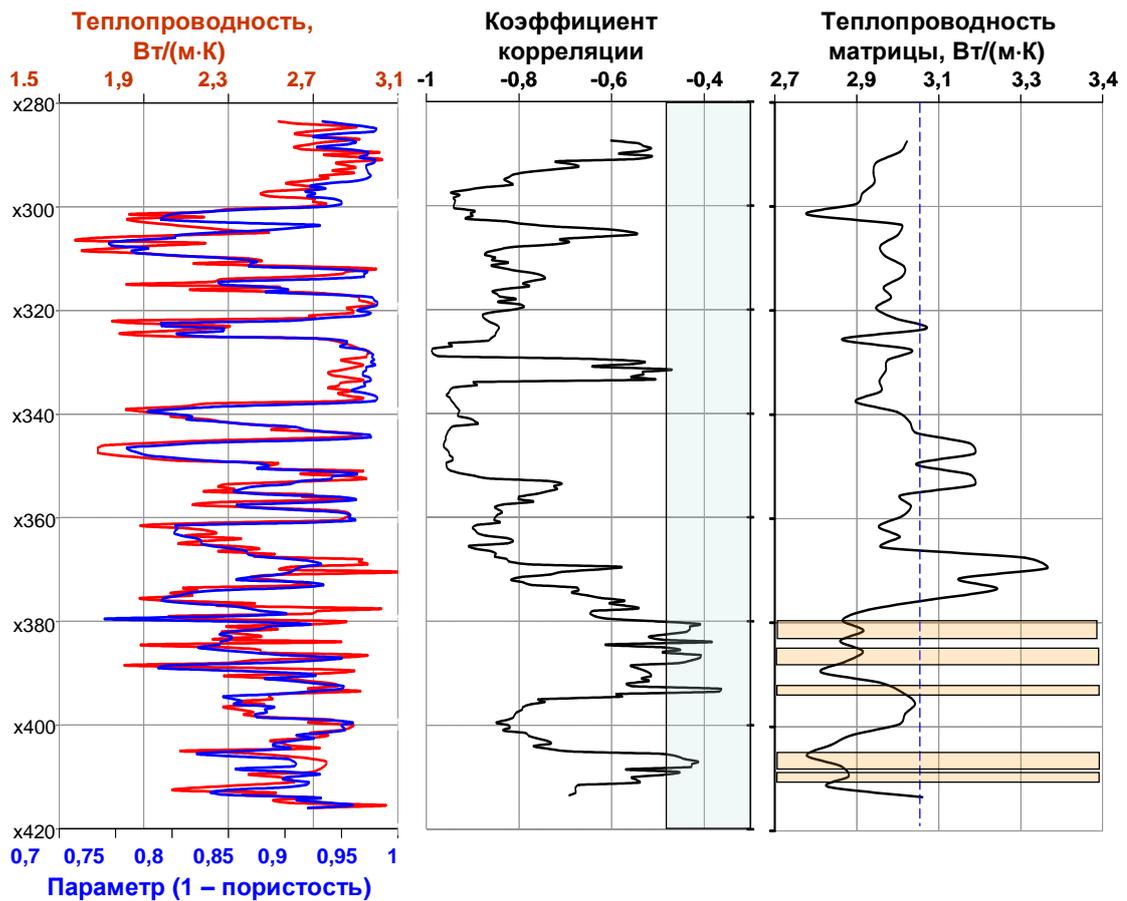


Рисунок 4.18. - Вертикальные вариации теплопроводности и пористости пород (общая пористость по данным ГИС), коэффициента корреляции между ними и теплопроводности минеральной матрицы пород, оцененной по уравнениям регрессии для корреляции между теплопроводностью и пористостью в коротких интервалах глубин, для скважины Б. Голубым полем выделена область, в которой коэффициент корреляции имеет значение, меньшее значимого уровня (0,482 при доверительной вероятности 0,95) для объема выборки 17 элементов. Голубым полем на средней панели выделена область, в которой коэффициент корреляции имеет значение, меньшее значимого уровня (0,482 при доверительной вероятности 0,95) для объема выборки 17 элементов. Голубая пунктирная линия на правой панели отмечает уровень средней теплопроводности матрицы 3,06 Вт/(м·К), соответствующий рисунку 4.4. Розовым полем на правой панели выделены интервалы глубин, для которых коэффициент корреляции имеет значения меньше значимого уровня.

Предложенный подход позволил впервые в практике геофизических работ улучшить обеспечение детальными данными о вертикальных вариациях теплопроводности матрицы пород разработку эффективных технологий добычи тяжелой нефти, осуществляемую на основе термогидродинамического моделирования процессов тепломассопереноса в резервуарах.

Оценка вариаций объемной теплоемкости минеральной матрицы пород оказалась возможной лишь в отдельных интервалах глубин обеих скважин, так как степень связи объемной теплоемкости пород с пористостью (раздел 4.3) оказалась невысокой для большей части обеих скважин А и Б. Причинами этого являются существенно меньший диапазон вариаций объемной теплоемкости по сравнению с теплопроводностью в сочетании, к тому же, с менее высокой точностью измерений объемной теплоемкости по сравнению с теплопроводностью (раздел 4.1).

#### 4.6. Взаимосвязь вариаций теплопроводности с вариациями скорости продольной упругой волны и плотности пород

На левой и средней панелях рисунков 4.19 и 4.20 приведено сопоставление вертикальных вариаций теплопроводности пород, зарегистрированной при непрерывном теплофизическом профилировании керна скважин *A* и *B*, с вариациями скорости продольной упругой волны (данные акустического каротажа) и плотности (данные гамма-гамма плотностного каротажа). Хорошее соответствие вертикальных вариаций всех этих свойств обусловлено тем, что пористость коллекторов и значительные контрасты этих свойств для порового флюида и минеральной матрицы являются главными факторами, влияющими на эти свойства пород, в условиях меньшей чувствительности данных свойств к вариациям минерального состава, геометрии порового пространства и состава флюида в пределах интервалов, где зональность свойств хорошо совпадает.

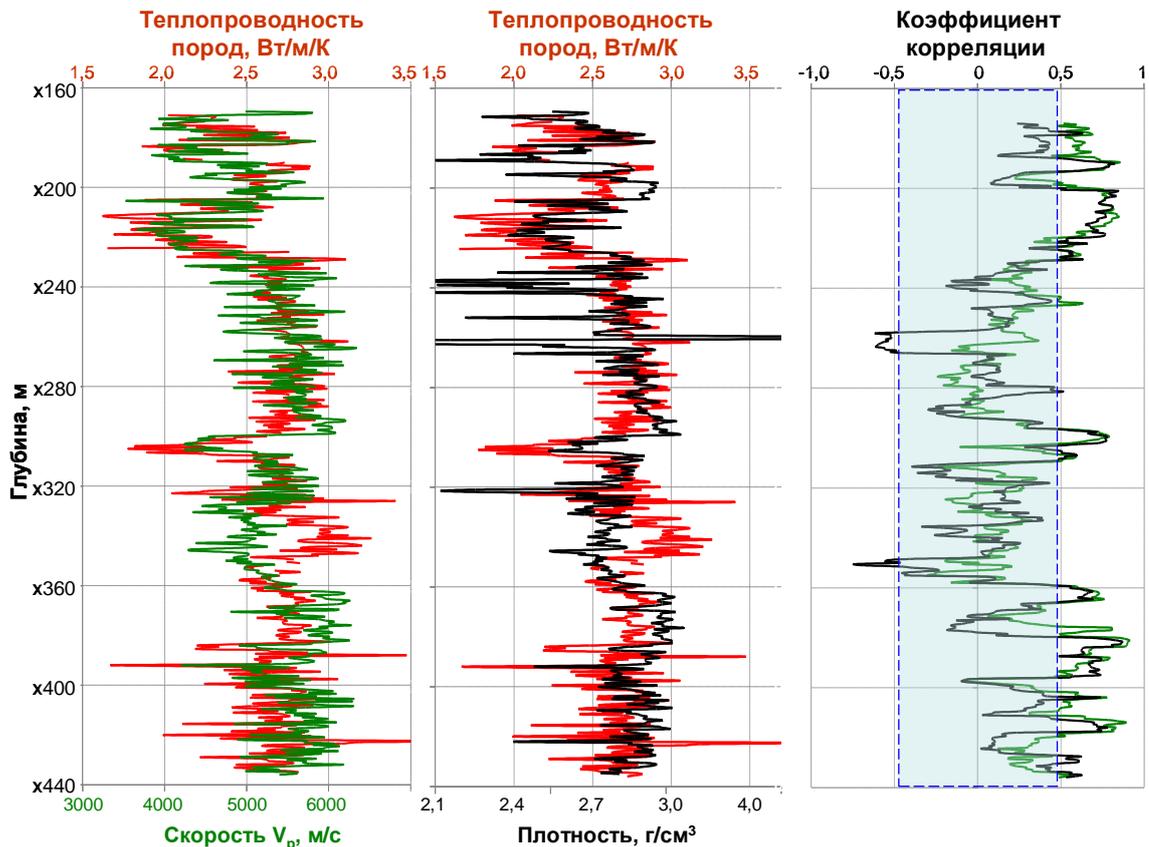


Рисунок 4.19. - Взаимосвязи вертикальных вариаций теплопроводности пород с вариациями скорости продольной упругой волны и плотности и распределение коэффициентов корреляций этих связей вдоль скважины *A*. На правой панели зеленая линия – коэффициент корреляции теплопроводности со скоростью продольной упругой волны, черная линия – коэффициент корреляции теплопроводности с плотностью. Голубым полем на правой панели выделена область, в которой коэффициент корреляции имеет значение, меньшее значимого уровня (0,482 при доверительной вероятности 0,95) для объема выборки 17 элементов. Желтым полем выделены интервалы глубин, для которых коэффициент корреляции имеет значения меньше значимого уровня.

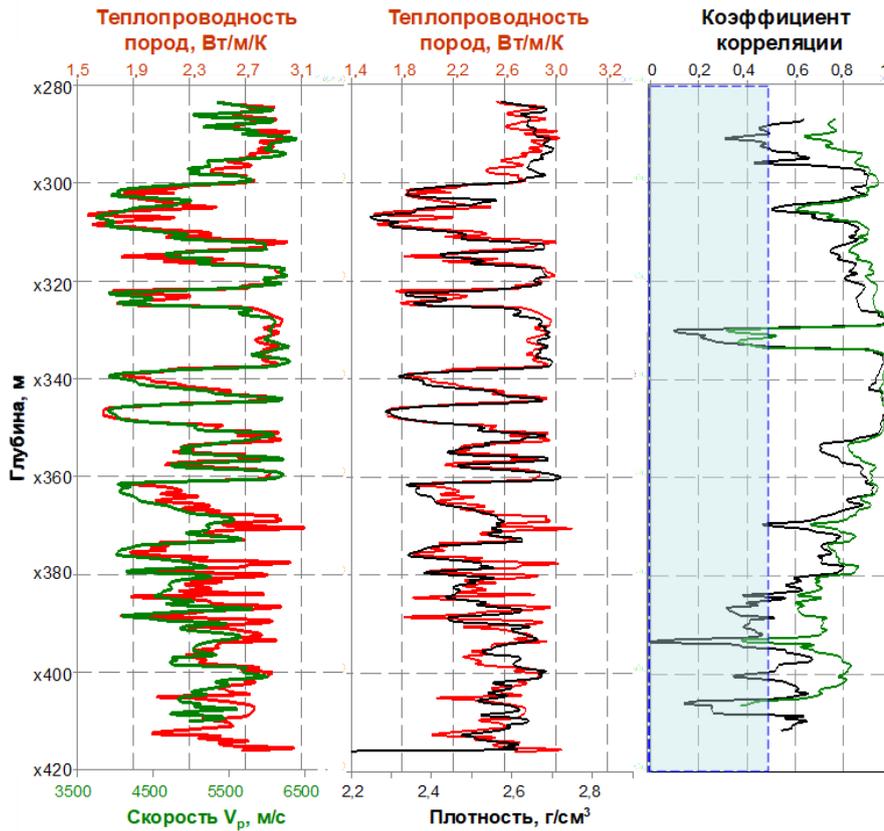


Рисунок 4.20. - Взаимосвязи вертикальных вариаций теплопроводности пород с вариациями скорости продольной упругой волны и плотности и вертикальное распределение коэффициентов корреляций этих связей вдоль скважины *Б*. На третьей слева панели зеленая линия – коэффициент корреляции теплопроводности со скоростью продольной упругой волны, черная линия – коэффициент корреляции теплопроводности с плотностью. Голубым полем на третьей слева панели выделена область, в которой коэффициент корреляции имеет значение, меньшее значимого уровня (0,482 при доверительной вероятности 0,95) для объема выборки 17 элементов.

На правой панели каждого из рисунков 4.19 и 4.20 для соответственно скважин *А* и *Б* приведены данные анализа корреляции теплопроводности со скоростью продольной упругой волны и плотностью в пределах каждого интервала глубин протяженностью 8 м со сдвигом интервала на 2 м. Как и в случае с анализом корреляции между теплопроводностью и пористостью (раздел 4.5), для совместимости данных по теплопроводности с данными по скорости и плотности результаты теплофизического профилирования усредняли в скользящем окне протяженностью 0,5 м. Таким образом, каждый интервал протяженностью 8 м включал 17 результатов определений теплопроводности, скорости и плотности. Как и на рисунках 4.18 и 4.19, голубым полем для каждой скважины выделены интервалы глубин, в которых коэффициент корреляции имеет значения, меньшие значимого уровня (0,482 при доверительной вероятности 0,95) для объема выборки 17 элементов.

Как следует из рисунков 4.19 и 4.20, для скважины *Б* тесная корреляция теплопроводности со скоростью продольной упругой волны и пористостью характерна практически вдоль всей

длины скважины, за исключением ее самой нижней части. Понижение коэффициента корреляции в районе глубины 1930 м и значительной части нижнего интервала глубин скважины связано с тем, что вариации всех сопоставляемых свойств пород здесь являются незначительными, что и приводит к отсутствию возможности анализировать корреляционные связи. Для скважины А, характеризующейся, как это уже было показано в разделах 4.3-4.5, более существенным влиянием вариаций минерального состава пород на теплопроводность, значимая корреляция теплопроводности со скоростью и плотностью (на третьих слева панелях – участки вне голубого поля, соответствующие коэффициентам корреляции более 0,482) наблюдается лишь в отдельных интервалах глубин. Эти интервалы глубин со значимой корреляцией следует охарактеризовать как участки с малым изменением содержания высокотеплопроводных кварца и пирита и отсутствием обводнения коллекторов, приводящим к значительному снижению влияния пористости на рассматриваемые свойства пород в связи с более близкими свойствами порового флюида к свойствам минеральной матрицы пород.

Поле корреляции между теплопроводностью и скоростью продольной упругой волны для скважины Б, приведенное на рисунке 4.21, показывает, что тесная связь этих свойств для всего вскрытого интервала глубин в целом сочетается с существенными отклонениями от этой общей закономерности в некоторых коротких интервалах глубин. Такие отклонения от общей закономерности несут в себе геологическую информацию, содержание которой можно будет раскрыть при последующем более тщательном анализе геолого-геофизического материала, полученного при изучении скважины.

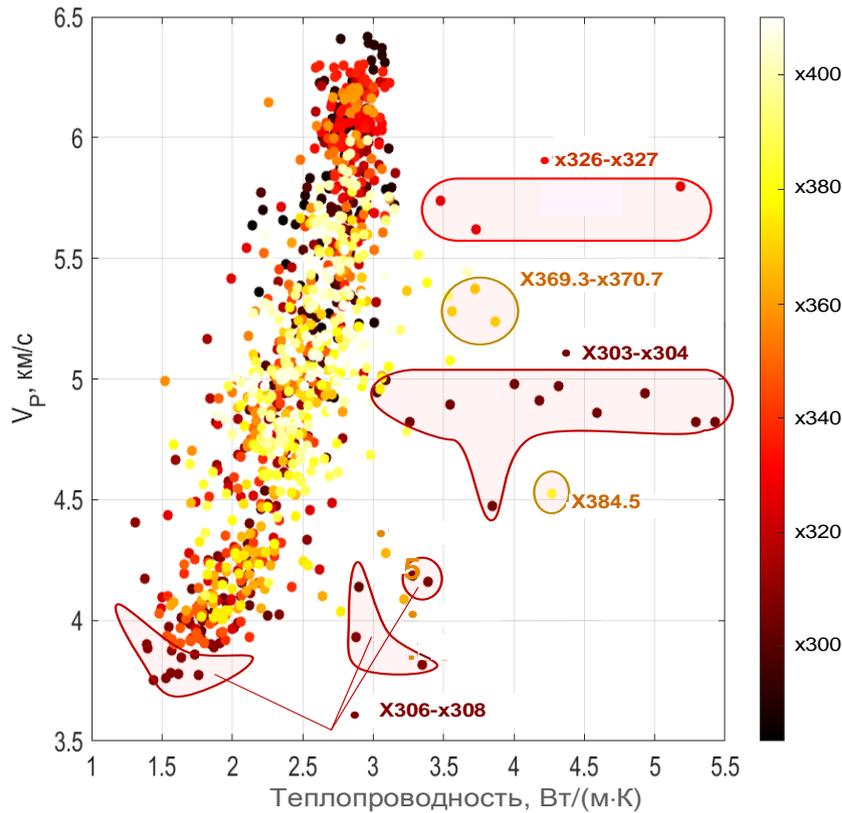


Рисунок 4.21. - Поле корреляции между теплопроводностью и скоростью продольной упругой волны для скважины *Б*. Цветная вертикальная шкала справа отражает глубины в метрах.

Установленная тесная связь теплопроводности со скоростью продольной упругой волны и плотностью пород в целом для скважины *Б* и отдельных интервалов глубин скважины *А* создает предпосылки для использования результатов непрерывного теплофизического профилирования керна для получения данных о геомеханических характеристиках пород, улучшения привязки по глубине керна к результатам каротажа в скважинах, выделения участков коллекторов с вариациями минерального состава пород и свойствами порового флюида. Подобные возможности были установлены нами также при исследованиях пород баженовской и доманиковой свит (глава 5).

#### 4.7. Определение общего содержания органического вещества по результатам профилирования теплопроводности образцов пород баженовской свиты и доманиковой формации

Установленная тесная связь составляющей теплопроводности вдоль напластования пород баженовской свиты с общим содержанием органического вещества  $C_{орг}$  (раздел 3.5) создает предпосылки для использования детальных непрерывных профилей теплопроводности и средних значений теплопроводности в пределах каждого образца керна для определения  $C_{орг}$  по результатам непрерывного теплофизического профилирования керна.

#### 4.7.1. Пути преобразования результатов измерений теплопроводности в данные об общем содержании органического вещества

Для разработки методики определения  $C_{орг}$  по результатам измерений теплопроводности необходима формализации связи измеренных значений теплопроводности  $\lambda_{изм}$  и  $C_{орг}$ . С этой целью рассмотрены два варианта преобразования результатов измерений теплопроводности в данные о  $C_{орг}$ :

вариант 1 - получение профиля  $C_{орг}$  с пространственным разрешением  $\sim 1$  мм путем соответствующего преобразования непрерывного профиля теплопроводности, регистрируемого в процессе профилирования полноразмерного керна с пространственной разрешающей способностью  $\sim 1$  мм;

вариант 2 - получение данных о среднем значении  $C_{орг}$  для каждого образца керна по результатам определения среднего значения теплопроводности для каждого образца керна.

Как показано в разделе 3.5 (рисунки 3.11 и 3.12), для оценки  $C_{орг}$  в обоих случаях - как при помощи варианта 1, так и при помощи варианта 2 - наиболее целесообразно использовать составляющую теплопроводности  $\lambda_{//}$  вдоль напластования пород, так как в этом случае получаем более устойчивую связь результатов теплофизического профилирования с  $C_{орг}$ , чем при использовании для этой цели теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  поперек напластования [59].

При определении  $C_{орг}$  с использованием любого из вариантов 1 и 2 автором использованы два подхода к преобразованию данных о теплопроводности в данные о  $C_{орг}$ :

- на основе корреляционной связи между теплопроводностью и  $C_{орг}$  для пород баженовской и доманиковой формаций;
- на основе аналитической связи с использованием теоретической модели эффективной теплопроводности двухфазной среды, состоящей из минеральной матрицы породы и органического вещества.

В 2015-2018 гг. более чем для 1200 образцов пород баженовской и доманиковой формаций в рамках совместных работ с нефтяными компаниями и другими организациями нами были использованы результаты измерений  $C_{орг}$  при помощи пиролиза. Измерения  $C_{орг}$  были проведены при помощи прибора Rock-Eval-6 в МГУ им. М.В.Ломоносова, организациях НТЦ «Гапромнефть», ВНИГНИ, компаниях Роснефть и ООО «Лукойл-Инжиниринг», а также при помощи прибора HAWK в Сколковском институте науки и технологий. Анализ корреляционных связей между измеренной теплопроводностью  $\lambda_{изм}$  и данными  $C_{орг}$  позволил установить уравнения регрессии, связывающие  $\lambda_{изм}$  и  $C_{орг}$  для пород различных месторождений.

На рисунке 4.22 приведены примеры полученных нами полей корреляции для семи скважин, пробуренных в баженовской свите (результаты определений  $C_{орг}$  путем пиролиза получены Е.В. Козловой, в лаборатории проф. Г.А. Калмыкова в МГУ им. М.В. Ломоносова, в компаниях Роснефть, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», ООО «Газпромнефть НТЦ», ВНИГНИ).

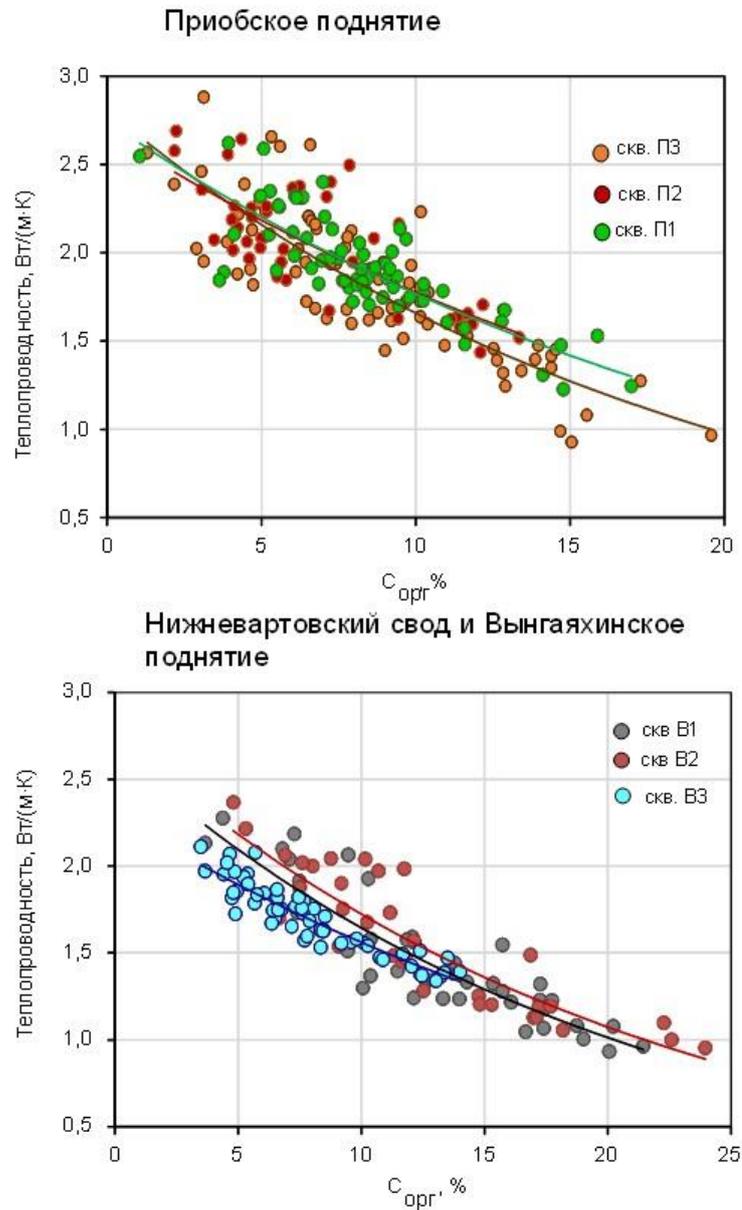


Рисунок 4.22. - Примеры полей корреляций, связывающих  $\lambda_{изм}$  и  $C_{орг}$  для скважин, вскрывших породы баженовской свиты.

На рисунке 4.23 приведены примеры полученных нами полей корреляции для скважин, пробуренных в доманиковой формации.

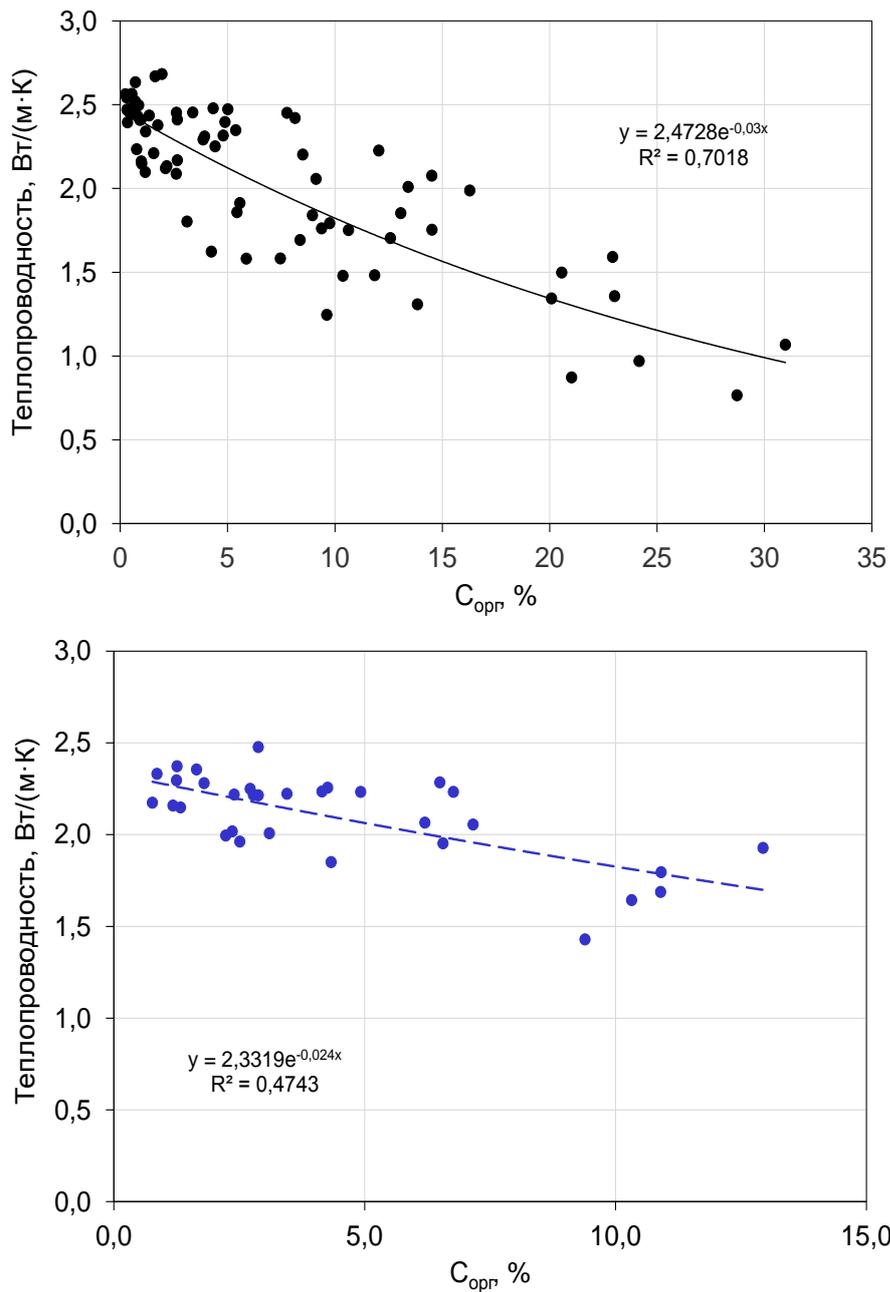


Рисунок 4.23. - Примеры полей корреляций и уравнений регрессии, связывающих  $\lambda_{изм}$  и  $C_{орг}$  для скважин, вскрывших породы доманиковой формации (результаты определений  $C_{орг}$  путем пиролиза получены Е.В. Козловой, а также предоставлены компанией ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»).

Во всех случаях, приведенных на рисунках 4.22 и 4.23, коэффициент детерминации существенно превосходит уровень значимых значений (при оценке значимости по критерию Фишера).

Полученные в результате корреляционного анализа (рисунки 4.22 и 4.23) уравнения регрессии имеют вид

$$\lambda_{изм} = \lambda_{матр} \cdot \exp(-k \cdot C_{орг}), \quad (4.2)$$

где  $\lambda_{матр}$  - теплопроводность минеральной матрицы,  $k$  – параметр, установленный при корреляционном анализе экспериментальных данных для каждой скважины, который определяли из условия, что коэффициент детерминации для анализируемой выборки достигает наиболее высоких значений.

Результаты корреляционного анализа позволили сделать оценки теплопроводности минеральной матрицы  $\lambda_{матр}$  пород из уравнений регрессии (4.2) так как коэффициент в правой части уравнений перед экспонентой соответствует теплопроводности пород при  $C_{орг}=0$ , т.е. характеризует собой теплопроводность матрицы.

За период 2014-2019 гг. при помощи технологии непрерывного теплофизического профилирования керна были изучены 29 месторождений, 42 скважины, около 10900 образцов керна для баженовской свиты и доманиковой формации. В результате сформирована представительная база данных о теплопроводности минеральной матрицы изученных пород и параметра связи  $k$  и теплопроводности минеральной матрицы  $\lambda_{матр}$  (уравнение 4.2). В таблице 4.2 для ряда скважин, вскрывших породы баженовской и доманиковой формаций, в качестве примеров приведены уравнения регрессии, полученные по результатам непрерывного профилирования теплопроводности на керне и оценкам  $C_{орг}$  при помощи пиролиза, и значения коэффициентов детерминации для связи между теплопроводностью и содержанием  $C_{орг}$ .

Таблица 4.2. Уравнения регрессии и коэффициент детерминации между теплопроводностью и содержанием  $C_{орг}$  в породах баженовской и доманиковой формаций по результатам непрерывного профилирования теплопроводности на керне и оценкам  $C_{орг}$  при помощи пиролиза.

№ скважины	$\lambda$ матрицы, Вт/(м·К)	Уравнение регрессии (где «у» соответствует $\lambda$ , «х» соответствует $C_{орг}$ )	Коэффициент детерминации, $R^2$	N
П1 (бажен)	2,74	$y = 2,740e^{-0,044x}$	0,70	68
П2 (бажен)	2,70	$y = 2,689e^{-0,042x}$	0,61	42
П3 (бажен)	2,81	$y = 2,811e^{-0,044x}$	0,73	76
В1 (бажен)	2,77	$y = 2,767e^{-0,047x}$	0,83	43
В2 (бажен)	2,67	$y = 2,670e^{-0,048x}$	0,81	33
В3 (бажен)	2,30	$y = 2,297e^{-0,039x}$	0,86	56
Ю1 (доманик)	2,47	$y = 2,473e^{-0,030x}$	0,70	64
ПС1 (доманик)	2,33	$y = 2,332e^{-0,024x}$	0,47	33

Из уравнения (4.2) следует соотношение для определения  $C_{орг}$  по результатам измерений теплопроводности:

$$C_{орг} = \frac{\ln \frac{\lambda_{матр}}{\lambda_{изм}}}{k} \quad (4.3)$$

При существенной литологической неоднородности толщи пород, что на нашей практике наблюдалось достаточно редко, параметр  $k$  и теплопроводность матрицы пород  $\lambda_{матр}$  следует устанавливать при помощи получения уравнения регрессии для каждого из фрагментов толщи.

По результатам анализа связи теплопроводности и  $C_{орг}$  для изучавшихся скважин диапазон теплопроводности минеральной матрицы составил 2,30...2,81 Вт/(м·К), диапазон вариаций параметра  $k$  составил 0,024...0,048.

В связи с высокой неоднородностью пород баженовской свиты и доманиковой формации, связанной с локальным распределением органического вещества в образцах пород и значительным контрастом свойств минеральной матрицы и органического вещества, для получения надежных уравнений регрессии, связывающих  $\lambda_{изм}$  и  $C_{орг}$ , отбор проб из образцов керна для проведения определений  $C_{орг}$  путем пиролиза целесообразно проводить по результатам профилирования теплопроводности для этих образцов. Такой подход к отбору образцов для пиролиза особенно эффективен, так как пространственная разрешающая способность профилирования теплопроводности методом оптического сканирования составляет ~1 мм (раздел 2.5), а при использовании новых лазерных установок, разработанных с участием автора, достигает 0,2 мм (раздел 3.2), что важно в условиях высокой неоднородности пород баженовской свиты и доманиковой формации, характеризующихся проявлениями органического вещества на участках часто всего в несколько миллиметров. Такой подход к отбору образцов для пиролиза позволяет учесть значительные вариации  $C_{орг}$  в пределах каждого образца и повышает представительность результатов пиролиза. О наличии значительных вариаций  $C_{орг}$  в пределах образцов, свидетельствуют высокие (в основном в диапазоне 0,3-2) коэффициенты тепловой неоднородности образцов пород нетрадиционных коллекторов (разделы 5.1 - 5.2), особенно характерные для доманиковой свиты (разделы 5.1 - 5.3). Пример вариаций  $C_{орг}$  в пределах образца, оцененных по результатам профилирования теплопроводности для одного из образцов керна при помощи соотношения (4.3), показан на рисунке 4.24.

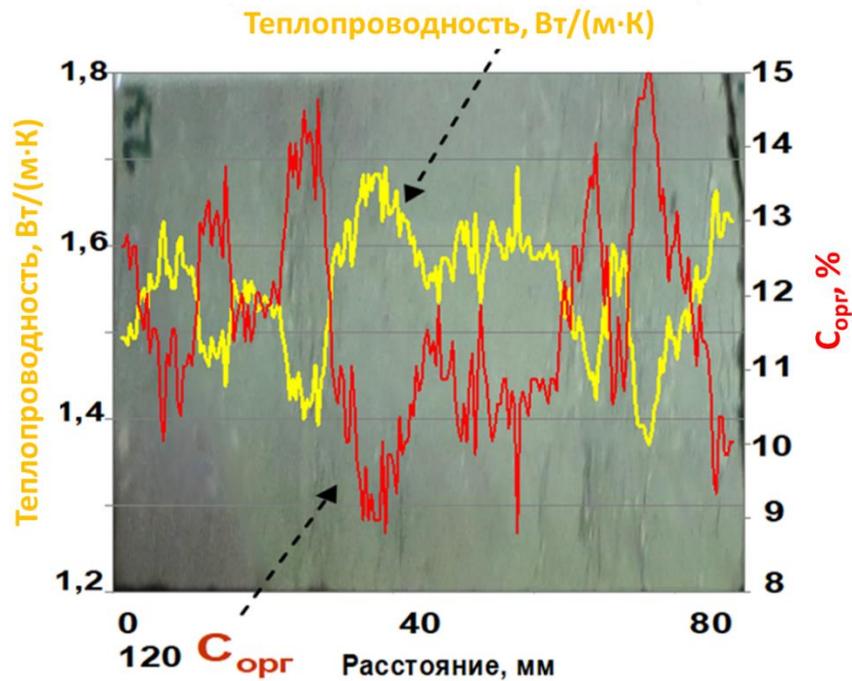


Рисунок 4.24. Результаты регистрации распределения  $C_{орг}$  путем преобразования профиля теплопроводности в профиль  $C_{орг}$  при помощи соотношения (5.2) [81].

Получение надежных данных о теплопроводности матрицы, необходимых для определения  $C_{орг}$  по данным о теплопроводности  $\lambda_{изм}$  при помощи уравнения (5.2), может быть затруднено, если месторождения данного типа не изучались при помощи непрерывного теплофизического профилирования керна ранее и отсутствуют представительные данные пиролиза о  $C_{орг}$ . Это не позволяет установить для конкретной скважины корреляционную связь теплопроводности и параметра  $C_{орг}$  и получить связывающее их уравнение регрессии, которое обеспечивает определение теплопроводности матрицы  $\lambda_{матр}$ . В таком случае для определения  $\lambda_{матр}$  может быть использован следующий прием. По результатам непрерывного теплофизического профилирования керна анализируют распределение вдоль скважины максимальных для каждого образца керна значений теплопроводности  $\lambda_{макс}$ , которые фиксируются по профилю теплопроводности каждого образца. Как указано выше, согласно результатам наших измерений подавляющее большинство образцов пород баженовской и доманиковой формаций существенно неоднородны (разделы 5.2 и 5.3), при этом повышенные значения коэффициента тепловой неоднородности для большинства образцов пород связаны с локальными зонами содержания низкотеплопроводного органического вещества в пределах образца вдоль линий оптического сканирования. В таких случаях значения теплопроводности  $\lambda_{макс}$ , соответствующие участкам образцов пород между участками органического вещества, отражают уровень теплопроводности матрицы, что и помогает оценить значения  $\lambda_{матр}$  как в пределах всего изучаемого интервала глубин, так и на отдельных его участках. В отдельных интервалах глубин резко повышенные значения  $\lambda_{макс}$  отражают локальные включения

высокотеплопроводных минералов (например, достаточно распространенные проявления гнезд пирита). В этих случаях также можно делать приближенные оценки теплопроводности матрицы, исключая участки профилей теплопроводности с повышенными значениями  $\lambda_{\max}$  из рассмотрения. Значения параметра  $k$  в таких случаях следует брать из базы данных, сформированной по результатам оценки параметра  $k$  для разных месторождений, учитывая общность изучаемого месторождения с ранее изученными объектами.

Из соотношения (4.3), записанного в виде

$$C_{орг} = \frac{\ln \lambda_{матр}}{k} - \frac{\ln \lambda_{изм}}{k}, \quad (4.4)$$

следуют два важных вывода:

1. Неопределенности в данных о теплопроводности матрицы и параметра  $k$  при стабильных их значениях в пределах отдельного изучаемого интервала глубин могут повлиять на оценки абсолютных значений  $C_{орг}$ , но не влияют на характер пространственных вариаций  $C_{орг}$ , зарегистрированный по результатам теплофизического профилирования керна, что позволяет оценивать характер изменений  $C_{орг}$  вдоль скважины. Это свидетельствует о том, что прогнозируемое относительное распределение  $C_{орг}$  вдоль скважины в таком случае обладает высокой степенью надежности и не имеет серьезных погрешностей по характеру выявленных вариаций. Уточнение абсолютных значений  $C_{орг}$  может быть проведено при измерениях  $C_{орг}$  путем пиролиза.

2. При погрешности в определении и задании теплопроводности матрицы  $\Delta(\lambda_{матр})$  абсолютная систематическая погрешность  $\Delta C_{орг}$  в определении  $C_{орг}$  будет постоянна и составит, согласно (4.3)

$$\Delta(C_{орг}) = \frac{\ln(1 + \frac{\Delta\lambda_{матр}}{\lambda_{матр}})}{k}. \quad (4.5)$$

Так, при погрешности в определении теплопроводности матрицы в 5% и 10 % при  $\lambda_{матр}=2,5$  Вт/(м·К) и параметре  $k=0,04$  величина  $\Delta(C_{орг})$  составляет соответственно 1,3 % и 2,6 %. Ошибка при задании параметра  $k$  – например, выбор значения  $k=0,05$  вместо  $k=0,04$  – при теплопроводности матрицы на уровне 2,5 Вт/(м·К) приводит к погрешностям в диапазоне -2,5...1 % для диапазона  $C_{орг}=5...20\%$ , при этом максимальные значения абсолютной погрешности  $C_{орг}$  повышаются до значений - 4...1,5 % за границами указанного диапазона значений  $C_{орг}$ .

#### 4.7.2. Преобразование результатов измерений теплопроводности в данные об общем содержании органического вещества на основе теоретической модели эффективной теплопроводности

Для двухфазной среды, представляющей собой комбинацию двух составляющих – органического вещества и окружающей его матрицы – эффективная теплопроводность может быть описана формулой Лихтенеккера (3.9) [135]:

$$\lambda_{эфф} = \lambda_{орг}^{\Phi_{орг}} \cdot \lambda_{матр}^{1-\Phi_{орг}}, \quad (4.6)$$

где  $\lambda_{орг}$  - теплопроводность органического вещества,  $\Phi_{орг}$  - объемная доля органического вещества в образце породы.

Согласно заключению Woodside и Messmer (1961) [183], при контрасте теплопроводности двух материалов, образующих двухфазную среду, не более, чем 20:1, что в целом соответствует породам бажендовской свиты и доманиковой формации (таблица 4.3), соотношение (5.5) является достаточно корректным для оценки эффективной теплопроводности  $\lambda_{эфф}$  двухкомпонентной среды.

Объемную долю  $\Phi_{орг}$  органического вещества можно связать с общим содержанием органического вещества  $C_{орг}$  соотношением

$$\Phi_{орг} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{орг}}{\rho_{матр}} \cdot \left(\frac{1}{C_{орг}} - 1\right)}, \quad (4.7)$$

где  $\rho_{орг}$  и  $\rho_{матр}$  – плотность соответственно органического вещества и матрицы породы.

После подстановки  $\Phi_{орг}$  из формулы (4.7) в формулу (4.6) и замены  $\lambda_{эфф}$  на его значение  $\lambda_{изм}$ , измеряемое при теплофизическом профилировании керна, получаем

$$\lambda_{изм} = \lambda_{матр} e^{-\frac{1}{1 + \frac{\rho_{кер}}{\rho_{матр}} \left(\frac{1}{C_{орг}} - 1\right)}} \quad (4.8)$$

Из соотношения (4.8) получаем следующее соотношение для определения  $C_{орг}$ :

$$C_{орг} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{матр}}{\rho_{кер}} \cdot \frac{\ln \frac{\lambda_{кер}}{\lambda_{изм}}}{\ln \frac{\lambda_{изм}}{\lambda_{матр}}}} \quad (4.9)$$

Соотношение (4.9) позволяет определять общее содержание  $C_{орг}$  по результатам измерений  $\lambda_{изм}$  теплопроводности пород при условии, что известны  $\rho_{матр}$  и  $\rho_{орг}$  (или их отношение),  $\lambda_{матр}$  и теплопроводность органического вещества  $\lambda_{орг}$ .

Оценки плотности органического вещества, представленного керогеном, составляют 1,14 г/см<sup>3</sup> (согласно данным Г.А. Калмыкова и А.Г. Калмыкова), 1,20 г/см<sup>3</sup> [1], 1,15 г/см<sup>3</sup> [126]. Вместе с тем, для будущих оценок следует иметь в виду, что имеются указания на то, что плотность керогена может достигать 1,6 г/см<sup>3</sup> в зависимости от степени зрелости керогена [126]. Оценку плотности минеральной матрицы для пород баженовской и доманиковой формаций можно принять как 2,5-2,6 г/см<sup>3</sup>.

Для оценки теплопроводности органического вещества  $\lambda_{изм}$  воспользуемся соотношением, следующим из формулы (4.9):

$$\lambda_{орг} = \lambda_{изм} \cdot e^{\frac{\rho_{орг}}{\rho_{матр}} \left( \frac{1}{C_{орг}} - 1 \right) \ln \frac{\lambda_{изм}}{\lambda_{матр}}} \quad (4.10)$$

При оценках теплопроводности органического вещества (керогена)  $\lambda_{орг}$  для пород баженовской свиты и доманиковой формации по соотношению (4.10) мы использовали:

- результаты измерений теплопроводности пород  $\lambda_{изм}$  при непрерывном теплофизическом профилировании на керне 22 месторождений в баженовской и доманиковой формациях;
- оценки  $C_{орг}$  при помощи соотношения (4.3) при значениях параметра  $k$ , установленных при корреляционном анализе связи теплопроводности  $\lambda_{изм}$  и результатов определения  $C_{орг}$  путем пиролиза;
- оценку плотности керогена 1,14 г/см<sup>3</sup>;
- оценки теплопроводности минеральной матрицы пород  $\lambda_{матр}$ , представленные в таблице 4.2 или сделанные при анализе вариаций значений  $\lambda_{макс}$ , как это указано выше в данном разделе.

В таблице 4.3 приведены результаты оценок средних значений теплопроводности  $\lambda_{орг}$ , диапазоны вариаций  $\lambda_{орг}$  и среднеквадратичное отклонение СКО, характеризующее вариации  $\lambda_{орг}$  вдоль скважин для интервалов глубин скважин, пробуренных в баженовской свите и доманиковой формации, полученные при помощи соотношения (4.10). Приведенные оценки выполнены по результатам изучения более чем 9000 образцов керна. Столь значительный объем данных о теплопроводности керогена получен впервые, так как применение традиционных методов измерений для определения теплопроводности керогена крайне затруднено.

Представленные в данном разделе данные о  $\lambda_{матр}$ ,  $\lambda_{орг}$ , параметре  $k$ , характеризующем взаимосвязь теплопроводности  $\lambda_{изм}$  и результатами определения  $C_{орг}$  при помощи пиролиза, создают основу для оценок  $C_{орг}$  как при помощи соотношения (4.3), так и при помощи соотношения (4.9).

Таблица 4.3. Результаты оценки теплопроводности органического вещества для различных месторождений углеводородов в баженовской и доманиковой формациях.

Номер	Месторождение	Теплопроводность, Вт/м/К			СКО, Вт/(м·К)	Число образцов
		средняя	миним.	максим.		
Баженовская свита						
1	Юж.-Приобское, скв. А	0,353	0,137	0,42	0,088	1177
2	Юж.-Приобское, скв. Б	0,542	0,348	0,61	0,049	866
3	Юж.-Приобское, скв. В	0,542	0,298	0,62	0,04	1067
4	Вынгайхинское	0,384	0,288	0,457	0,028	829
5	Повховское	0,445	0,323	0,621	0,045	147
6	Красноленинское	0,482	0,34	0,589	0,044	367
7	В.-Медвежье	0,54	0,184	0,624	0,121	135
8	Ем-Еговское	0,418	0,299	0,507	0,04	445
9	Юбилейное	0,601	0,535	0,707	0,029	139
10	Пальяновское, скв. А	0,451	0,354	0,499	0,035	592
11	Пальяновское, скв. Б	0,548	0,329	0,662	0,056	321
12	Южное	0,458	0,316	0,586	0,06	292
13	Орехово-Ермаковское	0,216	0,163	0,275	0,025	96
14	Салымское, скв. А	0,534	0,416	0,623	0,04	228
15	Салымское, скв. Б	0,496	0,312	0,604	0,052	232
16	Салымское, скв. В	0,542	0,475	0,622	0,039	254
17	Салымское, скв. Г	0,547	0,437	0,622	0,046	242
Доманиковая формация						
18	Югомашевское	0,278	0,152	0,343	0,036	573
19	Поспеловское	0,357	0,255	0,423	0,033	495
20	Добрынинское	0,605	0,342	0,755	0,069	167
21	Зап-Авралинское	0,358	0,171	0,422	0,04	200
22	Уранское	0,639	0,522	0,76	0,037	388

#### 4.7.3. Результаты определения общего содержания органического вещества по результатам профилирования теплопроводности и сравнение с данными пиролиза

На рисунке 4.25 приведены результаты теплофизического профилирования керна одной из скважин, пробуренных в районе залегания баженовской свиты. Как и все результаты профилирования пород баженовской свиты для других изучавшихся скважин, данные результаты отражают высокий коэффициент тепловой анизотропии пород и его существенные разномасштабные вариации вдоль скважины.

По результатам распределения максимального для каждого образца значения теплопроводности  $\lambda_{\max}$  средняя теплопроводность минеральной матрицы  $\lambda_{\text{матр}}$  пород, вскрытых скважиной в представленном на рисунке 4.25 интервале глубин, была оценена в 2,4 Вт/(м·К), по

данным анализа соответствия пород скважины ранее изучавшимся породам параметр  $k$  был принят равным 0,039.

По результатам распределения максимального для каждого образца значения теплопроводности  $\lambda_{\max}$  средняя теплопроводность минеральной матрицы  $\lambda_{\text{матр}}$  пород, вскрытых скважиной в представленном на рисунке 4.25 интервале глубин, была оценена в 2,4 Вт/(м·К), по данным анализа соответствия пород скважины ранее изучавшимся породам параметр  $k$  был принят равным 0,039.

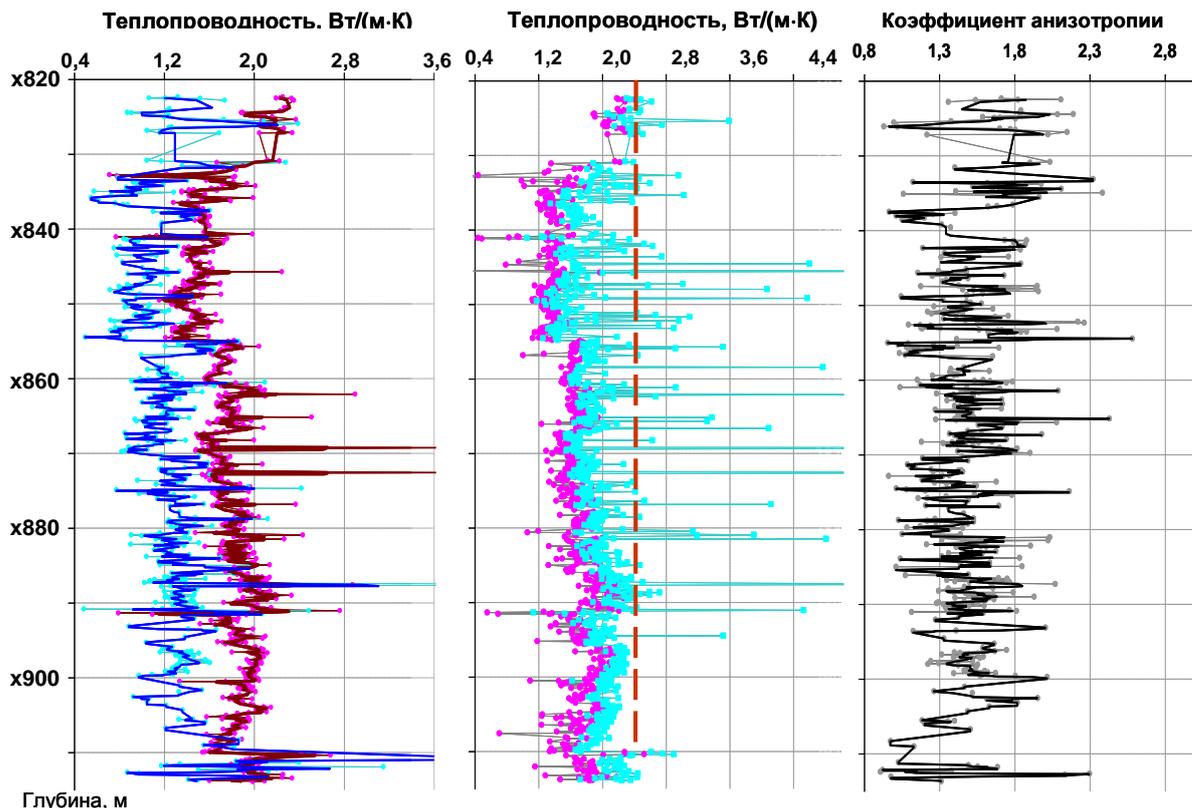


Рисунок 4.25. - Распределение вдоль скважины главных значений теплопроводности параллельной вдоль и поперек напластования (левая панель, соответственно коричневая и синяя кривые), минимального и максимального значений теплопроводности  $\lambda_{//}$  для профилей каждого образца керна (средняя панель, соответственно розовая и голубая кривые) и коэффициента тепловой анизотропии (правая панель). Точки на левой панели представляют средние значения главных значений теплопроводности для образца керна, сглаживающие линии на левой и правой панелях – результаты усреднения в скользящем окне с 3 элементами усреднения в окне.

На рисунке 4.26 представлены результаты определения средних для каждого образца керна значений общего содержания органического вещества  $C_{org}$  по результатам измерений средних для образцов значений теплопроводности вдоль напластования. Расчеты  $C_{org}$  проводились при помощи соотношения (4.3). На этом же рисунке представлены результаты определений  $C_{org}$  при помощи пиролиза. Данные о  $C_{org}$  при помощи соотношения (4.3) по результатам измерений теплопроводности были получены и переданы собственнику керна – ООО «Газпромнефть НТЦ» задолго до измерений  $C_{org}$  при помощи пиролиза. Измерения при помощи пиролиза проводились спустя несколько недель и показали хорошее соответствие

результатам определений  $C_{орг}$  по данным о теплопроводности. Наиболее заметное расхождение наблюдается в интервале глубин x857 - x861 м, но и здесь средние для данного интервала глубин значения  $C_{орг}$  по данным обоих методов определений составляют, как видно на рисунке 4.26, всего около 1%.

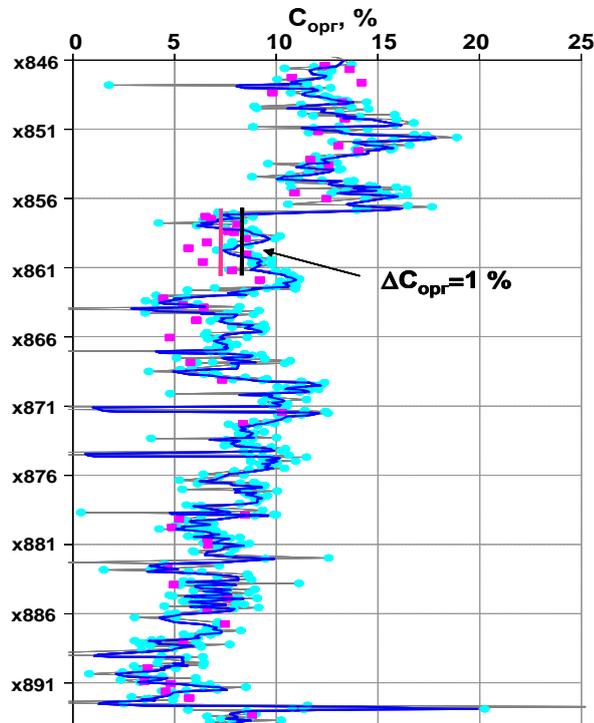


Рисунок 4.26. - Результаты определения общего содержания органического вещества  $C_{орг}$ . Голубые точки – средние для образцов керна значения  $C_{орг}$ , определенные по результатам измерений средней теплопроводности образцов керна, синяя линия – результат усреднения в скользящем прямоугольном окне с тремя элементами в окне, розовые точки – результаты определения  $C_{орг}$  при помощи пиролитического анализа на приборе НАWK. Розовая и черная параллельные полосы в интервале глубин x857 - x861 м – средние значения результатов определения  $C_{орг}$  при помощи соответственно пиролитического анализа и теплофизического профилирования керна в данном интервале глубин.

На рисунке 4.27 показаны результаты анализа влияния неопределенности параметров  $\lambda_{матр}$  и  $k$  на отклонения в результатах определения  $C_{орг}$  при помощи соотношения (4.3) для той же скважины, что отражена и на рисунке 4.27. Как следует из данных рисунка 4.27, большее внимание на настоящем этапе применения рассматриваемой методики определения  $C_{орг}$  по данным о теплопроводности следует уделять надежности данных о параметре  $k$ .

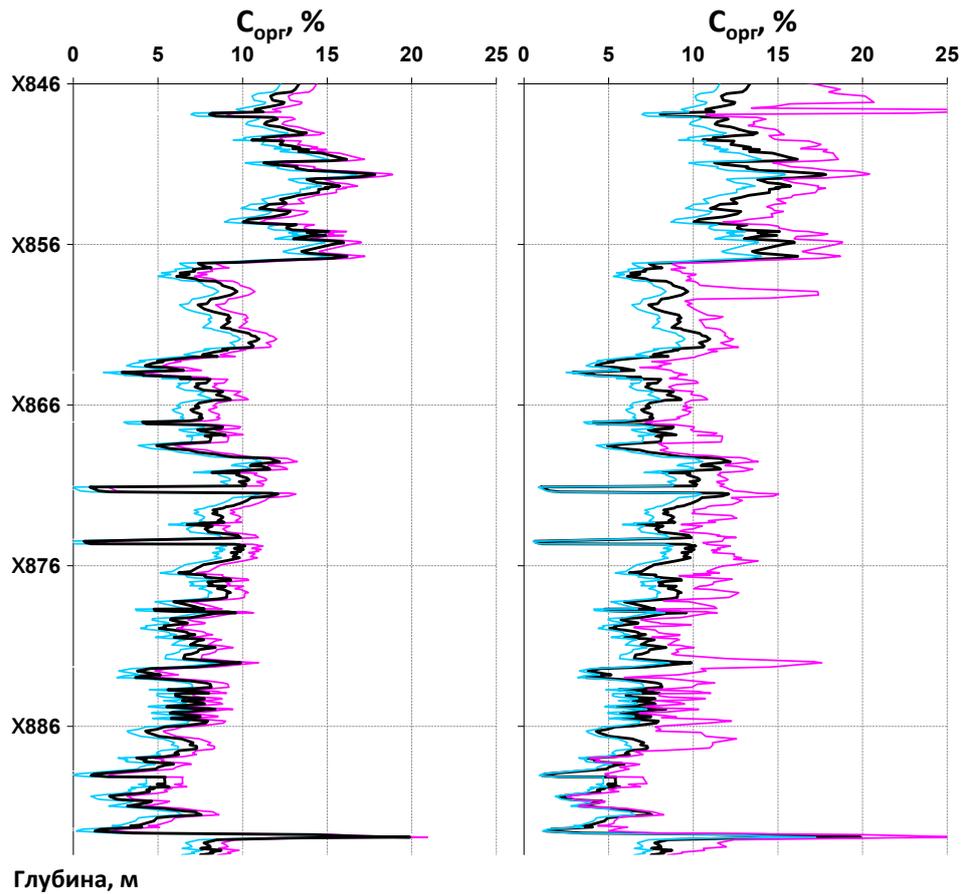


Рисунок 4.27. - Влияние неопределенности в значениях параметров  $\lambda_{матр}$  и  $k$  на отклонения в результатах определения  $C_{орг}$  по данным о теплопроводности пород. Черные кривые – результаты усреднения данных расчетов при  $\lambda_{матр}=2,4$  Вт/(м·К) и  $k=0,039$ . Левая панель: синяя и розовая кривые – результаты расчетов соответственно при  $\lambda_{матр}=2,3$  Вт/(м·К) и  $\lambda_{матр}=2,5$  Вт/(м·К) (в обоих случаях  $k=0,039$ ). Правая панель: синяя и розовая кривые – результаты расчетов соответственно при  $k=0,045$  и  $k=0,037$  (в обоих случаях  $\lambda_{матр}=2,4$  Вт/(м·К)).

На рисунке 4.28 приведен еще один характерный пример определения общего содержания органического вещества путем теплофизического профилирования керна для трех скважин другого месторождения баженовской свиты.

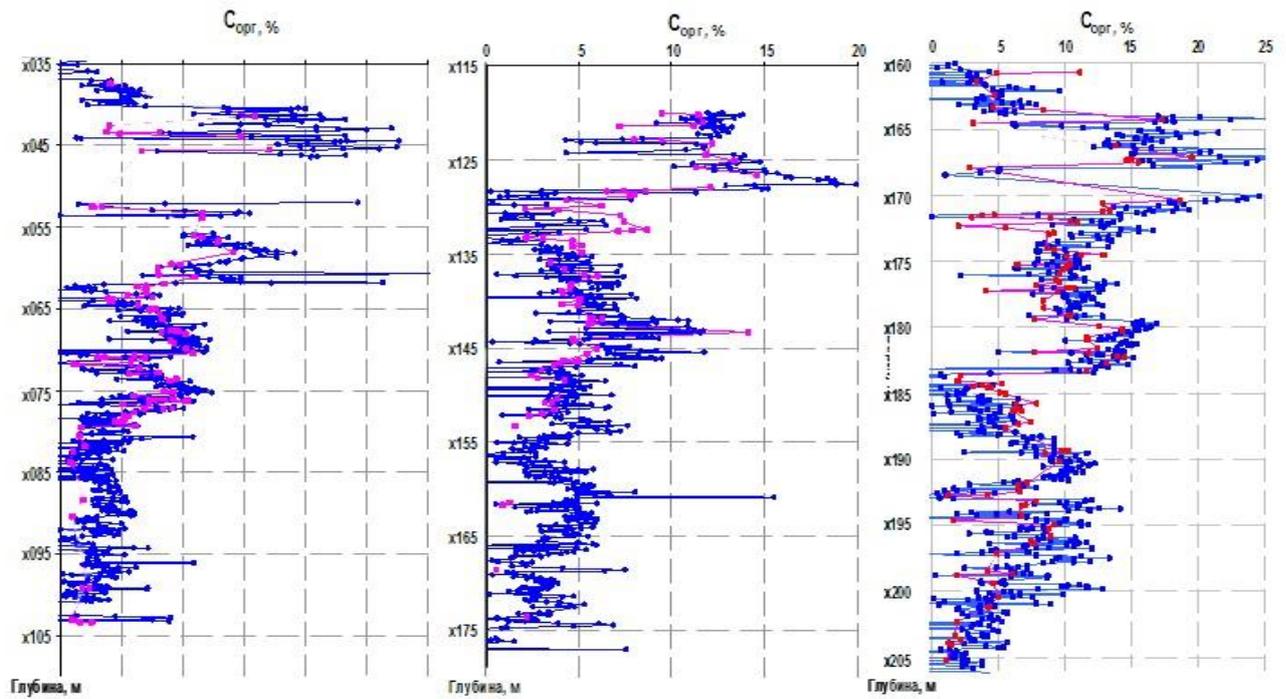


Рисунок 4.28. - Результаты определения средних для образцов керна значений  $C_{орг}$  путем расчета по формуле (4.3) с использованием профилирования теплопроводности (синий цвет) и пиролиза (розовый и красный цвет) для трех скважин одного месторождения нетрадиционных ресурсов углеводородов в баженовской свите.

Помимо применения теплофизического профилирования для определений распределения  $C_{орг}$  вдоль отдельных образцов керна и его средних значений для всех изучаемых образцов керна, непрерывное профилирование теплопроводности позволяет регистрировать с высоким пространственным разрешением (около 1 мм) распределение  $C_{орг}$  вдоль всего изучаемого интервала глубины, в котором проводится теплофизическое профилирование керна. Связь теплопроводности с содержанием органического вещества для коллекторов с нетрадиционными ресурсами углеводородов характеризуется практически теми же особенностями, поэтому принципы преобразования результатов профилирования теплопроводности в непрерывные профили  $C_{орг}$  для пород баженовской свиты сохраняются в силе и для пород доманиковой формации. На рисунке 4.29а приведены результаты преобразования непрерывного профиля теплопроводности пород, имеющего пространственное разрешение около 1 мм, в детальный профиль общего содержания органического вещества  $C_{орг}$  с шагом 1 мм. Данные на рисунке отражают результаты, полученные для одного из месторождений Западной Сибири с запасами углеводородов в баженовской свите. Всего определение  $C_{орг}$  осуществлено для 49129 точек вдоль исследованного интервала керна, что позволило детально охарактеризовать распределение  $C_{орг}$  вдоль скважины. На рисунке 5.25а приведены также результаты определения  $C_{орг}$  при помощи пиролиза на 114 образцах пород в том же интервале глубин, которые использовались для дополнительной калибровки результатов профилирования  $C_{орг}$ . Сопоставление результатов оценки  $C_{орг}$  двумя методами показывает, что в интервале глубин 2389-2396 м по данным

теплофизической методики выделяются несколько участков с повышенным значением  $C_{орг}$ , не выделенные по результатам пиролиза в связи с недостаточной детальностью отбора проб на пиролиз. На рисунке 4.29б результаты детальных определений  $C_{орг}$  представлены непрерывной голубой линией, а темно-синей линии приведены данные о распределении усредненных оценок  $C_{орг}$  вдоль скважины, которые получены путем усреднения первичных оценок  $C_{орг}$ , сделанных через 1 мм вдоль образцов керна, в интервалах глубин протяженностью 100 мм, что отражает среднюю длину изучавшихся образцов керна.

На рисунке 4.30 приведено распределение коэффициента тепловой неоднородности образцов пород вдоль скважины, которое показывает существенную систематическую неоднородность пород с вариациями теплопроводности в пределах одного образца керна до 70 %. Анализ причин неоднородности, проведенный с учетом полученных данные о минимальных и максимальных в пределах каждого образца керна значениях теплопроводности, показал, что лишь в редких случаях в образцах проявляются локальные зоны пиритизации (теплопроводность пирита составляет 41,4 Вт/(м·К) [79], в то время как большей частью неоднородность обусловлена локальными в пределах образцов проявлениями низкотеплопроводного органического вещества.

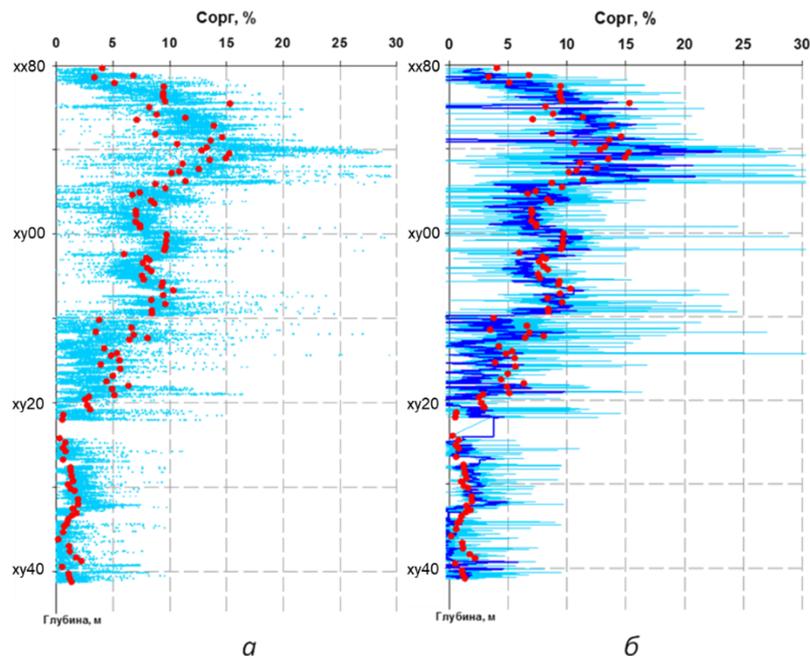


Рисунок 4.29. - Детальные профили  $C_{орг}$  вдоль скважины, пробуренной в баженовской свите [142].

*а:* Результаты определения вариаций  $C_{орг}$  с шагом около 1 мм вдоль скважины (голубые точки), полученные по данным теплофизического профилирования керна, и результаты определения  $C_{орг}$  при помощи пиролиза (красные точки).

*б:* Профили  $C_{орг}$ : светло-голубой цвет – пространственное разрешение 1 мм; темно-синий цвет – результаты усреднения прямоугольным фильтром при помощи скользящего окна шириной 100 мм (соответствует средней длине образцов керна) с шагом смещения окна 1 мм.

Сопоставление рисунка 4.29 с рисунком 4.30 показывает, что интервал глубин 2389-2394 м характеризуется как наибольшей неоднородностью образцов пород, так и наибольшим содержанием  $C_{орг}$ . Это показывает, что высокая неоднородность пород обусловлена, в основном, значительными вариациями содержания низкотеплопроводного органического вещества в пределах каждого образца. Так, согласно результатам, приведенным на рисунках 4.30 и 4.31, значительные вариации  $C_{орг}$  в пределах образцов каждого образца керна составляют 2-20%, что показывает, что результаты определений  $C_{орг}$  при помощи пиролиза на малых по объему пробах (как правило, не более 0,1 см<sup>3</sup>) являются недостаточно представительными.

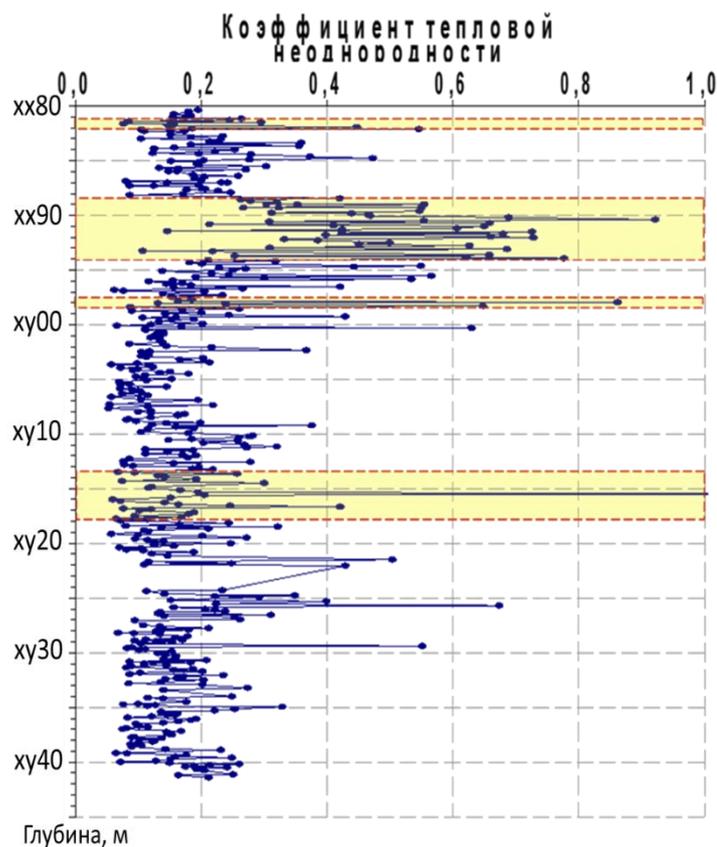


Рисунок 4.30. - Распределение коэффициента тепловой неоднородности образцов пород вдоль скважины, зарегистрированное при непрерывном теплофизическом профилировании керна (бежевым цветом выделены зоны повышенной тепловой неоднородности пород) [142].

Вместе с тем, данные измерений  $C_{орг}$  при помощи пиролиза позволяют повысить точность измерений абсолютных значений  $C_{орг}$  при помощи метода теплофизического профилирования керна путем калибровки метода теплофизического профилирования. Так, на рисунке 4.31а приведены результаты определений средних значений  $C_{орг}$  для каждого изучавшегося образца керна, полученные до калибровки теплофизического метода определения  $C_{орг}$  по результатам пиролиза. На рисунке 4.31б приведены результаты определений средних значений  $C_{орг}$  для каждого изучавшегося образца керна, полученные после калибровки теплофизического метода определения  $C_{орг}$  по результатам пиролиза. Хотя характер вариаций  $C_{орг}$  по данным на обоих

рисунках практически одинаков, калибровка позволила достаточно существенно скорректировать результаты определений  $C_{орг}$  в интервале глубин ниже глубины 2424 м. Причина необходимости корректировки заключается в том, что для пород данной формации ранее теплофизическая методика для определения  $C_{орг}$  практически не применялась, поэтому для данной формации у сотрудников научной группы отсутствовали достаточно точные параметры для реализации данной методики с необходимой точностью.

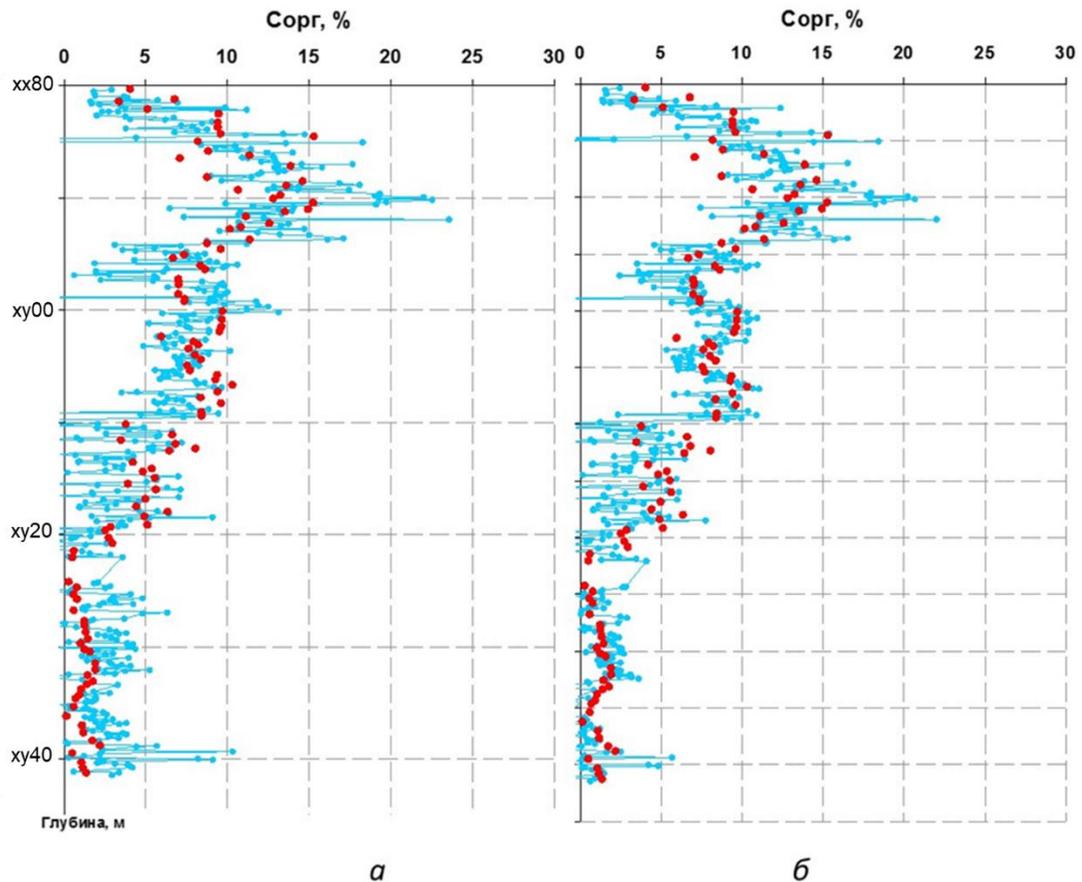


Рисунок 4.31. - Результаты определений средних значений  $C_{орг}$  для каждого изучавшегося образца керна скважины. а - полученные до калибровки теплофизического метода определения  $C_{орг}$  по результатам пиролиза; б - после калибровки теплофизического метода определения  $C_{орг}$  по результатам пиролиза на 114 образцах.

На рисунке 4.32 приведено поле корреляции между результатами оценки  $C_{орг}$  по данным пиролиза и нашими результатами определения  $C_{орг}$  по данным теплофизического профилирования. Для анализа были отобраны только те результаты пиролиза, которые соответствуют 54 образцам пород, отбирившимся для пиролиза по результатам теплофизического профилирования керна. Таким образом, приведенные на рисунке 4.32 данные пиролиза строго соответствуют участкам теплофизического профилирования 54 образцов керна. Для каждого образца на рисунке 4.32 при помощи цветовой шкалы и цифрами указана глубина отбора образца.

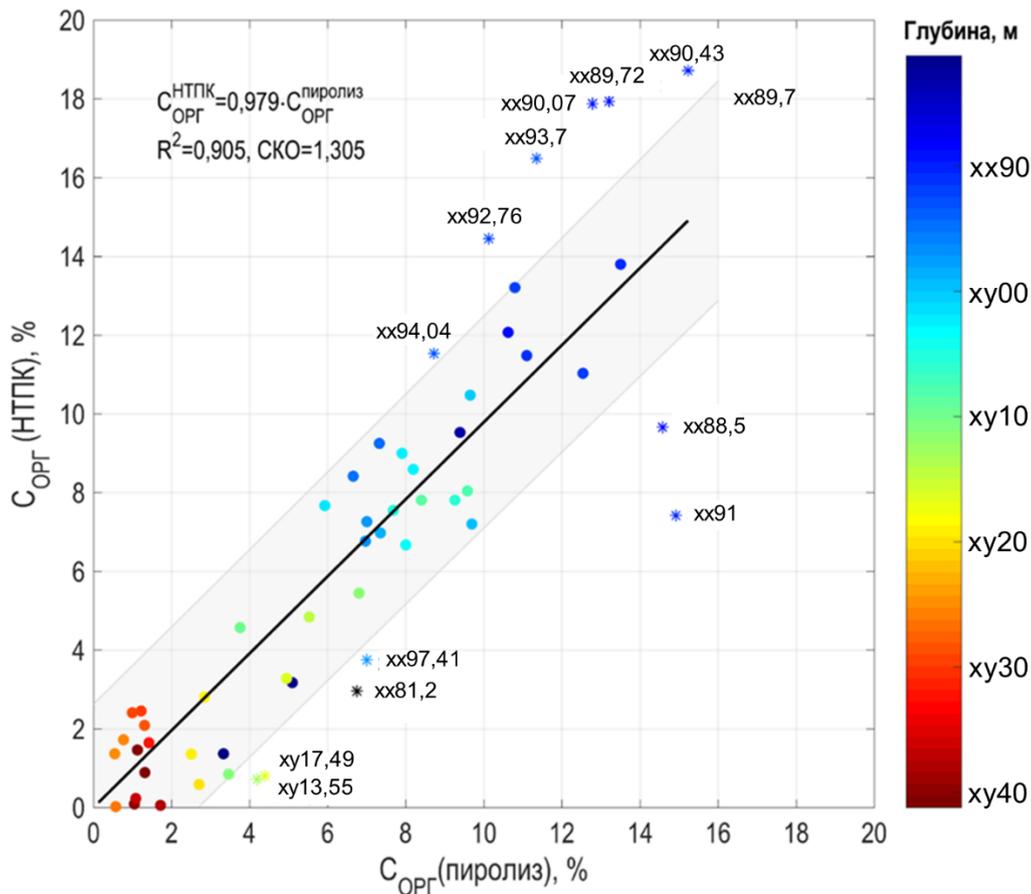


Рисунок 4.32. - Поле корреляции результатов определения  $C_{\text{орг}}$  методом пиролиза (ось абсцисс) и методом непрерывного теплофизического профилирования зерна (НТПК) (ось ординат). Рядом с точками на рисунке, характеризующими наиболее существенное расхождение данных, приведены глубины отбора изучавшихся образцов пород (в метрах). Цвет точек на рисунке соответствует цветовой шкале глубин, приведенной справа.

Серьезная трудность сопоставления результатов определения  $C_{\text{орг}}$ , полученными методами пиролиза и непрерывного теплофизического профилирования зерна, заключается в том, что представительность данных пиролиза значительно уступает данным теплофизического профилирования. Это обусловлено следующими причинами:

- 1) исследования путем пиролиза проводятся на малых образцах, объем которых не превышает 0,10-0,25 см<sup>3</sup>, в то время как объем образца зерна, охватываемый при теплофизическом профилировании составляет 13-30 см<sup>3</sup> в зависимости от длины образца зерна [61], т.е. результаты определения  $C_{\text{орг}}$  путем теплофизического профилирования характеризуют в 50-120 раз больший объем породы, чем при пиролизе, что при высокой неоднородности пород баженовской свиты является важным;
- 2) малые по объему образцы для пиролиза отбираются из образцов полноразмерного зерна достаточно субъективно, что становится критичным при высокой неоднородности пород баженовской свиты и доманиковой формации, проиллюстрированной на рисунке 4.30 и характеризуемой материалами главы 5 (таблицы 5.1-5.5, рисунки 5.3, 5.7).

Как следует из рисунка 4.32, наибольшим расхождением в результатах определения  $C_{org}$  путем пиролиза и теплофизического профилирования отличаются 8 образцов пород из интервала глубин 2388,51 – 2394,04 м. Эти образцы составляют большинство – 8 из 12 – образцов, которые соответствуют наиболее сильному расхождению данных по  $C_{org}$ , полученных двумя методами. Однако, согласно рисунку 4.30, именно в этом интервале глубин, который выделен желтым цветом на рисунке 4.30, образцы керна отличаются наиболее высокой неоднородностью с характерными вариациями коэффициента тепловой неоднородности в основном в диапазоне очень высоких значений 0,3 – 0,7. Это показывает, что высокая неоднородность образцов баженовской свиты не позволяет получить достаточную представительность результатов определений  $C_{org}$  методом пиролиза, что и является основной причиной отмечаемого расхождения данных двух методов измерений. Остальные 4 образца пород, для которых данные по  $C_{org}$  выходят за пределы доверительного интервала  $\pm 2$  СКО (СКО - среднеквадратичное отклонение), также соответствуют диапазонам глубин с повышенной степенью неоднородности пород, также выделенным желтым цветом на рисунке 4.30, в которых повышенная неоднородность снижает представительность результатов пиролиза вследствие малого объема каждого из образцов, отбираемых на пиролиз. В связи с отмечаемым искажающим влиянием неоднородности образцов на представительность данных, используемых для настоящего корреляционного анализа, указанные образцы, соответствующие интервалам глубин, выделенным желтым цветом на рисунке 4.30, были удалены с поля корреляции при переходе от рисунка 4.32 к рисунку 4.33 из-за низкой представительности результатов измерений методом пиролиза.

На рисунке 4.33, построенном с исключением существенно неоднородных образцов, искажающих связь результатов определения  $C_{org}$  двумя разными методами, приведено поле корреляции для результатов определения  $C_{org}$  на 42 образцах керна как методом пиролиза, так и методом теплофизического профилирования керна, в условиях, когда неоднородность образцов пород не могла играть столь существенной роли, хотя, тем не менее, и снижала представительность результатов пиролиза из-за малого объема изучаемых образцов пород. Как следует из данных на рисунке 4.33, корреляция между результатами определения  $C_{org}$  путем пиролиза и теплофизического профилирования характеризуется высоким коэффициентом корреляции (0,905), который намного превышает критический уровень значимости данного коэффициента: при доверительной вероятности 0,95 при данном объеме выборки для коэффициента корреляции критическим является значение 0,30. Наклон прямой линии линейной регрессии показывает, что даже в диапазоне максимальных зарегистрированных значений  $C_{org}$  систематическое расхождение результатов определений  $C_{org}$  двумя сопоставляемыми методами пренебрежимо мало и не превышает 0,25%.

Как показано выше, тесная связь вариаций теплопроводности и  $C_{орг}$  объясняется значительным отличием теплопроводности органического вещества (0,15-0,70 Вт/(м·К) в зависимости от пористости керогена) и теплопроводности минеральной матрицы пород (2,5 – 3,3 Вт/(м·К)). Теплопроводность основных минералов, образующих минеральную матрицу пород баженовской свиты, варьирует незначительно, за исключением пирита, проявления которого легко контролируются по значительным локальным повышениям теплопроводности на ее профилях вдоль образцов керна и исключаются оператором при обработке результатов профилирования и оценке  $C_{орг}$ .

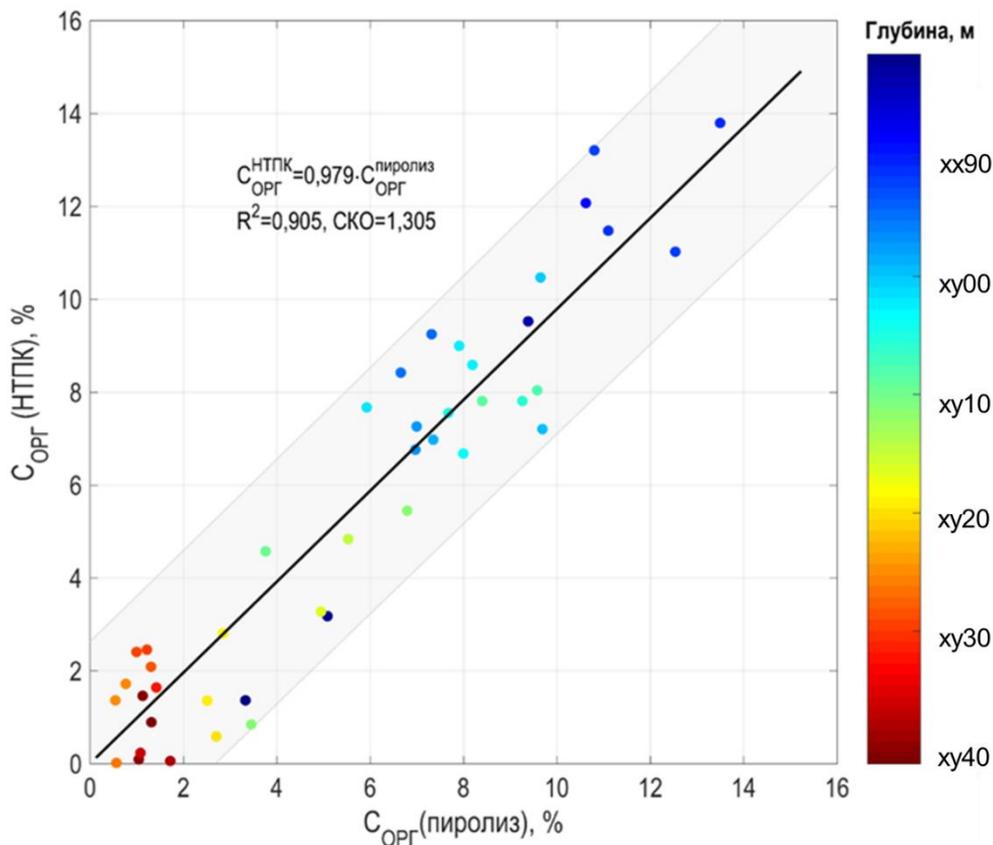


Рисунок 4.33. - Поле корреляции результатов определения  $C_{орг}$  методом пиролиза (ось абсцисс) и методом непрерывного теплофизического профилирования керна (НТПК) (ось ординат). Серым цветом отмечен 95% доверительный интервал для результатов определений  $C_{орг}$  методом непрерывного теплофизического профилирования. На рисунке приведены уравнение регрессии, коэффициент детерминации и среднеквадратичное отклонение (СКО).

Подобное сопоставление результатов определения  $C_{орг}$  было выполнено с использованием результатов пиролиза более чем на 900 образцах пород для более 20 скважин, пробуренных в месторождениях, расположенных в баженовской и доманиковой свитах [55, 56, 59, 61, 65, 70, 71, 72]. Данные проведенных сопоставлений подтверждают приведенные выше положительные результаты сопоставимости результатов определения  $C_{орг}$  методами пиролиза и теплофизического профилирования керна.

К сожалению, оценка абсолютной погрешности определения  $C_{орг}$  методом теплофизического профилирования по результатам пиролиза не могла быть проведена в связи с тем, что как в публикациях, так и в технической документации на приборы Rock-Eval и HAWK не удалось обнаружить данные об абсолютной погрешности определений  $C_{орг}$  при помощи данных приборов. В литературе, технической документации к прибору HAWK и ответах компании-производителя прибора HAWK содержится лишь информация о случайной погрешности измерений (повторяемости, воспроизводимости) результатов измерений.

На рисунке 4.34 приведены детальные профили общего содержания органического вещества (синий цвет), полученные с пространственной разрешающей способностью  $\sim 1$  мм по результатам непрерывного высокоразрешающего (с пространственной разрешающей способностью  $\sim 1$  мм) профилирования теплопроводности  $\lambda_{||}$  по керну (левая панель – Добрынинское месторождение, правая панель – Западно-Авралинское месторождение). Красным цветом на рисунке показаны результаты определения  $C_{орг}$  путем пиролиза [56].

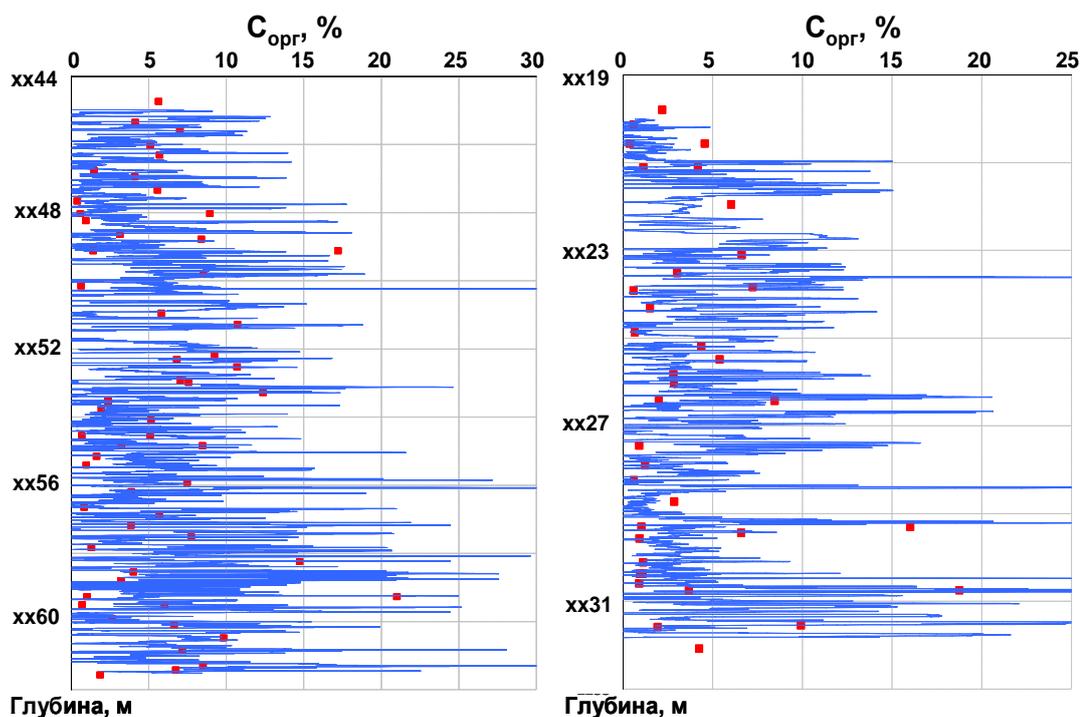


Рисунок 4.34. - Профили общего содержания органического вещества (синий цвет), полученные по результатам непрерывного профилирования теплопроводности  $\lambda_{||}$  по керну (левая панель – Добрынинское месторождение, правая панель – Западно-Авралинское месторождение). Красный цвет – результаты определения  $C_{орг}$  путем пиролиза [56].

Приведенные в данном разделе материалы исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Метод определения  $C_{орг}$  при помощи теплофизического профилирования керна обеспечивает представительные данные о высокодетальном (с разрешающей

способностью около 1 мм) распределении  $C_{org}$  вдоль скважин, что практически не может быть осуществлено при помощи других методов исследований.

2. Высокая неоднородность пород баженовской свиты и доманиковой формации обусловлена, в основном, значительными вариациями содержания органического вещества в пределах каждого образца пород.
3. Установленные значительные вариации  $C_{org}$  в пределах образца керна (с изменениями  $C_{org}$  вдоль одного образца керна до 20%) показывают, что профилирование  $C_{org}$  по результатам теплофизического профилирования керна позволяет существенно дополнить данные пиролиза для повышения надежности оценок распределения  $C_{org}$  вдоль скважин.
4. В отдельных интервалах глубин результаты определения  $C_{org}$  по данным теплофизического профилирования могут существенно противоречить результатам пиролиза в связи с высокой разномасштабной неоднородностью пород баженовской свиты и доманиковой формации, недостаточной детальностью отбора проб на пиролиз и малым объемом проб, отбираемых на пиролиз.
5. В условиях существенной неоднородности пород как на уровне изучавшихся интервалов глубин, так и на уровне отдельных образцов керна, метод теплофизического профилирования предоставляет важную информацию для обоснованного отбора проб для пиролиза и целенаправленного выбора участков керна для изготовления стандартных образцов пород для последующих лабораторных исследований.
6. Поскольку общее содержание органического вещества значительно влияет не только на теплопроводность, но ряд других свойств пород (скорости упругих волн, плотность, естественная радиоактивность и др., глава 5), целесообразным является поточное высокоразрешающее теплофизическое профилирование керна для исследования всего керна скважин сразу после извлечения керна из упаковочных контейнеров, что обеспечит последующие исследования керна детальной информацией о неоднородности и анизотропии пород разреза как для каждого образца керна, так и для изучаемого участка разреза в целом.
7. Информация о характере детальных вариаций  $C_{org}$  как вдоль скважины, так и вдоль каждого образца керна, получаемая при помощи метода теплофизического профилирования, является достаточно стабильной и не зависит существенно от результатов калибровки метода при помощи данных пиролиза., которая, тем не менее, помогает уточнить абсолютные результаты измерений  $C_{org}$ , полученные при помощи теплофизического профилирования керна.

#### 4.8. Использование измерений тепловых свойств для обоснованного отбора образцов керна для лабораторных исследований и контроля за изменениями их свойств в процессе петрофизических работ

Результаты применения непрерывного высокоразрешающего теплофизического профилирования керна создают возможности для более обоснованного отбора образцов пород для последующих лабораторных исследований, так как обеспечивают детальную разномасштабную информацию о вариациях теплопроводности, неоднородности и степени анизотропии пород вдоль скважины. В нашей практике петрофизических исследований такой отбор образцов керна мы сочетаем на второй стадии работ с последующими исследованиями тепловой неоднородности и пространственных вариаций степени тепловой анизотропии каждого отобранного таким образом образца при помощи разработанных приемов, основанных на применении метода оптического сканирования [152]. Это позволяет обеспечить оптимальный выбор области в образце, отобранном на первой стадии работ, для изготовления стандартных образцов (цилиндры 30x30 мм) или других малогабаритных образцов для различных видов стандартных или специальных лабораторных исследований [152].

Основанный на таком подходе стандартный комплекс исследований тепловых свойств включает в себя следующие последовательные этапы (рисунок 4.35) [152, 157]:



Рисунок 4.35. – Использование теплофизического профилирования для обоснованного отбора образцов полноразмерного керна и их участков для выбуривания стандартных образцов пород для лабораторных петрофизических исследований.

- непрерывное теплофизическое профилирование на полноразмерном керне в условиях кернохранилища или в лаборатории,
- отбор наиболее представительных образцов керна по результатам теплофизического профилирования и геологического анализа,
- дополнительное разнонаправленное теплофизическое профилирование отобранных образцов керна для более детального анализа их неоднородности, оценки их тепловой анизотропии и выявления вариаций тепловой анизотропии в пределах отобранных образцов,
- обоснованный выбор мест отбора на отобранных образцах керна по результатам дополнительного профилирования и выбуривание представительных стандартных образцов пород для каждого выделенного литотипа или интервала глубин на основе данных профилирования,
- лабораторные петрофизические исследования на изготовленных стандартных образцах (измерения при помощи лазерных приборов оптического сканирования до и после экстрагирования, для высушенных и водонасыщенных образцов, измерения тепловых свойств при пластовых условиях на специальном оборудовании) [77, 78].

## **ВЫВОДЫ**

1. Новый метод изучения коллекторов, основанный на непрерывном профилировании теплопроводности и температуропроводности/объемной теплоемкости керна с последующей обработкой экспериментальных теплофизических данных совместно с результатами ГИС, предоставляет возможности для увеличения объема и повышения качества петрофизических данных о месторождениях с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными ресурсами.
2. Непрерывное теплофизическое профилирование около 3000 образцов полноразмерного керна двух оценочных скважин, пробуренных в пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения тяжелой нефти, выполненное впервые в практике геолого-геофизических работ, позволило зарегистрировать существенные разномасштабные вариации комплекса тепловых свойств пород, включая теплопроводность, коэффициент тепловой анизотропии, объемную теплоемкость, в масштабе от 1 мм до десятков метров, обеспечило детальные данные о зональности тепловых свойств пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения тяжелой нефти и тепловых свойствах минеральной матрицы пород, необходимые для термогидродинамического моделирования резервуара при разработке методов добычи с тепловым воздействием на пласт.

3. Выявленные связи теплопроводности и коэффициента тепловой неоднородности с пористостью и характер изменения этих связей с глубиной обеспечили возможность дифференцировать разные виды пористости по интервалам глубин и характеризовать распределение пористости в пределах образцов пород, выделять участки разреза с вариациями минерального состава пород. Показано, что существенно более высокая разрешающая способность при регистрации вариаций теплопроводности, чем при регистрации вариаций пористости по ГИС, позволяет уточнить структуру порового пространства путем сравнения вертикальных вариаций теплопроводности по данным ее профилирования и вертикальных вариаций пористости по данным ГИС.
4. Участки пермо-карбоновой залежи, вскрытые двумя скважинами, характеризуются не только существенной вертикальной теплофизической зональностью, но и отличаются между собой по взаимосвязи тепловых свойств, характеру и степени их пространственных вариаций в различном масштабе, связям тепловых свойств с пористостью, что свидетельствует о значительных отличиях в геологическом строении участков залежи, вскрытых данными скважинами, и трехмерной неоднородности свойств пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения.
5. Сочетание результатов непрерывного теплофизического профилирования керна с данными ГИС позволило разработать подход для определения теплопроводности минеральной матрицы пород и зарегистрировать вертикальные вариации теплопроводности минеральной матрицы, необходимые для гидродинамического моделирования, вдоль одной из изучавшихся оценочных скважин.
6. Метод непрерывного теплофизического профилирования керна скважин обеспечивает непрерывную регистрацию с высокой пространственной разрешающей способностью распределения общего содержания органического вещества вдоль скважин по данным о вариациях теплопроводности.
7. Непрерывное профилирование тепловых свойств пород на керне позволяет оптимизировать отбор образцов полноразмерного керна для лабораторных исследований, а последующий анализ вариаций теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии в пределах отобранных образцов полноразмерного керна позволяет определить на них участки для изготовления стандартных образцов пород для последующих лабораторных исследований.

## ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ КЕРНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ И ДОМАНИКОВОЙ ФОРМАЦИИ

Первые исследования пород баженовской свиты при помощи нового метода непрерывного теплофизического профилирования керна были проведены в рамках сотрудничества с ООО «Газпром нефть НТЦ» в 2015 г., когда для 5 скважин месторождений Южно-Приобское, Вынгаяхинское и Краснотенинское автором диссертации было изучено 4306 образцов керна. Эти работы были продолжены в 2016 - 2018 гг. совместно с ООО «Газпром нефть НТЦ», компаниями «Роснефть», ООО «Лукойл Инжиниринг» и АО «РИТЭК». Всего в течение 2015-2018 гг. данным методом лично автором или под его руководством экспериментальными работами было изучено 7460 образцов керна из 33 скважин, пробуренных для изучения 22 месторождений в баженовской свите, и 3417 образцов керна из 9 скважин, пробуренных в 7 месторождениях доманиковой формации [54, 55, 58, 61, 65, 66, 68, 69, 70, 80, 81, 104, 142, 144, 150, 168, 173].

Впервые тепловые свойства пород не только центральной части Западно-Сибирской плиты, но и любого участка осадочных бассейнов мира были изучены на столь представительном материале с получением данных о теплопроводности, объемной теплоемкости, коэффициенте тепловой анизотропии и степени неоднородности образцов, характеризующей текстурные особенности пород.

Проведенные исследования позволили установить новые возможности, которые предоставляет метод непрерывного теплофизического профилирования керна при поисках, разведке и разработке месторождений с нетрадиционными ресурсами углеводородов.

В результате данных работ было установлено, что охарактеризованная в разделе 3.3 связь теплопроводности с общим содержанием органического вещества обусловлена, в основном, следующими факторами:

- относительно малые вариации эффективной теплопроводности минеральной матрицы пород нетрадиционных коллекторов в пределах толщи, вскрытой скважиной (в диапазоне 2,2-3,1 Вт/(м·К), разделы 5.1-5.5);
- достаточно высокий контраст эффективной теплопроводности минеральной матрицы пород и теплопроводности органического вещества (0, 2-0,6 Вт/(м·К)), являющийся причиной высокой неоднородности пород как в масштабах пласта, так и на уровне образцов керна;
- малая пористость пород (первые проценты).

Контраст в свойствах минеральной матрицы и органического вещества характерен также для скоростей упругих волн, электропроводности, плотности. Известно также, что содержание органического вещества в данных породах коррелирует с естественной радиоактивностью пород [43, 51]. Все эти факторы должны обуславливать взаимосвязь перечисленных свойств пород, как это показано на рисунке 5.1, что создало благоприятные предпосылки для получения на представительном экспериментальном материале корреляций между теплопроводностью и каждым из других свойств пород: общим содержанием органического вещества, скоростями упругих волн, плотностью, электропроводностью, естественной радиоактивностью.

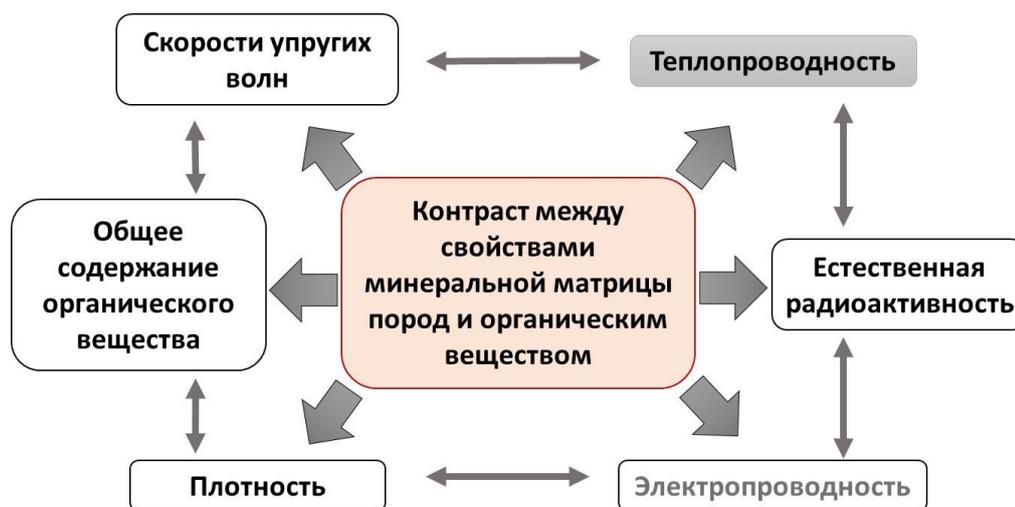


Рисунок 5.1. – Высокий контраст между свойствами минеральной матрицы нетрадиционных коллекторов и органическим веществом как фактор, определяющий перспективы установления тесных корреляций между теплопроводностью и каждым из других свойств пород: общим содержанием органического вещества, скоростями упругих волн, плотностью, электропроводностью, естественной радиоактивностью.

Важной особенностью породы баженовской и доманиковой формаций является их существенная анизотропия [3, 27], которая должна учитываться при петрофизических исследованиях, что обеспечивается методом оптического сканирования.

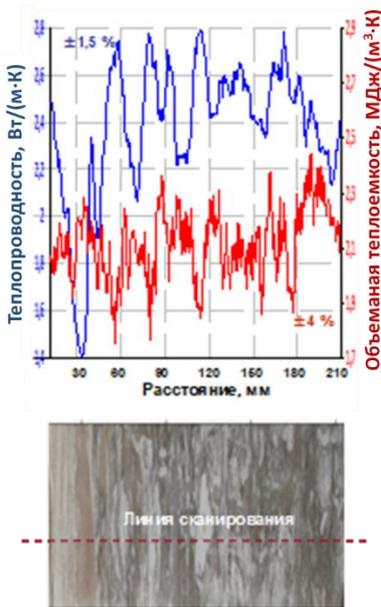
Указанные особенности пород нетрадиционных коллекторов обусловили эффективность применения нового метода непрерывного теплофизического профилирования керна для изучения пород баженовской свиты и доманиковой формации. Результаты данных исследований приведены в настоящей главе.

## 5.1. Применение метода непрерывного теплофизического профилирования керна для исследований месторождений углеводородов в баженовской свите и доманиковой формации

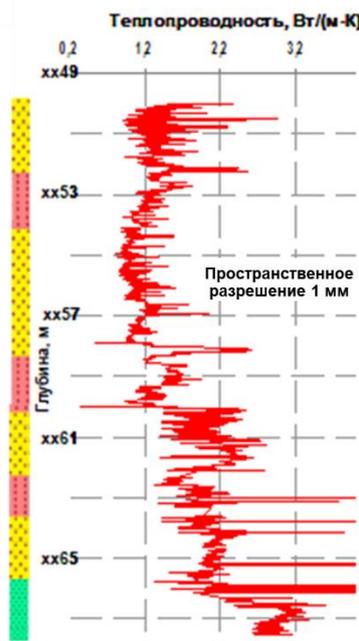
### 5.1.1. Виды информации о тепловых свойствах пород, регистрируемой при непрерывном профилировании керна

По результатам теплофизического профилирования керна для каждой скважины получают три вида информации о тепловых свойствах пород: (1) профили теплопроводности и объемной теплоемкости и коэффициенты тепловой анизотропии и неоднородности для каждого образца (левая панель на рисунке 5.2), (2) непрерывный профиль высокого разрешения (~1 мм) теплопроводности вдоль скважины (средняя панель на рисунке 5.2), (3) профили вдоль скважины средних значений главных значений теплопроводности, объемной теплоемкости, коэффициента тепловой анизотропии, коэффициентов тепловой неоднородности, а также минимальной и максимальной теплопроводности при сканировании вдоль и поперек образца для каждого образца (правая панель на рисунке 5.2).

1. Профили тепловых свойств вдоль каждого образца керна



2. Профили теплопроводности высокого разрешения вдоль скважин



3. Профили тепловых свойств по средним значениям для образцов

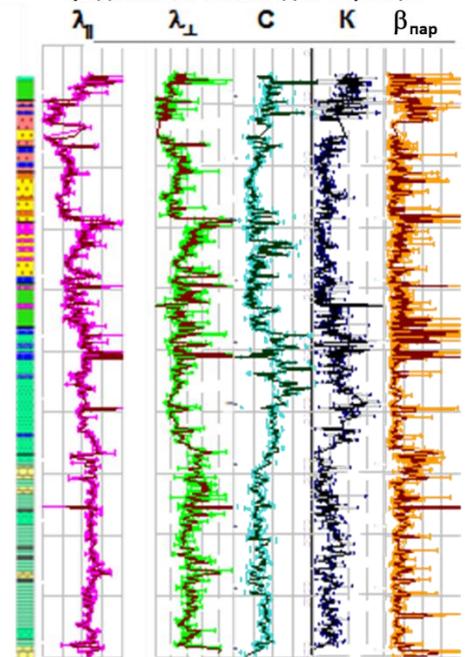


Рисунок 5.2. – Три вида информации о тепловых свойствах пород, получаемых по результатам профилирования керна для каждой скважины.

На рисунке 5.3 приведен характерный пример зарегистрированного распределения комплекса тепловых свойств вдоль скважины одного из месторождений баженовской свиты. Точками отмечены средние значения параметров для каждого образца керна, сплошными цветными линиями – результаты усреднения в скользящем прямоугольном окне с 5 элементами.

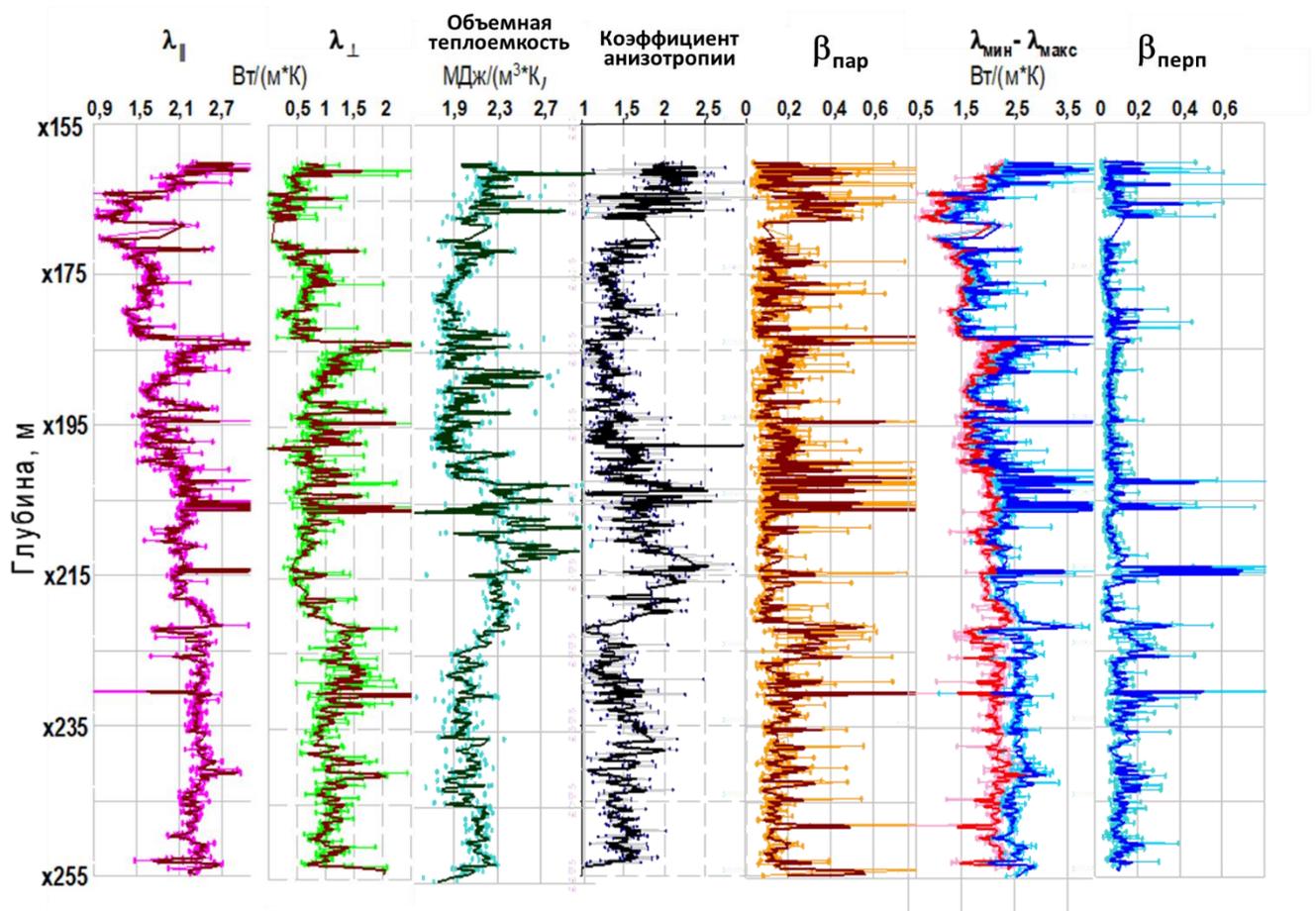


Рисунок 5.3. – Распределение вдоль скважины, вскрывшей отложения баженовской свиты, компонент теплопроводности  $\lambda_{||}$  и  $\lambda_{\perp}$  (соответственно вдоль и поперек напластования пород, объемной теплоемкости, коэффициента тепловой анизотропии  $K$ , коэффициента тепловой неоднородности  $\beta_{\text{пар}}$  и  $\beta_{\text{перп}}$  при профилировании керна соответственно вдоль и поперек его оси и минимальных и максимальных значений теплопроводности по ее профилю для каждого образца [81]. Для компонент теплопроводности, объемной теплоемкости и коэффициента анизотропии точками показаны средние значения параметров для каждого изучавшегося образца.

Подобный комплекс данных был получен для 35 скважин, пробуренных в 28 месторождениях баженовской и доманиковой формаций. По данным, приведенным на рисунке 5.3, можно отметить общие особенности, характерные для всех этих случаев [54, 58, 61, 66, 68, 69, 70, 81, 104, 142, 144, 150, 168]:

- оба главных значения тензора теплопроводности (вдоль и поперек слоистости), объемная теплоемкость, коэффициенты тепловой анизотропии и тепловой неоднородности отличаются ярко выраженной зональностью вдоль скважины, что свидетельствует о хороших перспективах использования комплекса тепловых свойств для расчленения разреза и анализа неоднородности толщи;
- изучавшиеся породы баженовской свиты характеризуются существенным коэффициентом тепловой анизотропии - в большинстве своем в диапазоне значений 1,2 – 2,5;

- большинство образцов пород существенно неоднородны: коэффициент тепловой неоднородности при сканировании поперек слоистости (т.е. вдоль оси керна) составляет для большинства образцов 0,05 – 0,5;
- степень неоднородности при сканировании вдоль слоистости существенно ниже, чем при сканировании поперек слоистости.

Согласно рисунку 5.3, неоднородность пород характеризуется существенными высокочастотными вариациями даже в малых интервалах глубин, вплоть до масштаба в несколько сантиметров, о чем свидетельствуют как вариации средних значений теплопроводности и объемной теплоемкости на рисунке 5.3, так и существенные значения коэффициента тепловой неоднородности, зарегистрированного при сканировании поперек слоистости (вдоль скважины). Это говорит о том, что непрерывная регистрация вариаций теплопроводности на всем полноразмерном керне при пространственной разрешающей способности 1-2 мм является перспективным подходом для характеристики и расчленения маломощных перспективных геологических объектов, какими являются отложения баженовской свиты.

#### **5.1.2. Обобщенные характеристики тепловых свойств пород баженовской свиты и вмещающих толщ**

В период 2015-2018 гг. при помощи разработанной технологии непрерывного теплофизического профилирования керна были проведены комплексные теплофизические измерения на около 12500 образцах керна 28 скважин, пробуренных на 22 участках Западной Сибири, охватывающих баженовскую свиту. Исследовались тепловые свойства пород баженовской свиты, вмещающих ее пород, а также пород фундамента для нескольких месторождений Краснотеннинского свода, Верхнеляминского вала (Югорский свод), Приобского поднятия, Нижневартовского свода и Вынгаихинского поднятия. Впервые тепловые свойства пород не только центральной части Западно-Сибирской плиты, но и любого участка осадочных бассейнов мира, были изучены на столь представительном материале с получением широкого комплекса данных: теплопроводности, объемной теплоемкости, коэффициенте тепловой анизотропии и степени неоднородности образцов, характеризующей текстурные особенности пород.

Детальные данные о комплексе тепловых свойств, полученные при непрерывном профилировании керна в рамках вышеописанных работ, систематически проводимых, начиная с 2014 г., в сотрудничестве с компаниями ООО «Газпромнефть НТЦ», ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», АО «РИТЕК», «Роснефть» и др., нашли применение при решении следующих задач поиска, разведки и разработки нефтегазовых месторождений:

- создание представительных баз исходных данных по тепловым свойствам для моделирования осадочных бассейнов и гидродинамического моделирования резервуаров при тепловых методах добычи на этапах разработки технологий добычи и их оптимизации, а также при оценке запасов [59, 62, 63, 69, 70, 72];
- геомеханическое моделирование для проектирования ГРП (оценка динамических упругих свойств горных пород и акустической анизотропии) [59, 62, 63, 69, 70, 72];
- повышение разрешающей способности геофизических методов путем комплексирования их данных с результатами непрерывного высокоразрешающего профилирования тепловых свойств пород на керне [59, 62, 63, 69, 70, 72];
- выявление кросс-функциональных связей типа «кern-кern»;
- уточнение глубинной привязки интервалов долбления полноразмерного керна [59, 62, 63, 69, 70, 72];
- обоснованный отбор образцов керна для различных лабораторных исследований (стандартный петрофизический анализ, пиролиз и др.) [54, 59];
- поиск связей между литологическим, вещественным составом горных пород и их физическими свойствами (в т.ч. экстремальные проявления в интервалах, включающих металлосодержащие минералы и кероген) [54, 65, 103].

В таблицах 5.1-5.4 приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных, полученных для пород баженовской свиты и вмещающих толщ: ачимовской и фроловской свит, абалакской и георгиевской свит, тюменской и васюганской свит.

Таблица 5.1. Статистические характеристики тепловых свойств пород баженовской свиты центральной части Западно-Сибирской плиты

Скважина	Теплопроводность, Вт/(м·К)		K <sub>аниз</sub>	β	C, МДж/м <sup>3</sup> ·К	N
	λ <sub>  </sub>	λ <sub>⊥</sub>				
1	2	3	4	5	6	7
<b>Красноленинский свод</b>						
К-Б-1	<u>1,70 (0,24)*</u> 0,68-3,65	<u>0,97 (0,29)</u> 0,30-3,35	<u>1,90 (0,38)</u> 0,55-3,67	<u>0,29 (0,17)</u> 0,04-2,59	<u>1,96 (0,10)</u> 1,23-2,59	367
К-Б-2	<u>1,96 (0,23)</u> 1,40-2,57	<u>1,47 (0,45)</u> 0,80-2,35	<u>1,51 (0,33)</u> 0,97-2,30	<u>0,14 (0,12)</u> 0,04-0,81	<u>2,05 (0,11)</u> 1,86-2,45	60
К-Б-3	<u>2,08 (0,61)</u> 0,83-9,35	<u>1,26 (0,89)</u> 0,50-7,19	<u>1,90 (0,45)</u> 0,98-3,33	<u>0,21 (0,23)</u> 0,04-2,82	<u>2,09 (0,12)</u> 1,76-2,85	233
К-Б-4	<u>2,02 (0,39)</u> 0,86-3,04	<u>1,37 (0,59)</u> 0,48-3,64	<u>1,69 (0,36)</u> 0,99-2,45	<u>0,21 (0,22)</u> 0,05-1,53	<u>2,08 (0,13)</u> 1,71-2,62	159
К-Б-5	<u>1,99 (0,36)</u> 1,12-3,28	<u>1,33 (0,78)</u> 0,21-9,76	<u>1,69 (0,43)</u> 1,00-3,40	<u>0,23 (0,16)</u> 0,05-0,92	<u>2,06 (0,10)</u> 1,62-2,35	265

1	2	3	4	5	6	7
<b>Верхнелямнинский вал</b>						
Вл-Б-1	$\frac{1,74 (0,39)}{0,63-3,08}$	$\frac{1,33 (0,44)}{0,54-2,33}$	$\frac{1,54 (0,28)}{0,95-3,03}$	$\frac{0,21 (0,10)}{0,05-0,74}$	$\frac{1,98 (0,12)}{1,71-2,74}$	121
Вл-Б-2	$\frac{1,88 (0,36)}{0,85-2,87}$	$\frac{1,32 (0,36)}{0,58-2,43}$	$\frac{1,64 (0,29)}{1,03-2,60}$	$\frac{0,23 (0,13)}{0,04-1,10}$	$\frac{2,04 (0,13)}{1,79-2,52}$	77
<b>Приобское поднятие</b>						
П-Б-1	$\frac{2,02 (0,37)}{1,28-3,48}$	$\frac{1,55 (0,67)}{0,68-7,52}$	$\frac{1,42 (0,24)}{0,95-2,05}$	$\frac{0,17 (0,16)}{0,03-1,72}$	$\frac{2,00 (0,13)}{1,71-2,39}$	219
П-Б-2	$\frac{1,83 (0,39)}{0,82-4,46}$	$\frac{1,40 (0,50)}{0,37-2,94}$	$\frac{1,40 (0,26)}{0,98-2,39}$	$\frac{0,20 (0,21)}{0,04-2,29}$	$\frac{1,92 (0,13)}{1,70-2,45}$	332
П-Б-3	$\frac{1,76 (0,39)}{0,75-4,24}$	$\frac{1,30 (0,44)}{0,33-5,61}$	$\frac{1,42 (0,28)}{0,98-2,96}$	$\frac{0,18 (0,18)}{0,03-2,61}$	$\frac{2,01 (0,21)}{1,70-2,86}$	517
<b>Демьянский свод</b>						
Д-Б-1	$\frac{1,80 (0,28)}{1,24-3,35}$	$\frac{1,23 (0,42)}{0,49-3,12}$	$\frac{1,55 (0,29)}{1,01-2,65}$	$\frac{0,20 (0,25)}{0,03-1,79}$	$\frac{1,98 (0,11)}{1,74-2,40}$	280
<b>Сургутский свод</b>						
С-Б-1	$\frac{1,72 (0,36)}{0,71-2,92}$	$\frac{1,27 (0,50)}{0,40-2,81}$	$\frac{1,50 (0,34)}{1,00-2,75}$	$\frac{0,19 (0,17)}{0,04-1,02}$	$\frac{1,98 (0,11)}{1,73-2,33}$	172
С-Б-2	$\frac{1,92 (0,66)}{1,30-7,32}$	$\frac{1,42 (0,56)}{0,52-5,11}$	$\frac{1,44 (0,24)}{1,03-2,52}$	$\frac{0,11 (0,07)}{0,03-0,45}$	$\frac{1,91 (0,07)}{1,73-2,07}$	82
<b>Нижневартовский свод</b>						
Нв-Б-1	$\frac{1,46 (0,43)}{0,93-2,53}$	$\frac{0,93 (0,62)}{0,43-3,33}$	$\frac{1,90 (0,57)}{0,97-3,15}$	$\frac{0,37 (0,35)}{0,04-2,38}$	$\frac{1,92 (0,11)}{1,70-2,30}$	129
Нв-Б-2	$\frac{1,52 (0,35)}{0,85-2,72}$	$\frac{0,92 (0,52)}{0,20-2,60}$	$\frac{1,63 (0,49)}{0,95-2,82}$	$\frac{0,40 (0,31)}{0,08-2,16}$	$\frac{2,06 (0,16)}{1,74-2,58}$	213
Нв-Б-3	$\frac{1,71 (0,29)}{1,07-2,61}$	$\frac{1,18 (0,41)}{0,60-2,86}$	$\frac{1,53 (0,31)}{1,01-2,55}$	$\frac{0,12 (0,08)}{0,03-0,49}$	$\frac{1,96 (0,10)}{1,75-2,31}$	150
<b>Вынгайхинский вал</b>						
Вя-Б-1	$\frac{1,73 (0,31)}{0,71-4,72}$	$\frac{1,22 (0,41)}{0,48-6,67}$	$\frac{1,48 (0,26)}{1,00-2,58}$	$\frac{0,22 (0,34)}{0,03-4,34}$	$\frac{2,18 (0,10)}{1,91-2,57}$	620

\*Примечание: первое число в числителе – среднее значение, число в скобках – среднеквадратичное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальные значения, Б – баженовская свита, N – количество образцов в выборке.

Таблица 5.2. Статистические характеристики тепловых свойств пород ачимовской / фроловской свиты центральной части Западно-Сибирской плиты

Скважина, месторождение (площадь)	Теплопроводность, Вт/(м·К)		К	$\beta$	С, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)	N
	$\lambda_{\parallel}$	$\lambda_{\perp}$				
<b>Красноленинский свод</b>						
К-АФ-1	<u>2,51 (0,10)</u> 2,36-2,73	<u>1,06 (0,36)</u> 0,67-1,77	<u>2,61 (0,73)</u> 1,40-3,67	<u>0,14 (0,06)</u> 0,07-0,29	<u>2,28 (0,16)</u> 2,15-2,59	11
К-АФ-2	<u>2,02 (0,10)</u> 1,81-2,34	<u>1,27 (0,21)</u> 1,00-1,87	<u>1,64 (0,23)</u> 1,12-2,07	<u>0,10 (0,04)</u> 0,05-0,22	<u>2,06 (0,12)</u> 1,84-2,30	105
К-АФ-3	<u>2,51 (0,15)</u> 2,01-2,73	<u>0,85 (0,13)</u> 0,68-1,67	<u>3,02 (0,38)</u> 1,40-3,69	<u>0,09 (0,04)</u> 0,03-0,25	<u>2,36 (0,12)</u> 2,08-2,67	88
К-АФ-4	<u>2,44 (0,38)</u> 1,02-2,89	<u>0,98 (0,18)</u> 0,72-1,81	<u>2,69 (0,43)</u> 1,29 (3,59)	<u>0,15 (0,21)</u> 0,03-1,41	<u>2,30 (0,11)</u> 1,88-2,56	98
<b>Верхнеламнинский вал</b>						
Вл-АФ-1	<u>2,11 (0,26)</u> 0,88-4,22	<u>1,07 (0,25)</u> 0,63-2,24	<u>2,04 (0,31)</u> 1,00-2,84	<u>0,14 (0,18)</u> 0,03-1,83	<u>2,16 (0,13)</u> 1,33-2,36	216
<b>Приобское поднятие</b>						
П-АФ-1	<u>2,39 (0,31)</u> 1,59-6,51	<u>1,60 (0,57)</u> 0,77-7,18	<u>1,63 (0,45)</u> 1,00-3,00	<u>0,14 (0,13)</u> 0,04-1,60	<u>2,21 (0,19)</u> 1,74-2,95	566
П-АФ-2	<u>2,27 (0,55)</u> 1,71-4,80	<u>1,15 (0,53)</u> 0,78-4,25	<u>2,01 (0,28)</u> 1,03-2,53	<u>0,23 (0,28)</u> 0,03-1,05	<u>2,29 (0,18)</u> 2,02-2,85	50
<b>Нижневартовский свод</b>						
Нв-АФ-1	<u>2,03 (0,15)</u> 1,80-2,53	<u>1,21 (0,24)</u> 0,71-1,53	<u>1,82 (0,40)</u> 1,38-2,74	<u>0,22 (0,08)</u> 0,08-0,52	<u>2,21 (0,12)</u> 1,93-2,49	44

Таблица 5.3. Статистические характеристики тепловых свойств пород абалакской/георгиевской свиты центральной части Западно-Сибирской плиты

Скважина, месторождение (площадь)	Теплопроводность, Вт/(м·К)		К	$\beta$	С, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)	N
	$\lambda_{\parallel}$	$\lambda_{\perp}$				
1	2	3	4	5	6	7
<b>Красноленинский свод</b>						
К-АГ-1	<u>2,19 (0,35)</u> 1,79-3,34	<u>1,34 (0,38)</u> 1,01-2,35	<u>1,82 (0,30)</u> 1,29-2,74	<u>0,16 (0,16)</u> 0,04-0,70	<u>2,23 (0,06)</u> 2,15-2,37	39
	<u>2,23 (0,34)</u> 1,51-3,46	<u>1,25 (0,29)</u> 0,74-3,00	<u>1,87 (0,32)</u> 1,05-2,91	<u>0,17 (0,15)</u> 0,02-1,06	<u>2,31 (0,15)</u> 1,91-2,66	132
К-АГ-1	<u>2,06 (0,23)</u> 1,71-2,67	<u>1,20 (0,25)</u> 0,69-2,02	<u>1,75 (0,30)</u> 1,05-2,51	<u>0,15 (0,10)</u> 0,06-0,56	<u>2,26 (0,10)</u> 1,92-2,66	76
<b>Верхнеламнинский вал</b>						
Вл-АГ-1	<u>1,97 (0,23)</u> 1,61-2,60	<u>1,39 (0,42)</u> 0,98-2,59	<u>1,56 (0,25)</u> 1,05-1,95	<u>0,11 (0,13)</u> 0,03-0,99	<u>2,03 (0,13)</u> 1,81-2,50	62
	<u>2,26 (0,27)</u> 1,57-3,71	<u>1,33 (0,55)</u> 0,88-5,68	<u>1,83 (0,32)</u> 1,01-2,64	<u>0,16 (0,18)</u> 0,03-1,33	<u>2,29 (0,11)</u> 1,71- 2,52	104
<b>Приобское поднятие</b>						
П-АГ-1	<u>2,32 (0,35)</u> 1,73-5,55	<u>1,20 (0,35)</u> 0,58-4,23	<u>2,00 (0,32)</u> 1,00-2,74	<u>0,19 (0,27)</u> 0,05-2,40	<u>2,33 (0,13)</u> 1,73-2,67	260

1	2	3	4	5	6	7
П-АГ-2	<u>2,23 (0,63)</u> 1,48-11,65	<u>1,24 (0,49)</u> 0,59-6,85	<u>1,90 (0,40)</u> 1,00-2,95	<u>0,17 (0,24)</u> 0,05-2,33	<u>2,25 (0,15)</u> 1,84-2,74	378
	<u>2,26 (0,64)</u> 1,61-7,40	<u>1,34 (0,60)</u> 0,78-5,89	<u>1,75 (0,35)</u> 0,97-2,83	<u>0,19 (0,27)</u> 0,03-1,73	<u>2,35 (0,26)</u> 1,78-3,16	
<b>Демьянский свод</b>						
Д-АГ-1	<u>2,02 (0,82)</u> 1,58-8,51	<u>1,18 (1,04)</u> 0,40-10,7	<u>1,82 (0,22)</u> 1,00-2,44	<u>0,22 (0,31)</u> 0,04-1,81	<u>2,05 (0,10)</u> 1,73-2,42	119
<b>Нижневартовский свод</b>						
Нв-АГ-1	<u>2,28 (0,37)</u> 1,92-3,11	<u>1,66 (0,10)</u> 1,56-1,75	<u>1,28 (0,06)</u> 1,22-1,34	<u>0,44 (0,47)</u> 0,09-1,65	<u>2,22 (0,23)</u> 1,87-2,86	13
	<u>1,75 (0,19)</u> 1,48-2,36	<u>1,43 (0,52)</u> 0,83-2,47	<u>1,46 (0,34)</u> 1,00-2,09	<u>0,47 (0,48)</u> 0,10-2,10	<u>2,17 (0,20)</u> 1,81-2,62	
Нв-АГ-2	<u>1,75 (0,19)</u> 1,48-2,36	<u>1,43 (0,52)</u> 0,83-2,47	<u>1,46 (0,34)</u> 1,00-2,09	<u>0,47 (0,48)</u> 0,10-2,10	<u>2,17 (0,20)</u> 1,81-2,62	24
<b>Вынгайхинский вал</b>						
Вя-АГ-1	<u>1,89 (0,13)</u> 1,33-2,11	<u>1,32 (0,16)</u> 0,88-1,66	<u>1,51 (0,18)</u> 1,12-2,01	<u>0,14 (0,11)</u> 0,03-0,85	<u>2,24 (0,11)</u> 1,99-2,49	115

Таблица 5.4. Статистические характеристики тепловых свойств пород тюменской/васюганской свиты центральной части Западно-Сибирской плиты

Скважина, месторождение (площадь)	Теплопроводность, Вт/(м·К)		К	β	C, МДж/(м³·К)	N
	λ <sub>  </sub>	λ <sub>⊥</sub>				
1	2	3	4	5	6	7
<b>Красноленинский свод</b>						
К-ТВ-1	<u>2,61 (0,19)</u> 1,84-3,13	<u>2,00 (0,37)</u> 0,25-3,07	<u>1,37 (0,22)</u> 1,00-2,44	<u>0,15 (0,11)</u> 0,03-1,14	<u>2,11 (0,14)</u> 1,76-2,60	386
	<u>2,57 (0,27)</u> 1,49-3,61	<u>1,83 (0,49)</u> 0,85-3,85	<u>1,50 (0,31)</u> 1,00-2,55	<u>0,16 (0,11)</u> 0,05-0,87	<u>2,09 (0,14)</u> 1,77-2,44	
К-ТВ-2	<u>2,57 (0,27)</u> 1,49-3,61	<u>1,83 (0,49)</u> 0,85-3,85	<u>1,50 (0,31)</u> 1,00-2,55	<u>0,16 (0,11)</u> 0,05-0,87	<u>2,09 (0,14)</u> 1,77-2,44	204
<b>Верхнелямнинский вал</b>						
Вл-ТВ-1	<u>2,33 (0,39)</u> 0,48-5,58	<u>1,80 (0,27)</u> 1,26-2,47	<u>1,41 (0,20)</u> 1,03-1,98	<u>0,18 (0,19)</u> 0,04-2,24	<u>2,03 (0,12)</u> 1,77-2,37	255
	<u>2,42 (0,22)</u> 1,55-3,00	<u>1,84 (0,30)</u> 0,71-2,78	<u>1,36 (0,21)</u> 1,00-2,79	<u>0,12 (0,07)</u> 0,04-0,48	<u>2,10 (0,14)</u> 1,76-2,43	
Вл-ТВ-2	<u>2,42 (0,22)</u> 1,55-3,00	<u>1,84 (0,30)</u> 0,71-2,78	<u>1,36 (0,21)</u> 1,00-2,79	<u>0,12 (0,07)</u> 0,04-0,48	<u>2,10 (0,14)</u> 1,76-2,43	451
<b>Приобское поднятие</b>						
П-ТВ-1	<u>2,46 (0,38)</u> 1,85-2,83	<u>1,82 (0,43)</u> 1,38-2,94	<u>1,69 (0,33)</u> 1,01-2,00	<u>0,12 (0,04)</u> 0,07-0,22	<u>2,38 (0,14)</u> 2,06-2,63	15
	<u>2,53 (0,45)</u> 0,20-4,74	<u>1,80 (0,52)</u> 0,17-3,97	<u>1,48 (0,34)</u> 1,00-2,81	<u>0,23 (0,30)</u> 0,03-2,95	<u>2,10 (0,18)</u> 1,70-2,52	
П-ТВ-2	<u>2,53 (0,45)</u> 0,20-4,74	<u>1,80 (0,52)</u> 0,17-3,97	<u>1,48 (0,34)</u> 1,00-2,81	<u>0,23 (0,30)</u> 0,03-2,95	<u>2,10 (0,18)</u> 1,70-2,52	265
П-ТВ-3	<u>2,34 (0,23)</u> 0,28-3,08	<u>1,66 (0,35)</u> 0,99-2,93	<u>1,47 (0,26)</u> 1,00-2,48	<u>0,20 (0,23)</u> 0,05-3,27	<u>2,05 (0,14)</u> 1,71-2,49	289
	<u>2,34 (0,23)</u> 0,28-3,08	<u>1,66 (0,35)</u> 0,99-2,93	<u>1,47 (0,26)</u> 1,00-2,48	<u>0,20 (0,23)</u> 0,05-3,27	<u>2,05 (0,14)</u> 1,71-2,49	
<b>Демьянский свод</b>						
Д-ТВ-1	<u>2,81 (0,16)</u> 2,15-3,12	<u>2,10 (0,17)</u> 0,88-2,96	<u>1,36 (0,16)</u> 1,04-1,67	<u>0,15 (0,07)</u> 0,06-0,41	<u>2,13 (0,10)</u> 1,89-2,28	29

1	2	3	4	5	6	7
<b>Вынгаяхинский вал</b>						
Вя-ТВ-1	$\frac{1,92 (0,20)}{1,54-2,67}$	$\frac{1,69 (0,63)}{0,87-3,67}$	$\frac{1,42 (0,34)}{1,00-2,30}$	$\frac{0,18 (0,12)}{0,03-0,78}$	$\frac{2,25 (0,11)}{1,98-2,51}$	94

Анализ экспериментальных данных для пород баженовской свиты, приведенных в таблицах 5.1-5.4, показывает следующее.

Средние для каждого образца керна значения теплопроводности пород  $\lambda_{||}$  вдоль напластования и  $\lambda_{\perp}$  поперек напластования изменяются соответственно от 0,28 Вт/(м·К) до 9,65 Вт/(м·К) и от 0,21 Вт/(м·К) до 9,76 Вт/(м·К). Значительный диапазон вариаций теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  вдоль скважин (например 0,21-9,76 Вт/(м·К) для скважины К-Б-5) можно объяснить как различием в текстурных особенностях пород (массивная, линзовидно-горизонтальная, слоистая, пятнистая), так и локальными проявлениями высокотеплопроводного пирита.

Средние значения объемной теплоемкости пород для всех изученных скважин имеют незначительные различия и варьируют в диапазоне 1,92-2,38 МДж/(м<sup>3</sup>·К). Среднеквадратичное значение (СКО) объемной теплоемкости для одной из скважин Приобского поднятия отличается от СКО объемной теплоемкости для других скважин на 27-54%, что свидетельствует о более высокой неоднородности объемной теплоемкости пород БС на уровне толщи в этой скважине.

Породы БС, вскрытые всеми изучавшимися скважинами, устойчиво отличаются высокими средними коэффициентами тепловой анизотропии (в диапазоне 1,36 – 3,02). Значительные вариации коэффициента анизотропии вдоль скважин, характеризующиеся повышенными значениями СКО коэффициента анизотропии, отмечаются для пород баженовской свиты Красноленинского и Нижневартовского сводов, что вызвано неравномерным распределением вдоль скважин повышенной ориентированной (сеть параллельных трещин) трещиноватостью исследованных пород Красноленинского свода и повышенным содержанием глинистой составляющей в изученных породах Нижневартовского свода (чешуйки глинистых минералов располагаются параллельно друг другу и поверхностям наслоения).

Высокие значения коэффициента тепловой неоднородности пород (до 4,34 для пород Вынгаяхинского вала) следует объяснить как неоднородным распределением в образцах пород низкотеплопроводного органического вещества (таблица 4.3), так и локальными проявлениями высокотеплопроводного пирита, присутствующего, как правило, в виде гнезд.

Как следует из таблиц 5.1–5.4, высокими средними коэффициентами тепловой анизотропии (до 3,02) устойчиво характеризуются и породы толщ, вмещающих породы баженовской свиты.

### 5.1.3. Обобщенные характеристики тепловых свойств пород доманиковой формации и вмещающих толщ

Впервые в геолого-геофизической практике проведены детальные исследования комплекса тепловых свойств пород доманиковой формации. Исследования проводились при помощи метода непрерывного бесконтактного профилирования тепловых свойств (раздел 4.1) на керне скважин, пробуренных на территории Самарской области на лицензионных участках АО «РИТЭК» [56]. Для скважины Добрынинского месторождения изучено 16,9 м полноразмерного керна (167 образцов), для скважины Западно-Авралинского месторождения - 21,9 м (200 образцов). Для каждого образца керна с пространственным разрешением  $\sim 1$  мм регистрировались профили главного значения тензора теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  вдоль напластования, профили объемной теплоемкости  $C$ , определялись главные значения тензора теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  перпендикулярно напластованию, коэффициент тепловой анизотропии  $K$ , коэффициент тепловой неоднородности  $\beta$ , характеризующий структурно-текстурные особенности пород при сканировании вдоль оси керна ( $\beta_{\parallel}$ ) и в перпендикулярном направлении ( $\beta_{\perp}$ ) [56].

Результаты теплофизического профилирования на керне для Добрынинского и Западно-Авралинского месторождений приведены на рисунках 5.4 и 5.5. Основным целевым назначением результатов измерений теплофизического профилирования на керне являлось формирование представительных баз исходных данных о тепловых свойствах пород и петрофизическое обоснование их использования для бассейнового моделирования и гидродинамического моделирования процессов тепло- и массопереноса в резервуарах при тепловых методах добычи, а также решения прямых задач термометрии скважин [56].

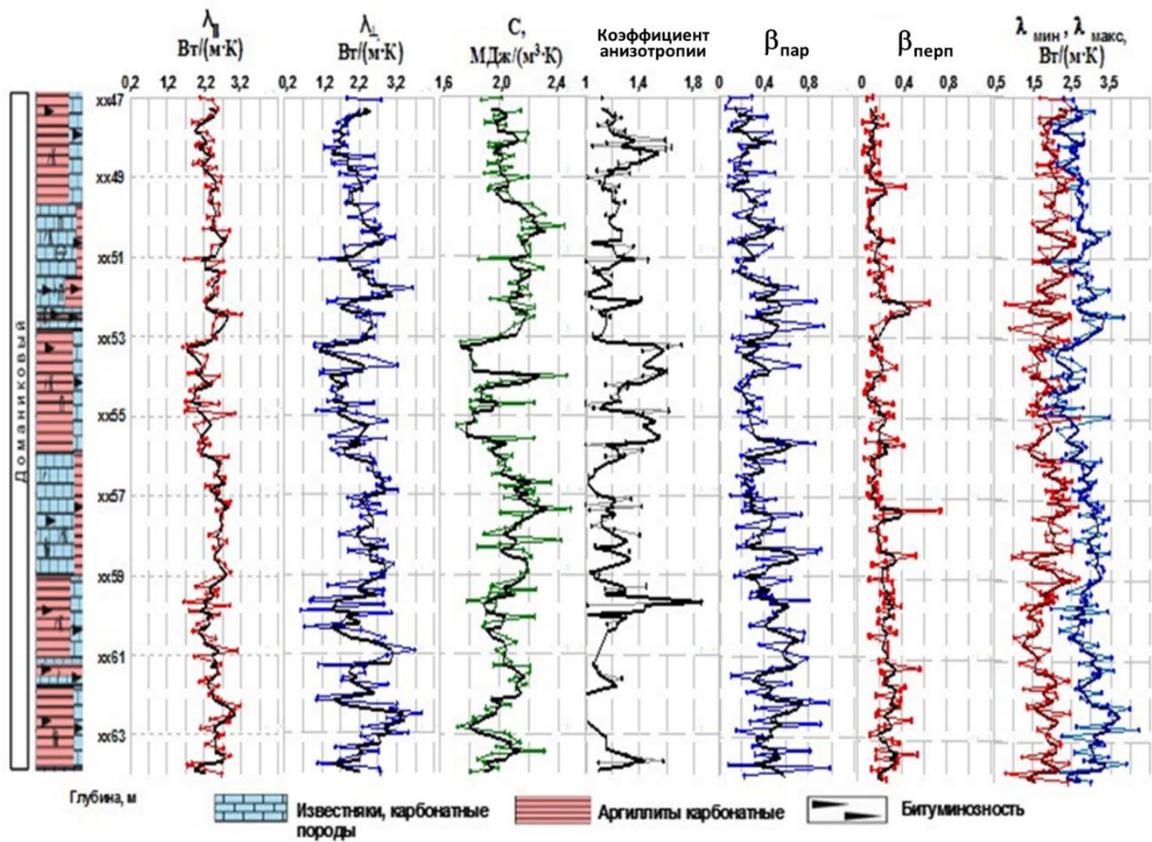


Рисунок 5.4. - Результаты исследований тепловых свойств пород месторождения Добрынинское методом непрерывного профилирования керна (пояснения даны в тексте) [56]. Точками показаны средние значения параметров для каждого изучавшегося образца керна, черные линии на всех панелях – результаты обработки данных сглаживающим прямоугольным фильтром с окном осреднения 3 элемента.

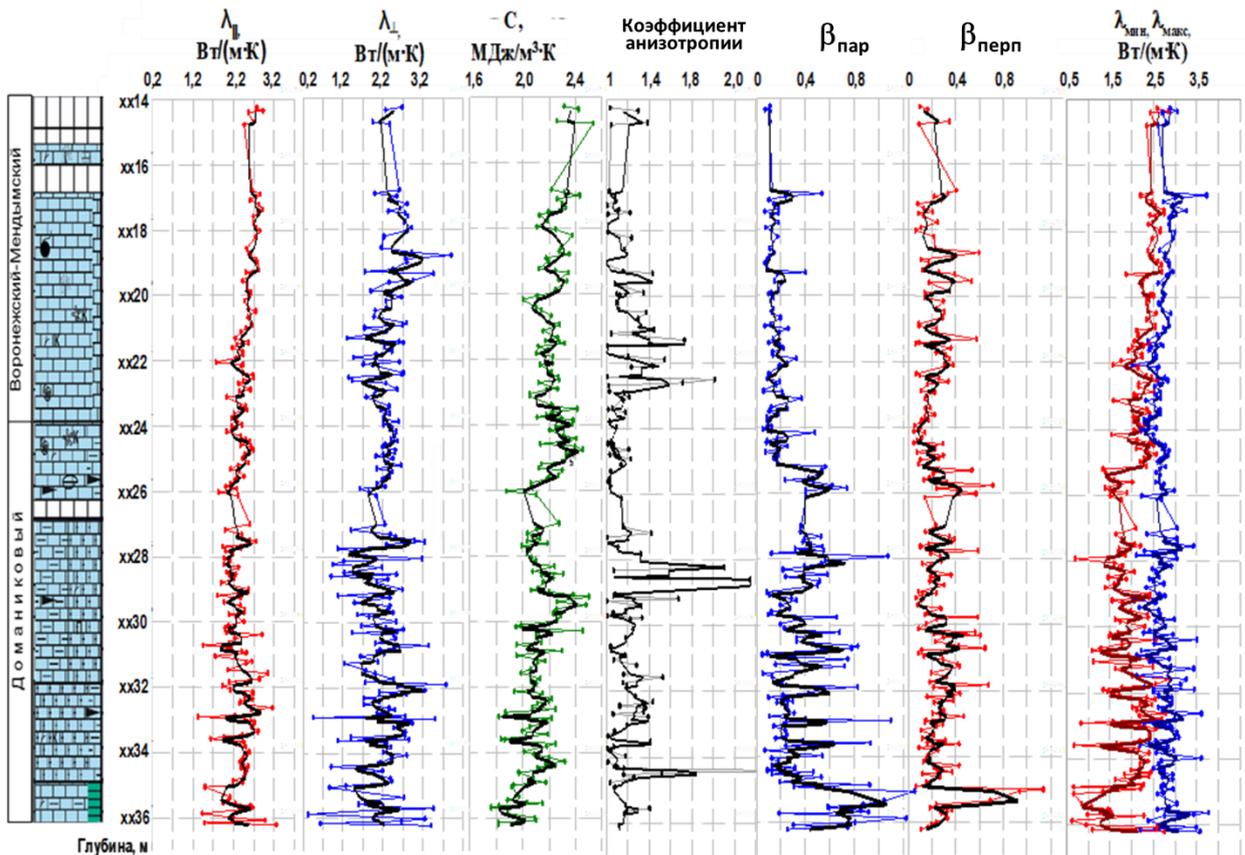


Рисунок 5.5. - Результаты исследований тепловых свойств пород месторождения Западно-Авралинское путем непрерывного профилирования керна [56]. Точками показаны средние значения параметров для каждого изучавшегося образца керна, черные линии на всех панелях – результаты обработки данных сглаживающим прямоугольным фильтром с окном осреднения 3 элемента.

Согласно данным на рисунках 5.4 и 5.5, значительные вариации теплопроводности и объемной теплоемкости характеризуют существенную неоднородность пород обоих разрезов. Данные о коэффициентах  $\beta_{||}$  и  $\beta_{\perp}$  свидетельствуют о серьезной неоднородности изучавшихся образцов пород, поскольку вариации теплопроводности в пределах образцов достигают 80-90%, что в первую очередь отражает значительные вариации  $C_{орг}$  в пределах образца керна, и при этом характеризуются зональностью вдоль скважин [56]. Обращает на себя внимание существенная анизотропия пород (с коэффициентом тепловой анизотропии до 2,2) с ее четко выраженной зональностью вдоль скважин. Совокупность данных о параметрах  $\lambda_{мин}$  и  $\lambda_{макс}$  обеспечивает информацию, необходимую для интерпретации вертикальных вариаций коэффициента тепловой неоднородности пород, так как повышенные значения коэффициента тепловой неоднородности могут быть обусловлены как увеличением значений  $\lambda_{макс}$  (что обусловлено наличием гнезд высокотеплопроводных пирита, кварца и т.д.), так и существенным уменьшением  $\lambda_{мин}$  (что означает возрастание  $C_{орг}$ , наличие в образцах пород трещин и т.д.) [56]. Использование данных теплофизического профилирования как средства анализа неоднородности высокого разрешения

позволило обеспечить обоснованный отбор образцов для стандартных и специальных исследований керна.

На рисунке 5.6 приведены детальные профили теплопроводности  $\lambda_{//}$  пород изучавшихся месторождений, что предоставило уникальную возможность характеризовать разномасштабную неоднородность разрезов, начиная от масштаба в  $\sim 1$  мм (случайная погрешность определения теплопроводности составляет  $\pm 1,5\%$  при доверительной вероятности 0,95). Данные на рисунках 5.4-5.6 свидетельствуют о существенной неоднородности разрезов, которая проявляется на разных масштабах, начиная с первых миллиметров, что связано в первую очередь, как указывалось выше, со значительными вариациями общего содержания органического вещества  $C_{org}$  [56].

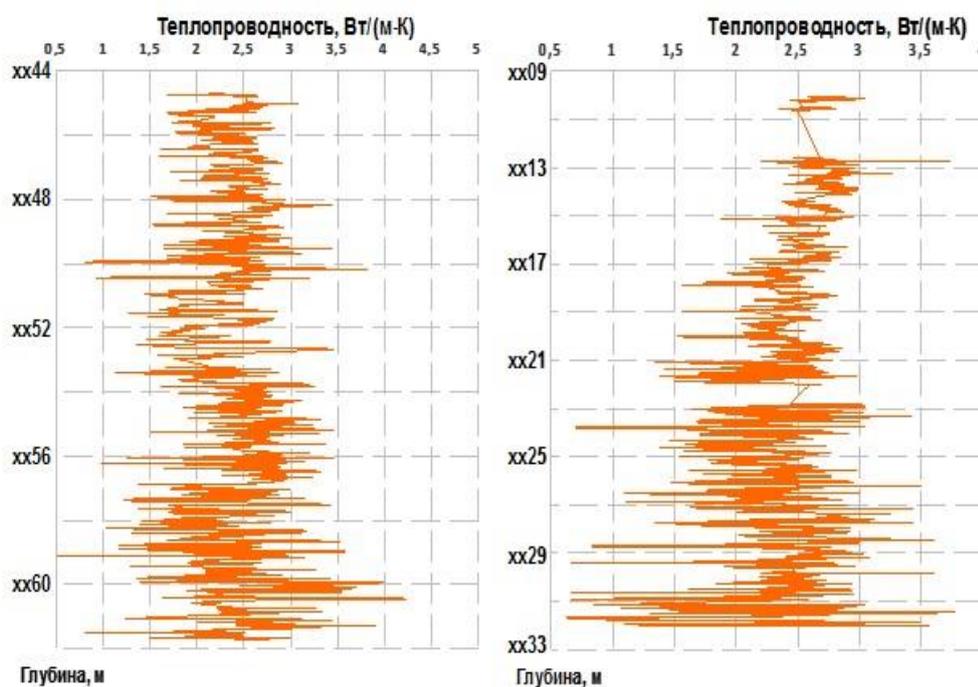


Рисунок 5.6. Результаты высокоразрешающего (пространственное разрешение – 1 мм) непрерывного профилирования теплопроводности  $\lambda_{//}$ . Левая панель – Добрынинское месторождение, правая панель – Западно-Авралинское месторождение [56].

В таблице 5.5 приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных, полученных для пород доманиковой формации и вмещающих толщ.

Анализ экспериментальных данных для пород доманиковой формации и вмещающих толщ, приведенных в таблице 5.5, показывает следующее.

Значения теплопроводности пород доманиковой формации  $\lambda_{//}$  вдоль напластования и  $\lambda_{\perp}$  поперек напластования изменяются, как и для пород баженовской свиты (таблица 5.1), в достаточно широких диапазонах - соответственно от 0,77 Вт/(м·К) до 4,49 Вт/(м·К) и от 0,16 Вт/(м·К) до 4,22 Вт/(м·К). Средние значения объемной теплоемкости пород для всех изученных скважин варьируют в несколько более широком, чем для пород баженовской свиты (таблица 5.1)

диапазоне: 1,33-2,84 МДж/(м<sup>3</sup>·К). Как и для пород баженовской свиты. Для пород доманиковой формации характерны значительные коэффициенты тепловой неоднородности и тепловой анизотропии.

Таблица 5.5. Статистические характеристики тепловых свойств пород доманиковой формации

Горизонт	Теплопроводность, Вт/(м·К)		К	Коэффициент тепловой неоднородности		С, МДж/(м <sup>3</sup> ·К)	N
	$\lambda_{\parallel}$	$\lambda_{\perp}$		$\beta_{\parallel}$	$\beta_{\perp}$		
<b>Добрынинская</b>							
Доманиковый	<u>2,41 (0,34)</u> 1,63-3,51	<u>2,21 (0,64)</u> 0,64-3,68	<u>1,22 (0,20)</u> 1,00-2,14	<u>0,37 (0,21)</u> 0,05-0,99	<u>0,21 (0,12)</u> 0,04-0,74	<u>2,05 (0,15)</u> 1,71-2,49	167
<b>Западно-Авралинская</b>							
Мендымский	<u>2,53 (0,22)</u> 1,76-2,93	<u>2,36 (0,46)</u> 1,29-3,91	<u>1,17 (0,20)</u> 1,00-2,01	<u>0,15 (0,08)</u> 0,06-0,53	<u>0,22 (0,12)</u> 0,05-0,60	<u>2,23 (0,10)</u> 2,00-2,53	69
Доманиковый	<u>2,32 (0,34)</u> 1,32-3,26	<u>2,17 (0,62)</u> 0,33-3,78	<u>1,21 (0,30)</u> 1,00-2,84	<u>0,39 (0,27)</u> 0,05-1,30	<u>0,26 (0,17)</u> 0,05-1,14	<u>2,13 (0,15)</u> 1,76-2,50	131
<b>Югомашевская</b>							
Мендымский	<u>3,33 (0,86)</u> 1,93-5,42	<u>3,11(0,88)</u> 1,28-5,76	<u>1,11 (0,13)</u> 1,00-1,71	<u>0,21(0,12)</u> 0,05-0,84	<u>0,20 (0,12)</u> 0,07-0,86	<u>2,33 (0,16)</u> 1,33-2,83	332
Доманиковый	<u>2,22 (0,57)</u> 0,77-3,92	<u>2,07 (0,82)</u> 0,16-4,22	<u>1,16 (0,23)</u> 1,00-2,32	<u>0,48 (0,40)</u> 0,06-1,99	<u>0,28 (0,25)</u> 0,06-1,81	<u>2,15 (0,17)</u> 1,70-2,63	306
<b>Поспеловская</b>							
Мендымский	<u>2,65 (0,55)</u> 2,12-4,92	<u>2,57 (0,61)</u> 1,70-5,49	<u>1,07 (0,08)</u> 1,00-1,33	<u>0,19 (0,08)</u> 0,04-0,56	<u>0,15 (0,06)</u> 0,05-0,40	<u>2,32 (0,12)</u> 2,07-2,84	281
Доманиковый	<u>2,17 (0,40)</u> 0,83-4,49	<u>1,89 (0,63)</u> 0,34-3,64	<u>1,27 (0,33)</u> 1,00-3,09	<u>0,39 (0,27)</u> 0,08-2,04	<u>0,26 (0,17)</u> 0,07-1,49	<u>2,13 (0,15)</u> 1,73-2,53	259
Саргаевский	<u>2,50 (0,14)</u> 2,14-3,26	<u>2,32 (0,26)</u> 1,32-2,85	<u>1,11 (0,14)</u> 1,00-1,78	<u>0,19 (0,08)</u> 0,06-0,50	<u>0,20 (0,08)</u> 0,07-0,70	<u>2,30 (0,12)</u> 1,96-2,67	91

Примечание: в числителе – среднее значение, в скобках - среднеквадратичное отклонение, в знаменателе - минимальное и максимальные значения, N – количество образцов в выборке.

## 5.2. Сопоставление тепловых свойств пород баженовской свиты и доманиковой формации

Итогом проведенных работ явилось получение экспериментальных данных по тепловым свойствам пород месторождений с нетрадиционными запасами углеводородов, которые по совокупности тепловых свойств, качеству и объему измерений, разнообразию изучавшихся месторождений являются уникальными как для отечественной, так и для зарубежной тепловой петрофизики. Сочетание результатов экспрессного высокоразрешающего неразрушающего профилирования тепловых свойств пород с данными стандартных геофизических исследований скважин позволило оптимизировать отбор образцов для лабораторных исследований, установить корреляционные связи между тепловыми и другими свойствами пород.

Результаты исследований показывают, что породы баженовской свиты и доманиковой формации обладают следующими общими особенностями.

1. Теплопроводность минеральной матрицы изменяется в достаточно узком интервале теплопроводности – (2,1...3,2 Вт/(м·К)). Существенные изменения теплопроводности матрицы происходят редко и лишь при наличии гнезд пирита или кварца, теплопроводность которых (соответственно 41, 1 и 7,60 Вт/(м·К) [79]) значительно отличается от теплопроводности минеральной матрицы.
2. Объемная теплоемкость пород варьирует в диапазоне 1,7...2,7 МДж/(м<sup>3</sup>·К).
3. Породы существенно анизотропны, коэффициент тепловой анизотропии достигает значений 3-3,5.
4. Для образцов пород характерны значительные коэффициенты тепловой неоднородности, что обусловлено в основном неравномерным распределением в образце низкотеплопроводного органического вещества, а также наличием участков высокотеплопроводных минералов.
5. Все измерявшиеся тепловые свойства характеризуются существенными вертикальными вариациями вдоль скважин и ярко выраженной вертикальной зональностью.

В то же время установлены следующие важные особенности тепловых свойств, характеризующие существенное различие баженовской свиты и доманиковой формации (таблицы 5.1 и 5.5, рисунок 5.7):

1. Породы баженовской свиты обладают значительно более высокой степенью тепловой анизотропии, чем породы доманиковой формации: диапазоны средних коэффициентов тепловой анизотропии по отдельным скважинам составляют соответственно 1,40-1,90 и 1,07-1,27 при средних значениях 1,59 (СКО 0,16) и 1,16 (СКО 0,06). Похожее соотношение показывает сравнение вертикальных вариаций коэффициентов тепловой анизотропии для двух скважин – по одной для баженовской свиты и доманиковой формации (рисунок 5.7): средний коэффициент анизотропии составил 1,60 для пород баженовской свиты и 1,25 для пород доманиковой формации.

2. Породы баженовской свиты характеризуются значительно меньшей тепловой неоднородностью в пределах образцов: по характерным для пород обеих формаций результатам измерений по двум скважинам – одна в баженовской свите и другая в доманиковой формации - средний коэффициент тепловой неоднородности составляет 0,25 для баженовской свиты и 0,40 для пород доманиковой формации (рисунок 5.7), что отражает значительные отличия в текстурных особенностях пород. По данным таблиц 5.1 и 5.5 средние значения коэффициента тепловой неоднородности по отдельным скважинам составляют соответственно и 0,11-0,40 (0,15-

0,48) при общих средних значениях 0,22 (СКО 0,08) и 0,30 (СКО 0,12), что отражает текстурные особенности пород.

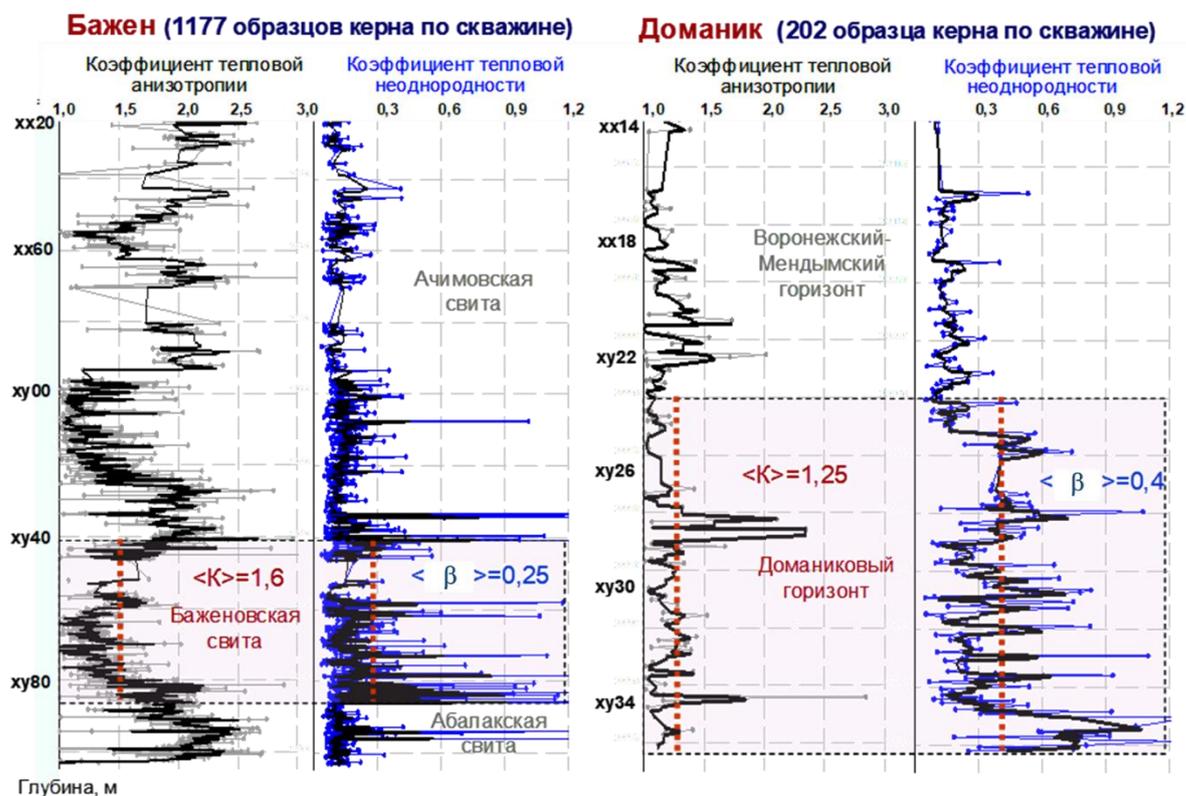


Рисунок 5.7. - Иллюстрация существенных отличий пород баженовской свиты и доманиковой формации по коэффициенты тепловой анизотропии  $K$  и коэффициенту тепловой неоднородности  $\beta$  на примере результатов исследований пород, вскрытых двумя скважинами, пробуренных в разных формациях.

Сочетание результатов профилирования тепловых свойств, стандартных профильных исследований и материалов ГИС позволило установить корреляции между тепловыми и другими свойствами пород. Высокий контраст между свойствами минеральной матрицы пород и органическим веществом, характерный для нетрадиционных коллекторов (раздел 5.1, рисунок 5.1) обусловил тесные корреляции между теплопроводностью и рядом других свойств данных пород: общим содержанием органического вещества, скоростями упругих волн, плотностью, естественной радиоактивностью. Ниже в разделах 5.3-5.5 рассматриваются результаты изучения связи теплопроводности и коэффициента тепловой анизотропии со скоростями упругих волн, характеристикой акустической анизотропии (параметр  $\gamma$  Томсена [176]), естественной радиоактивностью. Данные о связи теплопроводности с общим содержанием органического вещества приведены выше в разделах 3.3 и 4.7.

Предложенный теплофизический подход к анализу свойств пород разреза обеспечивает качественно новый уровень детализации информации по исследуемым коллекторам, возможность проведения экспресс-исследований как в кернохранилищах, так и в местах бурения скважин сразу после подъема керна, возможность оптимизации отбора образцов для

специальных исследований, дополнение технологий скретч-тестирования и гамма-спектрометрии при поточном профилировании на керне.

### 5.3. Связь вариаций теплопроводности с вариациями скоростей упругих волн пород баженовской свиты

Корреляционный анализ результатов акустического каротажа и теплофизического каротажа на керне показал тесную связь скорости продольной упругой волны и теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  в направлении перпендикулярно напластованию для баженовской и ачимовской свит, а также тесную корреляцию поперечной упругой волны и теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  в направлении, параллельном напластованию для баженовской свиты. На рисунке 5.8 представлены поля корреляции между теплопроводностью и продольной и поперечной скоростями упругих волн, обобщающие экспериментальные данные для трех скважин, пробуренных в Южно-Приобской площади [120]. Результаты корреляционного анализа для трех скважин практически повторяются и отражают характерные тесные связи теплопроводности со скоростями упругих волн, типичные для пород баженовской свиты. Такие же тесные связи между теплопроводностью  $\lambda_{\parallel}$  и обеими скоростями упругих волн установлены и для скважин, пробуренных в других месторождениях в баженовской свите.

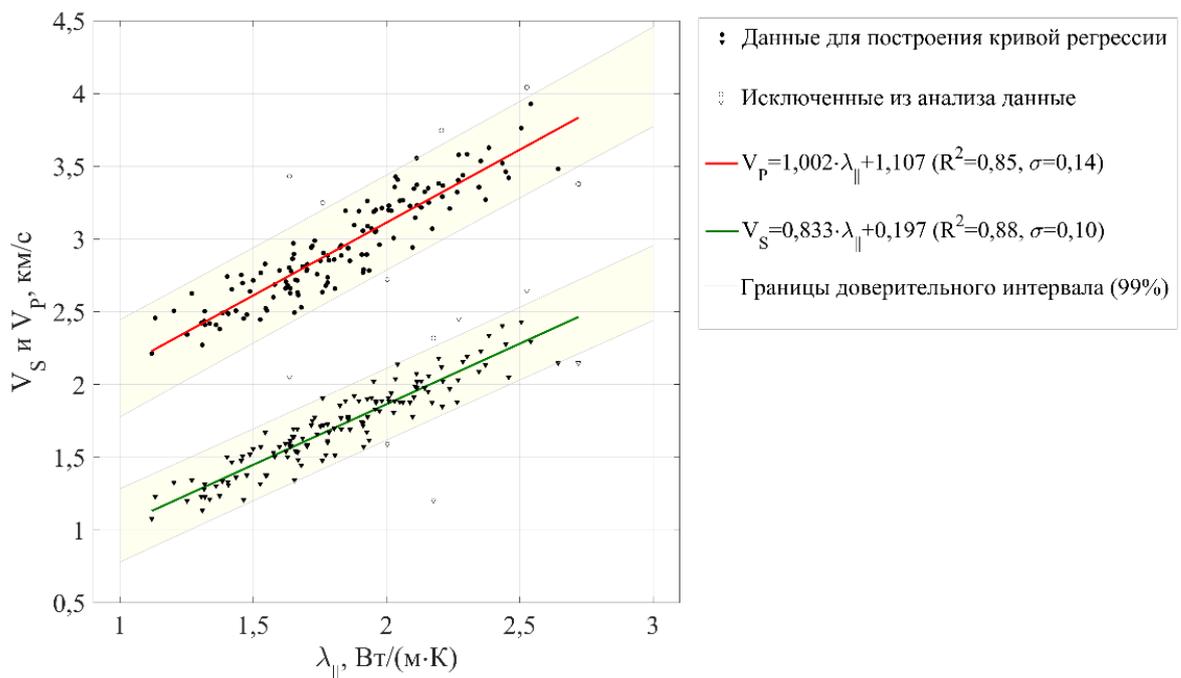


Рисунок 5.8. - Поля корреляции и результаты оценки корреляционной связи между теплопроводностью и скоростями упругих волн для трех скважин, пробуренных в Южно-Приобской площади [61, 71]. Результаты профилирования теплопроводности усреднялись в окне 0,6 м, чтобы привести их в соответствие с разрешающей способностью акустического каротажа.

Сочетание профилирования тепловых свойств, стандартных профильных исследований и материалов ГИС позволило установить корреляции между тепловыми и другими свойствами пород. Установленные тесные корреляционные связи теплопроводности и скоростями продольной ( $V_p$ ) и поперечной ( $V_s$ ) упругих волн (рисунок 5.8) и плотностью ( $\rho$ ), характеризующиеся, тем не менее, различными уравнениями регрессии для разных месторождений, (раздел 5.5) позволяют прогнозировать более детальные, чем по данным каротажа, вариации по разрезу скоростей упругих волн и по известным формулам рассчитать динамические модуль Юнга ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\nu$ ) (рисунки 5.9 и 5.10) [61, 71]. Это обеспечивает детальный прогноз динамических упругих параметров (вплоть до миллиметрового масштаба) на основе данных непрерывного профилирования на керне. Возможность осуществления такого прогноза зависит лишь от наличия керна и не зависит от состояния стенок скважины и других причин, затрудняющих или делающих невозможным интерпретацию данных акустического каротажа [80], что повышает качество данных об упругих параметрах пород доманиковой свиты.

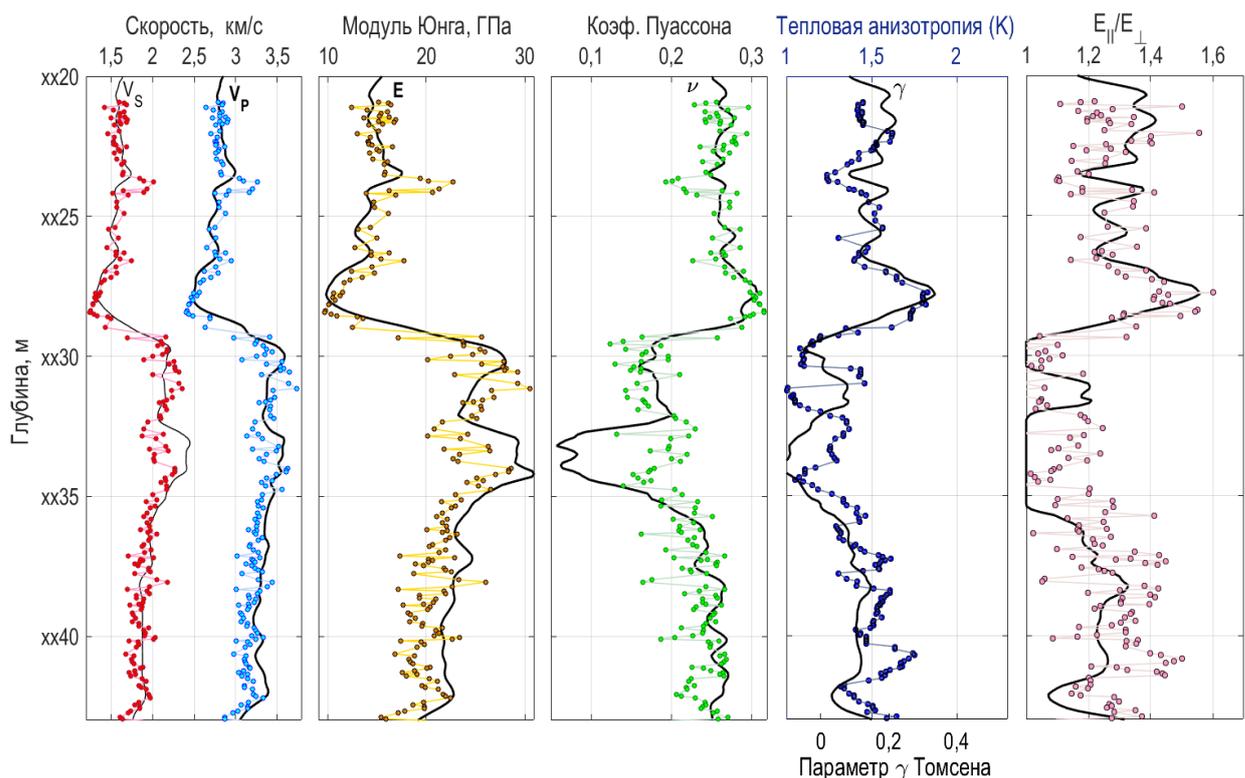


Рисунок 5.9. Вариации поперечной и продольной скоростей упругих волн, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициентов тепловой и акустической анизотропии (параметра Томсена), анизотропии модуля Юнга с глубиной на интервале баженовской свиты. Чёрными сплошными линиями показаны данные, полученные путем акустического каротажа, цветными линиями с маркерами – результаты прогноза по измеренным на керне значениям теплопроводности [81].

Для разных скважин в отложениях баженовской свиты подтверждена установленная ранее тесная корреляция между коэффициентом тепловой анизотропии и параметром  $\gamma$  Томсена [80], характеризующим акустическую анизотропию. Это позволяет характеризовать акустическую анизотропию и вариации степени акустической анизотропии по результатам теплофизического профилирования на керне в тех случаях, когда для отдельных интервалов глубин баженовской свиты проблематично или невозможно интерпретировать данные акустического каротажа и оценить параметр Томсена (вследствие размытости стенок скважин, изменяющихся свойств бурового раствора или по другим причинам) [80].

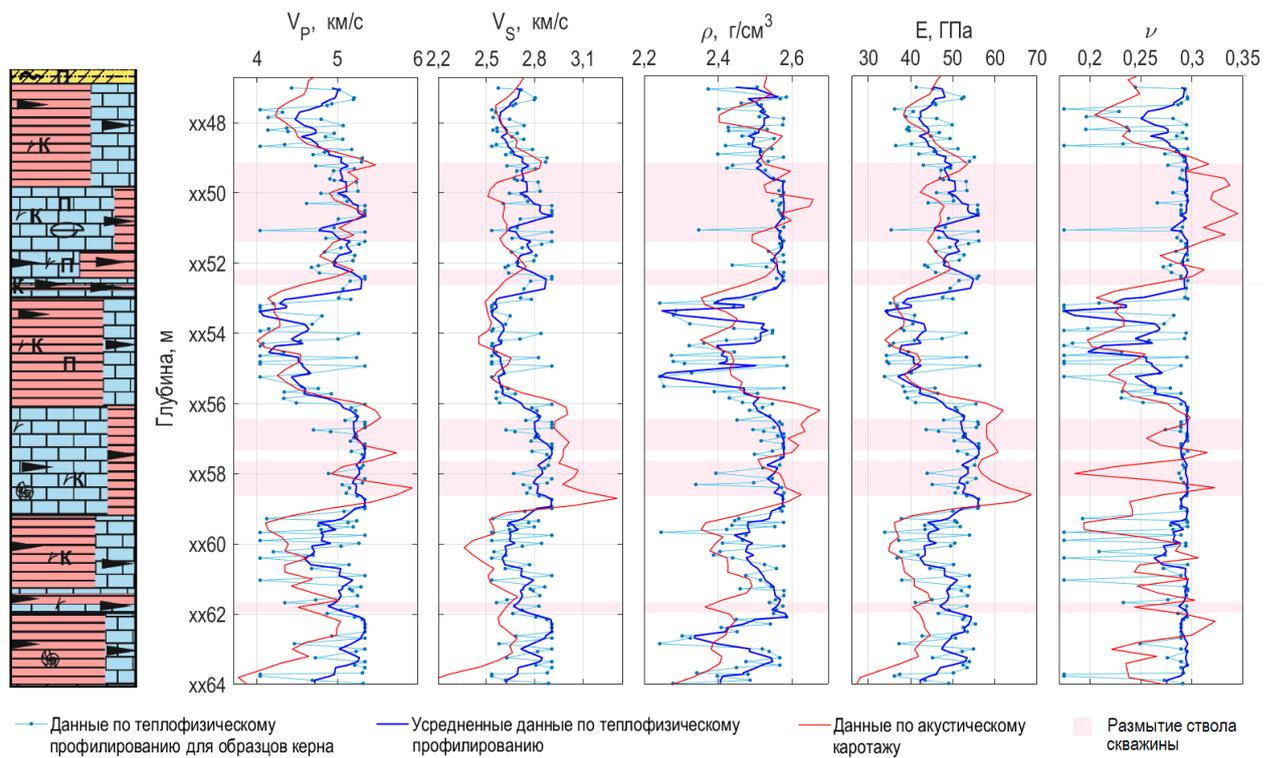


Рисунок 5.10. - Результаты определения динамических упругих характеристик по данным акустического, плотностного каротажа (красные кривые) и корреляционным зависимостям данных акустического и плотностного каротажа с теплопроводностью, измеренной на керне. Голубые точки – результаты определений упругих свойств по теплопроводности для отдельных образцов керна, синие сплошные сглаженные кривые – результаты усреднения данных, полученных для образцов керна, для приведения результатов к пространственной разрешающей способности акустического каротажа [56].

Сопоставление высокодетальных профилей теплопроводности и результатов применения метода механического скретчирования (царапания резцом) керна [174], имеющего серьезные ограничения при использовании для легкоразрушаемых при этом пород баженовской свиты, показывает перспективы применения метода теплофизического каротажа на керне для детальной регистрации неоднородности пород и оценки предела прочности на одноосное сжатие пород [154].

#### **5.4. Повышение качества изучения анизотропии пород путем сочетания акустического каротажа и измерений теплопроводности на керне**

Анализ анизотропии пород резервуаров является актуальной геофизической задачей. На практике для оценки акустической анизотропии пород используют кросс-дипольный акустический каротаж, который в вертикальных скважинах обеспечивает оценку параметров азимутальной анизотропии, обусловленной либо влиянием тектонических напряжений, либо субвертикальной трещиноватостью горных пород [123]. Кроме азимутальной, широко распространена TIV-анизотропия (акроним от Transverse Isotropic Vertical – анизотропная среда с вертикальной осью симметрии), характеризующаяся разницей вертикальных и горизонтальных скоростей, которая обусловлена текстурными особенностями пород, присуща в наибольшей степени глинистым отложениям и может иметь весьма широкое распространение по разрезу. Такой тип анизотропии оценивается при сравнении вертикальной скорости распространения S-волны, регистрируемой дипольными излучателями, и горизонтальной скоростью распространения S-волны, получаемой при помощи многочастотной инверсии волны Стоунли [24, 80].

Вместе с тем, сложное строение коллекторов углеводородов и особенности каротажа зачастую делают задачу исследования анизотропии нетривиальной/неоднозначной. Учитывая трудность разделения эффектов анизотропии и неоднородности, акустических исследований в скважине может оказаться недостаточно. Таким образом, задача повышения качества изучения анизотропии пород остается актуальной для современной нефтяной геофизики. Высокая анизотропия может существенно изменить оценку механических свойств, в связи с чем возникает вопрос об оценке достоверности этих расчетов. Сочетание результатов акустического каротажа с данными акустических измерений на керне традиционно считается наиболее достоверным подтверждением оценки анизотропии, но при этом характерен следующий недостаток: из керна выпиливается ограниченное количество образцов, что дает в результате ограниченное число реперных точек. При наличии характерной для осадочных пород неоднородности, связанной с вариациями пористости, минерального состава, геометрии порового пространства, межзерновых контактов в пределах образца керна [148], из которого выпиливают два или три образца, этого часто недостаточно для надежной оценки анизотропии таким путем [80].

Неразрушающие бесконтактные оперативные измерения теплопроводности на полноразмерном и стандартном керне создают новые возможности для оперативной оценки анизотропии пород и анализа ее вариаций вдоль скважины. Такие измерения позволяют быстро и качественно получить богатую информацию о тепловой анизотропии пород, тесно связанной с их текстурными особенностями. Следовательно, такие данные должны коррелировать с данными о вариациях текстурной акустической анизотропии. Корреляция тепловых свойств пород с

динамическими упругими параметрами была установлена и ранее [42, 132], поэтому совместный анализ вариаций упругих и тепловых свойств пород представляет значительный интерес и может открыть новые возможности для повышения качества оценки и изучения вариаций анизотропии пород [80].

Совместный анализ вариаций степени анизотропии упругих и тепловых свойств аргиллитов и тонкослоистых глинисто-кремнистых пород был выполнен путем непрерывного теплофизического профилирования керна одной из скважин, вскрывшей отложения баженовской свиты, и сравнения результатов с данными акустических измерений в этой скважине. Измерения главных значений тензора теплопроводности, объемной теплоемкости, коэффициента анизотропии и коэффициента тепловой неоднородности теплопроводности были проведены на плоской поверхности непрерывно отобранных 369 образцов полноразмерного керна (распиленного вдоль оси керна), находящегося в естественном состоянии, в интервале глубин  $x_{097} - x_{157}$  м. При определении главных значений теплопроводности принималась 2D модель анизотропии [24, 132], по результатам измерений определялись компоненты теплопроводности вдоль и поперек напластования, а коэффициент тепловой анизотропии  $K$  определяли как отношение значений теплопроводности вдоль и поперек напластования. При различии значений теплопроводности вдоль и поперек слоистости в пределах случайной погрешности измерений, а также в случаях серьезной помехи вследствие значительной тепловой неоднородности породы измеренные значения теплопроводности вдоль и поперек слоистости усредняли и предполагали образец изотропным. Различия теплопроводности вдоль и поперек слоистости, выходящие за рамки этих критериев, свидетельствуют об анизотропии породы и позволяют определить коэффициент тепловой анизотропии. Многоканальный широкополосный акустический каротаж в той же скважине был проведен прибором Sonic Scanner [123]. Помимо расчетов интервальных времен распространения волн, оценки упругих свойств и анализа азимутальной анизотропии был рассчитан параметр Томсена  $\gamma$ , характеризующий разницу скоростей поперечной волны в вертикальном и горизонтальном направлении и широко распространенный в индустрии [80, 176].

По результатам измерений наблюдаются согласованные, хотя и в разной степени в различных интервалах глубин (в значительной степени из-за разного пространственного масштаба данных), вариации теплопроводности пород (вдоль напластования) и скорости продольной волны (рисунок 5.11). Установлено, что имеет место достаточно тесная корреляция между коэффициентом тепловой анизотропии и параметром Томсена (рисунок 5.12): несмотря на очевидные расхождения, связанные с разницей в разрешающей способности методов (пространственный элемент разрешения для прибора Sonic Scanner приблизительно на порядок больше, чем для прибора оптического сканирования при усреднении результатов измерений для каждого образца керна), в поведении коэффициента тепловой анизотропии наблюдается

аналогичная тенденция, описанная выше для акустической анизотропии. Очевидна более высокая степень неоднородности верхней части разреза, где минеральный состав сильно изменяется по разрезу и силицитовые разности чередуются с карбонатными, при этом разброс коэффициентов анизотропии (как тепловой, так и акустической) очевидно связан с этой изменчивостью [80].

По данным на рисунке 5.11 прослеживается определенная тенденция: наиболее высокая акустическая и тепловая анизотропия отмечается в верхней части анализируемого интервала с последующим ее уменьшением в средней части (глубины x104 - x126 м) и повышением в нижней части (x126 – x134 м) [84]. В интервалах x097-x105, x114-x117 и x127-x132 м (рисунок 5.11), где наблюдается повышенная тепловая анизотропия, преобладает горизонтально-параллельная, трещиноватая (трещины параллельны напластованию) текстура. В этих же интервалах наблюдается повышение параметра Томсена (за исключением окрестности x115 м, характеризующейся также косослоистой параллельной и горизонтально-линзовидной текстурами). В интервале глубин x133 – x143 м, представленном породами с горизонтально-параллельной, трещиноватой текстурой, не удалось оценить степень акустической анизотропии в связи с отсутствием качественного сигнала волны Стоунли, что связано с размывом здесь стенки скважины, поэтому прогноз акустической анизотропии по данным о тепловой анизотропии, полученным по результатам изучения керна, имеет особенно важное значение [80].

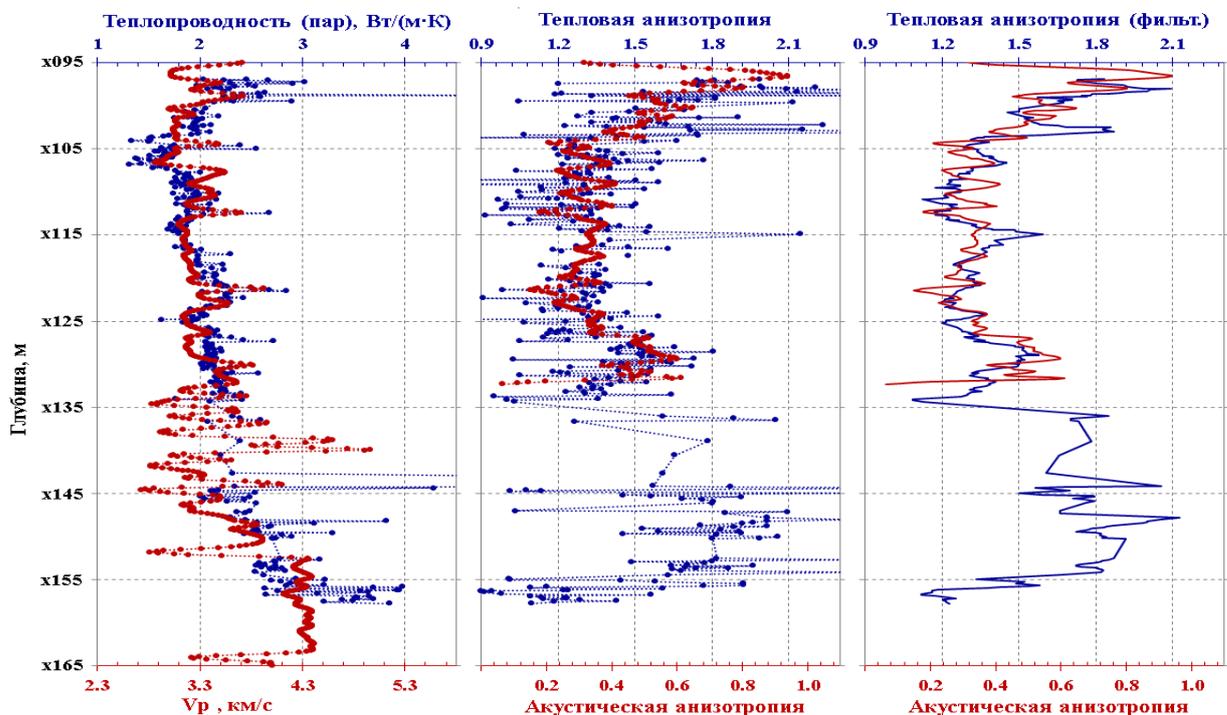


Рисунок 5.11. - Изменение с глубиной теплопроводности и скорости продольной волны (слева), тепловой анизотропии и акустической анизотропии (в центре). Справа значения тепловой анизотропии приведены к масштабу акустической анизотропии (отфильтрованы в подвижном окне) характеристикой акустической анизотропии является параметр Томсена [80].

Проведенный анализ показал, что значительная анизотропия теплопроводности и упругих свойств пород бажендовской и доманиковской свиты связана с текстурными особенностями пород: наличием упорядоченных в горизонтальной плоскости неизометричных неоднородностей: слоев, трещин, ориентированных частиц глинистых минералов, слоистым залеганием органического вещества, (раздел 3.6), что приводит к тому, что среда становится трансверсально-анизотропной с вертикальной осью симметрии [24]. Причиной значительной анизотропии может быть дополнительная («наведенная») ориентированная микротрещиноватость пород, которая может развиваться, в частности, в образцах керна после его подъема из-за установленной повышенной чувствительности пород бажендовской свиты к механическим, тепловым и другим воздействиям (раздел 3.10).

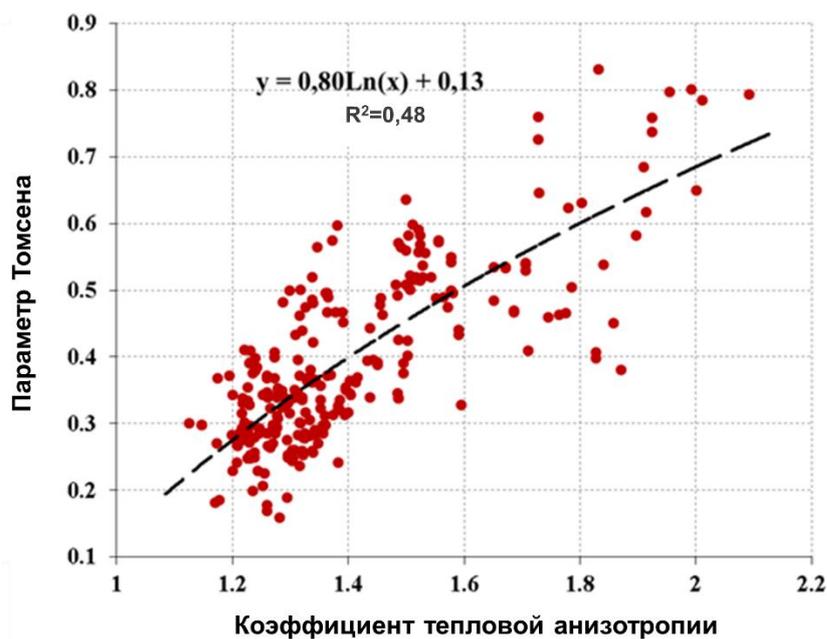


Рисунок 5.12. - Корреляция значений акустической и тепловой анизотропии в 35-метровом интервале (x097-x132 м, 263 точки) [80].

Таким образом, анализ тепловых свойств керна предоставляет необходимые данные об анизотропии пород в тех интервалах глубин, где отсутствуют данные об анизотропии упругих свойств по результатам акустического каротажа, в частности, где произвести оценку акустической анизотропии не представляется возможным из-за технологических ограничений (таких, как сильные размывы ствола скважины, или интервалы с меняющимися свойствами бурового раствора). В связи с этим в тех случаях, когда на определенных интервалах глубин невозможно интерпретировать данные акустического каротажа, наличие анизотропии пород и оценка ее вариаций может быть выявлена путем измерений теплопроводности на керне. В случае отсутствия керна тепловая анизотропия может быть оценена и изучена по обломкам керна в зонах дробления и крупным частицам шлама (с характерным размером 8 мм и более) при помощи разработанной автором мобильной лазерной установки оптического сканирования (раздел 3.2),

обеспечивающей измерения тепловых свойств на образцах малых размеров и с повышенной разрешающей способностью, или при помощи автономного модуля оптического сканирования, разработанного при участии автора (раздел 3.2) [154].

### **5.5. Связь теплопроводности с плотностью и естественной радиоактивностью**

Непрерывное профилирование теплопроводности и объемной теплоемкости на полноразмерном керне скважин, вскрывших отложения баженовской свиты, позволило впервые получить представительные экспериментальные данные для анализа связи теплопроводности с данными гамма-каротажа (ГК), гамма-спектрометрии на керне и данными гамма-гамма плотностного каротажа (ГГК).

На рисунках 5.13 и 5.14 приведены характерные примеры сопоставления вариаций вдоль скважины теплопроводности по данным теплофизического профилирования керна и плотности пород, измеренной при гамма-гамма плотностном каротаже. Из рисунка следует, что для большинства интервалов глубин наблюдается достаточно тесное соответствие пространственных вариаций плотности и теплопроводности, позволяющее использовать теплофизическое профилирование для определения геомеханических характеристик вместе с отмеченными в разделе 5.3 связями теплопроводности со скоростями упругих волн. Причина тесного соответствия вертикальных вариаций теплопроводности  $\lambda_{//}$  и плотности пород, зарегистрированной при гамма-гамма плотностном каротаже, заключается в определяющем влиянии содержания органического вещества на плотность пород, так как плотность органического вещества более чем вдвое меньше плотности минеральной матрицы.

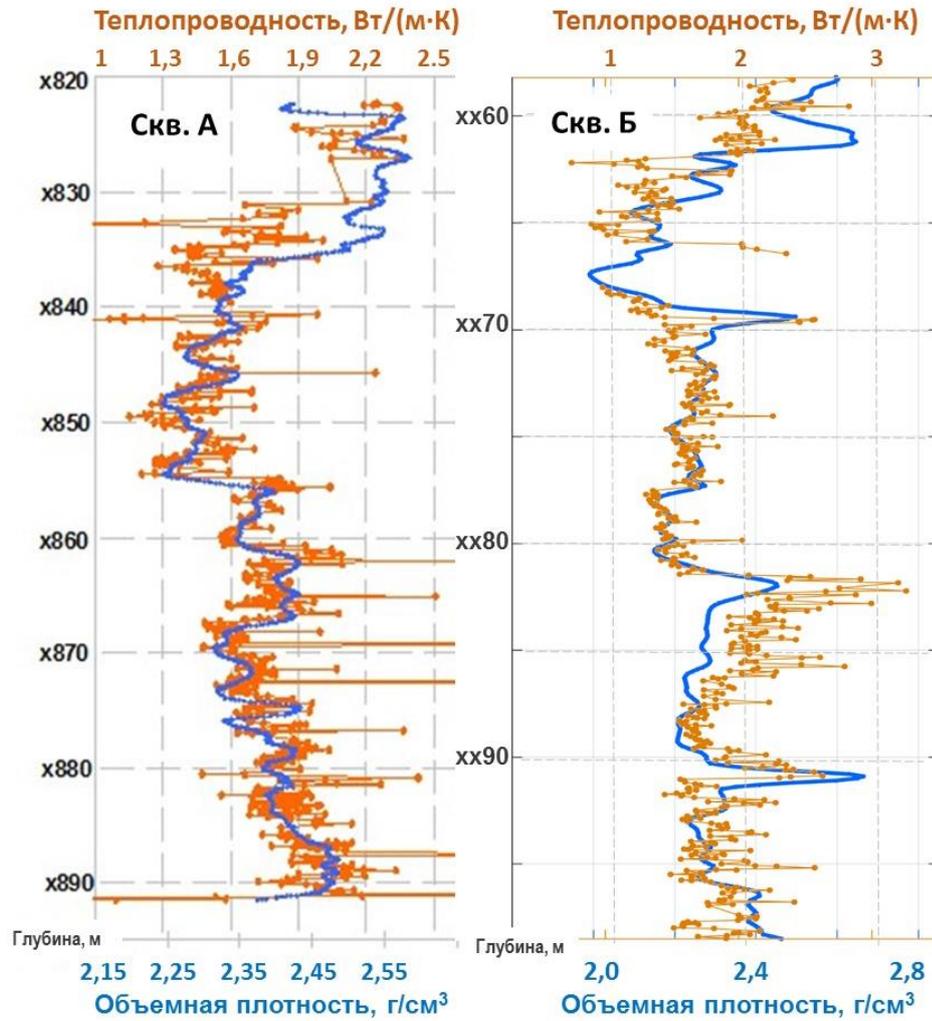


Рисунок 5.13. - Примеры взаимосвязи теплопроводности и плотности пород баженовской свиты, установленной по результатам совместного анализа результатов непрерывного теплофизического профилирования керна (желтые точки отражают среднее для каждого образца керна значение теплопроводности) и данных ГИС.

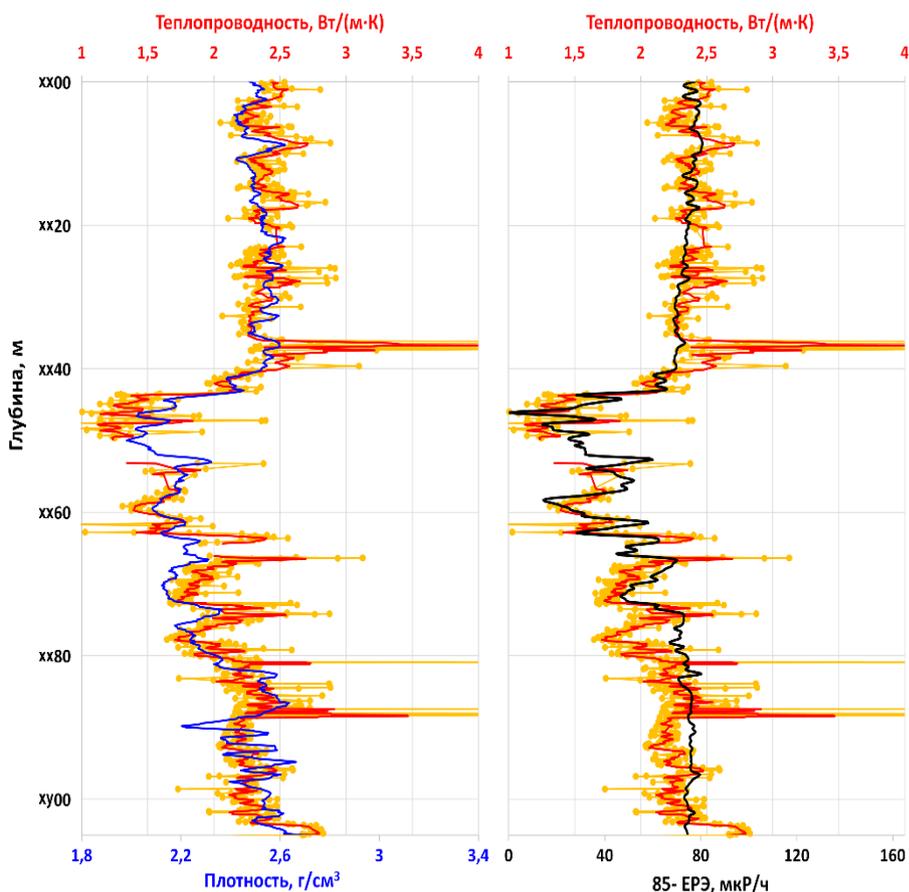


Рисунок 5.14. - Сравнение вертикальных вариаций теплопроводности с вариациями плотности (левая панель) и инверсии ЕРЭ (правая панель). Желтыми линиями с маркерами показаны прогнозы плотности и ЕРЭ по измеренным на керне значениям теплопроводности, линией красного цвета показаны результаты фильтрации, линией синего и черного цвета – вариации результатов плотностного каротажа (данные ГГК) и инверсии ЕРЭ (данные ГК) [71].

Вместе с тем, как следует из рисунков 5.13 и 5.14, в отдельных интервалах глубин наблюдается серьезное нарушение связи этих свойств. Развитие методики геолого-геофизической интерпретации результатов теплофизического профилирования керна совместно с данными ГИС позволит использовать такие нарушения связи теплопроводности с плотностью для получения дополнительной информации о резервуарах углеводородов.

На рисунке 5.14 на правой панели показано сравнение вертикальных вариаций теплопроводности с вариациями плотности (по данным ГГК) и параметра (85–ЕРЭ) мкР/час, где ЕРЭ – естественная радиоактивность элементов, определенная по результатам гамма-каротажа в скважине. Параметр (85–ЕРЭ) мкР/час (инверсия ЕРЭ) использован вместо непосредственных результатов гамма-каротажа ЕРЭ для облегчения визуального анализа соответствия вариаций теплопроводности и естественной радиоактивности пород. Данные на рисунке 5.15 демонстрируют тесную связь между теплопроводностью и результатами измерений естественной радиоактивности при гамма-каротаже и содержания урана U при гамма-спектрологии на керне для другого месторождения в баженовской свите [81].

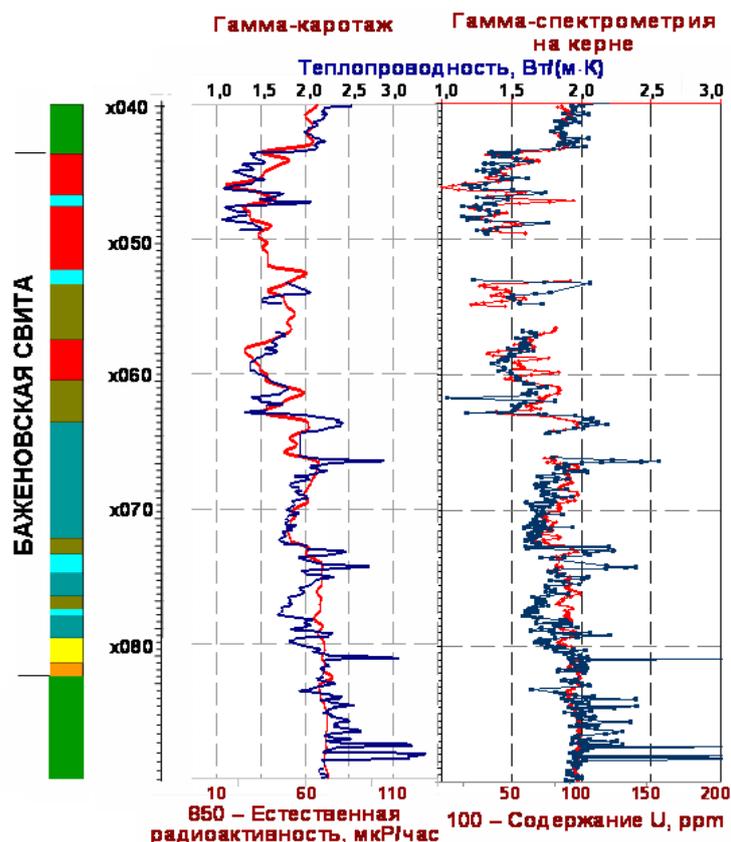


Рисунок 5.15. - Результаты гамма-каротажа, гамма-спектрологии на керне и непрерывного теплофизического профилирования на керне [81].

Связь между теплопроводностью и естественной радиоактивностью пород является опосредованной, так как известна связь между естественной радиоактивностью и общим содержанием органического вещества [43], которое в свою очередь, как показано выше (главы 3 и 4) определяет теплопроводность пород баженовской свиты и доманиковой формации.

Для двух исследованных скважин Пальяновского и Вынгайхинского месторождений и трех скважин Южно-Приобского месторождения был проведен корреляционный анализ связи между главным значением тензора теплопроводности вдоль напластования, полученном при теплофизическом каротаже на керне, и данными гамма-каротажа в интервале баженовской свиты. Чтобы привести данные измерений к одинаковому пространственному разрешению, было проведено усреднение данных в полуметровом интервале с привязкой результата усреднения к середине интервала. В результате корреляционного анализа для данных профильных измерений теплопроводности пород баженовской свиты, проведенных при теплофизическом каротаже на керне, и результатов гамма-каротажа для каждой из исследованных скважин установлена тесная корреляционная связь между теплопроводностью вдоль напластования и результатами измерений естественной радиоактивности элементов (ЕРЭ) (рисунок 5.16). Уравнения регрессии для каждой из скважин одного месторождения являются очень близкими, что позволяет охарактеризовать связь между теплопроводностью и результатами гамма-каротажа единым уравнением регрессии [54]. По результатам анализа можно предположить, что найденное

уравнение регрессии может являться универсальным не только для скважин одного месторождения, но и для разных месторождений, что откроет возможность его широкого использования при интерпретации как результатов теплофизического каротажа на керне, так и результатов гамма-каротажа [54].

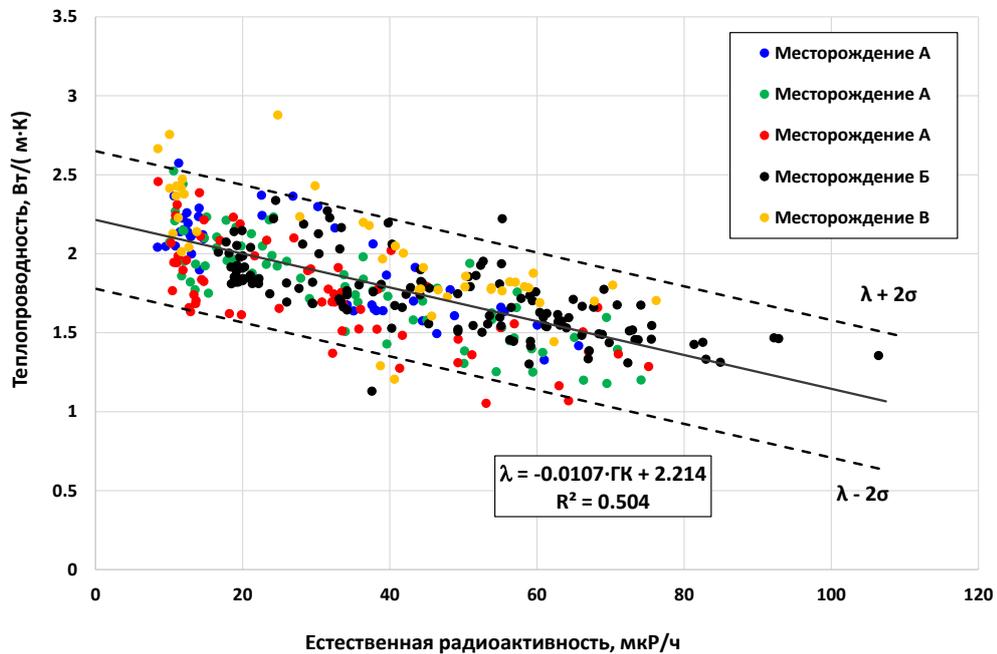


Рисунок 5.16. - Поля корреляции между теплопроводностью и естественной радиоактивностью пород по результатам исследований пяти скважин трех месторождений [54].

Установленные связи данных теплофизического профилирования на керне с результатами гамма-спектрометрии на керне и данными гамма-каротажа открывают возможность дальнейшего практического использования установленных зависимостей при интерпретации отдельно как результатов теплофизического каротажа на керне, так и результатов гамма-каротажа. Становится возможным детализировать результаты гамма-каротажа и гамма-спектрометрии при помощи теплофизических профилей, обладающих существенно более высоким пространственным разрешением, чем это обеспечивают гамма-гамма каротажи, гамма-каротаж и гамма-спектрометрия. Результаты теплофизического профилирования можно использовать также в качестве инструмента для экспресс-метода привязки керна по глубине [54].

На рисунке 5.17 представлен случай, когда для одной из скважин, пробуренных в баженовской свите, отмечаются интервалы глубин, в которых нарушена корреляция данных гамма-каротажа и результатов профилирования теплопроводности. Такие нарушения корреляции отмечаются также в отдельных интервалах глубин, пусть и в существенно меньшей степени, для скважин, результаты исследования которых представлены на рисунках 5.13 и 5.14. В то же время для скважины, охарактеризованной на рисунке 5.17, при помощи данных пиролиза установлено, в интервалах нарушения корреляции между данными гамма-каротажа и результатами профилирования теплопроводности сохраняется устойчивая корреляция

вертикальных вариаций содержания органического вещества ( $C_{org}$ ) и теплопроводности, что отражено на рисунке 5.17.

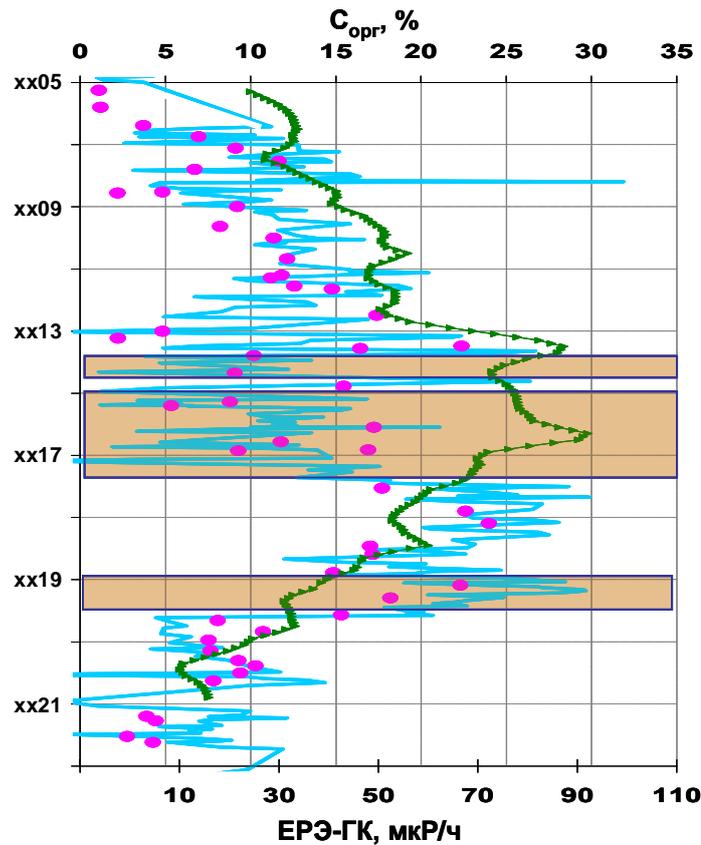


Рисунок 5.17. - Результаты профилирования  $C_{org}$  путем преобразования профилей теплопроводности (голубая кривая), данные по определению  $C_{org}$  путем пиролиза (розовые маркеры) и оценка инверсии ЕРЭ по данным гамма-каротажа (зеленая кривая). Темно-сиреневым цветом выделены интервалы глубин с резким нарушением соответствия вертикальных вариаций  $C_{org}$  (по пиролизу и теплофизическому профилированию) и данных об инверсии ЕРЭ.

Таким образом, можно сделать важный практический вывод о том, что в интервалах глубин, где нарушается связь между вертикальными вариациями теплопроводности и естественной радиоактивности по данным гамма-каротажа или гамма-спектрометрии на керне, результаты гамма-каротажа и гамма-спектрометрии не могут использоваться для оценки  $C_{org}$  и должны отбраковываться. Причины этого могут заключаться в следующем [54]:

1. Скважина, результаты исследований которой приведены на рисунке 5.14, расположена на южном борту Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Такое специфическое положение в бассейне седиментации на момент формирования пород баженовской свиты, возможно, повлияло и на состав самой породы. Речь идет об относительной близости исследуемой площади к источнику сноса кластического материала (глины и более крупные фракции). Увеличенный поток кластических обломков нарушает условия и необходимые темпы для осаждения урана из растворенного состояния, в результате чего порода становится как бы более «смешанной».

2. Поток частиц привносит с собой в среду дополнительные порции кислорода, что может повлиять на смену окислительно-восстановительного режима системы (уран осаждается при восстановительных условиях).

3. Скважина находится в области развития васюганской свиты, которая является разгрузкой снизу для движущихся инфильтрационных флюидов при погружении (диагенезе и катагенезе), которые «выносили» с водой уран из БС в гранулярные коллекторы васюганской свиты.

Полученная детальная картина распределения элементов и органического вещества в последующем может быть применена при восстановлении условий формирования пород бажендовской свиты с учетом того, что уран может рассматриваться как индикатор условий осадконакопления [51].

Таким образом, анализ степени взаимосвязи между теплопроводностью и результатами гамма-каротажа дает возможность контролировать надежность применимости гамма-каротажа для определения  $C_{org}$  и выделять интервалы глубин, для которых применение гамма-каротажа для этой цели нецелесообразно.

## **ВЫВОДЫ**

1. Результаты непрерывного теплофизического профилирования на 10877 образцах керна 42 скважин 30 нефтяных месторождений в бажендовской свите и доманиковой формации обеспечили условия для формирования представительной базы данных по широкому комплексу тепловых свойств пород для бассейнового моделирования и гидродинамического моделирования резервуаров месторождений с нетрадиционными ресурсами углеводородов.
2. Породы бажендовской свиты и доманиковой формации характеризуются значительной степенью тепловой анизотропии и существенной тепловой неоднородностью, при этом породы бажендовской свиты отличаются от пород доманиковой формации повышенной тепловой анизотропией, а породы доманиковой формации отличаются от пород бажендовской свиты повышенной тепловой неоднородностью, что отражает особенности текстурных особенностей пород. Значительная анизотропия пород обусловлена как слоистым чередованием пропластков органического вещества, существенно отличающегося по теплопроводности от вещества матрицы пород, так и дополнительной («наведенной») ориентированной микротрещиноватостью пород, развивающейся, в частности, в образцах керна после его подъема из-за повышенной чувствительности пород к механическим, тепловым и другим воздействиям.

3. Комплексование результатов теплофизического профилирования керна с данными ГИС позволило установить тесные связи теплопроводности со скоростями упругих волн, плотностью, естественной радиоактивностью пород баженовской свиты и доманиковой формации, что объясняется тем, что общее содержание органического вещества в породах и значительные контрасты теплопроводности и других указанных свойств для органического вещества и минеральной матрицы является главными факторами, влияющими на эти свойства пород, в условиях меньшей чувствительности данных свойств к вариациям минерального состава, геометрии порового пространства и других особенностей пород для большей части баженовской свиты и доманиковой формации.
4. Установлена тесная связь между степенью тепловой и акустической анизотропией пород баженовской свиты, что позволяет получать данные об акустической анизотропии по результатам теплофизического профилирования керна в тех случаях, когда отсутствуют данные об анизотропии упругих свойств по результатам акустического каротажа из-за технологических ограничений (в частности, из-за сильных размывов ствола скважины).
5. Установленная тесная связь между теплопроводностью и результатами измерений естественной радиоактивности при гамма-каротаже и содержанием урана  $U$  при гамма-спектропии на керне предоставляет возможность для повышенной детализации результатов гамма-каротажа и гамма-спектропии, прогноза естественной радиоактивности пород при помощи теплофизических профилей, повышения качества определения содержания органического вещества при помощи гамма-каротажа, позволяет использовать результаты теплофизического профилирования в качестве инструмента для экспресс-метода привязки керна по глубине.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработаны подходы к измерениям тепловых свойств пород без применения оптического покрытия образцов керна или с покрытием их термопленкой, исключающие изменения свойств пористых и трещиноватых образцов пород (патент RU 2548408).

2. Разработаны и внедрены рекомендации по применению эллиптической формы пятна нагрева и повышению скорости сканирования для снижения максимальной температуры нагрева образцов и увеличения скорости измерений тепловых свойств пород на керне.

3. Разработаны автономный лазерный модуль для комплексирования высокоразрешающего непрерывного теплофизического профилирования керна с механическим скретч-тестированием (патент RU 2535657) и гамма-спектрометрическим профилированием полноразмерного керна и мобильная лазерная установка оптического сканирования для измерений тепловых свойств пород на стандартных образцах пород и мелких фрагментах керна с широким диапазоном вариаций параметров режима измерений.

4. Разработан подход к анализу трещиноватости пород, основанный на измерениях главных значений тензора теплопроводности образцов пород при заполнении порового пространства веществами с различной теплопроводностью.

5. По результатам исследований теплопроводности и данным пиролиза для коллекций образцов баженовской свиты и доманиковой формации разработан метод регистрации детальных вариаций  $C_{орг}$  вдоль скважин по данным непрерывного теплофизического профилирования керна.

6. Показано, что контроль вариаций компонент теплопроводности вдоль и поперек напластования и объемной теплоемкости образцов пород позволяет контролировать и выявлять изменения минеральной матрицы и пустотного пространства в процессе лабораторных петрофизических работ.

7. Показана возможность применения теплофизического профилирования керна для обоснованного отбора образцов керна и выбору участков отобранных образцов керна для выбуривания стандартных образцов пород для дальнейших лабораторных петрофизических исследований.

8. Разработан метод изучения коллекторов, основанный на непрерывном теплофизическом высокоразрешающем профилировании полноразмерного керна с последующей обработкой результатов совместно с данными ГИС.

9. Методом непрерывного теплофизического профилирования изучено около 3000 образцов керна двух оценочных скважин, пробуренных в пермо-карбоновой залежи Усинского

месторождения тяжелой нефти, получены представительные данные о тепловых свойствах для термогидродинамического моделирования резервуара при разработке тепловых методов добычи, включая данные о вариациях теплопроводности минеральной матрицы вдоль скважин.

10. Методом непрерывного теплофизического профилирования исследованы коллекции керн скважин, пробуренных в 29 месторождениях баженовской свиты и доманиковой формации, что позволило получить уникальную по представительности информацию о тепловых свойствах пород.

11. Установлены тесные связи теплопроводности с данными ГИС по ряду других свойств пород - пористость, скорости упругих волн, плотность для традиционных коллекторов, общее содержание органического вещества, скорости упругих волн, плотность, естественная радиоактивность для нефтяных сланцевых толщ, - что объясняется высоким контрастом свойств минеральной матрицы пород со свойствами порового вещества в первом случае и со свойствами органического вещества во втором случае. Данные связи и соответствующие им уравнения регрессии имеют как общие, так и характерные особенности для пород разных месторождений.

Таким образом, в работе решена задача развития экспериментальной базы тепловой петрофизики применительно к теплофизическим исследованиям пород месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами углеводородов, что позволяет повысить эффективность петрофизических исследований месторождений при решении задач поиска, разведки и разработки.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аренс В. Ж. Физико-химическая технология: Учеб. пособие. -М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2001. -656 с.
2. Аюнов Д.Е., Дучков А.Д., Соколова Л.С. Теплопроводность пород баженовской свиты. XI Международный научный конгресс «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология», Новосибирск, 13–25 апреля, 2015. Сб. материалов в 3 т. Т. 2. -С.14-19.
3. Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Кирюхина Т.А., Коробова Н.И., Корост Д.В., Соболева Е.В., Ступакова А.В., Фадеева Н.П., Хамидуллин Р.А., Шарданова Т.А. Закономерности строения баженовского горизонта и верхов абалакской свиты в связи с перспективами добычи нефти из них // Геология нефти и газа. -2013. -№ 3. -С. 48-61.
4. Барщевский М.М., Безмозгин Э.С., Шапиро Р.Н. Справочник по переработке горючих сланцев. -Ленинград : Государственно научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1963.
5. Баяк И.О. Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов // Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО. -2011. - Вып. 12. -С. 107-120.
6. Баяк И.О., Калинин В.А. Упругая анизотропия горных пород. II. Ориентированная система трещин произвольной формы и концентрации // Физика Земли. -1995. - № 3. -С. 10-16.
7. Бевзюк М.И., Геращенко О.А., Грищенко Т.Г., Кутас Р.И. Новый способ определения теплопроводности горных пород в скважинах // Промышленная теплотехника. -1980. - №4. - С.99–102.
8. Боксерман А.А. Основные направления развития технологий тепловых методов увеличения нефтеотдачи пластов. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. -М. : Наука, 1990. -164 с.
9. Бондаренко Т.М., Мухаметдинова А.З., Попов Е.Ю., Черемисин А.Н., Калмыков А.Г., Карпов И.А. Анализ изменения свойств пород баженовской свиты в результате закачки воздуха высокого давления на основе лабораторного моделирования // Нефтяное хозяйство. -2017. - № 3. -С.40-44.
10. Воларович М.П. Физико-механические свойства горных пород верхней части земной коры. - М. : Наука, 1968. -254 с.
11. Галушкин Ю. И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазогосности. -М. : Научный мир, 2007. -456 с.
12. Голованова И. В. Тепловое поле Южного Урала. -М. : Наука, 2005.

13. Горобцов Д.Н. Научно-методические основы исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.08/ Горобцов Денис Николаевич. – М. : МГРИ, 2011.
14. ГОСТ 25499-82. Породы горные. Метод определения коэффициента теплопроводности, 1982с.
15. ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением, 1985.- 8 с.
16. Гутман И.С., Руднев С.А., Саакян М.И., Даниленко А.Н., Урсегов С.О., Прокушева С.А. Зоны развития коллекторов пермо-карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения // Недропользование XXI век. -2012. - № 4. -С.28 – 35.
17. Демежко Д.Ю. Измерение тепловой активности твердых материалов контактным методом // Приборы и техника эксперимента. -2011. -Т. 6. -С. 127-132.
18. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала) - Екатеринбург : УрО РАН, 2001. -144 с.
19. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. -М. : Недра, 1984. -455 с.
20. Дучков А.Д., Лысак С.В., Балобаев В.Т. Тепловое поле недр Сибири. -Новосибирск : Наука, 1987. -196 с.
21. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Злобина О.Н. Теплопроводность пород осадочного чехла арктической части Западной Сибири // Геология и геофизика. -2013. -Т. 54, -№ 12. -С. 1952—1960.
22. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Ян П.А. Теплопроводность пород баженовской свиты Салымского района (Западно-Сибирская плита) // Геология и геофизика. -2016. -№ 57 (7). -С. 1367-1380.
23. Дьяконов Д.И., Яковлев Б.А. Определение и использование тепловых свойств горных пород и пластовых жидкостей нефтяных месторождений. -М. : Недра, 1969. -117 с.
24. Еремеев А.А., Михальцева И.В. Выявление и оценка упругих свойств горных пород с вертикальной осью анизотропии (ТIV-анизотропии) по данным широкополосного акустического каротажа // Каротажник. -2013. -Т. 234. -С.20-32.
25. Калинин А.Н. Прибор с прямым отсчетом коэффициента теплопроводности твердых тел произвольной формы // Промышленная теплотехника. -1981. -№ I. -С.48-53.
26. Калинин А.Н., Соколова Л.С., Дучков А.Д., Черепанов В.Я. Исследования теплового компаратора применительно к измерениям теплопроводности горных пород // Геология и геофизика. -1983. -№ 3. -С. 116-121.

27. Калмыков Г.А., Балушкина Н.С., Белохин В.С., Билибин С.И., Дьяконова Т.Ф., Исакова Т.Г. Пустотное пространство пород баженовской свиты и насыщающие его флюиды // Недропользование-XXI век. -2015. -№ 1. -С.64-71.
28. Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А., Балушкина Н.С., Пронина Н.В., Полудеткина Е.Н., Костенко О.В., Юрченко А.Ю., Борисов Р.С., Бычков А.Ю., Калмыков А.Г., Хамидуллин Р.А., Стрельцова Е.Д. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогенонасыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. -2015. -№ 5. -С.44-53.
29. Коноплев Ю.П., Гуляев В.Э. Внедрение новых методов термощахтной разработки на Ярегском месторождении высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. -2011. -№ 2. -С.89-96.
30. Коробков Д.А. Исследования тепловых свойств осадочных пород методом оптического сканирования. Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.10/ Коробков Дмитрий Александрович. – М. : МГРИ, 2006.
31. Купцов С.М. Методология прогнозирования теплофизических свойств пластовых жидкостей и горных пород нефтяных месторождений. Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук: 25.00.17/ Купцов Сергей Михайлович. – М., 2010.
32. Курепин В.В., Бегункова А.В. Сравнительный метод определения теплопроводности // Инженерно-физический журнал. -1975. -№ 24(4). -С.613-619.
33. Курепин В.И., Калинин В.А. Скоростной метод определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности твердых тел // Изв. Сев.-Кавказского научного центра Высшей школы. Сер. естеств. наук. -1979. -№ 2. -С. 24-27.
34. Курчиков А. Р., Ставицкий Б. П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. -М.: Недра, 1987. -134 с.
35. Липаев А.А. Теплофизические исследования в петрофизике. -Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1993. -145.
36. Лопатин Н. В., Емец Т. П. Пиролиз в нефтегазовой геологии. -М. : Наука, 1987. -143 с.
37. Лыков А.В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. -М. : Энергия, 1973. -336 с.
38. Любимова Е.А., Масленников А.И., Ганиев Ю.А. О теплопроводности некоторых изверженных и осадочных пород при повышенных температурах и давлениях в водо- и нефтенасыщенном состоянии // Изв. АН СССР. Физика Земли. -1979. -Т. 5. -С.87-96.
39. Магомедов Я.Б., Эмиров С.Н. Влияние высоких давлений и температуры на теплопроводность полупроводников. -Махачкала : АЛЕФ, 2017. -152 с.

40. Малофеев Г.Е., Сабанеева Н.С., Сергиенко С.И. Определение теплофизических свойств горных пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты // Нефтяное хозяйство. -1972. -№ 2. -С. 33-37.
41. Новиков С.В., Попов Ю.А., Тертычный В.В., Шако В.В., Пименов В.П. Возможности и проблемы современного теплового каротажа // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2008. -№3. -С.54–58.
42. Новиков С.В. Тепловые свойства терригенных коллекторов и насыщающих флюидов. Дис. канд. техн. наук. 25.00.10/ – М. : МГРИ, 2009.
43. Парфенова Т.М., Меленевский В.Н., Москвин В.И. Использование гамма-каротажа для определения содержания органического вещества в высокоуглеродистых осадочных формациях (на примере Баженовской свиты) // Нефт. и газ. пром-сть. Геол., геофиз. и разраб. нефт. месторожд. -1999. -№ 11. -С.29-34.
44. Парфенюк О.И., Марешаль Ж.-К. Численное моделирование термомеханической эволюции структурной зоны Капускейсинг (провинция Сьюперior Канадского щита) // Физика Земли. -1998. -№ 10. -С.22-32.
45. Паршин А.В., Попов Е.Ю. Новые возможности в петрофизических исследованиях керна с применением систем оптического сканирования. EAGE-SPE Joint workshop 2013 "Geoscience monitoring of the field development process", Москва, Россия, 4-6 марта, 2013.
46. Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Савельев Е.Г., Ромушкевич Р.А., Павлов К.А. Экспериментальные исследования тепловых свойств пород Авачинской геотермальной системы, Камчатка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). -2015. -№ 63. -С.7-23.
47. Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Тарелко Н.Ф., Чернев И.И., Павлов К.А., Муратов П.В. Новые данные о тепловых свойствах пород геотермальных месторождений Камчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельный выпуск. -2014. -С.36-46.
48. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Теплофизические свойства вещества Земли (Часть 1). -М. : Физический факультет МГУ, 2011. -68 с.
49. Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Установка для измерения температуропроводности материалов методом плоских температурных волн // Теплофизика высоких температур. -1971. -Т. 9, -№ 3. -С.622-626.
50. Платунов Е.С., Курепин В.В., Комкова Л.А. Комплекс приборов для массовых теплофизических измерений при комнатной температуре. Доклады 3-го Всесоюзного совещания по тепломассообмену, Минск, 1968. Т. 7. -С.388-395.

51. Плуман И.И. Распределение урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты как критерий геохимических условий осадконакопления // Геохимия. -1971. -№ 1. -С. 34-41.
52. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Тепловой поток на континентах. Доклады АН СССР, 1966. Т. 168 (1). -С.170-172.
53. Попов Е.Ю. Современные возможности метода оптического сканирования для изучения разномасштабной неоднородности пород разреза по вариациям их тепловых свойств. VIII Всероссийское литологическое совещание «Эволюция осадочных процессов в истории Земли» Москва, Россия, 26-28 октября, 2015.
54. Попов Е.Ю., Габова А.В., Карпов И.А., Заграновская Д.Е., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Чехонин Е.М., Попов Ю.А. Связь теплопроводности и естественной радиоактивности пород баженовской свиты по данным гамма-каротажа, гамма-спектрометрии и теплофизического каротажа на керне EAGE «Геомодель-2016», Геленджик, РФ, 12-16 сентября, 2016.
55. Попов Е.Ю., Калмыков Г.А., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Плешаков А.М. Теплопроводность пород как индикатор общего содержания органического вещества пород баженовской свиты. EAGE «Геомодель-2015», Геленджик, Россия, 2015.
56. Попов Е.Ю., Попов Ю.А., Габова А.В., Чехонин Е.М., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Стенин В.П., Делия С.В., Шаяхметов Т.Р., Драндусов К.А. Результаты комплексных исследований доманиковой формации путем непрерывного теплофизического профилирования керна. EAGE «Геомодель-2017» Геленджик, Россия, 11-14 сентября, 2017.
57. Попов Е.Ю., Попов Ю.А., Паршин А. В. Способ для определения теплопроводности и температуропроводности материалов : Патент RU 2548408. Россия, 18.12.2013, 2014.
58. Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Габова А.В., Савельев Е.Г., Попов Ю.А., Романов Ю.К., Спиридонов Д.А. Тепловые свойства пород баженовской свиты Сургутского и Нижневартовского сводов Западно-Сибирской плиты по результатам непрерывного профилирования керна. EAGE «Геомодель-2017», Геленджик, Россия, 11-14 сентября, 2017.
59. Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Попов Ю.А. Измерения тепловых свойств пород на стандартных образцах как необходимый этап теплофизических исследований месторождений углеводородов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2017. -№ 2. -С.56-70.
60. Попов Е.Ю., Савельев Е.Г. Регистрация пространственных вариаций свойств образцов пород на основе метода оптического сканирования // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2015. -№ 5.

61. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Габова А.В., Жуков В.В. Новый подход к изучению баженовской свиты на основе теплофизического профилирования керна // Недропользование – XXI век. -2016. -№ 6(63). -С.52-61.
62. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Ромушкевич Р.А., Сафонов С.С., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Теплофизическое профилирование керна при доизучении геологического строения пермокарбоновой залежи Усинского месторождения // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2016. -№ 6. -С.38-49.
63. Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Сафонов С.С., Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Герасимов И.В., Урсегов С.О., Гурбатова И.П. Результаты доизучения геологического строения пермокарбоновой залежи Усинского месторождения путем непрерывного теплофизического профилирования керна. EAGE «Геомодель-2014», Геленджик, Россия, 8-11 сентября, 2014. Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=77923>. Доступ 22.09.2019.
64. Попов Е.Ю. Бесконтактные измерения теплопроводности и температуропроводности полноразмерного керна без выравнивания оптических характеристик образцов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2015. -№.4.
65. Попов Е.Ю., Калмыков Г.А., Стенин В.П., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю. Тепловые свойства пород баженовской свиты // Нефтегазовое хозяйство. -2015. -№ 10. -С.32-37.
66. Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Габова А.В., Чехонин Е.М., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю., Заграновская Д.Е., Беленькая И.Ю., Карпов И.А., Калмыков Г.А. Формирование базы исходных данных о тепловых свойствах пород баженовской свиты для бассейнового и гидродинамического моделирования. EAGE «Геомодель-2016». Геленджик, РФ, 12-15 сентября, 2016.
67. Попов Ю.А. Теоретические модели метода измерения тепловых свойств горных пород на основе подвижных источников тепловой энергии. Известия высших учебных заведений. Часть I. // Геология и разведка. 1983. № 9. -С. 97. Часть II. // Геология и разведка. 1984. № 2. -С.97.
68. Попов Ю.А., Паршин А.В., Калмыков Г.А., Ромушкевич Р.А., Баяк И.О., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Попов Е.Ю., Коробков Д.А. Новые методы тепловой петрофизики как эффективный инструмент исследований пород баженовской свиты. XII Научно-практическая конференция «Геология разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами», Геленджик, Россия, 18–21 сентября, 2012. Режим доступа: <https://sites.google.com/site/gelengik2012/home/2/07>. Доступ 22.09.2019.
69. Попов Ю.А., Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Чехонин Е.М., Габова А.В., Спасенных М.Ю., Заграновская Д.Е., Карпов И.А., Овчаренко Ю.В. Взаимосвязи свойств пород баженовской

- свиты и их роль при поисках, разведке и разработке месторождений. EAGE/SPE Joint Workshop-2017. Shale Science: Prospecting&Development, Москва, Россия, 10-11 апреля, 2017.
70. Попов Ю.А., Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Габова А.В., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю. Теплофизический каротаж на керне – новый метод исследований баженовской свиты при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов. . XXI Научно-практическая конференция «Новые ГИС технологии для нефтегазовых компаний», Уфа, Россия, 15 ноября, 2016. -С.23-25.
  71. Попов Ю.А., Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Габова А.В., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Заграновская Д.Е. Исследование баженовской свиты с применением непрерывного профилирования тепловых свойств на керне // Нефтяное хозяйство. -2017. -№ 3. -С.22-27.
  72. Попов Ю.А., Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Козлова Е.В., Габова А.В., Жуков В.В., Заграновская Д.Е., Карпов И.А., Беленькая И.Ю., Овчаренко Ю.В., Алексеев А.Д., Калмыков Г.А., Гутман И.С., Оксенойд Е.Е. Теплофизический каротаж на керне как новый метод исследований баженовской свиты при решении задач поиска, разведки и добычи углеводородов. EAGE Геомодель-2016, Геленджик, Россия, 12-15 сентября, 2016.
  73. Попов Ю.А., Рабе Ф., Бангура А. Анализ адекватности теоретической и экспериментальной моделей метода сканирования при измерениях теплопроводности минералов, пород, руд // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -1992. -№ 6. -С.120-129.
  74. Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Попов Е.Ю. Теплофизические исследования пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины // Тюменская сверхглубокая скважина. -Пермь : Изд. КамНИИКИГС и ГНПП "Недра", 1996. С. 57-72.
  75. Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Попов Е.Ю., Башта К.Г. Геотермические характеристики разреза СГ-4 // Результаты бурения и исследований Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). -Ярославль : Изд. ГНПП "Недра", 1999. -С.77-88.
  76. Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростелев В.М. Бесконтактное определение температуры и тепловых свойств грунтов // Метеорология и гидрология. -1983. -№ 9.
  77. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Миклашевский Д.Е., Сафонов С.С. Эволюция тепловой петрофизики и ее роли в прикладных и фундаментальных исследованиях осадочных бассейнов. III Балтийская школа-семинар «Петрофизическое моделирование осадочных пород», Петергоф, Россия, 15-19 сентября, 2014.
  78. Попов Ю.А. Миклашевский Д.Е., Вертоградский В.А., Шувалов В.И., Коробков Д.А., Лазаренко А.П. Совершенствование аппаратно-методической базы для измерений температурного коэффициента линейного расширения минералов и пород // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2008. -№6. -С.63-68.

79. Попов Ю.А., Березин В.В., Соловьев Г.А., Ромушкевич Р.А., Коростелев В.М., Костюрин А.А., Куликов И.В. Теплопроводность минералов // Известия РАН. Физика Земли. -1987. -№ 3. -С. 83–89.
80. Попов Ю.А., Михальцева И.В., Чехонин Е.М., Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Калмыков Г.А., Латыпов И.Д. Повышение качества изучения анизотропии пород путем сочетания акустического каротажа и измерений теплопроводности на керне. EAGE "Геомодель-2015", Геленджик, Россия, 7-10 сентября, 2015. Режим доступа: <http://earthdoc.eage.org>. Доступ 22.09.2019.
81. Попов Ю.А., Попов Е.Ю., Чехонин Е.М., Ромушкевич Р.А., Спасенных М.Ю., Богданович Н.Н., Козлова Е.В., Габова А.В., Жуков В.В., Заграновская Д.Е., Карпов И.А., Беленькая И. Ю., Овчаренко Ю.В., Алексеев А.Д., Калмыков Г.А., Гутман И.С., Волков В.А., Оксенойд Е. Е. Теплофизический каротаж на керне как новый метод исследований баженовской свиты при решении задач поиска, разведки и добычи углеводородов. EAGE «Геомодель-2016», Геленджик, РФ, 12-15 сентября, 2016.
82. Попов Ю.А., Спасенных М.Ю., Писаренко Д.В., Богданович Н.Н., Стенин В.П., Чертенков М. В. Тепловые и акустические свойства коллекторов Ярегского месторождения // Каротажник. -2011. -№ 7 (205). -С.27–36.
83. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Паршин А.В., Попов Е.Ю., Миклашевский Д.Е. Новая аппаратурно-методическая база тепловой петрофизики как средство повышения эффективности добычи тяжелых нефтей // Нефть. Газ. Новации. -2013. -№4. -С.52–58.
84. Продайвода Г.Т., Коболев В.П. Определение коэффициента теплопроводности горных пород и минералов методом цилиндрического зонда // Вопросы прикладной геохимии и петрофизики. -1976. -С.124-129.
85. Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н. Барическая и температурная зависимость теплопроводности осадочных горных пород // Изв. РАН. Серия физика. -2012. -Т.76, -№ 10. -С. 1152-1156.
86. Рыкалин Н.Н. Тепловые основы сварки. Ч.1. -М. : Литература, 1947. -283 с.
87. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений // М.:Издательство стандартов. -1972. -156 с.
88. Сергеев О.А., Филатов Л.И., Френкель И.М. Прибор "Лямбда" с непосредственным отсчетом теплопроводности // Измерительная техника. -1971. -№ 7. -С.35-36.
89. Сергеев О.А., Шашков А. Г. Теплофизика оптических сред // Минск: Наука и техника. -1983. -232 с.
90. Скакун А.П. Влияние температуры, минерального состава и плотности на теплопроводность горных пород // Физические процессы горного производства. -1977. -№ 4. -С.16-19.

91. Скибицкая Н.А., Бурханова И.О., Большаков М.Н., Доманова Е.Г., Кузьмин В.А., Пуго Т.А., Марутян О.О., Яковлева О.П., Зекель Л.А., Прибылов А.А., Навроцкий О.К. Научное обоснование оценки неучтенных запасов связанного газа газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений, сорбированного высокомолекулярными компонентами и керогеноподобным полимером продуктивных отложений (на примере Оренбургского НГКМ) [Электронный ресурс]. -2014. -Выпуск 1(9). Режим доступа: [http://oilgasjournal.ru/vol\\_9/skibitskaya.pdf](http://oilgasjournal.ru/vol_9/skibitskaya.pdf). Доступ 22.09.2019.
92. Смирнова Е.В. О применении сравнительного метода для определения теплопроводности горных пород // Экспериментальное и теоретическое изучение тепловых потоков. -М., 1979. С.113-122.
93. Соколова Л.С., Дучков А.Д., Юрченко Н.В. Теплопроводность битуминозных аргиллитов баженовской свиты // Геология и геофизика. -1986. -№ 10. -С.42-46.
94. Статистические методы при геохимических поисках месторождений. -Москва : АН СССР, МинГЕО СССР, ИМГРЭ, 1973. -123 с.
95. Суетнова Е.И. Тепловой режим осадочных бассейнов в условиях переменного глубинного теплового потока // Доклады АН СССР. -1989. -Т. 309, -№ 1. -С.65-69.
96. Тимарева С.В., Смирнов Я.Б., Поляк В.Г. Теплопроводность горных пород // Тепловой режим недр СССР. -М. : Наука, 1970. -С.45-57.
97. Урсегов С.О. Обоснование оптимальных параметров термических технологий разработки крупных месторождений высоковязких нефтей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Дисс. канд. техн. наук., 25.00.17/ Урсегов Станислав Олегович. – Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2007. - 281 с.
98. Филиппов Л.П. Направления развития методов измерения теплофизических свойств веществ и материалов // Изв. вузов. Энергетика. -1980. -№ 3. -С.35-40.
99. Хачай Ю.В. Термическая эволюция дифференцируемой верхней мантии // Геология и геофизика. -1979. -№ 1. -С.83.
100. Хачай Ю.В., Голованова И.В., Гордиенко В.В., Дучков А.Д., Кашубин С.Н., Кашубина Т.В., Кутас Р.И., Щапов В.А. Геотермический разрез литосферы вдоль геотраверса «Гранит» // Литосфера. -2002. -№ 3. -С.38-45.
101. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. -М. : РУДН, 1996. - 289.
102. Чехонин Е., Паршин А., Писаренко Д., Попов Ю., Ромушкевич Р., Сафонов С., Спасенных М., Чертенков М., Стенин В. Теплофизические свойства пород-коллекторов // Нефтегазовое обозрение. -2012. -С.1-22.

103. Чехонин Е. М., Попов Ю. А., Попов Е. Ю., Спасенных М. Ю., Овчаренко Ю. В., Жуков В. В. Теплофизический каротаж на керне как средство повышения качества данных о геомеханических параметрах пород баженовской свиты. EAGE "Геомодель-2016", Геленджик, РФ, 12-15 сентября, 2016.
104. Чехонин Е.М., Попов Е.Ю., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю., Жуков В.В., Овчаренко Ю.В., Карпов И.А., Заграновская Д.Е. Повышение качества данных о геомеханических параметрах пород баженовской свиты по результатам теплофизического каротажа на керне. Международная научно-практическая конференция EAGE «Геомодель-2016», Геленджик, Россия, 12-15 сентября, 2016.
105. Щапов В.А. Тепловое поле Урала // Уральский геофизический вестник. -2000. -№ 1. -С.126.
106. Эмиров С.Н., Рамазанова А.Э. Влияние давления на процессы переноса тепла во флюидонасыщенных образцах песчаника // Изв. РАН. Сер. физ. -2017. -Т. 81. -С.424-426.
107. Юдин В.А., Королёв А.В., Афанаскин И.В., Вольпин С.Г. Теплоёмкость и теплопроводность пород и флюидов баженовской свиты – исходные данные для численного моделирования тепловых способов разработки. -М. : ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2015. -225 с.
108. Яковлев Б.А. Решение задач нефтяной геологии методами термометрии. -М. : Недра, 1979. - 143 с.
109. Яковлев Б.А. Прогнозирование нефтегазоносности недр по данным геотермии. -М. : Недра, 1996. -240 с.
110. Ялаев Т.Р., Баяк И.О., Горобцов Д.Н., Попов Е.Ю. Экспериментальный анализ применимости современных подходов к теоретическому моделированию теплопроводности осадочных пород // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. -2013. -№ 2. -С.63-68.
111. Ялаев Т.Р., Чехонин Е.М., Попов Е.Ю., Абашкин В.В., Ромушкевич Р.А. Применение теории эффективных сред для реконструкции тензора упругости песчаника Бентхаймер. 17-я Международная научно-практическая конференция EAGE «Геомодель-2015», Геленджик, РФ, 7-10 сентября, 2015.
112. Asaad Y. A study of the thermal conductivity of fluid bearing porous rocks. Phd Dissertation/ – : Univ. of Calif. Berkeley, 1955.
113. Bayuk I., Popov Yu., Parshin A. A new powerful tool for interpreting and predicting in reservoir geophysics: theoretical modeling as applied to laboratory measurements of thermal properties. International Symposium of the Society of Core Analysts, Austin, Texas, USA, 2011. SCA2011-39. -P.1–12.

114. Bayuk I., Tertychnyi V., Popov Yu. Theoretical modeling as a key for interpretation of experimental data on rock's thermal conductivity. The Earth's thermal field and related research methods, Moscow, Russia, 17–20 June, 2002. -P. 12–17.
115. Beardsmore G., Cull J. Crustal Heat Flow: A guide to measurement and modelling. -Cambridge : Cambridge University Press, 2001. -324 p.
116. Beck A. Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity // Handbook on Terrestrial Heat Flow Density Determination. -Dordrecht : Kluwer, 1987. -P. 87–124.
117. Brigaud F., Vasseur G. Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks // Geophysical Journal International. -1989. -№ 98. -P.525-542.
118. Burkhardt H., Honarmand H., Pribnow D. Test measurements with a new thermal conductivity borehole tool // Tectonophysics. -1995. -№ 224. -P. 161–165.
119. Chekhonin E., Parshin A., Pissarenko D., Popov Y., Romushkevich R., Safonov S., Spasennykh M., Chertenkov M., Stenin V. When rocks get hot: thermal properties of reservoir rocks // Oilfield Review. -2012. -Vol. 24, -№ 3. -P.20–37.
120. Chekhonin E., Popov E., Popov Y., Gabova A., Romushkevich R., Spasennykh M., D Zagranovskaya D. High-Resolution Evaluation of Elastic Properties and Anisotropy of Unconventional Reservoir Rocks via Thermal Core Logging // Rock Mechanics and Rock Engineering. -2018. -Vol. 51. -P.2747–2759.
121. Chekhonin E., Popov E., Popov Yu., Spasennykh M., Ovcharenko Yu., Zhukov V., Martemianov A. Prediction of geomechanical properties from thermal conductivity of low-permeable reservoirs. EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 19-22, 2016, 2016.
122. Clauser C. Geothermal Energy. -Heidelberg-Berlin : Springer Verlag, 2006. Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energies. P.493–604.
123. Close D., Cho, D., Horn, F., Edmundson, H. The Sound of Sonic: A Historical Perspective and Introduction to Acoustic Logging // CSEG RECORDER. -2009. -Vol.34 (5).
124. Dubow J., Nottenburg R., Collins G. Thermal and electrical conductivities of Green river oil shales Department of Electrical Engineering Colorado State University Fort Collins, Colorado 80523, Final report, June 1976.
125. Duchkov A.D., Sokolova L.S., Rodyakin S.V., Chernysh P.S. Thermal conductivity of the sedimentary-cover rocks of the West Siberian Plate in relation to their humidity and porosity // Russian Geology and Geophysics. -2014. -№ 55. -P.784–792.
126. Esemé E., Krooss B.M., Littke R. Evolution of petrophysical properties of oil shales during high-temperature compaction tests: Implications for petroleum expulsion // Marine and Petroleum Geology. -2012. -Vol. 31. -P.110-124.

127. Fuchs S., Schütz F., Förster H.-J., Förster A. Evaluation of common mixing models for calculating bulk thermal conductivity of sedimentary rocks: Correction charts and new conversion equations // *Geothermics*. -2013. -№ 47. -P.40-52.
128. Galson D., Wilson N., Schärli U., Rybach L. A comparison of the divided-bar and QTM methods of measuring thermal conductivity // *Geothermics*. -1987. -Vol.16, -№ 3. -P.215–226.
129. Hantschel T., Kauerauf, A. *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. -Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. -476 p.
130. Höfer M., Schilling F. Heat transfer in quartz, orthoclase, and sanidine at elevated temperature // *Physics and Chemistry of Minerals*. -2002. -Vol.29, -№ 9. -P.571–584.
131. Jacquot A., Vollmer F., Bayer B., Jaegle M., Ebling D., Böttner H. Thermal conductivity measurements on challenging samples by the 3 omega method // *Journal of Electronic Materials*. -2010. -Vol.39, -№ 9. -P.1621-1626.
132. Kim H., Cho J.-W., Song I., Min K.-B. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea // *Engineering Geology*. -2012. -Vol.147–148. -P.68–77.
133. Kukkonen I., Suppala I., Korpisalo A., Koshkinen T. Drill hole logging device TERO76 for determination of rock thermal properties // *Geological Survey of Finland*. -Posiva : Posiva OY, 2007. -63 p.
134. Lee S., Speight J., Loyalka S. *Handbook of alternative fuel technologies, Second Edition*. -Boca Roca, United States : Taylor & Francis Inc., 2014. -712 p.
135. Lichtenecker K. The thermal conductivity of granular materials // *Physikalische Zc*. -1926. -№ 27. -P.115-118.
136. Litho Scanner High-Definition Spectroscopy Service. Электронный ресурс: [http://www.slb.com/services/characterization/petrophysics/wireline/litho\\_scanner.aspx?t=4&libtab=4](http://www.slb.com/services/characterization/petrophysics/wireline/litho_scanner.aspx?t=4&libtab=4), Доступ. 04.10.2017 // Schlumberger. -2017.
137. Palmer C., Mattson E., Huang H. Models for thermal transport properties of oil shale. 30th Oils Shale Symposium, Golden, Colorado, USA, October 18-22, 2010. V.2. -467 p.
138. Parker W., Jenkins R., Butler C., Abbott G. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity // *Journal of Applied Physics*. -1961. -Vol.32. -P.1679-1685.
139. Petrunin G.I., Popov V.G. Temperature dependence of lattice thermal conductivity of Earth's mineral substance // *Physics Of The Solid Earth*. -1999. -V.30. -№7/8. -P.617-623.
140. Pollack H.N., Huang S., Demezhko D.Y., Shchapov V.A., Duchkov A.D., Golovanova I.V., Smerdon J.E. Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures // *Journal of Geophysical Research*. -2003. -V.108. -№ 4.

141. Popov E., Gabova A., Romushkevich R., Chekhonin E., Savelev E. Bazhenov formation characterization with rock thermal property profiling technique. 79th EAGE Conference and Exhibition, Paris, France, 12-15 June 2017, 2017.
142. Popov E., Popov Y., Romushkevich R., Spasennykh M., Kozlova E. Detailed profiling organic carbon content of oil shales with thermal core logging technique. Sixth EAGE Shale Workshop, Bordeaux, France, 28 April–1 May, 2019.
143. Popov E., Popov Yu., Chekhonin E., Savelev E., Nozdryakova E., Gurbatova I. Acquisition of integrated petrophysical data from thermal core logging and thermal core plug investigation for Usinskoye heavy oil field. Abstract volume of IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly Kobe, Japan, July 30-August 4, 2017.
144. Popov E., Popov Yu., Spasennykh M., Kozlova E., Chekhonin E., Zagranovskaya D., Belenkaya I., Alekseev A. New technique for TOC estimation based on the thermal core logging in low-permeable formations (Bazhen formation). Thermal properties of Bazhen formation sediments from thermal core logging. Proceedings volume of EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-22 April, 2016.
145. Popov E., Romushkevich R., Popov Yu., Chekhonin E., Safonov S., Gerasimov I., Ursegov S., Taraskin E. Continuous thermal core logging for reservoir characterization. Volume of Abstracts of 26th General Assembly, Prague, Czech Republic, June 22-July 02, 2015.
146. Popov E., Trofimov A., Goncharov A., Abaimov C., Chekhonin E., Popov Y., Sevostianov I. Technique of rock thermal conductivity evaluation on core cuttings and nonconsolidated rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. -2018. -Vol.108. -P.15-22.
147. Popov Y., Pimenov V., Pevzner L., Romushkevich R., Popov E. Geothermal characteristics of the Voritilivo deep borehole drilled into the Puchezh-Katunk impact structure // Tectonophysics. -1998. -№ 30. -P. 72-83.
148. Popov Y., Tertychnyi V., Romushkevich R., Korobkov D., Pohl J. Interrelations Between Thermal Conductivity and Other Physical Properties of Rocks: Experimental Data // Pure and Applied Geophysics. -2003. -Vol.160. -P.1137–1161.
149. Popov Yu., Chekhonin E., Popov E., Parshin A., Konoplev Yu., Taraskin E. Experimental investigations of spatial and temporal variations in rock thermal properties as necessary stage in thermal EOR. Society of Petroleum Engineers - SPE Heavy Oil Conference 2013, Calgary, Alberta, Canada, 11-13 June, 2013. SPE 165474-MS. -P.1384-1403.
150. Popov Yu., Chekhonin E., Popov E., Spasennykh M., Ovcharenko Yu., Zhukov V., Martemianov A. Correlations between thermal and sonic anisotropy for low-permeable reservoirs. Proceedings volume of EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-22 April, 2016.

151. Popov Yu., Korostelev V., Popov E. Technology of the optical scanning for measurements of thermal properties of rocks: recent state and application. In Proceedings of the International conference "Heat Flow and the Structure of the Lithosphere", Trest, Czech Republic, 9-15 June, 1996. -P. 95-97.
152. Popov Yu., Parshin A., Al-Hinai S., Miklashevskiy D., Popov E., Dyshlyuk E., Chekhonin E., Safonov S., Khan R. Experimental investigations of reservoir thermal properties for heavy oil field in Oman with new methods and equipment. World Heavy Oil Congress, New Orlean, LA, USA, 5-7 March, 2014. WHOC14 – 258. -14 p.
153. Popov Yu., Parshin A., Chekhonin E., Gorobtsov D., Miklashevskiy D., Korobkov D., Suarez-Rivera R., Green S. Rock heterogeneity from thermal profiles using an optical scanning technique. 46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Chicago, Illinois, USA, 24-27 June, 2012. V.2. -P.1186-1193.
154. Popov Yu., Parshin A., Chekhonin E., Popov E., Miklashevskiy D., Suarez-Rivera R., Green S. Continuous core thermal properties measurements and analysis. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013, 2013. ARMA 13-391. V.4. -P.2991-2999.
155. Popov Yu., Parshin A., Safonov S., Miklashevskiy D., Popov E., Chekhonin E., Bayuk I., Yalaev T. New challenges in applied geothermics related to 4D thermal reservoir modeling and heterogeneous rock analysis. Abstract volume of IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly "Knowledge for the Future", Gothenburg, Sweden, July 22 - 26, 2013.
156. Popov Yu., Pevzner L., Pimenov V., Romushkevich R., Popov E. Geothermic investigations of the Vorotilovo deep borehole section (Puchezhe-Katunk impact structure). In Proceedings of the International conference "Heat Flow and the Structure of the Lithosphere", Trest, Czech Republic, 9-15 June, 1996. -P.93-95.
157. Popov Yu., Pissarenko D., Parshin A., Chekhonin E., Safonov S., Spasennykh M., Popov E., Bayuk I., Miklashevskiy D., Tarelko N. New workflow of reservoir thermal property investigations in application to thermal methods of heavy oil production and basin modeling. 21st World Petroleum Congress, Moscow, Russia, 15-19 June, 2014.
158. Popov Yu., Popov E., Chekhonin E., Gorobtsov D. Thermal petrophysics in application to hydrocarbon reservoir investigations: current state-of-art. IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly, Kobe, Japan, July 30-August 4, 2017.
159. Popov Yu., Popov E., Miklashevskiy D., Korobkov D. New thermal data and challenges of heat flow variations evaluation for basin petroleum exploration. Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 December 2014. IPTC-18095-MS. -11 p.

160. Popov Yu., Romushkevich R., Popov E., Pevzner L., Karasyovaa T. Geothermic parameters of sections of the Ural and Tyumen superdeep boreholes. In Proceedings of the International conference "Heat Flow and the Structure of the Lithosphere", Trest, Czech Republic, June 9-15, 1996. -P. 97-99.
161. Popov Yu. B. G., Clauser C., Roy S. ISRM Suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. - 2016. -Vol.49(10). -P. 4179-4207.
162. Popov Yu.A., Pevzner L.A., Romushkevich R.A., Korostev V.M., Vorobyev M.G. Thermophysical and Geothermal Sections Obtained from Kolvinskaya Well Logging Data // *Physics Of The Solid Earth*. -1994. -Vol.30, -№ 9. Режим доступа: <http://eos.wdcb.ru/transl/izve/9409/pap04.ps>. Доступ 15.05.2019.
163. Prats M., O'Brien S. Thermal conductivity and diffusivity of Green River oil shale // *Journal of Petroleum Technology*. -1975. -№ (Jan). -P. 97-106.
164. Pribnow D., Sass J.H. Determination of thermal conductivity from deep boreholes // *Journal Geophysical Research* -1995. -Vol. 100. -P.9981-9994.
165. Pribnow D., Williams C., Sass J., Keating R. Thermal conductivity of water-saturated rocks from the KTB Pilot Hole at temperatures of 25 to 300°C // *Geophysical Research Letters*. -1996. -Vol. 23(4). -P. 391–394.
166. R. Jorand, C. Vogt, G. Marquart, C.Clauser. Effective thermal conductivity of heterogeneous rocks from laboratory experiments and numerical modeling // *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*. -2013. -Vol. 118. -P.5225–5235.
167. Rajeshwar K., Dubov J., Rosenvold J. Dependence of thermal conductivity on organic content for Green River oil shale // *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. - 1980. -Vol.19 (4). -P.629-632.
168. Romushkevich R., Popov E., Popov Yu., Chekhonin E., Myasnikov A., Kazak A., Belenkaya I., Zagranovskaya D. Thermal properties of West Siberian sediments in application to basin and petroleum systems modeling. Proceedings volume of EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 19-22, 2016.
169. Sass J., Kenneby J., Smith E., Wendt W. Laboratory line-source methods for the measurement of thermal conductivity of rocks near room temperature // *Tech. Report, US Geological Surrey. Menlo Park, California*. -1984. - 21 p.
170. Sass J. H., Stone C., Munroe R. J. Thermal conductivity determinations on solid rock - a comparison between a steady-state dividedbar apparatus and a commercial transient line-source device - // *J. Volcan. Geothermal Resources*. -1984. - V. 20, N 1/2. - P. 145-153.

171. Schön J.H. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics (Second Edition) : Elsevier, 2015. Vol. 65. -512 p.
172. Somerton W.H. Thermal properties and temperature-related behaviour of rock/fluid systems. - Amsterdam : Elsevier, 1992. -257 p.
173. Spasennykh M., Popov E., Chekhonin E., Romushkevich R., Zagranovskaya J., Belenkaya I., Zhukov V., Karpov I., Saveliev E., Gabova A. Thermal properties of Bazhen formation sediments from thermal core logging. Proceedings volume of EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 19-22, 2016.
174. Suarez-Rivera R., Ostroff G., Tan K., Begnaud B., Martin W., Bermudez T. Continuous rock strength measurements on core and neural network modeling result in significant improvements in log-based rock strength predictions used to optimize completion design and improve prediction of sanding potential and wellbore stability. The SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 5-8 October 2003. SPE-84558
175. Teka Company. TK04 Thermal Conductivity Meter. // Berlin. TeKa. -2014. Электронный ресурс: <http://www.te-ka.de/images/teka/download/TK04-ThermalConductivityMeter.pdf>, Доступ. 05.10.2017
176. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics. -1986. -№ 51 (10).
177. Tihen S., Carpenter H., Sohns H. Thermal conductivity and thermal diffusivity of Green River oil shale. -USA : National Bureau of Standards, 1968.
178. Tisot P.R. Alterations in structure and physical properties of Green River oil shale by thermal treatment // Journal of Chemical & Engineering Data. -1967. -Vol.12(3). -P.405-412.
179. Troschke B., Burkhardt H. Thermal conductivity models for two-phase systems // Physics and Chemistry of the Earth. -1998. -Vol. 23 (3). -P.35.
180. Wang Y., Rajeshwar K., Dubow J. Dependence of thermal diffusivity on organic content for Green River oil shales—Extension of the modified Cheng Vachon model to the parallel heat flow case // Journal of Applied Physics. -1980. -Vol.51(3).
181. Wang Y., Rajeshwar K., Dubow J. Dependence of thermal conductivity on organic content for Green River oil shales // Journal of Applied Physics. -1980. -Vol. 50(5). -P.2776-2781.
182. Williams C., Anderson R. Thermophysical properties of the Earth's crust: in-situ measurements from continental and ocean drilling // Journal of Geophysical Research -1990. -№ 95. -P. 9209–9236.
183. Woodside W., Messmer J. Thermal conductivity of porous media. II Consolidated rocks // Journal of Applied Physics. -1961. -№ 32 (9). -P.1688–1699.
184. Yi He. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor // Thermochemica Acta. - 2005. - V.436 (1–2). -P.130–134.